DNIT

Publicação IPR – 709

MANUAL DE INSPEÇÃO DE PONTES

3ª EDIÇÃO
BRASÍLIA
2026

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

TERCEIRA EDIÇÃO – BRASÍLIA, 2026

EQUIPE TÉCNICA:

Eng.º Brunno Emidio Sobrinho – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.ª Caroline Correa de Faria – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Igor José Santos Ribeiro – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.ª Isabela Ames – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º João Francisco Alves Junqueira – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º João Francisco de Carvalho Neto – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Jorge Martins Sarkis – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Matheus Abreu e Souza – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Tecg.° Rafael Petille Hune – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Ruan Cesar Maciel – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Ruan Richelly Santos – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Túlio Nogueira Bittencourt – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – Coordenador da Equipe Técnica da ABECE

Eng.º William Dener Assis Fonseca – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.º Zacarias Martins Chamberlain Pravia – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE

Eng.ª Caroline Buratto de Lima e Oliveira – SREMG/DNIT

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Ana Carolina Pereira Martins – Consórcio Progen/HPT

Eng.º Nataniel Wontoon Barbosa Lima – Consórcio Progen/HPT

Eng.ª Mara Monaliza Linhares Pereira – Consórcio STE/SIMEMP

EQUIPE DE REVISÃO E EDITORAÇÃO:

Eng.ª Caroline Buratto de Lima e Oliveira – SREMG/DNIT

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Mara Monaliza Linhares Pereira – Consórcio STE/SIMEMP

Eng.ª Ana Carolina Pereira Martins – Consórcio Progen/HPT

Eng.º Nataniel Wontoon Barbosa Lima – Consórcio Progen/HPT

Arq. e Urb. Patrícia Cristina Cunha Nunes de Oliveira Fontoura – Consórcio Progen/HPT

Eng.ª Thália Raelly de Lima Romeiro Mattos – Consórcio Progen/HPT

Eng.ª Victória Barbosa Costa Garcia Vieira – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
Instituto de Pesquisas em Transportes.

Manual de Inspeção de Pontes. 3ª Edição – Brasília – DF, 2026.

432 p. (Publicação IPR – 709)

Inspeção de Pontes – Manuais. I. Série. II. Título.

Reprodução permitida desde que citado o DNIT como fonte.

Impresso no Brasil / *Printed in Brazil*

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES – MT
José Renan Vasconcelos Calheiros Filho

DIRETOR-GERAL DO DNIT
Fabrício de Oliveira Galvão

DIRETOR DE PLANEJAMENTO E PESQUISA – DPP
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

COORDENADOR-GERAL DO INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES – IPR
Luiz Heleno Albuquerque Filho

Setor de Autarquias Norte

Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes

CEP 70040-902 – Brasília – DF

Telefone/fax.: (61) 3315-4831

E-mail: ipr@dnit.gov.br

TÍTULO: MANUAL DE INSPEÇÃO DE PONTES

Elaboração: DNIT/IPR

Aprovado pela Diretoria Colegiada do DNIT em 09/06/2026 (Relato n.º 104/2026)

Processo SEI nº 50600.008877/2023-52

Impresso no Brasil / *Printed in Brazil*

Apresentação

A Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes – CGIPT (IPR), unidade vinculada à Diretoria de Planejamento e Pesquisa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, apresenta a 3ª edição do *Manual de Inspeção de Pontes*. Este documento resulta do processo de revisão do *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias* (Publicação IPR – 709), publicado originalmente pelo DNER em 1980, que teve sua 2ª edição lançada em 2004 e agora passa por nova atualização.

Esta nova edição tem como objetivo consolidar e atualizar as diretrizes técnicas aplicáveis à inspeção de pontes, em consonância com a evolução das normas, metodologias e conceitos observados nas últimas décadas. O Manual sistematiza as práticas adotadas pelo DNIT, reforçando o papel fundamental da inspeção na avaliação da condição das estruturas e no suporte técnico à gestão, ao planejamento da manutenção e à priorização de intervenções.

O desenvolvimento dessa edição contou com a colaboração de servidores e técnicos do DNIT, de profissionais da academia e de consultores especializados da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE, no âmbito do Acordo de Cooperação Técnica e Científica nº 658/2022, voltado ao aprimoramento das publicações técnicas nacionais sobre o tema.

Por fim, a comunidade técnica é incentivada a explorar e aplicar as diretrizes aqui apresentadas, bem como a encaminhar sugestões e contribuições para o seu aprimoramento, por meio do endereço eletrônico: ipr@dnit.gov.br.

Luiz Heleno Albuquerque Filho
Coordenador-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR

Lista de símbolos

E	Módulo de elasticidade
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_u	Resistência ao escoamento do aço
f_y	Resistência à ruptura do aço
w_k	Abertura característica de fissura
φ	Coeficiente de impacto

Lista de siglas

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*
AUVs	*Autonomous Underwater Vehicles*
BIM	*Building Information Modeling*
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EC	Estado de Condição
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FHWA	*Federal Highway Administration*
FIB	*Fédération Internationale du Béton*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
IPR	Instituto de Pesquisas em Transportes
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
MIE	Monitoramento da Integridade Estrutural
NT	Nota Técnica
PNMR	Plano Nacional de Manutenção Rodoviária
ROV	*Remotely Operated Vehicle*
SCUBA	*Self-Contained Underwater Breathing Apparatus*
SGE	Sistema de Gerenciamento de Estruturas
SHM	*Structural Health Monitoring*
SI	Sistema Internacional de Unidades

Lista de ilustrações

Figura 2.1 Importância da inspeção visual mostrada em termos de informações obtidas e dos custos....33

Figura 2.2 Fluxograma de ocorrências e inspeções 48

Figura 3.1 Representação dos tipos de fissuras possíveis de ocorrer no concreto 61

Figura 3.2 Esquema da ocorrência de fissuras de flexão e cisalhamento em vigas de concreto 64

Figura 3.3 Esquema da ocorrência de fissuras em lajes armadas em uma única direção: (a) seção longitudinal da laje; (b) vista em planta com indicação das fissuras primárias e secundárias de flexão e das fissuras de retração 65

Figura 3.4 Esquema da ocorrência de fissuras de torção em vigas de concreto 66

Figura 3.5 Esquema da ocorrência de fissuras de retração térmica em vigas de concreto 67

Figura 3.6 Esquema da ocorrência de fissuras típicas de retração em muros de arrimo ..67

Figura 3.7 Esquema da ocorrência de fissuras por perda de aderência e colapso da armadura 68

Figura 3.8 Esquema da ocorrência de fissuras por perda de aderência e colapso da armadura 68

Figura 3.9 Esquema da ocorrência de fissuras por formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais....69

Figura 3.10 Esquema da ocorrência de fissuras de ruptura frágil em apoios extremos mal posicionados....70

Figura 3.11 Esquema da ocorrência de fissuras em dentes de articulação 70

Figura 3.12 Exemplo de fissuras em dentes de articulação....71

Figura 3.13 Esquema da ocorrência de fissuras em pilares isolados e parcialmente carregados:(a) seção longitudinal com fissura devido à deficiência de fretagem; (b) seção transversal com fissuras nos cantos por falta de folga entre extremidades de placas e pilares 71

Figura 3.14 Esquema da ocorrência de fissuras em pilares parede e parcialmente carregados....72

Figura 3.15 Manifestações patológicas decorrentes da corrosão da armadura: (a) perda de cobrimento com exposição das armaduras; (b) destacamento do concreto com armaduras expostas e corrosão avançada 74

Figura 3.16 Exemplos de desagregação no concreto em elementos de pontes: (a) desagregação na base do pilar; (b) desagregação superficial em pilar de concreto 76

Figura 3.17 Exemplos de disgregação no concreto em elementos de pontes: (a) disgregação localizada em pilar de concreto; (b) disgregação do concreto na face inferior do tabuleiro e vigas.....77

Figura 3.18 Esquema representativo do mecanismo de carbonatação 78

Figura 3.19 Representação da ação da carbonatação no concreto ao longo do tempo 79

Figura 3.20 Exemplo de carbonatação no concreto 79

Figura 3.21 Exemplos de desgaste nas superfícies de concreto sujeitas ao tráfego: (a) desgaste acentuado do pavimento; (b) desgaste superficial em placas de concreto ...82

Figura 3.22 Exemplos de desgaste em superfícies de elementos de concreto imersos em água:(a) desgaste superficial em pilar de ponte; (b) desgaste na base de pilar próximo ao nível d'água; (c) perda de argamassa e exposição de agregados em elementos de concreto submetido à ação da água.....82

Figura 3.23 Exemplos de lixiviação em estruturas de concreto: (a) manchas e escorrimentos decorrentes da lixiviação na face inferior de elemento estrutural; (b) depósitos esbranquiçados associados à lixiviação em região de junta ou fissura 83

Figura 3.24 Exemplos de nichos de concretagem nas estruturas de concreto: (a) nichos de concretagem na base de pilar; (b) nichos de concretagem na face inferior de elemento estrutural.....84

Figura 3.25 Exemplo de perda de aderência nos elementos de concreto 85

Figura 3.26 Exemplo de danos por colisões nos elementos.....86

Figura 3.27 Exemplo de infiltrações nos elementos 87

Figura 3.28 Exemplo de danos por efeitos de temperatura no concreto.....88

Figura 3.29 Exemplo de irregularidades geométricas em peças de concreto armado 88

Figura 3.30 Exemplo de manifestações patológicas no concreto devido à ação biológica 89

Figura 3.31 Exemplo de manifestações patológicas na estrutura metálica devido à corrosão 100

Figura 3.32 Exemplo de corrosão uniforme em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com corrosão uniforme; (b) representação esquemática do processo de corrosão uniforme 101

Figura 3.33 Exemplo de corrosão por placas em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com destacamento de placas de corrosão; (b) representação esquemática da corrosão por placas 102

Figura 3.34 Exemplo de corrosão alveolar em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com cavidades decorrentes de corrosão alveolar; (b) representação esquemática do processo de corrosão alveolar 102

Figura 3.35 Exemplo de corrosão puntiforme (pites) em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com ocorrência de pites; (b) representação esquemática da corrosão puntiforme 103

Figura 3.36 Esquema de representação da corrosão intergranular em estruturas metálicas 104

Figura 3.37 Esquema de representação da corrosão intragranular em estruturas metálicas 104

Figura 3.38 Esquema de representação da corrosão filiforme 105

Figura 3.39 Exemplo de corrosão por esfoliação em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com destacamento lamelar causado pela corrosão; (b) representação esquemática do processo de corrosão por esfoliação 105

Figura 3.40 Exemplo de danos por colisão em elementos de pontes metálicos 108

Figura 3.41 Exemplo de danos em ligações parafusadas 109

Figura 3.42 Corrosão por esfoliação em ligações parafusadas 110

Figura 3.43 Desenho esquemático da distribuição de pontes de madeira no Brasil 111

Figura 3.44 Agentes de deterioração da madeira 118

Figura 3.45 Apodrecimento da madeira causado por fungos: (a) alteração de coloração; (b) degradação das fibras da madeira; (c) deterioração avançada com desagregação do material 118

Figura 3.46 Infestações de insetos 120

Figura 3.47 Abrasão mecânica 121

Figura 3.48 Topo de pilares danificados pela luz ultravioleta 122

Figura 3.49 Manchas na madeira por corrosão 123

Figura 3.50 Seção transversal de madeira submetida ao fogo 126

Figura 4.1 Danos no pavimento rodoviário devido à degradação da junta longitudinal: (a) vista superior do pavimento asfáltico com falhas alinhadas à junta longitudinal; (b) vista inferior da estrutura evidenciando a junta longitudinal com processo de degradação avançado 128

Figura 4.2 Danos no pavimento rodoviário devido à ruína da laje: (a) vista superior evidenciando buraco na pista; (b) vista inferior da estrutura mostrando a ruína da laje 128

Figura 4.3 Trincas no pavimento junto à junta de dilatação: (a) fissuração inicial alinhada à junta de dilatação; (b) trinca mais desenvolvida no pavimento associada à movimentação da junta 129

Figura 4.4 Esquema das manifestações patológicas frequentes nas proximidades da ponte 130

Figura 4.5 Manifestações patológicas no pavimento na região do encontro das pontes: (a) danos ao pavimento associados à instabilidade do talude e (b) fissuração do pavimento associada à laje de transição 130

Figura 4.6 Falhas e defeitos no pavimento rodoviário: (a) deterioração localizada do revestimento asfáltico; (b) degradação do pavimento com perda de material 131

Figura 4.7 Estrado com lastro 133

Figura 4.8 Estrado sem lastro 134

Figura 4.9 Estrado com fixação direta 135

Figura 4.10 Desnivelamento da via: (a) longitudinal e (b) transversal 137

Figura 4.11 (a) fratura no trilho e (b) defeito superficial no trilho 138

Figura 4.12 Via com contratrilho sobre ponte 139

Figura 4.13 Falha em junta provocando a fuga de lastro 139

Figura 4.14 Retenção de umidade decorrente de lastro contaminado 141

Figura 4.15 Dormente deteriorado 142

Figura 4.16 Dormente totalmente consumido pelo fogo 143

Figura 4.17 Condição extrema de dormentes e fixações quebradas por descarrilhamento 144

Figura 4.18 Defeitos de fixação e rotação do dormente 145

Figura 4.19 Entalhamento de dormente de madeira 145

Figura 4.20 Fixação adequada entre dormentes 146

Figura 4.21 Rachadura nos dormentes de madeira 146

Figura 4.22 Deterioração da camada de transição entre a junta da ponte e o pavimento: (a) deterioração localizada com perda de material; (b) degradação progressiva da camada de transição 148

Figura 4.23 Recobrimento da junta de dilatação com material betuminoso: (a) fissuração do pavimento alinhada à junta recoberta; (b) degradação do recobrimento betuminoso com abertura de trinca no pavimento 149

Figura 4.24 Condições observadas em juntas de dilatação: (a) acúmulo de detritos no interior da junta; (b) deterioração do sistema de junta 150

Figura 4.25 Desaperto das fixações da junta de dilatação: (a) abertura na região da junta devido à falha de fixação; (b) sobre-elevação do elemento da junta decorrente do desaperto das ancoragens 151

Figura 4.26 Ausência de junta de dilatação em ponte: (a) abertura na interface entre o pavimento e a estrutura; (b) descontinuidade longitudinal evidenciando a ausência de sistema de junta de dilatação 151

Figura 4.27 Infiltração nos elementos devido à ausência ou ineficiência de junta de dilatação: (a) marcas de escorrimento e infiltração na região da junta; (b) percolação de água atingindo o encontro da ponte 152

Figura 4.28 Selantes elastoméricos deteriorados em juntas de dilatação: (a) deterioração do selante com perda de material; (b) falha do selante evidenciando abertura na região da junta 153

Figura 4.29 Aparelho de apoio não paralelo ao eixo do pilar 155

Figura 4.30 Aparelho de apoio inexistente 156

Figura 4.31 Aparelho de apoio com movimentação impedida por depósito de detritos: (a) acúmulo de detritos na região do aparelho de apoio; (b) obstrução do deslocamento do aparelho de apoio devido ao depósito de materiais 157

Figura 4.32 Aparelho de apoio de Neoprene com elevada compressão 157

Figura 4.33 Aparelho de apoio rolo metálico com corrosão 159

Figura 4.34 Aparelho de apoio do tipo pêndulo com concreto desagregado e armadura exposta 160

Figura 4.35 Aparelho de apoio com distorção 160

Figura 4.36 Aparelho de apoio deslocado da posição 161

Figura 4.37 Aparelho de apoio com rasgos no elastômero 162

Figura 4.38 Acúmulo de detritos na base de assentamento do aparelho de apoio: (a) presença de detritos na região de apoio; (b) depósito de materiais e deterioração na base de assentamento 163

Figura 4.39 Exemplo de falhas no sistema de drenagem 164

Figura 4.40 Exemplo de falhas no sistema de drenagem 164

Figura 4.41 Exemplo de concreto desagregado na barreira New Jersey 166

Figura 4.42 Exemplo de guarda-corpo metálico danificado e ancoragem inadequada da defensa metálica 166

Figura 5.1 Principais elementos estruturais de uma ponte: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura 167

Figura 5.2 Principais elementos de uma ponte rodoviária: (a) vista lateral de uma ponte; (b) seção transversal do tabuleiro 169

Figura 5.3 Superestrutura – Ponte em laje: (a) de concreto; (b) de concreto protendido 171

Figura 5.4 Superestrutura – Ponte em viga-caixão em: (a) concreto; (b) aço 171

Figura 5.5 Superestrutura – Ponte em viga em: (a) concreto; (b) aço 171

Figura 5.6 Superestrutura – Ponte em viga. Treliça em: (a) aço; (b) madeira 172

Figura 5.7 Superestrutura – Pontes em arco: (a), (b) em aço; (c), (d) de concreto; (e), (f) madeira 173

Figura 5.8 Superestrutura – Ponte: (a) pênsil; (b) estaiada 175

Figura 5.9 Distribuição dos esforços: (a) tensões básicas; (b) solicitações secundárias. 175

Figura 5.10 Distribuição dos esforços em diferentes sistemas de pontes 176

Figura 5.11 Seção transversal da viga T de concreto armado 178

Figura 5.12 Viga I ou T de concreto armado (estrutural) 178

Figura 5.13 Representação esquemática das armaduras de uma viga principal de concreto armado 179

Figura 5.14 Tipos de pontes em arco: (a) ponte em arco com tabuleiro superior ligado ao arco; (b) ponte em arco com tabuleiro superior desligado ao arco; (c) ponte em arco com tabuleiro inferior; (d) ponte em arco com tabuleiro intermediário 181

Figura 5.15 Seção longitudinal de estrutura contínua construída com balanços sucessivos 183

Figura 5.16 Viga-caixão de dois vãos: (a) seção longitudinal; (b) seção transversal 183

Figura 5.17 Seções transversais de tabuleiros de pontes com diferentes sistemas estruturais: (a) duas vigas principais; (b) vigas múltiplas 185

Figura 5.18 Seções transversais de vigas em concreto protendido: (a) viga tipo I; (b) viga tipo T 186

Figura 5.19 Seção transversal de vigas pré-moldadas e laje estrutural moldada sobre pré-lajes 186

Figura 5.20 Seção transversal de laje estrutural moldada entre vigas 186

Figura 5.21 Esquemas de lajes em pontes: (a) laje isostática – seção longitudinal; (b) laje contínua – seção longitudinal; (c) seção transversal da laje 187

Figura 5.22 Seção transversal de elemento laje: (a) laje alveolar; (b) seção caixão 188

Figura 5.23 Seção transversal de laje alveolar de elementos pré-moldados 189

Figura 5.24 Seção transversal de laje alveolar moldada no local 189

Figura 5.25 Seção transversal de elementos justapostos 190

Figura 5.26 Seção transversal de elementos separados 190
Figura 5.27 Tipos de estruturas de vigas treliçadas metálicas 192
Figura 5.28 Representação gráfica dos elementos constituintes de uma treliça 194
Figura 5.29 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro inferior e contraventamento superior (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal do sistema estrutural 194
Figura 5.30 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro inferior e sem contraventamento superior: (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal 195
Figura 5.31 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro superior: (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal 195
Figura 5.32 Esquema de treliça do tipo Pratt 196
Figura 5.33 Esquema de treliça do tipo Howe 196
Figura 5.34 Esquema de treliça do tipo Warren 196
Figura 5.35 Esquema de treliça do tipo K 196
Figura 5.36 Tabuleiro metálico tipo grelha plana 197
Figura 5.37 Seção transversal de vigas mistas múltiplas de perfis laminados 198
Figura 5.38 Exemplo de vigas mistas múltiplas de perfis laminados 198
Figura 5.39 Seção transversal de vigas mistas múltiplas de chapas soldadas 199
Figura 5.40 Exemplo de vigas mistas múltiplas de chapas soldadas 199
Figura 5.41 Seção transversal de viga-caixão com caixão único 200
Figura 5.42 Seção transversal de viga-caixão com caixão duplo 201
Figura 5.43 Exemplo de seção transversal em caixão metálico – Ponte Rio-Niterói 201
Figura 5.44 Desenho esquemático de uma estrutura especial estaiada 202
Figura 5.45 Ponte Anita Garibaldi, BR101 – SC 203
Figura 5.46 Desenho esquemático das configurações de pontes estaiadas: (a) em harpa; (b) em leque; (c) em semileque 204
Figura 5.47 Desenho esquemático de uma estrutura especial de ponte pênsil 205
Figura 5.48 Ponte Pênsil Hercílio Luz – Florianópolis, SC 205
Figura 5.49 Esquema representativo de juntas definidas por fôrmas: (a) junta aberta, sem proteção; (b) junta aberta, com cantoneiras de proteção 215
Figura 5.50 Esquema representativo de juntas em chapas dentadas 215
Figura 5.51 Esquema representativo de juntas elastoméricas em compressão 216
Figura 5.52 Desenho esquemático da seção transversal da junta tipo "JEENE" 217

Figura 5.53 Desenho esquemático do detalhe de pontes com extremo em balanço.....218

Figura 5.54 Desenho esquemático do processo de execução: (a) detalhe do alojamento (b) juntas do tipo "JEENE" 218

Figura 5.55 Detalhes de junta de dilatação monobloco em elastômero e aço: (a) seção transversal da junta no tabuleiro; (b) componentes e esquema de montagem do sistema de junta 219

Figura 5.56 Detalhes de juntas em placas de aço deslizantes 220

Figura 5.57 Detalhes de juntas em elastoméricas modulares 221

Figura 5.58 Detalhe da vista longitudinal da articulação de chumbo 227

Figura 5.59 Articulação Freyssinet: (a) corte transversal; (b) vista longitudinal 228

Figura 5.60 Detalhe do corte transversal e vista longitudinal da articulação Mesnager ..228

Figura 5.61 Detalhe da articulação de contato de superfície 229

Figura 5.62 Detalhe das articulações de contato: (a) esquema geométrico da articulação; (b) detalhe dimensional da superfície de contato 230

Figura 5.63 Detalhe da articulação do tipo Blindada (ou Burkhardt).....230

Figura 5.64 Esquema de articulação sem rolo metálico: (a) funcionamento da articulação em seção; (b) vista em planta do sistema.....231

Figura 5.65 Detalhe de articulações com rolo metálico: (a) vista longitudinal do sistema; (b) vista transversal da articulação 231

Figura 5.66 Detalhe de articulação submetida a cargas verticais reversíveis: (a) vista longitudinal do sistema; (b) vista transversal da articulação 232

Figura 5.67 Detalhe de aparelhos de apoio de deslizamento 233

Figura 5.68 Detalhes de aparelhos de apoio de rolo único.....234

Figura 5.69 Detalhes de aparelhos de apoio de rolo múltiplos 234

Figura 5.70 Detalhes para aparelhos de apoio pendulares de concreto.....235

Figura 5.71 Aparelho de apoio pendular de aço: (a) vista frontal do sistema; (b) esquema de funcionamento com deslocamento e rotação 236

Figura 5.72 Comportamento dos aparelhos de apoio de elastômero fretado para diversas solicitações: (a) comportamento ao cisalhamento; (b) comportamento à compressão; (c) comportamento à rotação.....238

Figura 5.73 Detalhe de aparelho de apoio de Neoprene contido.....239

Figura 5.74 Esquema de pilares isolados ou apenas contraventados.....240

Figura 5.75 Esquema de pilares isolados com viga-travessa 241

Figura 5.76 Esquema de pilar único com viga-travessa 241

Figura 5.77 Esquema de pilar parede, maciço ou celular 242

Figura 5.78 Desenho esquemático dos cortes de pontes com falso encontro ou encontro leve:(a) corte longitudinal; (b) corte transversal 243

Figura 5.79 Desenho esquemático dos cortes de pontes com encontro especial: (a) corte longitudinal; (b) corte transversal 244

Figura 5.80 Desenho esquemático dos cortes de pontes com extremo em balanço: (a) corte longitudinal; (b) detalhe da ala 245

Figura 5.81 Corte longitudinal esquemático de encontros em aterros estabilizados 246

Figura 5.82 Corte longitudinal em encontros vazados 247

Figura 5.83 Corte transversal em ponte com encontros vazados 247

Figura 5.84 Vista frontal: (a) corte longitudinal; (b) encontros de contenção sem tabuleiro 248

Figura 5.85 Corte longitudinal de encontros fechados com tabuleiro completo 248

Figura 6.1 Exemplos de equipamentos e ferramentas de limpeza 252

Figura 6.2 Exemplos de equipamentos e ferramentas de investigação 252

Figura 6.3 Exemplos de equipamentos de visibilidade 253

Figura 6.4 Instrumentos de medição: (a) trena a laser; (b) fissurômetro; (c) nível, fio de prumo, trena e paquímetro digital 253

Figura 6.5 Câmeras utilizadas para registro fotográfico: (a) câmera digital; (b) câmera estabilizadora portátil 254

Figura 6.6 Utilização de escada para acesso 256

Figura 6.7 Utilização de plataformas apoiadas para acesso 257

Figura 6.8 Plataforma elevatória utilizada para acesso e inspeção em pontes: (a) plataforma elevatória articulada; (b) utilização da plataforma para inspeção da estrutura da ponte .258

Figura 6.9 Outros tipos de plataformas elevatórias: (a) sobre esteiras; (b) tipo tesoura ..258

Figura 6.10 Utilização de balsas em inspeções 259

Figura 6.11 Veículo Munck rodoferroviário utilizado em inspeções de pontes: (a) posicionamento do veículo sobre a estrutura; (b) acesso à parte inferior do tabuleiro por meio do cesto de inspeção. 260

Figura 6.12 Exemplo de viga-caixão com abertura/porta de inspeção 261

Figura 6.13 Viabilização de acesso à viga caixão da Ponte sobre o Rio Piquiri BR-272/PR 262

Figura 6.14 Drenos internos em vigas caixão 265

Figura 7.1 Esquema de rios de meandros 271

Figura 7.2 Esquema representativo de rios trançados....272
Figura 7.3 Esquema representativo de rios retos 272
Figura 7.4 Esquema de desalinhamento do canal....275
Figura 7.5 Formação de balseiro sob a Ponte sobre o Rio Iaco (BR-364/AC): (a) vista superior do acúmulo de material; (b) vista em ângulo do balseiro junto ao vão da estrutura 285
Figura 7.6 Formação de balseiro no bloco de ponte em construção: (a) erosão de contração; (b) erosão localizada....288
Figura 7.7 Localização da ponte sobre o Rio Autaz Mirim....294
Figura 7.8 (a) Ruptura do talude da margem direita e (b) situação do apoio 5 antes do colapso. 294
Figura 7.9 Desvio do fluxo da água no entorno do escombro....295
Figura 7.10 Vestígios de antigos meandros e impacto na margem próxima à ponte sobre o Rio Tarauacá....296
Figura 7.11 Cabeceira da Ponte sobre o Rio Tarauacá 297
Figura 8.1 Medição de velocidade de ondas ultrassônicas....300
Figura 8.2 Medidor de resistividade, método de Wenner....301
Figura 8.3 Detecção de falhas no concreto por meio do uso do GPR 302
Figura 8.4 Equipamento para realização do ensaio de eco-impacto 304
Figura 8.5 Execução do ensaio de pacometria: (a) posicionamento do sensor; (b) leitura do cobrimento das armaduras em elemento de concreto 306
Figura 8.6 Ensaio de esclerometria 307
Figura 8.7 Ensaio de potencial de corrosão: (a) aparelho de medição; (b) eletrodo negativo na superfície do concreto; (c) eletrodo positivo do equipamento fixado em uma barra da armadura 309
Figura 8.8 Ensaio de carbonatação 311
Figura 8.9 Extração de testemunhos de concreto: (a) operação da extratora; (b) vista frontal após a extração dos testemunhos 312
Figura 8.10 Detecção de falhas no aço por emissões acústicas 315
Figura 8.11 Detecção de falhas no aço por meio de líquido penetrante 317
Figura 8.12 Detecção de falhas no aço através de partículas magnéticas: (a) aplicação do ensaio na superfície metálica; (b) indicação de descontinuidade revelada pelas partículas magnéticas 318
Figura 8.13 Detecção de falhas no aço por meio de radiografia....319

Figura 8.14 Detecção de falhas no aço por meio de ultrassom 321

Figura 8.15 Equipamentos para detecção de falhas em elementos de aço por correntes parasitas: (a) equipamento portátil; (b) instrumento analógico 322

Figura 8.16 Equipamento para realização do ensaio de impacto Charpy.....330

Figura 8.17 Amostra usada no ensaio de tração 331

Figura 8.18 Radar interferométrico 333

Figura 8.19 Representação esquemática do processo de fotogrametria.....336

Figura 8.20 Levantamento fotográfico com drone 337

Figura 8.21 Detecção de falhas no aço por meio inspeções robóticas: (a) veículo de superfície não tripulado; (b) veículo subaquático autônomo.....338

Figura 8.22 Veículo empregado em ensaio de prova de carga dinâmica 340

Figura 8.23 Fluxograma de abordagem para identificação de danos a partir da extração contínua de coeficientes autorregressivos a partir de séries temporais de deformação..342

Figura 8.24 Fluxograma de metodologia de detecção de danos por drive-by para pontes ferroviárias.....343

Figura 9.1 Limpeza Nível II.....352

Figura 9.2 Limpeza em estrutura com auxílio de mergulho 352

Figura 9.3 Detalhes de inspeção rotineira de Nível III 355

Figura 9.4 Deterioração de estruturas de aço.....362

Figura 9.5 Equipamentos típicos para mergulho dependente: (a) painel de controle e monitoramento do mergulho; (b) capacete e sistema de fornecimento de ar para mergulho dependente; (c) conjunto de controle e distribuição de ar comprimido 366

Figura 9.6 Extração de testemunho em estrutura de concreto submersa: (a) operação de extração realizada por mergulhador; (b) testemunhos de concreto obtidos após a perfuração 368

Figura 9.7 Inspeção de ponte utilizando ROV: (a) veículo subaquático utilizado na inspeção; (b) ROV em operação; (c) imagem capturada pelo ROV mostrando elemento estrutural submerso.....369

Figura AP 1 Seção transversal das pontes projetadas até 1950 (medidas em centímetros) 375

Figura AP 2 Detalhe 1 da seção transversal para pontes projetadas até 1950 (medidas em centímetros).....375

Figura AP 3 Esquema com as dimensões do trem-tipo até 1950 (medidas em centímetros) 376

Figura AP 4 Esquema para a formação do trem-tipo até 1950 376

Figura AP 5 Seção transversal das pontes projetadas de 1950 a 1960 (medidas em centímetros) 377

Figura AP 6 Detalhe 1 da seção transversal para pontes projetadas de 1950 a 1960 (medidas em centímetros) 378

Figura AP 7 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1950 a 1960 para compressor de 24 tf 379

Figura AP 8 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1950 a 1960 para compressor de 12 tf 379

Figura AP 9 Esquema para a formação do trem-tipo de pontes projetadas de 1950 a 1960 380

Figura AP 10 Seção transversal das pontes projetadas de 1960 a 1975 (dimensões em centímetros) 381

Figura AP 11 Detalhe 2 da seção transversal para pontes projetadas de 1960 a 1975 (dimensões em centímetros) 381

Figura AP 12 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1960 a 1975 para o compressor de 36 tf 382

Figura AP 13 Esquema para formação de trem-tipo de 1960 a 1975 382

Figura AP 14 Seção transversal das pontes projetadas de 1975 a 1985 (dimensões em centímetros) 383

Figura AP 15 Detalhe 3 da seção transversal para pontes projetadas de 1975 a 1985 (dimensões em centímetros) 384

Figura AP 16 Esquema para formação de trem-tipo de 1975 a 1985 384

Figura AP 17 Seção transversal das pontes projetadas de 1985 a 2013 (medidas em centímetros) 386

Figura AP 18 Detalhe 3 da seção transversal para pontes projetadas de 1985 a 2013 (medidas em centímetros) 386

Figura AP 19 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1985 a 2013 para o compressor de 45 tf 387

Figura AP 20 Cargas dos trens-tipo e características geométricas conforme a ABNT 390

Figura AP 21 Cargas dos trens-tipo e características geométricas conforme a ABNT NBR 7189:1985 391

Figura AP 22 Modelo de carga LM71 394

Figura AP 23 Modelos de carga SW/0 e SW/2 394

Figura AP 24 Modelo de carga Cooper E80 395

Figura AP 25 Distribuição de cargas utilizada pela ENGEFER 396

Lista de quadros

Quadro 2.1 Instrução para atribuição das notas de avaliação 32
Quadro 2.2 Comparação entre os tipos de inspeção de pontes 40
Quadro 2.3 Escopo técnico das inspeções de pontes 42
Quadro 3.1 Abertura de fissuras de acordo com a classe de agressividade 59
Quadro 3.2 Classificação de fissuras intrínsecas (continua) 62
Quadro 7.1 Condições indicativas de inspeção especializada (contínua) 293
Quadro 8.1 Instrumentos adicionais e aplicações técnicas para ARPs 337
Quadro AP 1 Características gerais das pontes projetadas até 1950 374
Quadro AP 2 Características gerais das pontes projetadas de 1950 a 1960 377
Quadro AP 3 Características gerais das pontes projetadas de 1960 a 1975 380
Quadro AP 4 Características gerais das pontes projetadas de 1975 a 1985 383
Quadro AP 5 Características gerais das pontes projetadas de 1985 a 2013 385
Quadro AP 6 Características gerais das pontes projetadas de 2013 até o presente 388
Quadro AP 7 Resumo das características gerais das pontes rodoviárias projetadas em diferentes períodos 388
Quadro AP 8 Trens-tipo conforme a ABNT NB7:1943 389
Quadro AP 9 Trens-tipo conforme a ABNT NBR 7189:1985 391
Quadro AP 10 Trens-tipo conforme a atualização da ABNT NBR 7189 392
Quadro AP 11 Características dos modelos de carga SW/0 e SW/2 394
Quadro AN 1 Detalhes críticos de fadiga em elementos de aço 397

Sumário

1 INTRODUÇÃO 25

2 CONCEITOS E TIPOLOGIAS DE INSPEÇÕES 27

2.1 O que é inspeção? 27

2.2 Tipos de inspeção 28

2.2.1 Inspeção cadastral 29

2.2.2 Inspeção rotineira 31

2.2.3 Inspeção especial 34

2.2.4 Inspeção extraordinária 35

2.2.5 Inspeção intermediária 38

2.2.6 Comparativo dos tipos de inspeção 39

2.3 Escopo das inspeções 41

2.3.1 Descrição dos componentes do escopo 43

2.3.2 Aplicação contratual 44

2.4 Avaliação da condição e classificação da ponte 45

2.4.1 Nota Técnica (NT) – Avaliação estrutural do elemento 45

2.4.2 Estado de Condição (EC) 46

2.4.3 Integração com o Sistema de Gerenciamento de Estruturas (SGE) 46

2.5 Fluxograma: inspeções e ocorrências 47

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS 50

3.1 Concreto 50

3.1.1 Propriedades físicas 52

3.1.2 Propriedades mecânicas 53

3.1.3 Tipos de concreto estruturais 55

3.1.4 Causas e mecanismos de deterioração das estruturas de concreto 57

3.2 Aço 91

3.2.1 Tipos de aços estruturais 92

3.2.2 Propriedades do aço 95

3.2.3 Causas e mecanismos de deterioração 99

3.3 Madeira 110

3.3.1 Distribuição das pontes de madeira no Brasil 111

3.3.2 Características e desempenho do material 112

3.3.3 Durabilidade e prevenção da deterioração 112

3.3.4 Considerações para inspeção 113

3.3.5 Propriedades físicas 113
3.3.6 Propriedades mecânicas 116
3.3.7 Causas e mecanismos de deterioração 117
4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS COMPLEMENTARES 127
4.1 Pavimento rodoviário 127
4.1.1 Geral 127
4.1.2 Trincas devido à junta de dilatação 128
4.1.3 Região de transição ponte-aterro 129
4.1.4 Falhas localizadas no pavimento 131
4.2 Pavimento ferroviário 132
4.2.1 Geral 132
4.2.2 Manifestações patológicas em pavimentos ferroviários (anomalias) 136
4.3 Juntas de dilatação 147
4.3.1 Transição para o pavimento 148
4.3.2 Falhas por geometria, movimentação e fixação 149
4.3.3 Ausência de juntas 151
4.3.4 Impermeabilidade e drenagem 152
4.3.5 Deterioração dos selantes 153
4.4 Aparelhos de apoio 154
4.4.1 Falhas construtivas, de instalação e funcionamento 155
4.4.2 Falhas nos materiais 158
4.4.3 Falhas na base de assentamento 162
4.5 Sistema de drenagem 163
4.6 Dispositivos de segurança 165
5 CONCEITOS BÁSICOS DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE PONTES 167
5.1 Superestrutura 169
5.1.1 Estrutura principal de concreto 176
5.1.2 Estrutura principal de concreto protendido 184
5.1.3 Estrutura principal metálica 191
5.1.4 Estrutura principal especial 202
5.1.5 Estrutura secundária 205
5.2 Mesoestrutura 225
5.2.1 Aparelhos de apoio 225
5.2.2 Pilares 239
5.2.3 Encontros 242
5.3 Infraestrutura 249

5.3.1 Fundações diretas 249
5.3.2 Fundações profundas 249
6 EQUIPAMENTOS E ACESSOS PARA INSPEÇÃO 251
6.1 Equipamentos e ferramentas utilizados nas inspeções 251
6.1.1 Equipamentos e ferramentas comuns (uso geral) 251
6.1.2 Equipamentos especiais 255
6.2 Acessos para as inspeções 255
6.2.1 Equipamentos comuns de acesso 256
6.2.2 Plataformas elevatórias 257
6.2.3 Barcos e balsas 259
6.2.4 Veículos especiais 260
6.2.5 Acesso para inspeção em vigas-caixão 261
7 INSPEÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CURSOS D'ÁGUA 267
7.1 Propriedades que afetam os cursos d'água 268
7.2 Tipos de cursos d'água 270
7.2.1 Rios de meandros (ou meandrantes) 270
7.2.2 Rios trançados (ou entrelaçados) 271
7.2.3 Rios retos (ou retilíneos) 272
7.2.4 Rios de montanhas (ou de alta declividade) 272
7.3 Alterações nos cursos d'água: instabilidade e colapsos de pontes 273
7.3.1 Erosão das margens e migração lateral 273
7.3.2 Desalinhamento do canal em relação à ponte 274
7.3.3 Seção de vazão 275
7.3.4 Erosão do fundo do rio 276
7.4 Solapamento de elementos estruturais 276
7.5 Danos causados por embarcações e balseiros 277
7.5.1 Introdução à inspeção de pontes em cursos d'água navegáveis 277
7.5.2 Caracterização da navegação sob pontes 278
7.5.3 Mecanismos de ação e danos das embarcações na ponte 281
7.5.4 Danos em sistemas de proteção 283
7.5.5 Definição de balseiro e contexto hidrológico 285
7.5.6 Mecanismos de ação de balseiros sobre a ponte 286
7.6 Procedimentos de inspeção 289
7.6.1 Aspectos complementares na inspeção de cursos d'água 290
7.7 Situações indicativas de inspeção especializada 293
7.8 casos práticos 294

8 TÉCNICAS AVANÇADAS DE INSPEÇÃO 298
8.1 Concreto 300
8.1.1 Ensaios não destrutivos 300
Definição e equipamento 300
8.1.2 Ensaios semidestrutivos 309
8.1.3 Ensaios destrutivos 311
8.2 Aço 314
8.2.1 Ensaios não destrutivos 314
8.2.2 Ensaios semidestrutivos 326
8.2.3 Ensaios destrutivos 329
8.3 Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM) 332
8.4 Técnicas de inspeção remota 333
8.4.1 Vibrômetro a laser 334
8.4.2 LiDAR (*Light Detection and Ranging*) 334
8.4.3 Fotogrametria 335
8.4.4 Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARPs 336
8.4.5 Inspeção robótica 338
8.5 Provas de carga 339
8.6 Métodos de identificação de danos baseados em dados 340
8.6.1 Modelos de séries temporais 341
8.6.2 Metodologia de monitoramento indireto *drive-by* 343
9 INSPEÇÕES SUBMERSAS 345
9.1 Critério de Seleção de Pontes 346
9.2 Métodos de Inspeção Submersa 347
9.2.1 Inspeções em águas rasas 348
9.2.2 Mergulho autônomo (SCUBA) 348
9.2.3 Mergulho dependente (suprimento de ar da superfície) 349
9.2.4 Inspeção com veículos subaquáticos 350
9.3 Níveis de Intensidade das Inspeções Submersas 350
9.3.1 Inspeção de Nível I 351
9.3.2 Inspeção de Nível II 351
9.3.3 Inspeção de Nível III 353
9.4 Tipos de Inspeção 353
9.4.1 Inspeção inicial 354
9.4.2 Inspeção rotineira 354
9.4.3 Inspeção extraordinária (excepcional) 355

9.4.4 Inspeção detalhada 356
9.4.5 Inspeção intermediária 356
9.5 Planejamento de inspeções submersas 357
9.6 Elementos e unidades das infraestruturas 358
9.6.1 Apoios 359
9.6.2 Pilares 359
9.6.3 Encontros 359
9.6.4 Sistemas de proteção 359
9.7 Investigações de erosões 360
9.7.1 Equipamentos de medição 360
9.7.2 Atividades mínimas das inspeções submersas 361
9.8 Avaliação de anomalias 361
9.8.1 Estruturas de concreto e alvenaria 361
9.8.2 Estruturas de aço 362
9.8.3 Recuperações e reforços existentes 363
9.8.4 Registro das inspeções submersas 364
9.9 Equipamentos de Inspeção Submersa 365
9.9.1 Equipamentos de mergulho 365
9.9.2 Comunicação com a superfície 366
9.9.3 Equipamentos de acesso 366
9.9.4 Ferramentas 367
9.9.5 Equipamentos de testes não-destrutivos 367
9.9.6 Equipamentos de extração de testemunhos 368
9.9.7 Equipamentos de fotografia e vídeo 368
9.9.8 Veículos subaquáticos e acessórios 369
9.9.9 Extensão das anomalias 370
9.10 Considerações especiais sobre inspeções submersas 370
9.10.1 Correntezas 370
9.10.2 Matérias flutuantes e detritos 371
9.10.3 Limpeza 371
APÊNDICE A: EVOLUÇÃO DAS PONTES DA MALHA FEDERAL 372
ANEXO A: DETALHES CRÍTICOS DE FADIGA EM ELEMENTOS DE AÇO 397
GLOSSÁRIO 403
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 418

1 INTRODUÇÃO

As pontes são elementos estratégicos da infraestrutura de transportes, visto que viabilizam a transposição de obstáculos naturais e artificiais e, desse modo, garantem a continuidade física e operacional da malha viária. Em comparação aos demais componentes das vias de transporte, essas estruturas apresentam custos de implantação mais altos, possuem maior complexidade construtiva e são projetadas para uma vida útil de longo prazo. Essas particularidades tornam indispensável o acompanhamento sistemático da condição estrutural, funcional e operacional das pontes ao longo do tempo.

Neste Manual, o termo *ponte* é empregado em sentido amplo, abrangendo todas as estruturas implantadas para transpor cursos d'água, vales, outras vias e demais interferências, a exemplo de viadutos, pontilhões e passagens superiores e inferiores. Embora apresentem diferenças geométricas e funcionais, essas estruturas compartilham características estruturais semelhantes, estão sujeitas a processos comuns de deterioração e exigem critérios e rotinas de inspeção similares, o que justifica sua abordagem conjunta.

Esta edição estabelece diretrizes técnicas e procedimentos para a realização das inspeções de pontes sob responsabilidade do DNIT. O documento contempla os diferentes tipos de inspeção adotados pela autarquia, abrange estruturas construídas com diferentes materiais e tipologias e considera níveis variados de avaliação, desde inspeções predominantemente visuais até avaliações especiais e avançadas. O público-alvo deste Manual compreende os inspetores, técnicos e gestores envolvidos nas atividades de inspeção, avaliação e gerenciamento dessas estruturas.

O Manual inicia-se com a apresentação dos conceitos, tipologias, objetivos, escopos e critérios de aplicação das inspeções (Capítulo 2). Em seguida, são abordados os principais materiais empregados em pontes e suas manifestações patológicas, tanto nos elementos estruturais (Capítulo 3) quanto nos elementos complementares, que influenciam a funcionalidade e a durabilidade das pontes (Capítulo 4).

Na sequência, apresentam-se os conceitos básicos dos sistemas estruturais de pontes, com ênfase no papel dos diferentes elementos inspecionados (Capítulo 5), bem como os equipamentos, ferramentas e meios de acesso utilizados nas inspeções, considerando as condições práticas de execução em campo (Capítulo 6).

O Manual trata ainda da interação das pontes com o meio ambiente, em especial no que se refere aos cursos d'água e aos processos capazes de comprometer a estabilidade das estruturas (Capítulo 7). São também apresentadas técnicas avançadas de inspeção e avaliação (Capítulo 8), incluindo ensaios, instrumentação e métodos especiais, além de diretrizes para a realização de inspeções submersas (Capítulo 9).

Como complemento às diretrizes, o Manual inclui o Apêndice A: Evolução das Pontes da Malha Federal que apresenta um panorama da evolução das pontes da malha federal brasileira, destacando as alterações construtivas, tipológicas e operacionais verificadas ao longo do tempo. Esse contexto contribui para a compreensão do estado atual das estruturas e reforça a importância da inspeção sistemática como instrumento essencial à gestão, à conservação e à tomada de decisão ao longo do ciclo de vida das pontes.

O Anexo A: Detalhes Críticos de Fadiga em Elementos de Aço reúne informações sobre detalhes estruturais associados à fadiga em elementos de aço, subsidiando a identificação de condições potencialmente relacionadas à ruptura frágil e apoiando a avaliação técnica em inspeções especiais e extraordinárias.

2 CONCEITOS E TIPOLOGIAS DE INSPEÇÕES

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais relacionados às inspeções de pontes e o papel do processo de inspeção no contexto do gerenciamento.

A subseção 2.1 define o conceito de inspeção, destacando sua relevância no suporte às decisões de manutenção e intervenção. A subseção 2.2, por sua vez, descreve os tipos de inspeção adotados pelo DNIT, suas finalidades e níveis de detalhamento.

A subseção 2.3 detalha o escopo técnico das inspeções, indicando as atividades previstas em cada modalidade e aquelas passíveis de contratação sob demanda. A subseção 2.4 trata da avaliação da condição da ponte e dos critérios de classificação, incluindo a Nota Técnica (NT), o Estado de Condição (EC) e sua integração ao Sistema de Gerenciamento de Estruturas (SGE). Por fim, a subseção 2.5 consolida essas etapas em um fluxograma, ilustrando o encadeamento das inspeções ao longo do ciclo de vida da estrutura e suas interfaces com as atividades de planejamento e eventuais intervenções.

2.1 O QUE É INSPEÇÃO?

A inspeção de uma ponte é o processo sistemático de observação, levantamento e registro da condição da estrutura, com o objetivo de identificar anomalias, deteriorações ou quaisquer alterações que possam comprometer sua segurança, funcionalidade, durabilidade ou desempenho estrutural. Trata-se de uma atividade essencial no ciclo de conservação das pontes, pois somente a partir do conhecimento e do registro do estado real da estrutura é possível acompanhar sua evolução ao longo do tempo, estabelecer diagnósticos e prognósticos e, a partir deles, definir as intervenções necessárias.

O procedimento envolve a identificação e a documentação técnica das ocorrências observadas, mediante descrições, medições, registros fotográficos e demais evidências, assegurando rastreabilidade e consistência no processo de levantamento.

Os registros de inspeção devem priorizar critérios objetivos e mensuráveis, incluindo medições em unidades do Sistema Internacional (SI), mapeamento das anomalias, registros fotográficos padronizados e identificação precisa da localização dos danos. Essas práticas contribuem para a rastreabilidade das informações, a comparabilidade entre inspeções sucessivas e a redução da subjetividade na avaliação da evolução das manifestações patológicas.

O principal produto resultante da inspeção é a classificação da estrutura quanto à sua condição estrutural, funcional e de durabilidade. Isso é feito a partir da atribuição e do processamento de indicadores numéricos e qualitativos padronizados, que permitem expressar o estado de conservação da ponte e acompanhar a evolução deste ao longo do tempo. Para que esse processo seja efetivo, é essencial que as informações produzidas durante a inspeção sejam confiáveis, representativas da condição real da estrutura e compatíveis com o escopo do levantamento executado, o que reforça a responsabilidade técnica do inspetor como agente central na produção de dados que sustentam decisões de engenharia e de gestão da infraestrutura.

Os dados coletados nas inspeções constituem a base técnica para subsidiar a avaliação do estado das estruturas e orientar a tomada de decisão quanto à definição de prioridades de intervenção, à programação de obras e à alocação de recursos.

⚠ ATENÇÃO!

Inspeção e avaliação são etapas complementares, porém, distintas. Enquanto a inspeção é predominantemente descritiva, voltada ao levantamento e ao registro das condições observadas em campo, a avaliação corresponde à etapa de interpretação e análise crítica dos dados disponíveis, na qual se realiza o julgamento técnico quanto ao desempenho, à segurança e à durabilidade da estrutura. Além disso, a avaliação não se limita aos achados de uma inspeção em particular, pois leva em conta o histórico e informações pretéritas da ponte, a exemplo de projetos de concepção, manutenção, reforço ou reabilitação e relatórios de inspeções anteriores. Em conjunto, esses elementos permitirão uma análise consistente da evolução dos danos e das necessidades de intervenção.

2.2 TIPOS DE INSPEÇÃO

Os tipos de inspeções variam conforme a finalidade, o nível de detalhamento requerido, o grau de risco a que a estrutura está sujeita, as metodologias empregadas e a frequência de realização. A norma DNIT 010 – PRO estabelece os procedimentos, itens de verificação e formas de registro de observações para cada tipo de inspeção. Neste capítulo do Manual, cada modalidade é apresentada de forma conceitual e técnica, como referência complementar à norma.

O DNIT adota cinco tipos principais de inspeções:

- inspeção cadastral;
- inspeção rotineira;
- inspeção especial;
- inspeção extraordinária e;
- inspeção intermediária.

Independentemente do tipo de inspeção, os registros devem ser realizados de forma padronizada, preferencialmente por meio dos formulários adotados para a inspeção rotineira.

2.2.1 Inspeção cadastral

A inspeção cadastral é a primeira inspeção a ser realizada em uma estrutura e constitui o marco inicial da gestão desse ativo. Seu objetivo é identificar, caracterizar e registrar as principais informações técnicas, geométricas, estruturais e funcionais da ponte, além de servir como referência para todas as inspeções e avaliações subsequentes. A inspeção cadastral deve ser realizada:

- Após a conclusão da obra, sua instalação ou incorporação a um sistema viário.
- Quando houver alterações relevantes na configuração da estrutura, tais como reforços, alargamentos, inclusão, substituição ou modificação de elementos estruturais; ou mudanças no sistema estrutural. Nessas situações, deve-se também realizar o procedimento da inspeção rotineira para atribuir ou atualizar a nota técnica e os estados de condição da ponte.

O relatório da inspeção cadastral deve conter, no mínimo, as seguintes informações:

- **Identificação da ponte:** denominação, código da estrutura, localização, unidade da federação, rodovia ou via de inserção, data da inspeção.
- **Dados cadastrais:** finalidade, ano de construção, classe ou capacidade de carga, natureza da transposição, sistema estrutural, tráfego, extensão, dimensões dos vãos, dimensão de todos os elementos, número de vias, gabaritos, materiais utilizados, regime do curso d'água (indicar se é perene), condições de drenagem, iluminação e sinalização, proteções de margem e presença de área de preservação, existência de desvios e sua respectiva extensão, entre outros.
- **Esquema estrutural:** croquis longitudinais e transversais com identificação dos elementos.
- **Classificação da ponte:** enquadramento conforme parâmetros estruturais e funcionais adotados pelo DNIT e pelas normas técnicas aplicáveis.
- **Documentação fotográfica:** registro fotográfico completo da obra, contemplando vistas superiores, inferiores e laterais, bem como o entorno imediato, de forma a permitir o reconhecimento global da estrutura e de seus elementos, com resolução adequada e georreferenciamento.

É necessário também registrar eventuais deficiências funcionais, especialmente em pontes antigas, projetadas segundo normas ou parâmetros atualmente superados. Essas deficiências podem limitar a capacidade de tráfego, comprometer a segurança viária ou afetar a durabilidade da estrutura. Entre os exemplos mais recorrentes, pode-se citar:

- largura insuficiente das pistas de rolamento;
- gabaritos verticais reduzidos na transposição de interferências;
- inexistência de acostamentos;
- estreitamento da largura da plataforma em relação ao restante da rodovia após obras de ampliação da capacidade ou duplicação;
- restrições na capacidade de carga;
- ausência de barreiras de concreto;
- inexistência de pingadeiras;
- guarda-corpos inadequados;
- necessidade de implementação de passeios.

2.2.2 Inspeção rotineira

A inspeção rotineira é uma atividade de natureza preventiva e programada, realizada com maior frequência e em intervalos mais curtos que os demais tipos de inspeção. Sua principal finalidade é o monitoramento sistemático e regular da condição da ponte. Por meio da identificação de anomalias em desenvolvimento e de alterações na condição dos elementos estruturais e funcionais, essa inspeção permite atualizar os indicadores de avaliação da estrutura.

A norma DNIT 010 – PRO estabelece a avaliação da condição estrutural das pontes por meio da atribuição da denominada Nota Técnica (NT), aplicada aos elementos estruturais durante as inspeções. A NT assume valores inteiros de 1 a 5, sendo a nota 5 associada à melhor condição e a nota 1 à pior condição do elemento avaliado. Esse indicador reflete a gravidade dos problemas identificados e constitui o principal parâmetro direto de avaliação da condição estrutural da obra no âmbito das inspeções programadas realizadas segundo a sistemática do DNIT. O Quadro 2.1 apresenta a correlação entre as notas atribuídas e a categoria dos problemas detectados.

Para assegurar maior uniformidade na atribuição da Nota Técnica, a avaliação da gravidade das anomalias deve seguir critérios padronizados. Esses critérios devem considerar, além das características do dano observado, a importância daquele elemento no comportamento global da estrutura, isto é, sua relevância estrutural.

Este Manual indica, como referência auxiliar para a atribuição da Nota Técnica prevista na norma DNIT 010 – PRO, os critérios de avaliação estrutural baseados na classificação dos elementos estruturais segundo a sua relevância no sistema da ponte, conforme estabelecido na **ABNT NBR 9452** ou norma que venha a substituí-la.

Além da atribuição da Nota Técnica, a inspeção rotineira contempla o registro detalhado dos danos observados em cada elemento, com a identificação do tipo de manifestação patológica, sua localização, extensão e severidade, por meio do Estado de Condição (EC). Esses registros são fundamentais para a construção do histórico evolutivo da estrutura e para a alimentação dos sistemas de gestão.

Os dados coletados na inspeção rotineira — incluindo as Notas Técnicas atribuídas e os Estados de Condição dos danos — constituem a principal base de informações para o SGE, permitindo o acompanhamento da condição da estrutura ao longo do tempo e o suporte às análises de desempenho estrutural, funcional e de durabilidade realizadas em nível de gestão.

Quadro 2.1 Instrução para atribuição das notas de avaliação

Nota	Danos no elemento/ Insuficiência estrutural	Ação corretiva	Condições de estabilidade	Classificação das condições dos elementos
5	Não há danos ou os danos são irrelevantes ou isolados, não indicando insuficiência estrutural.	Nada a fazer	Excelente	Estrutura sem problemas.
4	Há danos de baixa gravidade, localizados e em pequenas áreas, sem sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural.	Nada a fazer, apenas serviços de manutenção.	Boa	Estrutura sem problemas importantes.
3	Há danos que podem vir a gerar alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da estrutura.	A recuperação da estrutura pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática.	Regular	Estrutura potencialmente problemática: recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas por meio de inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na estrutura, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da estrutura deve ser feita a curto prazo.	Ruim	Estrutura problemática: postergar demais a recuperação pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. A intensificação da avaliação da sua condição por meio das inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na estrutura; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) – ou em alguns casos substituição da estrutura – deve ser feita sem tardar.	Crítica	Estrutura crítica: em alguns casos pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da estrutura ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição da carga na estrutura, interdição total ou parcial do tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações etc. As inspeções devem ser intensificadas até que a intervenção definitiva seja realizada.

O procedimento de inspeção rotineira é predominantemente visual, o que o torna mais ágil e reduz os custos envolvidos. O uso de equipamentos especiais fica restrito às situações em que sejam indispensáveis para a adequada avaliação de determinados elementos. Inspeções visuais bem conduzidas são capazes de levantar um volume significativo de informações relevantes sobre a condição da estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.1. Segundo a *Fédération Internationale du Béton* (CEB – FIB, 2002), inspeções visuais podem fornecer aproximadamente 80 % das informações necessárias para avaliar a condição da estrutura.

Figura 2.1 Importância da inspeção visual mostrada em termos de informações obtidas e dos custos

Fonte: Adaptado de CEB – FIB (2002)

Os registros da inspeção rotineira devem ser realizados em formulários próprios e, preferencialmente, em campos específicos nos sistemas de gestão de pontes, a exemplo do Formulário apresentado na norma DNIT 010 – PRO.

O relatório da inspeção rotineira deve conter, no mínimo, as seguintes informações:

- **Dados básicos:** data da inspeção, equipe responsável e observações.
- **Avaliação dos elementos estruturais e funcionais:** atribuição das notas técnicas aos elementos inspecionados, conforme critérios padronizados.
- **Danos aos elementos:** identificação, quantificação e localização dos danos em cada elemento da estrutura, além da atribuição do estado de condição.
- **Insuficiências estruturais:** identificação de possíveis insuficiências estruturais, elemento afetado e causa provável.
- **Laudo especializado:** caso a estrutura apresente Nota Técnica menor ou igual a 2 é exigido que o inspetor registre um laudo especializado.
- **Registros fotográficos:** documentação fotográfica georreferenciada, com vistas gerais da ponte, do entorno e de todas as anomalias e achados relevantes, contendo a identificação do elemento e localização associada a cada imagem.
- **Croquis:** croquis com a identificação, localização e extensão dos danos reportados na inspeção.

2.2.3 Inspeção especial

A inspeção especial é um procedimento programado, realizado em intervalos superiores aos da inspeção rotineira. É de natureza mais pormenorizada e possui um maior nível de precisão na identificação e quantificação das anomalias, quando comparada aos demais tipos de inspeção. Sua principal característica é a obrigatoriedade da inspeção de todos os elementos da ponte, independentemente de sua localização, acessibilidade ou complexidade construtiva.

Em razão dessa característica, a Nota Técnica e os estados de condição da ponte podem ser revisados e atualizados a partir de uma inspeção especial. Para tanto, convém que os resultados da inspeção sejam registrados nos mesmos formulários padronizados utilizados nas inspeções rotineiras, para assegurar a padronização, a comparabilidade histórica e a integração das informações aos sistemas de gestão.

O objetivo da inspeção especial é diagnosticar as causas das anomalias e definir as intervenções de engenharia necessárias para restituir ou ampliar os níveis de segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade da ponte. Para isso, são necessários dados detalhados sobre todos os seus elementos, incluindo superestrutura, mesoestrutura, infraestrutura, regiões internas, fundações e partes submersas ou enterradas.

O escopo da inspeção especial deve ser definido, em função do tipo da estrutura, da natureza das anomalias identificadas e dos objetivos específicos da avaliação. Além do levantamento completo dos elementos e do registro detalhado dos danos, a inspeção especial pode incorporar, quando necessário, análises e estudos complementares voltados à compreensão das causas dos problemas e à definição das intervenções mais adequadas. Esses aprofundamentos podem abranger, entre outros, avaliações de materiais, análises estáticas ou dinâmicas, inspeções submersas, modelagem em ambiente BIM e estudos técnicos específicos relacionados ao comportamento estrutural e ao meio físico no qual a ponte está inserida. Essa flexibilidade permite adequar o nível de investigação às particularidades de cada estrutura, garantindo eficiência técnica e foco nos aspectos críticos da ponte.

O relatório da inspeção especial deve conter, no mínimo:

- identificação e dados cadastrais completos da obra;
- consolidação atualizada dos itens da inspeção rotineira;
- análise comparativa em relação à inspeção anterior, quando houver;
- mapeamento e quantificação das anomalias por elemento estrutural;
- descrição e resultados dos ensaios realizados;
- interpretação técnica dos resultados;
- recomendações de reparo, reforço ou outras intervenções.

O planejamento da inspeção especial deve prever os meios de acesso e investigação necessários, o que pode incluir o uso equipamentos especiais, ensaios destrutivos e não destrutivos e inspeção subaquática, por exemplo. Técnicas não invasivas, como drones, inspeção subaquática com veículos operados remotamente (ROVs), medições por imagem e radar interferométrico, podem ser empregadas para aumentar a segurança e a eficiência do processo.

Sempre que possível, recomenda-se a utilização de modelo tridimensional em BIM (*Building Information Modeling*) para identificação, numeração dos elementos, mapeamento das anomalias e registro das regiões críticas, garantindo consistência e rastreabilidade das avaliações.

2.2.4 Inspeção extraordinária

A inspeção extraordinária é um procedimento não programado, destinado a avaliar de forma rápida e direcionada a condição de uma ponte após a ocorrência de eventos excepcionais ou danos súbitos, tais como acidentes, impactos de veículos, incêndios, enchentes, erosões, sismos ou outras ações adversas de origem natural ou antrópica.

A equipe responsável por essa inspeção deve possuir capacidade técnica e experiência compatíveis para avaliar a gravidade dos danos observados e notificar imediatamente o gestor sobre condições que possam exigir medidas emergenciais, como restrições de carga, interdição parcial ou total do tráfego, implantação de desvios operacionais ou outras ações destinadas a preservar a segurança dos usuários e restabelecer a operação da via.

A realização de uma inspeção extraordinária não caracteriza, por si só, uma situação de emergência. A caracterização de emergência decorre da identificação de achados críticos que indiquem risco iminente à segurança dos usuários ou à estabilidade da estrutura, e não apenas da natureza do evento que motivou a inspeção.

A inspeção extraordinária pode utilizar os mesmos formulários e critérios de registro da inspeção rotineira, caso o escopo do levantamento permita a avaliação consistente dos elementos afetados. A atualização da Nota Técnica e dos estados de condição somente é admitida quando o nível de inspeção realizado for tecnicamente suficiente, devendo eventuais limitações ser registradas de forma explícita no relatório.

Em função da natureza e da complexidade do evento, a inspeção extraordinária pode ser complementada por uma inspeção especial e por estudos técnicos adicionais – como análises estruturais, investigações hidrodinâmicas, geológicas ou geotécnicas – com o objetivo de obter um diagnóstico aprofundado da condição da estrutura e definir as intervenções de engenharia necessárias.

Achados críticos indicativos de situação de emergência

Em consonância com as diretrizes da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e do *Federal Highway Administration* (FHWA), adota-se neste Manual um conjunto de achados críticos que, quando identificados em qualquer tipo de inspeção, devem ser tratados como indicativos de condição emergencial, exigindo comunicação imediata ao gestor da estrutura e avaliação quanto à necessidade de intervenção emergencial.

Constituem achados críticos, entre outros:

- Perda de seção ou disgregações profundas com armaduras expostas, com risco de perfuração do tabuleiro ou perigo direto ao tráfego.
- Vigas pré-moldadas com ruptura de fios de protensão ou deterioração severa em regiões críticas de alta solicitação de tração.
- Vigas-caixão adjacentes não compostas com perda significativa de protensão, alterações anormais de flecha ou fissuração torsional relevante.
- Longarinas, travessas ou capitéis com rompimento ou deterioração simultânea de múltiplas barras principais em uma mesma seção.
- Trincas por fadiga em membros não redundantes ou críticos à fratura.
- Perda severa de seção em membros principais, com comprometimento da capacidade resistente.
- Falhas em ligações estruturais (soldas, parafusos ou chumbadores) com potencial de levar à instabilidade local ou global.
- Placas do tabuleiro com perda total de material ou risco iminente de ruptura.

- Membros estruturais principais com danos significativos por colisão, apodrecimento ou múltiplas fissuras abertas em regiões de elevada tensão.
- Pilares, encontros ou estacas com perda de capacidade de suporte, decorrente de esmagamento, deterioração avançada, corrosão severa ou ataque biológico.
- Escorregamentos, recalques ou erosões severas que comprometam a estabilidade da fundação.
- Socavamento crítico em pilares ou encontros, com risco iminente de colapso.

A identificação de um ou mais desses achados não implica, por si só, na interdição automática da estrutura. Cabe ao inspetor, com base em avaliação técnica fundamentada, recomendar as medidas imediatas cabíveis, que podem incluir restrições de uso, monitoramento, escoramentos provisórios, intervenções emergenciais ou a realização de inspeção especial, cabendo ao gestor a decisão quanto à adoção dessas providências.

Conteúdo mínimo do relatório de inspeção extraordinária

É recomendado que o relatório da inspeção extraordinária contenha, no mínimo, as seguintes informações:

- **Identificação da ponte:** nome, localização e data da inspeção.
- **Motivo da inspeção:** descrição detalhada do evento ou da condição que ensejou a realização da inspeção não programada.
- **Atividades realizadas:** informações técnicas completas e pormenorizadas sobre os procedimentos executados durante a inspeção.
- **Registros fotográficos:** documentação fotográfica georreferenciada, com vistas gerais da ponte, do entorno e de todas as anomalias e achados relevantes, internos ou externos à estrutura, contendo a data de registro, a identificação do elemento e localização associada a cada imagem.
- **Recomendações operacionais ou emergenciais:** indicação das medidas recomendadas, quando aplicáveis, incluindo restrições de uso, monitoramento, intervenções emergenciais ou outras ações necessárias.
- **Registros complementares:** depoimentos de testemunhas ou informações relevantes coletadas no local, ou o devido registro da inexistência dessas informações.
- **Laudo técnico conclusivo:** documento final contendo a fundamentação técnica suficiente para subsidiar a tomada de decisão e, quando pertinente, justificar a necessidade de realização de inspeção especial posterior, destacando os aspectos críticos a serem esclarecidos ou solucionados.

2.2.5 Inspeção intermediária

A inspeção intermediária é uma inspeção sob demanda, destinada ao monitoramento de situações específicas previamente identificadas nas inspeções rotineiras, extraordinárias ou especiais. Seu objetivo é acompanhar a evolução de danos, anomalias ou condições estruturais particulares entre os ciclos de inspeções programadas.

O nível de abrangência dessa inspeção é variável, podendo situar-se desde uma vistoria pontual – voltada exclusivamente à observação de um dano localizado ou elemento específico – até um procedimento com abrangência semelhante à de uma inspeção rotineira, conforme o escopo definido pela gestão. Nos casos de menor complexidade, a inspeção intermediária pode limitar-se, por exemplo, à verificação visual de um único elemento, como o acompanhamento de recalques em fundações, processos erosivos junto aos encontros, fissuras em apoios ou deformações na superestrutura ou outros fenômenos específicos previamente identificados.

A inspeção intermediária pode resultar na atualização da Nota Técnica e dos estados de condição da ponte, sempre que o levantamento realizado for tecnicamente suficiente para caracterizar a condição dos elementos estruturais avaliados e se utilizar os mesmos formulários, critérios de registro e metodologia básica da inspeção rotineira. A eventual atualização da nota deve ser explicitamente justificada no relatório, com a descrição do escopo efetivamente inspecionado e das eventuais limitações existentes.

Quando o escopo for restrito ao monitoramento pontual, os registros devem refletir essa limitação, podendo subsidiar decisões de gestão, indicar a necessidade de intensificação do monitoramento, adoção de medidas operacionais ou realização de inspeção especial, sem prejuízo da rastreabilidade técnica.

O relatório da inspeção intermediária deve conter, no mínimo:

- **Identificação da ponte e do trecho inspecionado:** caracterização geral e localização do segmento avaliado;
- **Motivo da inspeção e histórico da condição monitorada:** contextualização da demanda e registro da evolução da condição ao longo do tempo;
- **Metodologia e recursos empregados:** descrição dos procedimentos adotados, incluindo ensaios realizados e instrumentos utilizados;
- **Registros técnicos:** apresentação da documentação fotográfica e das medições comparativas, quando aplicável;
- **Conclusão técnica e recomendações:** síntese dos achados e definição das medidas a serem adotadas.

A frequência e o escopo das inspeções intermediárias devem ser definidos com base na criticidade da ponte, no grau de risco associado ao dano e na estratégia de gestão adotada, tornando essa modalidade uma ferramenta essencial de gestão preventiva.

2.2.6 Comparativo dos tipos de inspeção

Com o objetivo de sintetizar as principais características, diferenças conceituais e limites de aplicação dos tipos de inspeção adotados pelo DNIT, apresenta-se o Quadro 2.2, que estabelece uma comparação sistematizada entre a inspeção cadastral, rotineira, especial, extraordinária e intermediária.

Quadro 2.2 Comparação entre os tipos de inspeção de pontes

Tipo de inspeção	Finalidade principal	Caráter	Abrangência dos elementos	Metodologia predominante	Atribui nota/ altera condição?	Periodicidade	Observações
Cadastral	Identificar, caracterizar e registrar a obra como ativo de infraestrutura.	Programada – inicial ou após alterações relevantes.	Todos os elementos, com foco cadastral e funcional.	Visual detalhada, levantamento geométrico e documental.	Não (exceto quando acompanhada de rotineira).	Pontual (inicial ou após modificação relevante).	Marco inicial da gestão; gera base de dados completa e referência histórica.
Rotineira	Monitorar sistematicamente a condição da estrutura.	Programada e periódica.	Elementos acessíveis, conforme viabilidade operacional.	Predominantemente visual.	Sim	Regular e frequente	Base do sistema de avaliação; gera histórico evolutivo da condição.
Especial	Diagnosticar causas das anomalias e definir intervenções.	Programada ou sob demanda técnica.	Todos os elementos, sem exceção.	Visual detalhada, ensaios destrutivos e não destrutivos, instrumentação.	Sim	Intervalos maiores ou sob demanda técnica.	Principal diferença: inspeção integral, inclusive fundações, regiões internas e submersas.
Extraordinária	Avaliar rapidamente os efeitos de eventos excepcionais.	Não programada – eventos adversos.	Parcial, focada nos elementos afetados, podendo ser ampliada.	Visual direcionada e expedita.	Sim	Eventual	Não caracteriza emergência por si só; pode identificar achados críticos e subsidiar decisões imediatas.
Intermediária	Monitorar deficiências específicas entre ciclos.	Sob demanda	Variável – de pontual a similar à rotineira.	Visual dirigida e/ou medições específicas.	Opcional	Conforme criticidade	Inspeção complementar; não substitui a rotineira, mas pode atualizá-la.

2.3 ESCOPO DAS INSPEÇÕES

Esta subseção define o escopo técnico das inspeções em pontes rodoviárias e ferroviárias, em função do tipo de inspeção, de sua finalidade e de seu nível de detalhamento, conforme sintetizado no (Quadro 2.3). O objetivo é estabelecer uma referência clara, padronizada e operacional, capaz de orientar a elaboração de Termos de Referência, contratos e produtos técnicos, assegurando uniformidade, suficiência técnica e comparabilidade dos resultados no âmbito do DNIT.

O Quadro 2.3 apresenta os componentes típicos de cada tipo de inspeção, incluindo atividades de cadastro, avaliação de elementos, avaliação de danos, ensaios, análises e prognósticos, indicando quais atividades integram o escopo mínimo recomendado e quais podem ser incorporadas sob demanda técnica.

Para fins deste Manual, adotam-se as seguintes definições:

- **Escopo típico e recomendado:** atividades que normalmente integram o tipo de inspeção correspondente e que deve compor o contrato como requisito padrão.
- **Escopo possível (sob demanda):** atividades complementares, que podem ser incluídas conforme a finalidade específica da contratação, a complexidade da ponte, o nível de risco identificado ou por demanda técnica do gestor.

Essa gradação permite ajustar o nível de aprofundamento técnico às características da estrutura, garantindo proporcionalidade, eficiência de custos e adequação ao risco estrutural, sem comprometer a confiabilidade do processo de gestão.

Quadro 2.3 Escopo técnico das inspeções de pontes

Tipo de inspeção	Escopo da inspeção									
	Cadastro	Avaliação dos Elementos (1 a 5)	Avaliação dos Danos (EC)	Modelo BIM	Análise estrutural	Análise dinâmica	Inspeção Subaquática	Avaliação Materiais	Análise de Viabilidade Estrutural	Prognóstico
Cadastral	☑			⚠						
Rotineira	☑	☑	☑	⚠						
Especial	☑	☑	☑	☑	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	☑
Intermediária	⚠	⚠	⚠				⚠			
Extraordinária		⚠	⚠		⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	☑

Legenda:
☑ Escopo Típico e Recomendado
⚠ Escopo possível, sob demanda

2.3.1 Descrição dos componentes do escopo

- **Cadastro:** registro e atualização dos dados físicos, estruturais, funcionais e administrativos da ponte, incluindo identificação, tipologia, dimensões, materiais, localização georreferenciada e demais informações cadastrais. Constitui atividade obrigatória na inspeção cadastral, podendo ser atualizada em inspeções rotineiras, especiais ou após intervenções significativas.

- **Avaliação dos elementos:** atribuição de notas técnicas (1 a 5) aos elementos estruturais, com base em critérios de desempenho e segurança estrutural. Constitui o núcleo da inspeção rotineira e integra também as inspeções especiais, intermediárias e extraordinárias, sempre que o escopo da inspeção permitir a avaliação tecnicamente consistente.

- **Avaliação dos danos (Estado de Condição):** identificação, caracterização e classificação das anomalias quanto à severidade (1 a 4), à extensão e ao grau de comprometimento, compondo o índice de durabilidade da ponte. É atividade obrigatória nas inspeções rotineira e especial podendo integrar inspeções intermediárias e extraordinárias quando houver levantamento sistemático dos danos.

- **Modelo BIM (inspeção):** representação digital tridimensional da estrutura, com vinculação das anomalias, notas de condição e demais informações técnicas aos elementos modelados. O uso do modelo é recomendado para inspeções cadastrais, rotineiras e especiais, conforme diretrizes BIM do DNIT.

- **Análise estrutural:** elaboração de modelos computacionais para análise do comportamento estrutural e verificação da capacidade resistente. Recomendada nas inspeções especiais e extraordinárias, quando se busca avaliar a integridade estrutural, a redistribuição de esforços ou a adequação às cargas atuantes.

- **Análise dinâmica:** técnica avançada para avaliação do comportamento vibratório da estrutura, permitindo identificar variações de rigidez, alterações nos modos de vibração e potenciais manifestações patológicas não visíveis por inspeção visual. É usualmente associada às inspeções especiais e pode ser adotada, sob demanda, em inspeções extraordinária e especiais, especialmente em estruturas de grande porte ou quando há suspeita de perda de desempenho estrutural.

- **Inspeção subaquática:** procedimento complementar aplicável a pontes com elementos estruturais submersos ou em contato direto com o leito de cursos d'água, utilizando técnicas como mergulho, sonar e veículos operados remotamente (ROVs). Pode integrar inspeções especiais ou extraordinárias. Quando seus resultados forem tecnicamente suficientes e integrados aos formulários padronizados, poderá fundamentar a atualização da Nota Técnica e dos estados de condição, devendo eventuais limitações ser registradas no relatório.

- **Avaliação dos materiais:** execução de ensaios *in situ* e laboratoriais para caracterização de propriedades físicas e químicas dos materiais (resistência, carbonatação, teor de cloretos, corrosão, reações expansivas, entre outros). Integra o escopo típico das inspeções especiais, podendo ser adotada sob demanda em extraordinárias. Em pontes estaiadas e estruturas metálicas, deve incluir a inspeção de cabos, ancoragens, ligações e soldas.

- **Análise de viabilidade estrutural:** comparação entre capacidade resistente da estrutura e as solicitações decorrentes de composições veiculares de carga reais ou especiais, com objetivo de avaliar a capacidade estrutural residual e eventuais restrições de uso. Pode integrar inspeções especiais e, quando aplicável, extraordinárias.

- **Prognóstico:** síntese técnica dos resultados obtidos, contendo recomendações de manutenção, recuperação e reforço/reabilitação, acompanhadas de estimativa de vida útil remanescente e ordem de grandeza dos custos das intervenções.

2.3.2 Aplicação contratual

O quadro de escopos e as descrições técnicas apresentadas nos itens anteriores podem orientar a definição de escopo nos Termos de Referência, Editais e Planilhas Orçamentárias, de modo a assegurar que:

- Cada contratação reflita claramente o tipo de inspeção pretendido (cadastral, rotineira, especial, extraordinária ou intermediária) e o nível de aprofundamento técnico requerido, em consonância com os objetivos da gestão do ativo.
- As atividades classificadas como "escopo possível (sob demanda)" sejam previstas em itens específicos, com critérios objetivos de acionamento e justificativa técnica formal, evitando ambiguidades quanto à sua execução, medição e o seu pagamento.

- O escopo contratado seja compatível com a complexidade, criticidade e nível de risco da ponte, permitindo ajustes proporcionais ao porte da obra e às condições observadas em inspeções anteriores.
- Os produtos e entregáveis estejam alinhados às diretrizes de integração com o SGE, garantindo a padronização dos registros, a rastreabilidade das informações e a compatibilidade com os módulos de avaliação, priorização e planejamento do sistema.
- Sejam explicitamente observadas as normas técnicas e instruções vigentes do DNIT, as normas da ABNT e demais referências aplicáveis, assegurando uniformidade metodológica, consistência técnica e confiabilidade dos resultados.

Sempre que pertinente, os documentos contratuais devem definir explicitamente os limites de escopo de cada tipo de inspeção e estabelecer critérios objetivos para eventual ampliação do escopo, mediante solicitação da fiscalização ou do gestor, evitando sobreposição indevida de atividades e conflitos de interpretação.

2.4 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA PONTE

A avaliação da condição das pontes por meio de escalas discretas de classificação constitui prática consolidada no país. A Nota Técnica (NT) expressa a condição estrutural de cada elemento inspecionado, enquanto o Estado de Condição (EC) registra, de forma sistematizada, as manifestações patológicas observadas. Os dados obtidos nas inspeções subsidiam o Sistema de Gerenciamento de Estruturas (SGE), responsável pela consolidação e processamento dessas informações para geração de indicadores de desempenho estrutural, funcional e de durabilidade das obras.

2.4.1 Nota Técnica (NT) – Avaliação estrutural do elemento

A norma DNIT 010 – PRO estabelece a avaliação da condição estrutural das pontes por meio da atribuição da denominada Nota Técnica (NT), aplicada aos elementos estruturais durante as inspeções. A NT assume valores inteiros de 1 a 5, sendo a nota 5 associada à melhor condição e a nota 1 à pior condição do elemento avaliado. Esse indicador reflete a gravidade dos problemas identificados e constitui o principal parâmetro direto de avaliação da condição estrutural da ponte no âmbito das inspeções programadas realizadas segundo a sistemática do DNIT.

A revisão da ABNT NBR 9452 publicada em dezembro de 2023 introduziu a nota 0, destinada a caracterizar situações de condição emergencial, nas quais a estrutura apresenta risco iminente à segurança dos usuários e/ou à estabilidade global. Essa classificação aplica-se a casos de colapso, de evolução para instabilidade de elementos estruturais principais, de ausência de condições funcionais de utilização da obra ou de elevado grau de deterioração, com grave insuficiência estrutural e/ou funcional, demandando a adoção de medidas emergenciais.

No âmbito do DNIT, a escala de avaliação adotada nas inspeções programadas permanece limitada às notas de 1 a 5. As situações que, à luz da ABNT NBR 9452, se enquadram como condição emergencial devem ser tratadas como eventos excepcionais, exigindo comunicação imediata ao gestor da estrutura e a adoção de procedimentos distintos dos regulares, tais como restrição de carga, interdição parcial ou total do tráfego e a realização de inspeção extraordinária. O tratamento dessas situações é detalhado na subseção 2.2.4 – Inspeção extraordinária, que apresenta exemplos típicos e orientações específicas para esses casos.

Os critérios para atribuição da Nota Técnica, bem como os procedimentos operacionais para sua aplicação em campo, são detalhados na subseção 2.2.2 – Inspeção rotineira.

2.4.2 Estado de Condição (EC)

Complementarmente à Nota Técnica, o DNIT adota o registro do Estado de Condição (EC) dos danos (norma DNIT 010 – PRO), parâmetro que considera, de forma sistematizada, a severidade e a extensão das manifestações patológicas observadas nos elementos inspecionados. Esses registros, associados às informações cadastrais da ponte permitem construir o histórico evolutivo das anomalias e subsidiar análises de desempenho e priorização de intervenções.

2.4.3 Integração com o Sistema de Gerenciamento de Estruturas (SGE)

As informações produzidas nas inspeções – em especial a Nota Técnica atribuída pelo inspetor por elemento e os Estados de Condição registrados para cada dano – alimentam o SGE. A partir desses dados, o sistema realiza o processamento e a consolidação das informações, gerando indicadores globais de desempenho estrutural, funcional e de durabilidade da ponte.

Nesse modelo, a Nota Técnica estrutural é atribuída pelo inspetor em campo, enquanto os indicadores consolidados de desempenho estrutural, funcional e de durabilidade são calculados automaticamente pelo sistema, a partir das informações registradas nas inspeções.

2.5 FLUXOGRAMA: INSPEÇÕES E OCORRÊNCIAS

A Figura 2.2 apresenta, de forma esquemática, o fluxo típico de realização das inspeções no processo de gestão das pontes sob responsabilidade do DNIT. O fluxograma ilustra a articulação entre os diferentes tipos de inspeção e mostra como as ocorrências operacionais, estruturais e ambientais podem alterar a sequência originalmente prevista, em função das condições observadas na estrutura ou de eventos externos.

O ciclo de gestão inicia-se com a Inspeção Cadastral, que estabelece o registro inicial da estrutura no sistema de gerenciamento ou promove a atualização cadastral decorrente de modificações relevantes em sua configuração, tais como reforços, alargamentos ou alterações no sistema estrutural.

Na sequência, a Inspeção Rotineira é executada de forma periódica, com o objetivo de acompanhar a evolução das condições estruturais, funcionais e de durabilidade da ponte ao longo do tempo. Os resultados dessa inspeção alimentam a etapa de Análise e Planejamento, na qual são avaliados o desempenho da estrutura, a gravidade das anomalias identificadas e a necessidade de inspeções complementares ou de intervenções

Quando são identificados danos localizados, manifestações patológicas específicas ou situações que demandem acompanhamento em curto prazo, pode ser programada uma Inspeção Intermediária, direcionada a elementos ou regiões específicas da estrutura, com escopo e metodologia compatíveis com o fenômeno a ser monitorado. Trata-se de uma inspeção de caráter complementar, voltada ao acompanhamento da evolução de condições previamente identificadas, quando suas causas são conhecidas ou razoavelmente presumidas. Dependendo da abrangência do levantamento, a inspeção intermediária pode resultar na atualização da condição da estrutura, desde que tecnicamente justificada e registrada nos formulários padronizados.

Quando as anomalias apresentarem maior complexidade, extensão significativa, evolução acelerada ou incerteza quanto às suas causas, a estrutura deve ser submetida a uma Inspeção Especial, de caráter detalhado, abrangente e essencialmente diagnóstico, voltada à identificação das causas das anomalias, à avaliação aprofundada do comportando estrutural e à definição das intervenções de engenharia necessárias.

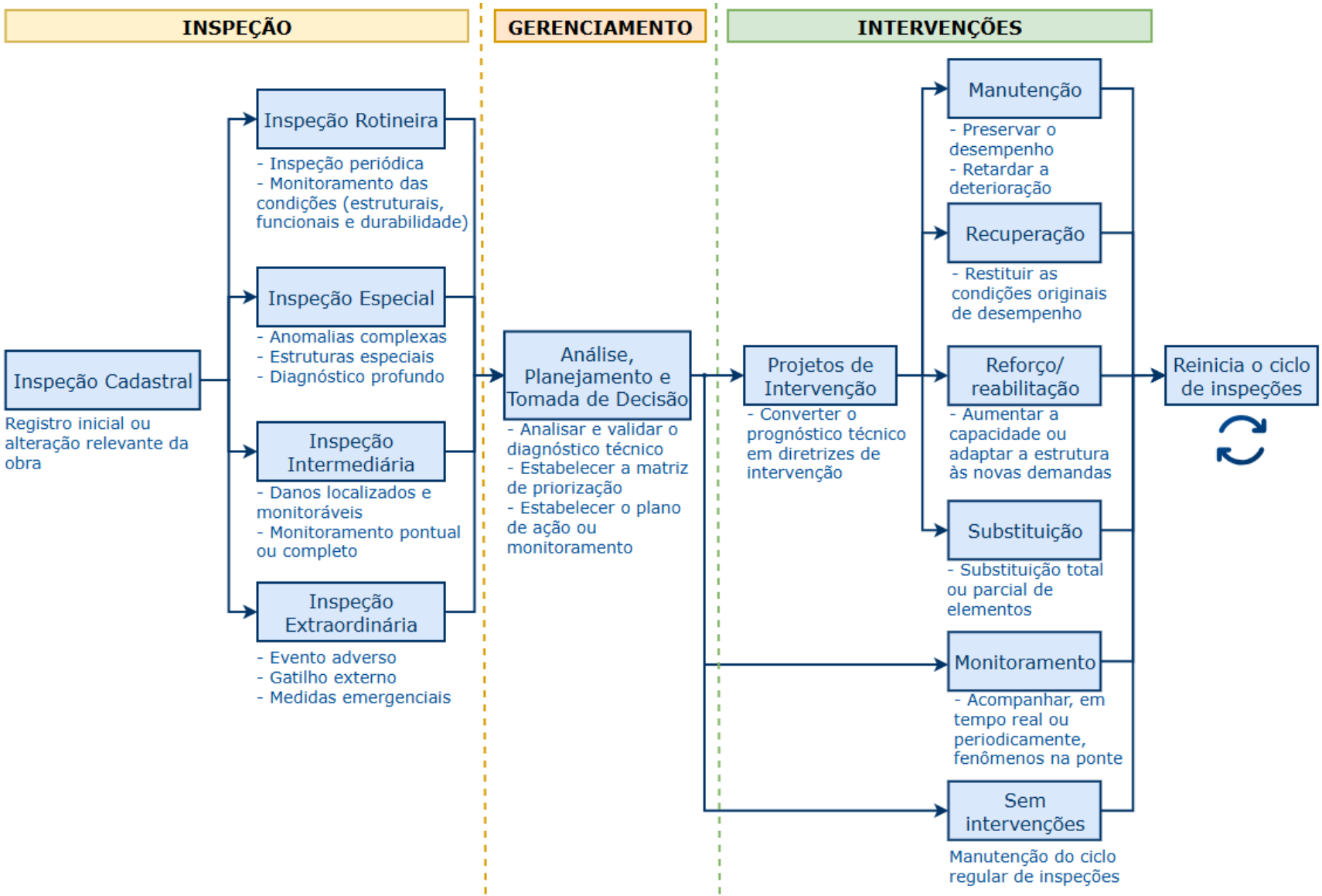


Figura 2.2 **Fluxograma de ocorrências e inspeções**

São indicativos típicos da necessidade de inspeção especial, entre outros:

- A necessidade de realização de ensaios destrutivos ou não destrutivos para caracterização de materiais, avaliação de integridade ou confirmação de hipóteses diagnósticas.
- A necessidade de modelagem estrutural, incluindo modelos numéricos, para verificação da capacidade resistente, redistribuição de esforços ou avaliação de segurança estrutural.
- A demanda por análise dinâmica, instrumentação ou monitoramento para avaliação do comportamento estrutural em serviço.
- A presença de anomalias extensas ou generalizadas, afetando múltiplos elementos estruturais ou regiões críticas da ponte.
- A ocorrência de danos cuja origem não possa ser claramente identificada por inspeção visual, exigindo investigação técnica aprofundada.

O enquadramento da ponte como estrutura especial, complexa ou crítica, em função de seu sistema estrutural, importância funcional ou nível de risco associado

A ocorrência de eventos adversos – tais como impactos de veículos, inundações, processos erosivos, incêndios, socavamentos ou outros fenômenos de origem natural ou antrópica – gera a necessidade de Inspeção Extraordinária. Esse tipo de inspeção tem por finalidade avaliar a segurança imediata da ponte, identificar achados críticos e subsidiar a adoção de medidas emergenciais, podendo, conforme a gravidade dos danos observados e o escopo do levantamento realizado, resultar na atualização da condição da estrutura ou encaminhar à realização de uma Inspeção Especial.

Com base nos resultados das inspeções e na etapa de análise e planejamento, são definidos os encaminhamentos técnicos mais adequados para a ponte, que podem incluir a manutenção do ciclo regular de inspeções, a intensificação do monitoramento, a elaboração de projetos de intervenção ou a execução de ações de manutenção, recuperação, reforço/reabilitação ou substituição de elementos. Essas decisões visam preservar, restituir ou ampliar o desempenho estrutural, funcional e de durabilidade da ponte, de acordo com a gravidade das anomalias identificadas e com os níveis de risco associados.

Os intervalos entre inspeções devem obedecer às periodicidades mínimas estabelecidas nas normas e instruções do DNIT. No entanto, esses prazos podem ser ajustados de forma criteriosa em função do tipo de estrutura, da agressividade do ambiente, da importância funcional da obra, do nível de risco associado e do histórico de desempenho estrutural. Dessa forma, o gestor poderá reduzir o intervalo previsto entre inspeções rotineiras sucessivas para pontes classificadas como críticas ou sujeitas a processos acelerados de deterioração, por exemplo.

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

O desempenho de uma estrutura de engenharia depende de diversos fatores, podendo ser classificados como internos ou externos. Entre os fatores externos que mais influenciam o comportamento e a vida útil das pontes, destacam-se o tipo e a frequência das cargas móveis, a agressividade do meio ambiente e, especialmente, a realização de manutenções adequadas e periódicas. Intrinsecamente, além da idade da obra e dos critérios de projeto, o desempenho estrutural está diretamente relacionado às propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na construção, bem como da qualidade da sua execução.

O conhecimento das propriedades, vantagens e limitações dos diferentes materiais empregados na construção de pontes é indispensável para a condução de inspeções seguras e confiáveis. O engenheiro responsável deve compreender os mecanismos de deterioração dos materiais e identificar as possíveis causas dos danos, a fim de recomendar medidas de conservação adequadas. A partir dessa análise, é possível avaliar a segurança e a capacidade de carga atual da ponte.

Este Manual, apresenta uma síntese dos conceitos fundamentais necessários à compreensão do comportamento dos materiais e de suas principais manifestações patológicas no contexto das inspeções de pontes. Ressalta-se, entretanto, que o conteúdo aqui apresentado não esgota o tema, recomendando-se o aprofundamento contínuo por meio da bibliografia técnica especializada, como parte essencial da qualificação e atualização do profissional.

3.1 CONCRETO

O concreto é um material compósito constituído essencialmente por cimento, agregados graúdos e miúdos, e água, sendo o cimento o mais importante deles. Quando esses materiais são misturados em proporções adequadas, ocorre a reação química de hidratação do cimento, resultando em uma massa coesa que envolve os agregados.

Esse processo leva à formação de cristais, à redução de volume e à criação de poros, culminando em um material resistente, durável e monolítico, ideal para moldar elementos estruturais como os de pontes.

Os elementos básicos do concreto são:

- cimento hidráulico;
- água de amassamento;
- agregados graúdos e miúdos;
- ar incorporado.

A estes elementos básicos podem ser acrescentados os aditivos e as adições minerais para melhorar ou introduzir propriedades específicas.

Cimento Portland

O cimento Portland é o tipo de cimento mais usado na construção de pontes, que consiste essencialmente de silicatos reativos de cálcio. Trata-se de um aglomerante hidráulico constituído de uma mistura de clínquer Portland e sulfato de cálcio, sendo o clínquer um produto da queima a altas temperaturas, em forno rotativo, de uma mistura moída e adequada de calcário e argila.

Durante a hidratação, formam-se principalmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica e pela capacidade de aderência do concreto, além de produtos secundários que influenciam sua microestrutura e durabilidade.

De acordo com a ABNT NBR 16697, os cimentos Portland são classificados em diferentes tipos: comum, composto, alto-forno, pozolânico, alta resistência inicial, e branco, devendo ser selecionado aquele mais adequado às condições de exposição, às exigências de desempenho e às características do concreto especificado.

Água

A água utilizada no concreto deve estar isenta de impurezas, como produtos químicos, substâncias orgânicas, açúcar, sal e algas, pois esses elementos podem causar efeitos indesejados na mistura. Além disso, a água de amassamento utilizada deve atender aos requisitos normativos relativos ao tempo de pega e à resistência à compressão do concreto.

Agregados

Os agregados correspondem a cerca de 75 % do volume de uma mistura de concreto convencional e influenciam diretamente sua resistência e durabilidade. Devem apresentar:

- resistência à abrasão, às intempéries e a ciclos de congelamento e descongelamento;
- estabilidade química frente ao meio alcalino do cimento;
- granulometria e tamanho compatíveis com o projeto;
- formas e texturas compatíveis com boa trabalhabilidade;
- baixa porosidade e ausência de impurezas.

Ar Incorporado

A presença controlada de pequenas quantidades de ar incorporado, desde que com distribuição uniforme, pode garantir a durabilidade da estrutura e a trabalhabilidade específica de cada projeto, além de reduzir a segregação e as tensões internas decorrentes de variações térmicas.

Aditivos e Adições

Além dos componentes básicos, o concreto pode conter aditivos químicos e adições minerais, utilizados para modificar propriedades no estado fresco ou endurecido, melhorar o desempenho e adequar o material às condições de execução e de exposição.

As adições minerais incluem materiais como pozolanas, cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno moída, que podem garantir a durabilidade, reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência a agentes agressivos.

Os aditivos químicos incluem, entre outros, plastificantes, superplastificantes, redutores de água, retardadores, aceleradores, inibidores de corrosão e agentes redutores de retração, sendo empregados para controlar o comportamento do concreto durante o lançamento, adensamento, cura e ao longo de sua vida útil.

3.1.1 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas do concreto relevantes para o desempenho e a inspeção de estruturas de pontes são:

- **Sensibilidade à variação de temperatura:** o concreto se expande com o aumento da temperatura e se contrai com sua redução. Esses movimentos, quando restringidos, podem induzir tensões internas, fissuração e esforços adicionais em juntas, aparelhos de apoio e ligações estruturais.

- **Porosidade:** devido à microestrutura da pasta de cimento hidratada e à presença de ar aprisionado, o concreto apresenta uma rede de poros e capilares que permite a absorção, a retenção e o transporte de água e de agentes agressivos. A porosidade influencia diretamente a permeabilidade, a durabilidade e a suscetibilidade à corrosão das armaduras.
- **Sensibilidade à umidade:** o concreto apresenta variações volumétricas higroscópicas, expandindo-se com o aumento da umidade e contraindo-se com sua redução. Esses efeitos, combinados com retração por secagem e variações térmicas, podem contribuir para a formação e a abertura de fissuras.
- **Resistência ao fogo:** concretos de boa qualidade apresentam comportamento satisfatório frente à ação do fogo por períodos limitados. Contudo, exposições prolongadas ou temperaturas elevadas (tipicamente superiores a 350 ºC) podem provocar perda de resistência mecânica, fissuração, destacamento (*spalling*) e degradação da aderência aço–concreto.

Capacidade de moldagem: no estado fresco, o concreto pode ser moldado em praticamente qualquer forma, permitindo a execução de geometrias complexas. Essa característica é fundamental para a concepção estrutural de pontes, mas também torna a qualidade da execução, do adensamento e da cura determinantes para o desempenho final do material.

3.1.2 Propriedades mecânicas

As principais propriedades mecânicas do concreto determinam sua capacidade de resistir às ações atuantes e de se deformar ao longo do tempo, influenciando diretamente o comportamento estrutural e a durabilidade das pontes.

3.1.2.1 Resistência

A resistência corresponde à tensão máxima que a amostra de concreto é capaz de resistir antes da ruptura. Entre as propriedades mecânicas do concreto, destacam-se a resistência à compressão, tração e ao cisalhamento, sendo a resistência à compressão o principal parâmetro utilizado no dimensionamento de estruturas.

O concreto simples (sem armadura) apresenta resistência à compressão variando, em geral, entre 15 e 30 MPa. Em concretos convencionais a resistência à tração corresponde aproximadamente a 10 % da resistência à compressão, enquanto a resistência à força cortante (cisalhamento) situa-se em torno de 14 % dessa resistência.

Atualmente, há concretos de alta resistência, com resistência à compressão (fck) variando de 50 a 80 MPa, e concretos de alto desempenho, com resistência à compressão atingindo cerca de 200 MPa. O aumento da resistência do concreto pode ser alcançado por meio de:

- redução da relação água/cimento;
- maior eficiência na granulometria e qualidade dos agregados;
- uso de aditivos químicos e adições minerais;
- controle rigoroso dos processos de mistura, lançamento, adensamento e cura.

Para fins de inspeção, a resistência do concreto influencia diretamente a capacidade resistente, a resposta à fissuração e a vulnerabilidade a processos de deterioração, como a corrosão das armaduras.

3.1.2.2 Elasticidade

No regime elástico, o concreto apresenta a capacidade de se deformar sob carregamento e recuperar, em grande parte, sua forma original quando a carga é removida. Essa propriedade é representada pelo módulo de elasticidade, que depende principalmente da resistência à compressão, do tipo de agregado e da idade do concreto.

Normas técnicas, como a ABNT NBR 6118, fornecem expressões empíricas para estimar o módulo de elasticidade em função do fck. O valor do módulo influencia diretamente flechas, redistribuição de esforços e comportamento global da estrutura, sendo relevante para a interpretação de deformações observadas em campo.

3.1.2.3 Fluência

A fluência é a deformação progressiva ao longo do tempo que ocorre quando o concreto é submetido a tensões constantes. Em estruturas de pontes, esse efeito pode resultar em aumento de flechas, redistribuição de esforços e perda gradual de protensão em estruturas protendidas.

Em condições usuais, a deformação por fluência pode atingir valores da ordem de 1 a 2 vezes a deformação elástica inicial, dependendo da idade do concreto, da umidade, do nível de tensão e da composição do material.

3.1.2.4 Relaxação

Sob deformação imposta constante, o concreto apresenta redução gradual da tensão ao longo do tempo, fenômeno conhecido como relaxação. Esse efeito é particularmente relevante em elementos submetidos a restrições de deformação e em estruturas protendidas, influenciando o estado de tensões e a redistribuição de esforços.

3.1.2.5 Retração

A retração corresponde à redução volumétrica do concreto associada principalmente à perda de água dos poros capilares e à hidratação do cimento. Pode ocorrer desde o estado fresco até idades avançadas e, quando restringida, leva ao desenvolvimento de tensões internas podendo ocorrer fissuração, frequentemente observada em tabuleiros, lajes e elementos de grande superfície exposta.

3.1.2.6 Isotropia

O concreto simples pode ser considerado, em primeira aproximação, um material isotrópico, ou seja, com propriedades mecânicas semelhantes em todas as direções. No concreto armado, entretanto, o comportamento global da estrutura passa a ser anisotrópico, em função da orientação e da disposição das armaduras, aspecto relevante na interpretação de fissuração e no desempenho estrutural.

3.1.3 Tipos de concreto estruturais

3.1.3.1 Concreto armado

O concreto possui elevada resistência à compressão, o que o torna um excelente material para a construção de pontes. No entanto, sua limitada resistência à tração – usualmente desprezada nos cálculos e dimensionamentos – exige a introdução de armaduras de aço nas zonas tracionadas da estrutura, resultando no sistema denominado concreto armado.

As armaduras de aço, utilizadas geralmente em barras de seção circular, podem ter superfícies lisas ou nervuradas; estas últimas proporcionam melhor aderência ao concreto. Aços de maior resistência mecânica, como os com limite de escoamento de até 500 ou 600 MPa, geralmente requerem concretos de melhor qualidade. No concreto armado convencional, os esforços nas armaduras são induzidos pelas cargas aplicadas após a

construção, e as armaduras acompanham passivamente as deformações da estrutura, por isso são denominadas armaduras passivas. Quando as armaduras são previamente alongadas e tensionadas antes da aplicação das cargas externas, o material resultante é chamado de concreto protendido.

Do ponto de vista do material, o concreto armado é basicamente uma estrutura fissurada e a utilização adequada das armaduras na sua quantidade, diâmetro e distribuição, proporciona maior distribuição dessas fissuras, bem como a diminuição de suas aberturas, influenciando diretamente na sua durabilidade. Embora todo concreto armado apresente algumas fissuras durante o uso, a fissuração pode ser controlada por meio de um projeto estrutural bem elaborado, um detalhamento adequado e a adoção de procedimentos corretos na execução.

Os mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura incluem:

- **Despassivação por cabonatação:** redução do pH do concreto, que compromete a camada passivadora do aço.
- **Despassivação por cloretos:** rompimento da película protetora do aço devido à presença de íons cloreto.
- **Mecanismos de origem estrutural:** ações mecânicas excessivas, impactos, fadiga por carregamentos cíclicos, retração, fluência, movimentações térmicas e outros efeitos que alteram o estado de tensões.

A progressão desses mecanismos pode levar à corrosão das armaduras, com expansão volumétrica dos produtos de corrosão, fissuração e destacamento do cobrimento, resultando em redução da seção de aço, perda de aderência e diminuição da capacidade resistente, podendo, em casos extremos, conduzir ao colapso estrutural.

A configuração e o padrão das fissuras fornecem importantes indícios do estado de tensões e do comportamento estrutural. Fissuras inclinadas podem indicar esforços de cisalhamento ou torção; fissuras longitudinais ou verticais podem estar associadas à flexão ou à tração em pilares; e aberturas excessivas frequentemente estão relacionadas a deformações elevadas (flechas). A flecha corresponde ao maior deslocamento transversal ao eixo da viga ou ao plano da laje e constitui um parâmetro importante para a avaliação da funcionalidade e da integridade estrutural.

3.1.3.2 Concreto protendido

O concreto protendido é obtido pela introdução deliberada de tensões de compressão no concreto por meio de cabos de aço de alta resistência, aplicadas de forma controlada, com o objetivo de contrabalançar as tensões de tração decorrentes das cargas de serviço. Essa técnica proporciona vantagens importantes em estruturas de pontes, tais como:

- redução ou eliminação das zonas tracionadas no concreto sob cargas de serviço, limitando ou evitando a fissuração;
- maior eficiência estrutural, permitindo seções mais esbeltas e vãos maiores;
- menores deformações (flechas) quando comparado ao concreto armado convencional em condições geométricas semelhantes;
- redução da quantidade de armaduras passivas, uma vez que parte significativa dos esforços é absorvida pelo sistema de protensão.

Métodos de Protensão

A protensão no concreto pode ser realizada por três métodos principais:

- **Pré-tensionamento:** os cabos de aço são tensionados antes da concretagem; ou seja, durante a produção do elemento, o aço é posicionado e tracionado antes da aplicação e cura do concreto, estabelecendo uma ligação aderente entre o aço e o concreto.
- **Pós-tensionamento:** o tensionamento do aço ocorre após a cura do concreto. Nesse caso, o concreto é moldado ao redor de dutos (geralmente de plástico ou, ocasionalmente, de aço), permitindo que os cabos sejam inseridos e tracionados posteriormente, sem aderência direta ao concreto.
- **Método combinado:** é adotado, em geral, para elementos mais extensos, em que a força de protensão exigida não pode ser atendida por um único método, ou ainda em situações específicas de construção, como em vigas segmentadas, que requerem o uso do pós-tensionamento.

3.1.4 Causas e mecanismos de deterioração das estruturas de concreto

O concreto, assim como qualquer material de construção, está sujeito à degradação natural. Entretanto, várias causas, listadas a seguir, podem acelerar a degradação das estruturas de concreto armado, em particular as pontes, que estão continuamente expostas a ações ambientais e carregamentos variáveis:

- **Projeto inadequado:** falhas na concepção estrutural, no dimensionamento, no detalhamento das armaduras ou nas especificações dos materiais.
- **Ausência de controle tecnológico:** podendo gerar escoramentos e fôrmas defeituosas, má colocação de armaduras, cobrimentos insuficientes, concreto com qualidade inferior às especificadas, ausência de plano de concretagem etc.
- **Manutenção inexistente ou insuficiente:** a falta de inspeções periódicas e de intervenções preventivas favorece a evolução de danos e acelera a deterioração.
- **Utilização inadequada da estrutura:** sobrecargas imprevistas, vibrações excessivas, mudanças de uso e solicitações não previstas em projeto.
- **Causas de origem química:** como reações internas do concreto, presença de cloretos, água, anidrido carbônico, ácidos e sais.
- **Causas de origem física:** como ação do calor, do vento e da água.
- **Causas de origem mecânica:** como choques de veículos e embarcações, acidentes de origem diversa e recalque de fundações.
- **Causas de origem biológica:** como o crescimento de vegetais nas juntas, de raízes sob fundações diretas e superficiais e a ação de insetos, como cupins e formigas.

Os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto podem ser classificados, conforme ABNT NBR 6118, em três categorias principais:

- **Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos à estrutura propriamente dita:** associados às condições de solicitação, às deformações e às movimentações impostas à estrutura ao longo do tempo, influenciando seu comportamento em serviço.
- **Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos à armadura:** vinculados às alterações físico-químicas que afetam o aço embutido no concreto, especialmente os processos de corrosão decorrentes da perda da camada de passivação.
- **Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos ao concreto:** relacionados às transformações internas da matriz cimentícia, bem como à interação do concreto com o meio ambiente, incluindo processos de transporte de água, gases e íons agressivos.

A seguir, cada um desses mecanismos é descrito em maior detalhe, apresentando-se as manifestações patológicas mais comuns, suas causas prováveis e os efeitos no desempenho e na durabilidade das estruturas de concreto.

3.1.4.1 Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos à estrutura

A deterioração associada ao comportamento estrutural do concreto está intimamente ligada ao processo de fissuração. As fissuras podem se desenvolver em decorrência de ações mecânicas, impactos, movimentações de origem térmica, ações cíclicas ou fluência. Com a manifestação de fissuras na estrutura, o acesso a agentes agressivos ao concreto e à armadura poderão surgir, propiciando um avanço na degradação da estrutura.

A fissura é uma fratura linear no concreto que pode se estender parcial ou completamente através do elemento. Em estruturas de concreto armado, o fissuramento é um fenômeno inerente ao comportamento da peça sob flexão, cisalhamento, torção ou restrições à deformação, e não implica automaticamente perda de resistência ou de durabilidade. O que determina sua gravidade é a abertura, a extensão, o padrão e sua evolução no tempo.

A ABNT NBR 6118 não adota mais limites universais e fixos para abertura de fissuras, diferentemente da antiga NB – 1:1978. Em vez disso, adota uma abordagem mais flexível e baseada no desempenho, considerando fatores como:

- classe de agressividade ambiental (CAA);
- tipo de exposição;
- diâmetro das barras e cobrimento;
- tensão de serviço na armadura;
- tipo e resistência do concreto.

A fissuração é verificada por meio do cálculo da abertura característica da fissura (wk), geralmente com limites usuais definidos conforme Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Abertura de fissuras de acordo com a classe de agressividade

Classe de agressividade	Tipo de ambiente	Abertura característica recomendada (wk)
CAA I	Não agressivo	≤ 0,40 mm
CAA II a CAA IV	Moderado a muito agressivo	0,30 mm a 0,20 mm

Entretanto, esses valores podem variar de acordo com a situação, o tipo de estrutura e da classe de exposição, podendo inclusive ser mais rigorosos conforme requisitos do projeto.

Os regulamentos internacionais são um pouco mais tolerantes. Em estruturas protendidas, esses mesmos regulamentos permitem uma abertura de fissura de 0,2 mm.

No Brasil, os parâmetros para controle da fissuração e proteção das armaduras é previsto na ABNT NBR 6118. O documento apresenta as exigências em função do tipo de concreto estrutural, da classe de agressividade ambiental e do tipo de protensão, das exigências relativas à fissuração e da combinação de ações em serviço a utilizar. A partir dessas variáveis que configuram o caso particular, são estabelecidas as aberturas toleráveis.

As fissuras apresentam diferentes características quanto à abertura, à extensão, à atividade e à origem, devendo sua avaliação considerar os possíveis impactos na durabilidade, estanqueidade e desempenho estrutural. As fissuras visíveis sem instrumentos devem ser mapeadas quanto ao comprimento, à abertura, à localização e à orientação. Em estruturas de concreto protendido, todas as fissuras devem ser objeto de registro e acompanhamento.

Também devem ser anotadas a presença de ferrugem, eflorescência, infiltrações e indícios de movimentação das fissuras não estabilizadas ou ativas, em contraposição às estabilizadas ou inativas.

As causas da fissuração podem ser variadas e, nem sempre, de fácil identificação; entretanto, as mesmas causas produzem idênticos padrões de fissuras, o que facilita bastante a tarefa do inspetor. As principais causas são:

- cura deficiente;
- retração ou expansão por variação higroscópica;
- variações térmicas;
- ataques químicos;
- sobrecargas;
- erros de projeto ou execução;
- recalques diferenciais.

As principais fissuras de origem estrutural, causadas pelas tensões provocadas pela carga permanente e pela carga móvel são:

- fissuras de flexão;
- fissuras de cisalhamento (força cortante);
- fissuras de torção.

Além dessas, outros tipos de fissuras também podem ser observados no concreto e merecem atenção durante a inspeção, tais como:

- fissuras de retração térmica;
- fissuras associadas à corrosão da armadura;
- fissuras causadas pela formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais;
- fissuras por ruptura frágil em apoios extremos mal posicionados;
- fissuras em dentes de articulação, que, dependendo da gravidade, podem oferecer risco de ruptura frágil;
- fissuras em elementos submetidos à compressão.

A Figura 3.1, e o Quadro 3.2 indicam suas formas de manifestação e os principais tipos de fissuras nos elementos de concreto, respectivamente.

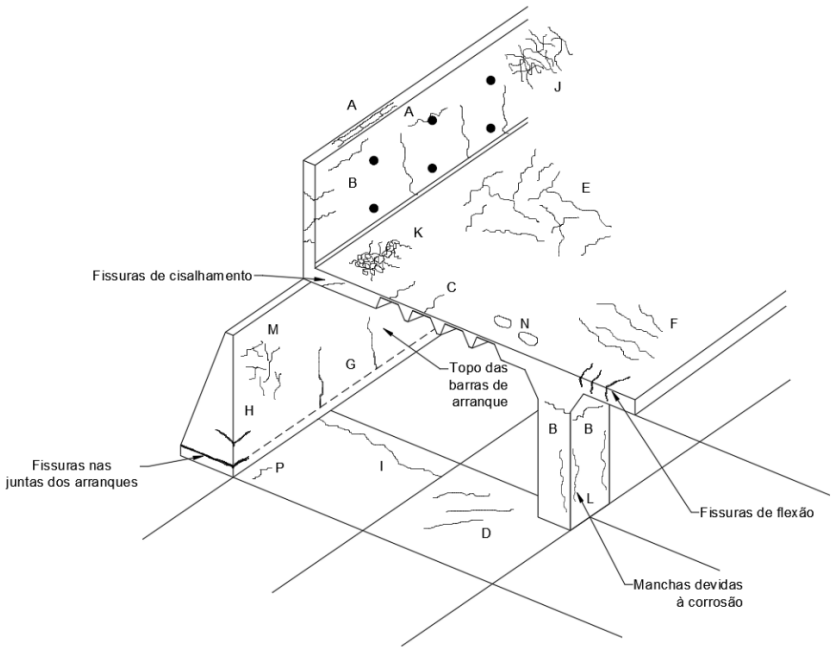


Figura 3.1 Representação dos tipos de fissuras possíveis de ocorrer no concreto

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

Quadro 3.2 Classificação de fissuras intrínsecas (continua)

Tipo de fissura	Símbolo na Figura 3.1	Subdivisão	Localização mais comum	Causa principal (excluindo restrição)	Causas secundárias/ fatores	Correção, em todos os casos, reduz restrição	Tempo de aparecimento
Assentamento plástico	A	Sobre a armadura	Seções espessas	Exsudação excessiva	Condições para secagem precoce	Reduzir a exsudação ou revibrar	10 min a 3 horas
	B	Em arco	Topo de pilares				
	C	Mudança de espessura	Lajes nervuradas				
Retração plástica	D	Diagonal	Pisos e lajes	Secagem precoce	Velocidade exsudação baixa	Melhorar cura inicial	30 min a 6 horas
	E	Aleatória	Lajes armadas				
	F	Sobre a armadura	Lajes armadas	Secagem precoce ou armadura próxima à superfície			
Retração térmica inicial	G	Restrição externa	Paredes espessas	Geração excessiva de calor de hidratação	Resfriamento rápido	Reduzir o calor e/ou isolar	1 dia a 2 ou 3 semanas
	H	Restrição interna	Lajes espessas	Gradiente de temperatura excessivos			
Retração por secagem em longo prazo	I		Lajes finas e paredes	Juntas ineficientes	Retração excessiva ou cura ineficiente	Reduzir a quantidade de água ou melhorar a cura	Várias semanas a meses

Tipo de fissura	Símbolo na Figura 3.1	Subdivisão	Localização mais comum	Causa principal (excluindo restrição)	Causas secundárias/ fatores	Correção, em todos os casos, reduz restrição	Tempo de aparecimento
Mapeamento	J	Junto às formas	Paredes	Formas impermeáveis	Misturas ricas ou cura inadequada	Melhorar a cura e o acabamento	1 a 7 dias, algumas vezes mais tarde
	K	Concreto desempenado	Lajes	Excesso de desempeno			
Corrosão de armadura	L	Carbonatação	Pilares e vigas	Cobrimento insuficiente	Concreto de baixa qualidade	Eliminar as causas listadas	Mais de 2 anos
		Cloretos					
Reação álcali agregado	M		Locais úmidos	Agregados reativos e cimento com alto teor de álcalis		Eliminar as causas listadas	Mais de 5 anos
Bolhas	N		Lajes	Água de exsudação aprisionada	Uso de desempenadeira metálica	Eliminar as causas listadas	Ao toque
Fissuração	P		Bordas livres de lajes	Agregados danificados por congelamento		Reduzir dimensão do agregado	Mais de 10 anos

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

A. Fissuras de flexão

As fissuras de flexão apresentam, em geral, orientação vertical e se formam na zona tracionada da peça, onde o momento fletor é máximo. A fissura inicia-se na região de tração e se propaga em direção à zona comprimida, podendo, em casos de deficiência de armadura, ultrapassar essa região.

Em vigas, observa-se o seguinte comportamento típico:

- No meio dos vãos – onde a tração ocorre na parte inferior da seção – as fissuras de flexão podem ser encontradas nas faces inferiores, prolongando-se pelas faces laterais.
- Próximo aos apoios – onde a tração ocorre na parte superior em vigas contínuas – as fissuras podem ser encontradas nas faces superiores, prolongando-se para baixo pelas faces laterais, conforme observa-se na Figura 3.2.

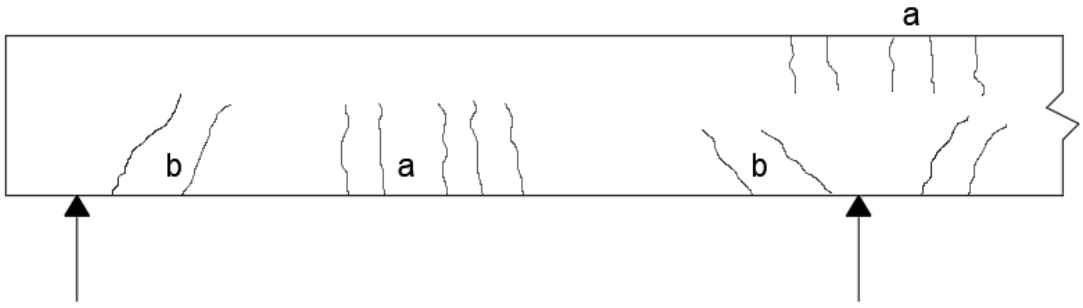


Figura 3.2 Esquema da ocorrência de fissuras de flexão e cisalhamento em vigas de concreto

Em lajes armadas em uma única direção, as fissuras de flexão se desenvolvem perpendicularmente à direção das barras tracionadas e distribuem-se ao longo do vão, refletindo a atuação dos momentos fletores principais (Figura 3.3).

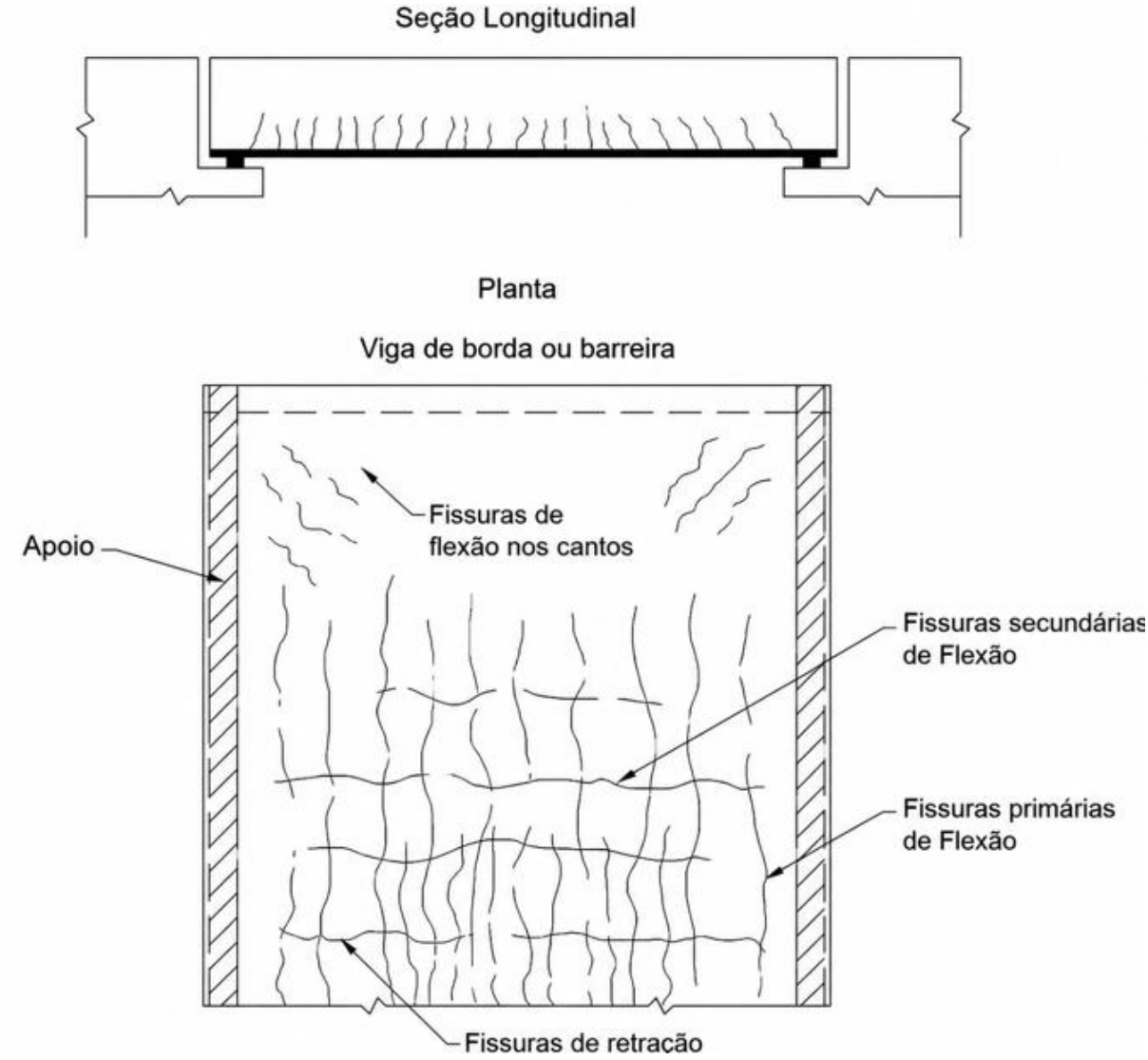


Figura 3.3 Esquema da ocorrência de fissuras em lajes armadas em uma única direção: (a) seção longitudinal da laje; (b) vista em planta com indicação das fissuras primárias e secundárias de flexão e das fissuras de retração

B. Fissuras de força cortante (cisalhamento)

As fissuras de cisalhamento apresentam, em geral, orientação inclinada, tipicamente entre 30° e 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento, e se desenvolvem principalmente na alma das vigas, com maior incidência nas regiões próximas aos apoios, onde os esforços cortantes são mais elevados.

Do ponto de vista estrutural, as fissuras de cisalhamento são mais críticas que as fissuras de flexão, pois podem evoluir de forma rápida e pouco dúctil, configurando um mecanismo potencial de ruptura frágil, especialmente em elementos com deficiência de estribos, deterioração das armaduras transversais ou corrosão localizada.

C. Fissuras de torção

As fissuras de torção apresentam padrão semelhante às fissuras de cisalhamento, porém ocorrem de forma simétrica e com inclinações opostas nas faces opostas do elemento, formando um padrão helicoidal em torno da viga ou do elemento estrutural. A Figura 3.4 apresenta uma viga com a representação das fissuras, e sua forma de ocorrência na estrutura.

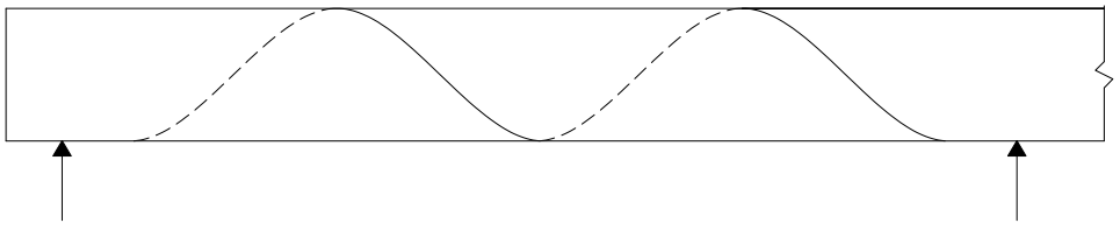


Figura 3.4 Esquema da ocorrência de fissuras de torção em vigas de concreto

D. Fissuras de retração térmica

As fissuras de retração térmica decorrem das variações de temperatura associadas ao calor de hidratação do cimento, fenômeno físico-químico inerente ao processo de endurecimento do concreto. Durante a hidratação, os compostos do cimento reagem com a água, liberando energia na forma de calor (Metha e Monteiro, 2008).

Em elementos de grande volume – como blocos de fundação, pilares, encontros, tabuleiros maciços e vigas de grande seção – a dissipação desse calor é limitada, provocando uma elevação significativa da temperatura interna nos primeiros dias após o lançamento do concreto. Posteriormente, com o resfriamento do elemento, ocorre contração volumétrica.

Quando esse movimento é restringido – seja pelos apoios, pela continuidade estrutural ou pela rigidez de elementos adjacentes – desenvolvem-se tensões de tração que podem exceder a resistência do concreto jovem, resultando em fissuração.

A ocorrência e a intensidade dessas fissuras dependem de diversos fatores, tais como:

- tipo e consumo de cimento;
- temperatura ambiente e dos materiais no lançamento;
- relação água/cimento;
- dimensão e geometria do elemento;
- uso de adições e aditivos.

Combinações desfavoráveis desses fatores podem gerar gradientes térmicos significativos, desencadeando sérios quadros de fissuração por retração térmica (Gomes e Ruggeri, 2013). A Figura 3.5 apresenta em esquema a manifestação das fissuras por retração térmica nas vigas de concreto.

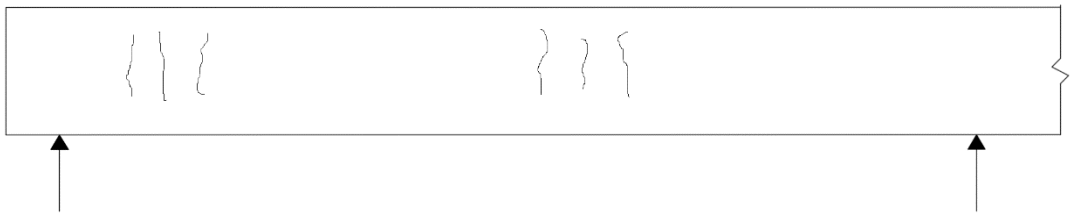


Figura 3.5 Esquema da ocorrência de fissuras de retração térmica em vigas de concreto

Outra representação de fissuras por retração térmica são as fissuras típicas encontradas em muros de arrimo e barreiras de concreto, como ilustrado na Figura 3.6.

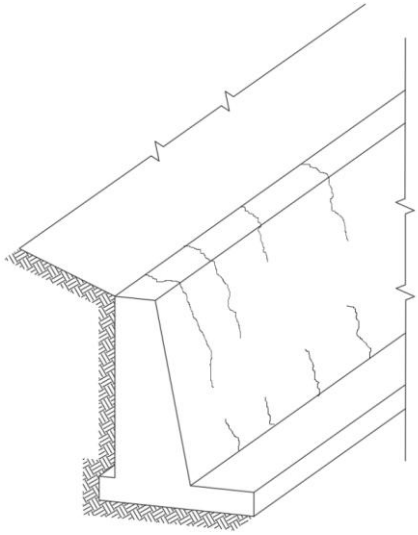


Figura 3.6 Esquema da ocorrência de fissuras típicas de retração em muros de arrimo

E. Fissuras associadas a manifestações patológicas nas armaduras

As fissuras que se desenvolvem em elementos de concreto armado em decorrência de problemas nas armaduras apresentam padrões característicos, que permitem sua identificação durante as inspeções. Esses padrões estão associados principalmente à perda de aderência e à corrosão do aço.

As fissuras por perda de aderência e por falha de ancoragem da armadura são atreladas às situações de proximidades das barras, podendo existir uma conexão entre as fissuras e uma perda de aderência total entre a armadura e o concreto (Souza e Ripper, 1998), conforme apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 Esquema da ocorrência de fissuras por perda de aderência e colapso da armadura

As fissuras associadas à corrosão das armaduras resultam da formação de produtos de corrosão, cujo volume é significativamente maior que o do aço original. Esse aumento volumétrico gera pressões internas no cobrimento de concreto, provocando fissuração, destacamento (*spalling*), perda de aderência e, progressivamente, redução da seção resistente da armadura (Helene, 1986). Em geral, essas fissuras se desenvolvem paralelamente ao eixo das barras, acompanhando sua posição no elemento, conforme ilustrado na Figura 3.8.

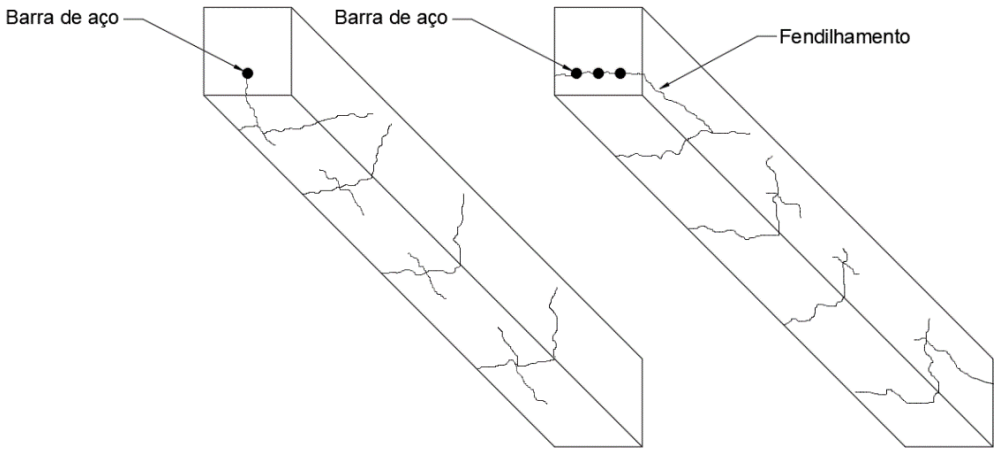


Figura 3.8 Esquema da ocorrência de fissuras por perda de aderência e colapso da armadura

Do ponto de vista da durabilidade e da segurança estrutural, as fissuras que seguem o traçado das armaduras são particularmente críticas, pois favorecem o ingresso direto de água, oxigênio e agentes agressivos, acelerando o processo de corrosão e comprometendo tanto a aderência quanto a capacidade resistente do elemento. Durante a inspeção, sua presença deve ser tratada como indicativo de deterioração ativa, exigindo avaliação detalhada e, em muitos casos, medidas de intervenção ou monitoramento.

F. Fissuras associadas à formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais

As armaduras dos elementos de concreto devem ser integralmente envolvidas pelo concreto, respeitando-se os valores de cobrimento mínimo estabelecidos em projeto e nas normas aplicáveis. Entretanto, em determinadas situações – especialmente em regiões

com alta densidade de armaduras, barras horizontais superiores, geometria desfavorável ou dificuldades de acesso para adensamento – o concreto pode não preencher adequadamente os espaços sob as barras, resultando na formação de vazios, bolhas ou ninhos de concretagem.

A vibração e o adensamento inadequados durante o lançamento do concreto são as principais causas desse tipo de defeito. Quando o concreto não se acomoda corretamente sob as barras horizontais, formam-se zonas porosas ou descontinuidades, que reduzem o cobrimento efetivo e favorecem a concentração de tensões, levando ao surgimento de fissuras longitudinais na superfície do elemento, geralmente paralelas às armaduras, (Figura 3.9).

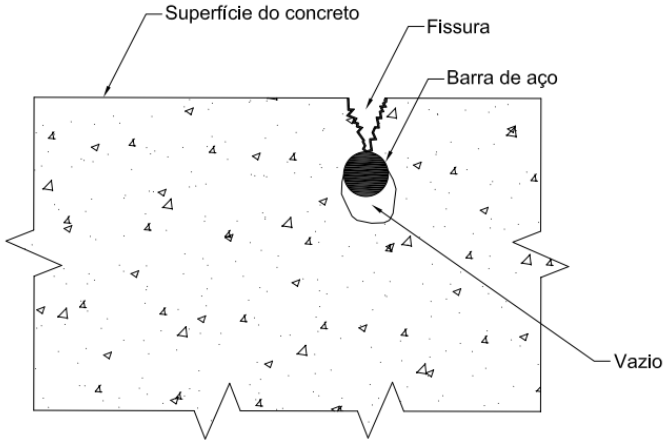


Figura 3.9 Esquema da ocorrência de fissuras por formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais

G. Fissuras associadas à ruptura frágil em apoios extremos mal posicionados

As fissuras por ruptura frágil em apoios extremos mal posicionados estão associadas a concentrações elevadas de tensões em regiões onde a transmissão dos esforços da superestrutura para os apoios ocorre de forma inadequada. Esse problema é típico de situações em que há desalinhamento, excentricidade, área de apoio insuficiente ou erro de posicionamento dos aparelhos de apoio.

Essas fissuras tendem a se manifestar-se de forma inclinada ou aproximadamente verticais nas regiões de apoio, podendo evoluir rapidamente para esmagamento do concreto, destacamento de blocos e, em casos mais graves, perda parcial ou total da capacidade de apoio do elemento (Figura 3.10).

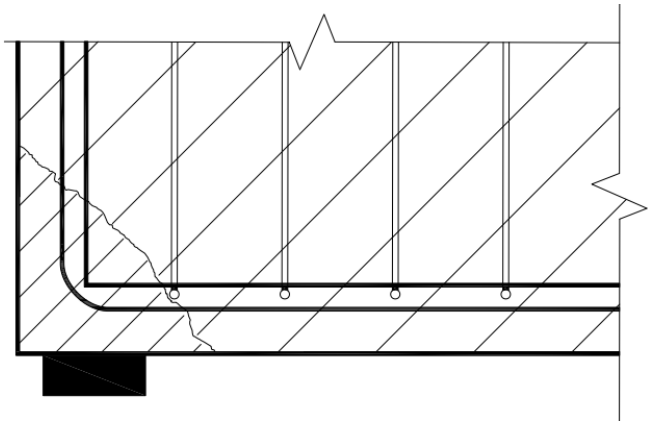


Figura 3.10 Esquema da ocorrência de fissuras de ruptura frágil em apoios extremos mal posicionados

H. Fissuras em dentes de articulação

Os dentes de articulação (dentes Gerber) são dispositivos estruturais responsáveis pela transferência de esforços cortantes entre vãos adjacentes, ao mesmo tempo em que possibilitam rotações relativas da estrutura. Esses elementos concentram elevadas tensões de cisalhamento e compressão em regiões de pequena área, o que os torna particularmente sensíveis à fissuração e à deterioração.

Conforme ilustrado na Figura 3.11, a solicitação do dente gera um campo de tensões que produz fissuras inclinadas e radiais, partindo da zona de apoio e se propagando para o interior dos elementos adjacentes. Esse padrão de fissuração é característico do mecanismo de cisalhamento–compressão, típico de modos de ruptura frágil. Na Figura 3.12 é mostrado como ocorre a fissura em dentes de articulação em um exemplo real.

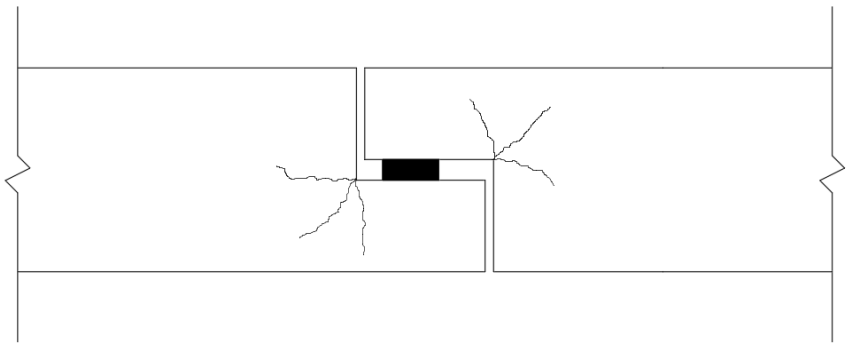


Figura 3.11 Esquema da ocorrência de fissuras em dentes de articulação

Figura 3.12 Exemplo de fissuras em dentes de articulação

I. Fissuras em elementos de compressão

As fissuras em pilares e outros elementos predominantemente comprimidos estão geralmente associadas à forma de introdução e distribuição das cargas, à restrição de deformações e à deficiência de confinamento (fretagem) nas regiões de apoio e ligação.

Quando as cargas são aplicadas de forma concentrada, excêntrica ou sem folgas adequadas entre placas e o concreto (Figura 3.13), surgem tensões transversais de tração que provocam fissuras verticais no fuste e fissuras inclinadas nos cantos, decorrentes do esmagamento localizado e da abertura lateral do elemento.

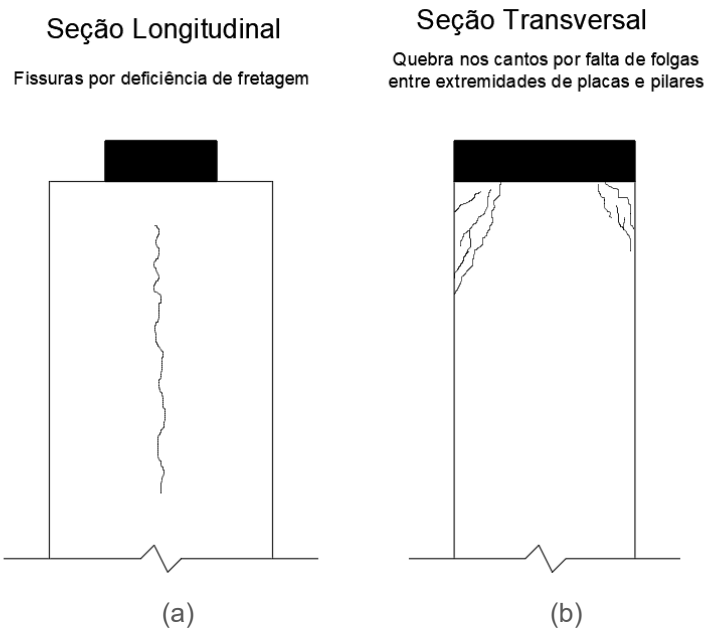


Figura 3.13 Esquema da ocorrência de fissuras em pilares isolados e parcialmente carregados: (a) seção longitudinal com fissura devido à deficiência de fretagem; (b) seção transversal com fissuras nos cantos por falta de folga entre extremidades de placas e pilares

Em pilares-parede e regiões superiores dos pilares (Figura 3.14), fissuras podem resultar de insuficiência de armadura de fretagem ou de tração, gerando fissuração no topo pela introdução não uniforme das cargas. Na base dos pilares, defasagens de concretagem entre o pilar e o bloco de fundação podem restringir a retração do concreto, originando fissuras verticais e inclinadas.

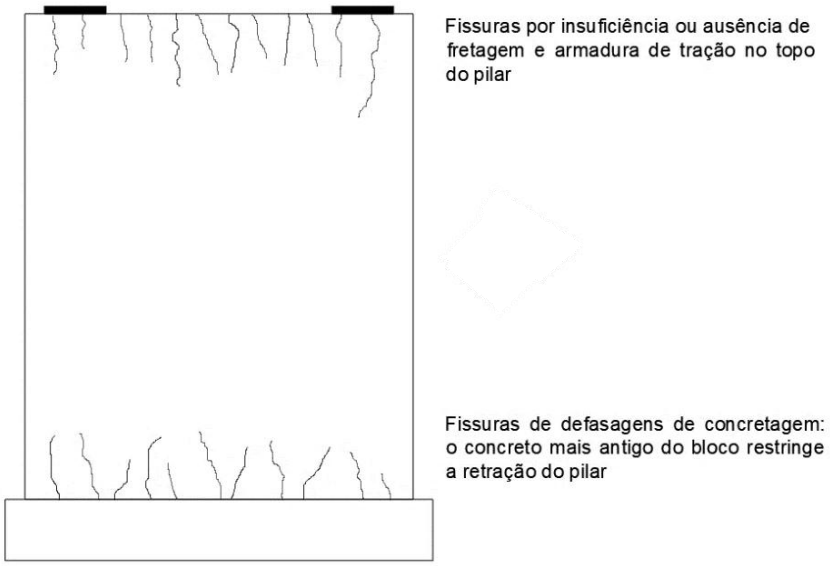


Figura 3.14 Esquema da ocorrência de fissuras em pilares parede e parcialmente carregados

A orientação e a posição dessas fissuras são indicativas do mecanismo de carregamento e permitem ao inspetor identificar problemas de apoio, confinamento ou execução que podem comprometer a capacidade resistente do elemento.

3.1.4.2 Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos à armadura

As armaduras das estruturas de concreto armado estão, em princípio, protegidas e passivadas contra a corrosão, processo de deterioração por ação química ou eletroquímica do aço. Esta proteção ocorre por meio de dois mecanismos complementares:

- **Proteção física:** proporcionada pelo cobrimento de concreto, que forma uma barreira ao ingresso de agentes externos.
- **Proteção química:** proporcionada pela elevada alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto, que forma uma película passivadora sobre a superfície do aço.

Segundo a ABNT NBR 6118, denomina-se armadura passiva toda armadura que não é utilizada para introduzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada. Apesar de não ter a função ativa de introduzir esforços na estrutura, essas armaduras são projetadas para resistir aos esforços atuantes, permanecendo, portanto, protegidas em condição passiva.

A despassivação da armadura ocorre quando a camada protetora que reveste o aço é rompida. Os principais mecanismos responsáveis por esse processo são:

- **Carbonatação:** resulta da penetração do gás carbônico (CO_2) da atmosfera no concreto, reduzindo sua alcalinidade.
- **Ação de cloretos:** consiste na ruptura local da camada passivadora, causada por elevado teor de íon-cloro.

Para mitigar esses mecanismos, recomenda-se a adoção de medidas que dificultem o ingresso de agentes agressivos, tais como:

- cobrimento adequado;
- controle da fissuração;
- utilização de concretos de baixa porosidade e baixa relação água/cimento;
- emprego de cimentos com adições minerais (escórias e pozolanas).

Evolução do processo corrosivo

A deterioração da armadura tem início com a perda ou ruptura da camada protetora, mesmo que localizada, dando origem a um processo geralmente progressivo e auto acelerado. Esse processo é favorecido por condições que aumentam a permeabilidade do concreto ou facilitam o acesso de água, oxigênio e cloretos, como:

- fissuração do concreto;
- solicitações cíclicas;
- falhas de execução e de cura;
- incompatibilidades entre materiais;
- ciclos de molhagem e secagem;
- atmosferas industriais ou marinhas (ambientes agressivos);
- variações térmicas e ação biológica.

Esses fatores justificam a importância do controle da qualidade do concreto, do adensamento adequado, da cura eficiente e da limitação dos teores de cloretos nos materiais constituintes.

Manifestações Patológicas e Consequências Estruturais

A corrosão de armaduras figura como uma das patologias de maior incidência nas estruturas de concreto armado. Os efeitos degenerativos da corrosão das armaduras manifestam-se na forma de:

- manchas superficiais avermelhadas devido aos produtos de corrosão;
- fissuras longitudinais paralelas às barras;
- destacamento do concreto de cobrimento;
- redução da seção resistente das armaduras;
- perda de aderência entre aço e concreto;
- rompimento de estribos e armaduras principais em estágios avançados.

A Figura 3.15 apresenta exemplos de manifestações patológicas devido à deterioração da armadura por corrosão em pontes.

(a) (b)

Figura 3.15 Manifestações patológicas decorrentes da corrosão da armadura: (a) perda de cobrimento com exposição das armaduras; (b) destacamento do concreto com armaduras expostas e corrosão avançada

Quanto à forma de desenvolvimento, a corrosão pode ser classificada em:

- **Corrosão generalizada:** ocorre de forma relativamente uniforme ao longo da superfície da armadura, contudo, se processa em extensas áreas do metal.
- **Corrosão localizada:** o desgaste se processa em uma superfície limitada e, usualmente, tende a se aprofundar de modo mais rápido do que em um processo de corrosão generalizada.

De maneira geral, o processo de corrosão das armaduras resulta da atuação simultânea de diversos fatores (químicos, físicos, eletroquímicos e ambientais), exigindo uma abordagem sistêmica para sua análise. No entanto, para fins didáticos e para facilitar a compreensão e o estudo, esses fatores podem ser examinados de forma isolada e individualizada.

A prevenção da corrosão em novas construções e a correção de problemas em estruturas já existentes dependem do conhecimento aprofundado desses fatores e mecanismos de ação, bem como da compreensão dos métodos disponíveis para monitoramento e medição dos parâmetros eletroquímicos da corrosão.

3.1.4.3 Mecanismos de envelhecimento e deterioração relativos ao concreto

O concreto, apesar de sua elevada durabilidade e resistência, está sujeito a diversos mecanismos de envelhecimento e deterioração ao longo do tempo. Esses mecanismos podem comprometer a integridade estrutural e funcional das pontes, influenciados por fatores químicos, físicos e biológicos, bem como por falhas executivas ou ações mecânicas externas.

Nesta seção são descritas as principais manifestações patológicas observadas em elementos de concreto em pontes, incluindo suas causas, características, consequências e exemplos ilustrativos obtidos em inspeções realizadas em campo.

A. Desagregações

A desagregação do concreto é uma das manifestações patológicas mais características da existência de um ataque químico; quando acontece, os componentes do concreto perdem sua coesão, reduzindo significativamente a resistência mecânica, podendo chegar ao ponto de liberação dos agregados.

O fenômeno da desagregação costuma evoluir de forma gradual, podendo ser descrito nas seguintes etapas:

a) alteração superficial da coloração e da textura do concreto;

b) surgimento e ampliação de fissuras, frequentemente em padrão entrecruzado;

c) empolamento e destacamento das camadas superficiais;

d) perda de coesão da pasta de cimento, com exposição dos agregados;

e) desintegração progressiva do material, com perda relevante de resistência.

A Figura 3.16 apresenta exemplos dessa patologia observada em elementos de pontes existentes. A desagregação refere-se à separação física de camadas ou fragmentos de concreto, resultando na perda de monolitismo e, frequentemente, na redução da aderência entre os agregados e da função aglomerante do cimento, podendo comprometer severamente a capacidade resistente da seção afetada.

(a) (b)

Figura 3.16 Exemplos de desagregação no concreto em elementos de pontes: (a) desagregação na base do pilar; (b) desagregação superficial em pilar de concreto

A principal causa das desagregações é, na maioria das vezes, a presença de sulfatos e cloretos, que reagem quimicamente com os produtos de hidratação do cimento. Outros fatores podem favorecer o fenômeno, tais como:

- uso de cimento inadequado para o ambiente;
- incorporação excessiva de cloretos em aditivos aceleradores de pega;
- adensamento ou cura deficiente do concreto.

Os sulfatos, em particular, são altamente agressivos. Presentes em águas subterrâneas, ambientes marinhos e efluentes industriais, podem reagir com os aluminatos hidratados do cimento, formando produtos expansivos, como o sal de Candlot, que provocam fissuração, empolamento e progressiva desintegração do concreto.

B. Disgregações

A disgregação do concreto diferencia-se da desagregação por ter origem predominantemente mecânica e física, e não química. Ela resulta de sobrecargas, impactos, restrições à deformação ou da pressão interna gerada pela corrosão das armaduras. Nesse último caso, a expansão dos produtos de corrosão do aço gera tensões de tração no cobrimento, levando à fissuração e ao destacamento do concreto.

A disgregação manifesta-se por quebras, lascamentos e desprendimentos, principalmente em bordas, quinas e regiões de cobrimento reduzido. Diferentemente da desagregação química, o concreto disgregado mantém suas propriedades intrínsecas, sendo o dano causado pela ação de esforços superiores à sua capacidade resistente. A Figura 3.17 apresenta exemplos de desagregação do concreto em elementos estruturais de pontes. Na Figura 3.17(a) observa-se disgregação localizada em pilar, enquanto na Figura 3.17(b) verifica-se a mesma manifestação patológica na face inferior do tabuleiro e vigas da ponte.

(a) (b)

Figura 3.17 Exemplos de disgregação no concreto em elementos de pontes: (a) disgregação localizada em pilar de concreto; (b) disgregação do concreto na face inferior do tabuleiro e vigas

C. Carbonatação

A carbonatação é um dos principais mecanismos de deterioração do concreto armado, especialmente em ambientes urbanos e industriais, onde a concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera é elevada. O processo de carbonatação ocorre quando o (CO_2) penetra no concreto por meio dos poros e microfissuras, reagindo com o hidróxido de cálcio $(Ca(OH)_2)$ presente na pasta de cimento, formando carbonato de cálcio $(CaCO3)$ e água, conforme a reação simplificada, representada pela Equação 1:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

O carbonato de cálcio formado possui pH neutro, reduzindo o pH da região carbonatada para valores inferiores a 9. O pH do carbonato de cálcio $(CaCO_3)$, em torno de 8 a 9, diminui a estabilidade química da camada passivadora do aço, originalmente com pH entre 13 e 14, facilitando o início da corrosão da armadura e o surgimento de fissuras. Quanto maior a concentração de CO_2, menor será o pH e, consequentemente, maior será a espessura da camada carbonatada no concreto.

Embora a carbonatação possa provocar um pequeno aumento de retração, ela não compromete, por si só, o desempenho do concreto simples, podendo inclusive torná-lo mais denso e menos permeável. No entanto, em estruturas de concreto armado, sua progressão até as armaduras representa um risco crítico à durabilidade, pois reduz a alcalinidade do meio e desencadeia o processo corrosivo.

A Figura 3.18 ilustra esquematicamente o mecanismo da carbonatação no concreto. Fissuras desempenham papel decisivo nesse processo, pois funcionam como caminhos preferenciais para a entrada de CO_2 e umidade, acelerando o avanço da carbonatação e a corrosão das armaduras. A presença de umidade pode ser evidenciada pela formação de eflorescências, depósitos esbranquiçados na superfície do concreto, resultantes da migração e precipitação de sais solúveis, como carbonatos e cloretos.

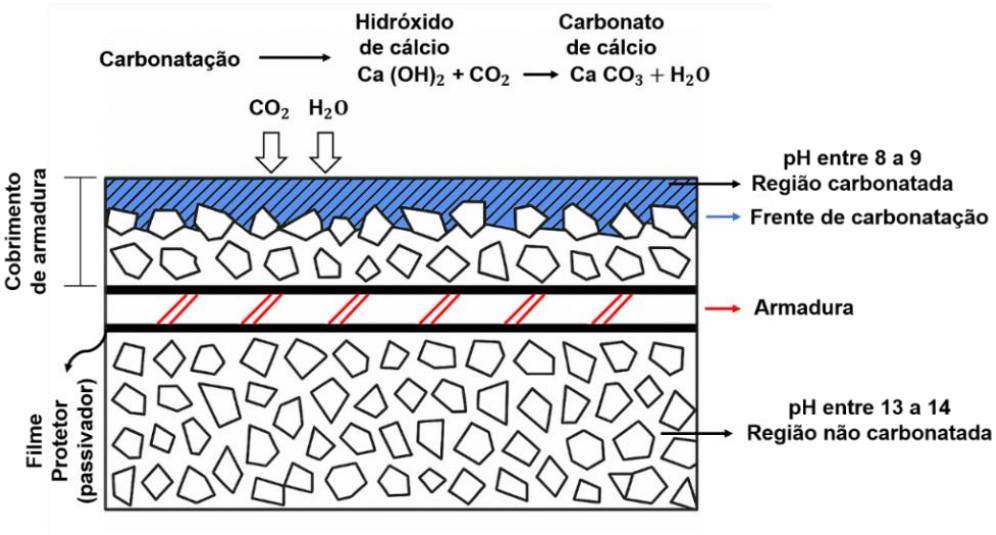


Figura 3.18 Esquema representativo do mecanismo de carbonatação

Fonte: Adaptado de Medeiros e Helene (2001)

A Figura 3.19 representa a evolução do processo ao longo do tempo, desde a região não carbonatada (t_1), com pH elevado e armadura passivada, até a região carbonatada (t_2), onde a redução do pH compromete a proteção do aço.

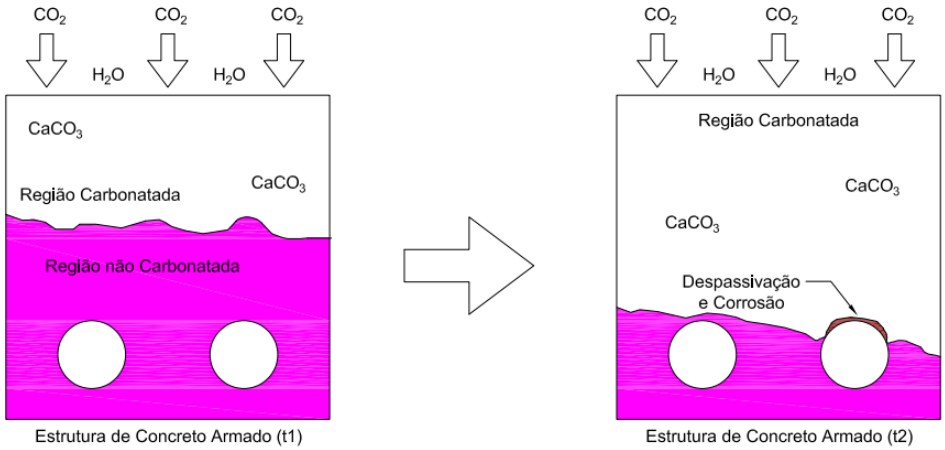


Figura 3.19 Representação da ação da carbonatação no concreto ao longo do tempo

Fonte: Adaptado de Tasca (2012)

O ensaio de determinação da profundidade da carbonatação é dada através dos indicadores de pH pelo método calorimétrico, com a solução de fenolftaleína em diversos pontos da estrutura de pontes. A profundidade da carbonatação é verificada pela diferença de coloração do ponto de viragem da fenolftaleína, como observa-se na Figura 3.20, em que o $Ca(OH)_2$ livre apresenta coloração rosada, enquanto a parte carbonatada é incolor. O ensaio é ágil e de simples execução, porém é importante destacar que a coloração rosa indica apenas a presença de $Ca(OH)_2$, não garantindo, necessariamente, a completa ausência de carbonatação.

Figura 3.20 Exemplo de carbonatação no concreto

Fonte: Medeiros *et al*. (2012)

D. Reação álcali-agregado ou álcali-sílica

A reação álcali-agregado (RAA), também denominada reação álcali-sílica (RAS), é um fenômeno químico expansivo que ocorre entre os íons alcalinos (Na^+ e K^+) presentes no cimento Portland, íons hidroxila (OH^-) da solução dos poros e certos constituintes silicosos, que podem estar presentes nos agregados. Esta reação, que provoca expansão e fissuração no concreto, ocasionando perda de resistência, de elasticidade e de durabilidade, pode manifestar-se também por meio de pipocamentos e exsudação de um fluido viscoso álcali-silicoso.

Atualmente, o fenômeno está bastante divulgado, sendo conhecidas as características dos cimentos e agregados que contribuem para a reação álcali-sílica. Embora dificilmente seja apontada como a causa primária do colapso, a fissuração provocada pela RAA pode contribuir para a aceleração de outros processos de deterioração no concreto armado, como a carbonatação e a corrosão das armaduras. Existem três tipos dessa reação:

- **Reação álcali-sílica:** envolve a presença de sílica amorfa ou tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais.
- **Reação álcali-silicato:** semelhante à reação álcali-sílica, no entanto, ocorre mais lentamente, com os silicatos presentes nos feldspatos, folhetos, argilosos, certas rochas sedimentares, metamórficas, magmáticas e a presença do quartzo deformado e minerais expansivos.
- **Reação álcali-carbonato:** envolve calcários dolomíticos e soluções alcalinas presentes nos poros do concreto.

Os principais fatores que influenciam a reação álcali-agregado e sua velocidade incluem:

- temperatura, com maior expansão em temperaturas mais elevadas;
- umidade elevada, essencial para a reação ocorrer;
- alcalinidade suficientemente alta da solução intersticial;
- presença de agregados reativos em concentrações dentro de uma faixa crítica;
- granulometria, onde a expansão aumenta à medida que a superfície específica diminui, intensificando a reatividade do material.

A RAA só se torna uma ameaça quando essas condições coexistem. Além disso, para que a reação ocorra, o agregado deve conter formas de sílica capazes de reagir com os íons hidroxila e álcalis da solução dos poros, como vidro vulcânico, sílica amorfa, sílica microcristalina, tridimita, cristobalita em faixas específicas de temperatura, opala, quartzo, calcedônia e feldspato deformados.

E. Desgaste de superfície

O desgaste das superfícies dos elementos do concreto pode assumir diferentes configurações, dependendo da fase de degradação do material, do tipo do elemento, do sistema construtivo e da natureza do agente de deterioração. Esse fenômeno pode evoluir de forma progressiva, sendo que a resistência à abrasão do material está relacionada com a qualidade da camada superficial. No avanço desta manifestação patológica, a resistência à abrasão depende da dureza dos agregados e da aderência entre a pasta de cimento e estes agregados.

Esse desgaste pode ter diversas origens, sendo as principais relacionadas a seguir:

- **Uso continuado:** ocorre nas superfícies sujeitas ao tráfego repetitivo, como as pistas de rolamento, tabuleiros e passarelas de concreto, levando à remoção progressiva da camada superficial.
- **Abrasão:** a ação abrasiva é mais acentuada em elementos de concreto submersos ou parcialmente imersos, como tubulões, pilares e blocos de fundação, especialmente quando sujeitos a correntes de água carregadas de partículas sólidas. A abrasão provocada pelo vento é, em geral, pouco significativa.
- **Cavitação:** é um fenômeno caracterizado pela formação de pequenas cavidades devido à ação de águas em movimento. Esse processo ocorre quando vazios se formam e colapsam rapidamente em decorrência da alta velocidade do fluxo, causando danos à superfície do concreto.

Esse processo compromete gradualmente a integridade do cobrimento, podendo expor agregados e armaduras e acelerar outros mecanismos de deterioração. Exemplos típicos dessas manifestações em superfícies de concreto sujeitas ao tráfego são apresentados na Figura 3.21(a) e Figura 3.21(b). Exemplos típicos dessas manifestações em elementos de concreto sujeitos à ação da água são apresentadas na Figura 3.22(a), Figura 3.22(b) e Figura 3.22(c).

(a) (b)

Figura 3.21 Exemplos de desgaste nas superfícies de concreto sujeitas ao tráfego: (a) desgaste acentuado do pavimento; (b) desgaste superficial em placas de concreto

(a) (b)

(c)

Figura 3.22 Exemplos de desgaste em superfícies de elementos de concreto imersos em água: (a) desgaste superficial em pilar de ponte; (b) desgaste na base de pilar próximo ao nível d'água; (c) perda de argamassa e exposição de agregados em elementos de concreto submetido à ação da água

F. Lixiviação

A lixiviação consiste na dissolução e carreamento dos compostos hidratados da pasta de cimento pela ação de águas puras, de águas carbônicas agressivas ou de águas ácidas. Esse processo resulta na remoção gradual dos constituintes solúveis do concreto, especialmente do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), levando à perda de massa e à modificação da microestrutura do material.

O fenômeno tem início, geralmente, nas camadas mais superficiais do concreto, onde ocorre a dissolução do hidróxido de cálcio e o consequente carreamento das partículas de areia e finos do cobrimento, conferindo ao elemento uma aparência porosa e esbranquiçada, característica dessa manifestação patológica.

A lixiviação contribui para o processo de carbonatação e a redução da área de seção de concreto e aço, podendo comprometer as características mecânicas da estrutura. Além disso, em determinadas condições, a remoção dos compostos de calcário pode resultar na formação de depósitos salinos na superfície do concreto, conhecidos como eflorescências. Alguns exemplos da manifestação dessa patologia são apresentados na Figura 3.23. Na Figura 3.23(a) observam-se manchas e escorrimentos decorrentes da lixiviação, enquanto na Figura 3.23(b) verificam-se depósitos esbranquiçados associados à percolação de água através do concreto.

(a) (b)

Figura 3.23 Exemplos de lixiviação em estruturas de concreto: (a) manchas e escorrimentos decorrentes da lixiviação na face inferior de elemento estrutural; (b) depósitos esbranquiçados associados à lixiviação em região de junta ou fissura

G. Nichos de concretagem

Os vazios de concretagem, também chamados de “ninhos” ou “nichos”, são espaços vazios que podem estar presentes na massa de concreto. Eles são causados em decorrência de falhas no processo de lançamento, vibração e adensamento. Esses vazios resultam na segregação do agregado graúdo, que se separa do agregado miúdo e da pasta de cimento, deixando espaços não preenchidos na matriz do concreto.

Mais do que um problema estético, os nichos de concretagem representam um defeito construtivo grave, pois podem:

- reduzir a seção resistente efetiva da peça estrutural;
- facilitar a penetração de agentes agressivos, como água, cloretos e dióxido de carbono;
- expor a armadura ao ambiente, favorecendo a corrosão e o desplacamento do concreto.

Falhas de concretagem não reparadas podem acarretar sérias consequências, principalmente em regiões agressivas e de difícil acesso à inspeção. Exemplos da ocorrência dessa patologia em pontes são ilustrados na Figura 3.24. Na Figura 3.24(a) observa-se a ocorrência de nichos na base de um pilar, enquanto na Figura 3.24(b) verifica-se a presença de vazios e agregados aparentes na face inferior de elemento estrutural.

(a) (b)

Figura 3.24 Exemplos de nichos de concretagem nas estruturas de concreto: (a) nichos de concretagem na base de pilar; (b) nichos de concretagem na face inferior de elemento estrutural

H. Perda de aderência

A perda de aderência é um dano de natureza estrutural que pode ter consequências severas para a integridade e o desempenho da estrutura. Essa ocorrência pode manifestar-se tanto entre camadas de concreto de idades diferentes, quanto entre o concreto e outro material.

No primeiro caso, está relacionada a um tratamento inadequado da superfície do concreto existente antes da aplicação do novo concreto, a um intervalo excessivo entre concretagens consecutivas ou ao surgimento de fissuras significativas no elemento estrutural. No segundo caso, ocorre principalmente devido à corrosão das armaduras, à disgregação do concreto ou à ação prolongada de incêndios ou cargas cíclicas. A Figura 3.25 apresenta um exemplo de perda de aderência em um pontilhão rodoviário.

Figura 3.25 Exemplo de perda de aderência nos elementos de concreto

I. Danos de colisões

Os danos por colisões são provocados por impactos diretos de veículos terrestres ou embarcações sobre elementos estruturais ou complementares das pontes. Esses eventos podem comprometer a integridade física dos componentes estruturais e a segurança operacional da obra.

As causas mais comuns incluem:

- colisões de caminhões com excesso de altura ou carga, que atingem pórticos de sinalização, passagens superiores ou vigas de bordo;
- impactos de veículos desgovernados contra defensas metálicas, barreiras de concreto, guarda-corpos ou pilares de apoio;

- acidentes com embarcações, em rios navegáveis, que colidem com pilares ou blocos de fundação, especialmente em períodos de cheia ou sob condições adversas de navegação.

No caso específico de passagens superiores, as vigas de concreto protendido, quando presentes, são particularmente vulneráveis a impactos de veículos que trafegam pela rodovia. A Figura 3.26 ilustra um dano típico causado por colisões de veículos de carga com altura superior ao permitido, uma ocorrência frequente em viadutos ou passagens com gabarito reduzido e desrespeito às restrições de altura estabelecidas.

Figura 3.26 Exemplo de danos por colisões nos elementos

J. Infiltração no concreto

As infiltrações constituem uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto, podendo comprometer a funcionalidade, a segurança e a durabilidades das pontes. A penetração e o acúmulo de água no interior do concreto favorecem processos de corrosão das armaduras, carbonatação acelerada, lixiviação, e fissuração por variação volumétrica decorrente de ciclos de umedecimento e secagem.

As águas das chuvas que incidem sobre as estruturas podem infiltrar-se por meio de fissuras, juntas deterioradas ou pontos de descontinuidade, principalmente devido à ausência e/ou à inoperância de dispositivos de drenagem adequados para sua condução segura. Essa patologia, em geral, é facilmente identificada pela presença de manchas na superfície do concreto, como ilustrado na Figura 3.27, as quais frequentemente indicam a origem do fluxo de água e evidenciam a deficiência dos dispositivos de drenagem da estrutura.

Figura 3.27 Exemplo de infiltrações nos elementos

K. Efeitos de altas temperaturas no concreto

Quando o concreto está exposto a altas temperaturas há uma redução progressiva de sua capacidade estrutural, embora possua certa resistência à ação do calor, por um tempo considerável, antes de atingir o colapso. Durante o aquecimento, ocorre a evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob forma livre ou combinada, resultando em um alívio de parte das tensões geradas com o calor.

Durante um incêndio, a estrutura e os demais elementos da construção absorvem calor, resultando em expansão térmica. Essa dilatação ocorre de maneira distinta no concreto e no aço, comprometendo a aderência entre os materiais e gerando tensões internas que provocam a desagregação do concreto, deixando as armaduras vulneráveis à ação direta do fogo. Quando exposto ao fogo, o concreto sofre uma mudança permanente de cor, cuja tonalidade varia conforme a temperatura atingida. As barras de aço das armaduras, por sua vez, são altamente sensíveis ao calor devido ao elevado coeficiente de dilatação térmica do material, mas o impacto sobre seu desempenho dependerá da espessura do cobrimento de concreto que as protege.

Antes do colapso pela elevação da temperatura, pode ocorrer o desplacamento das camadas superficiais quentes e camadas interiores mais frias. Este fenômeno é comumente identificado por *spalling* e pode ser verificado na Figura 3.28.

Figura 3.28 Exemplo de danos por efeitos de temperatura no concreto

L. Irregularidades geométricas em peças de concreto armado

As irregularidades geométricas constituem manifestações patológicas associadas, em geral, a falhas de execução, como imprecisão na montagem das fôrmas, deslocamento durante a concretagem, adensamento inadequado ou ausência de controle geométrico. Essas imperfeições podem afetar a planeza, o esquadro, o alinhamento e as dimensões finais dos elementos estruturais. Um exemplo típico desse tipo de anomalia é apresentado na Figura 3.29.

Figura 3.29 Exemplo de irregularidades geométricas em peças de concreto armado

Além do impacto estético, tais irregularidades podem provocar excentricidades não previstas, concentrações de tensões, dificuldades de acomodação de aparelhos de apoio e problemas de encaixe com elementos adjacentes, influenciando negativamente o comportamento estrutural e a durabilidade da obra.

M. Degradação do concreto por ação biológica

A degradação biológica ou biodeterioração é o processo de deterioração física e/ou química do concreto causado por organismos vivos, tais como fungos, algas, líquens, musgos, bactérias e insetos. Esse tipo de deterioração pode afetar tanto o aspecto estético quanto a integridade estrutural do material, reduzindo sua vida útil e desempenho ao longo do tempo. A biodeterioração pode ser classificada em três tipos:

- **Estética:** caracterizada pela alteração da aparência da superfície, como manchas, escurecimentos e formação de biofilmes.
- **Física:** associada ao crescimento de organismos que exercem pressão mecânica sobre os poros e fissuras do concreto, favorecendo a penetração de umidade e agentes agressivos.
- **Química:** decorrente das reações químicas promovidas pelas substâncias liberadas por microrganismos, que alteram o pH da matriz cimentícia e degradam os produtos de hidratação do cimento.

Um caso frequente em pontes é a presença de excrementos de morcegos, identificáveis por manchas escuras e acúmulos sob locais de pouso. Em alguns casos, excrementos mais antigos apresentam tonalidade acinzentada, como ilustrado na Figura 3.30.

Figura 3.30 Exemplo de manifestações patológicas no concreto devido à ação biológica

Esses excrementos podem acumular no chão, sob algum elemento da ponte, ou ainda, em componentes estruturais abaixo de onde os morcegos se empoleiram (VDOT, 2010). Quando em contato com água, são os principais responsáveis pela formação de sais que alteram o pH da estrutura, fazendo com que a partir do desequilíbrio ocorra a lixiviação, reação iônica e expansão das armaduras (Siedel *et al.*, 2008).

Além desse, dois agentes bastante destrutivos para o concreto são os cupins e as formigas. Os cupins podem se instalar em paredes e lajes, frequentemente através dos conduítes elétricos, destruindo tijolos e comprometendo a integridade estrutural, especialmente em edificações com lajes pré-fabricadas. Já as formigas costumam revolver o solo sob fundações superficiais, provocando recalques diferenciais que podem comprometer a estabilidade da estrutura de concreto e demandar intervenções corretivas.

N. Deterioração do concreto protendido

Elementos de concreto protendido podem ter sua capacidade resistente reduzida em consequência de diversos mecanismos de deterioração, tanto do concreto quanto das armaduras de protensão. Pequenas falhas de execução, proteção ou manutenção podem resultar em perda significativa de capacidade resistente, frequentemente associada a modos de ruptura frágil, sem sinais prévios evidentes.

A deterioração pode decorrer da ação combinada de fenômenos físicos, químicos e mecânicos, bem como de deficiências de projeto, detalhamento, execução ou manutenção. Os principais mecanismos observados são:

- perda de aderência entre o aço tensionado e o concreto, reduzindo o efeito da protensão, podendo ser bastante prejudicial;
- relaxação do aço de protensão, geralmente quando o sistema tem deformação constante, perdendo gradualmente a tensão;
- retração do concreto, podendo provocar fissuras na região tracionada da peça, eliminando a resistência a tração, antes mesmo de atuar qualquer solicitação;
- fluência do concreto, este fenômeno produz deformações elásticas e plásticas progressivas;
- corrosão do aço de protensão, quando em tensão, “*stress corrosion*”, fragilizando a seção da armadura, além de proporcionar a ruptura frágil;
- infiltração de água em dutos, ancoragens e juntas, especialmente em sistemas com injeção deficiente, favorecendo a corrosão dos cabos e a perda de capacidade estrutural.

3.2 AÇO

O aço é uma das ligas metálicas mais importantes e versáteis da engenharia estrutural, sendo largamente utilizado na construção de pontes. Trata-se de uma liga de ferro e carbono com outros elementos adicionais (silício, manganês, fósforo, enxofre, etc.), obtida por processos industriais que promovem a redução do minério de ferro e a remoção de impurezas indesejáveis.

Sua ampla utilização decorre de um conjunto de propriedades altamente favoráveis à engenharia estrutural, entre as quais se destacam: elevada resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, boa resistência à tração, compressão, flexão e torção, além de bom comportamento sob impacto, abrasão e desgaste. Quando adequadamente especificado e protegido, o aço também pode apresentar boa resistência às variações de temperatura, às intempéries e aos agentes químicos.

O aço é produzido em uma ampla variedade de tipos, classes e formas, de modo a atender às exigências específicas de cada aplicação. Essas variações decorrem do controle da composição química, dos processos de fabricação e dos tratamentos térmicos e mecânicos, que permitem ajustar propriedades como resistência, ductilidade, soldabilidade e tenacidade. Os produtos siderúrgicos são disponibilizados sob diversas formas geométricas, como chapas, perfis, tubos, barras, fios, cabos e cordoalhas.

Na engenharia de pontes, o aço pode ser empregado de diferentes maneiras:

- Como material predominante, nas estruturas metálicas, constituindo o sistema principal resistente (vigas, treliças, arcos e estais).
- Em estruturas de concreto armado, sob a forma de barras de aço, atuando como armadura passiva.
- Em estruturas de concreto protendido, na forma de fios ou cordoalhas, compondo a armadura ativa responsável pela aplicação das forças de protensão.
- Em pontes estaiadas ou pênseis, na forma de barras ou cabos múltiplos, responsáveis pela sustentação dos vãos principais.

3.2.1 Tipos de aços estruturais

O aço, em sua forma mais simples, é obtido a partir do ferro gusa refinado, com teor de carbono geralmente inferior a 2 %, sendo que a grande maioria dos aços possui menos de 1 % de carbono. A este aço básico podem ser adicionados outros elementos para melhorar ou introduzir características especiais. Os elementos de liga mais importantes são: manganês, níquel, vanádio, silício, zircônio, cobre, cobalto, cromo, tungstênio, nióbio, boro e molibdênio.

O manganês está presente na quase totalidade dos aços comerciais, contribuindo para o aumento da resistência mecânica, auxiliando na desoxidação do aço e mitigando os efeitos deletérios do enxofre. O cobre é empregado para melhorar a resistência à corrosão atmosférica, enquanto o níquel contribui para o aumento da resistência, dureza, tenacidade e durabilidade, além de melhorar o comportamento frente à corrosão.

O termo “aços estruturais” aplica-se a todos os aços que, em virtude de sua resistência, ductilidade e outras propriedades, são indicados para o uso de elementos que suportam cargas. Os aços utilizados em estruturas de concreto diferenciam-se principalmente por três aspectos:

- **Qualidade mecânica:** relacionada a propriedades como o limite de escoamento, a resistência à tração e o alongamento na ruptura.
- **Conformação superficial:** podendo ser lisa (com superfície laminada e mais áspera) ou nervurada, o que melhora a aderência ao concreto.
- **Tipo de fabricação:** incluindo o aço laminado com dureza natural (não tratado), e o aço deformado a frio, que passa por encruamento para aumentar a resistência.

Os aços são designados conforme as especificações da ABNT NBR 8800 e podem ser classificados em três grupos, de acordo com sua resistência ao escoamento (fy):

- **Aços-Carbono:** 195 a 260 Mpa.
- **Aços de alta resistência e baixa liga:** 290 a 345 Mpa.
- **Aços-Liga para construção, tratados termicamente:** 630 a 700 MPa.

3.2.1.1 Aços-carbono estruturais

Os aços-carbono constituem a categoria mais amplamente utilizada em aplicações estruturais, em razão de seu bom equilíbrio entre resistência, ductilidade, custo e facilidade de fabricação. De modo geral, esses aços apresentam os seguintes teores máximos típicos de elementos químicos:

- **Carbono:** até 2,0 %.
- **Manganês:** até 1,65 %.
- **Silício:** até 0,60 %.
- **Cobre:** até 0,35 %.

Além desses elementos, podem conter outros em quantidades residuais, sem especificação mínima, conhecidos como elementos residuais. Esses aços são empregados principalmente quando as solicitações de cálculo são baixas e o critério predominante de dimensionamento é a rigidez da estrutura. O aumento de resistência em relação ao ferro puro é proporcionado principalmente pelo carbono e, em menor escala, pelo manganês.

Além disso, com base no teor de carbono, os aços-carbono podem ser classificados em três categorias principais:

- **Baixo carbono (C < 0,29 %):** utilizados principalmente em aplicações que exigem boa ductilidade e conformação, como na estampagem de peças na indústria automobilística.
- **Médio carbono (0,30 % < C < 0,59 %):** empregados em elementos estruturais como perfis metálicos e vergalhões, oferecendo um bom equilíbrio entre resistência e ductilidade.
- **Alto carbono (0,60 % < C < 2,0 %):** aplicados na fabricação de componentes que exigem alta resistência e dureza, como molas, arames de alta resistência e ferramentas.

3.2.1.2 Aços de alta resistência e baixa liga

São os aços estruturais com limite de escoamento de 345 MPa, que apresentam melhorias em algumas propriedades mecânicas por meio da adição de pequenas quantidades de elementos de liga, sem a necessidade de tratamento térmico posterior.

Esses aços estão disponíveis sob diversas formas comerciais – chapas, perfis estruturais, barras, tubos estruturais, chapas finas e bobinas – e caracterizam-se pela combinação de alta resistência mecânica, boa soldabilidade e maior resistência à corrosão atmosférica, quando comparados aos aços-carbono convencionais.

A melhoria das propriedades mecânicas decorre principalmente da adição de elementos de liga em baixos teores, como manganês, nióbio, vanádio e titânio, que promovem o refinamento da microestrutura do aço, resultando em grãos mais finos. Esse mecanismo permite alcançar elevados níveis de resistência mesmo com teores de carbono relativamente baixos, geralmente em torno de 0,20 %, o que favorece significativamente a soldabilidade e o desempenho estrutural do material.

3.2.1.3 Aços-liga

Os aços-liga contém elementos de liga adequados para aplicações estruturais e são submetidos a tratamentos térmicos atingindo elevados níveis de resistência.

Apresentam limites de escoamento entre 630 e 700 Mpa, sendo significativamente mais resistentes do que os aços-carbono comuns. Dentre suas características, destacam-se:

- resistência à corrosão atmosférica duas a quatro vezes superior à do aço-carbono;
- alta resistência à abrasão, podendo ser aproximadamente o dobro quando comparado ao aço-carbono;
- excelente desempenho em ambientes agressivos e em peças altamente solicitadas.

De acordo com a ABNT NBR 7007, para fins de projetos estruturais, os aços podem ser designados por números que indicam seus respectivos limites de escoamento, em MPa, antecedidos das letras MR (média resistência) ou AR (alta resistência).

a) Aço ASTM A36 - MR 250

f_y = 250 MPa

f_u = 400 a 560 MPa

b) Aço de Alta Resistência - AR 350

f_y = 350 MPa

f_u = 450 MPa

c) Aço de alta resistência, resistente à corrosão - AR 350 COR

f_y = 350 MPa

f_u = 485 MPa

d) Aço de Alta Resistência - AR 415

f_y = 415 MPa

f_u = 520 MPa

No contexto internacional, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicou, em 1974, a norma ASTM A709 – *Standard Specification for Structural Steel for Bridges*, específica para aços estruturais empregados em pontes. As designações equivalentes adotadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) encontram-se na especificação M270.

3.2.2 Propriedades do aço

As principais propriedades mecânicas e físico-químicas do aço, relevantes para o comportamento estrutural em pontes, são listadas a seguir.

3.2.2.1 Resistência

O aço é um material isotrópico, capaz de resistir a elevadas tensões de compressão e de tração, apresentando comportamento mecânico semelhante sob ambos os tipos de solicitação. Sua resistência varia conforme o tipo e a aplicação, sendo o limite de escoamento uma das propriedades mecânicas mais relevantes para sua caracterização.

Conforme a ABNT NBR 7480, as armaduras destinadas ao concreto armado podem apresentar resistência característica de até 700 MPa.

De forma geral, os aços empregados na construção civil apresentam as seguintes faixas de resistência:

- **Aços estruturais:** entre 250 MPa e 350 Mpa.
- **Armaduras de concreto armado**: entre 500 MPa e 700 Mpa.
- **Conectores metálicos:** entre 300 MPa e 700 Mpa.
- **Aços para concreto protendido**: entre 1.450 MPa e 2.100 MPa.

3.2.2.2 Elasticidade

O módulo de elasticidade corresponde à razão entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante. Para os aços estruturais, esse parâmetro apresenta pouca variação entre os diferentes tipos de aço, sendo usualmente adotado o valor E = 200.000 MPa para fins de análise e projeto.

3.2.2.3 Ductilidade

A ductilidade é a capacidade do material de sofrer deformações plásticas significativas antes da ruptura, permitindo redistribuição de esforços e fornecendo sinais prévios de colapso. Essa propriedade é essencial para o desempenho seguro das pontes.

A ductilidade pode ser medida por parâmetros como:

- estricção (redução da área);
- alongamento total.

Em geral, todos os aços utilizados na construção de pontes apresentam boa ductilidade, ou seja, conseguem se deformar sem ruptura sob a ação de cargas. Entretanto, tratamento térmicos inadequados, processos de soldagem ou a fadiga provocada por carregamentos cíclicos podem comprometer essa propriedade, tornando o aço mais suscetível à fratura frágil.

3.2.2.4 Fragilidade

A fragilidade representa o comportamento oposto à ductilidade, caracterizando-se pela ruptura abrupta, com pouca ou nenhuma deformação prévia. Os aços podem apresentar comportamento frágil em determinadas condições, tais como:

- baixas temperaturas;
- efeitos térmicos localizados, como os gerados por soldagem;
- presença de tensões residuais;
- ações dinâmicas ou impactos.

O comportamento frágil do material é analisado sob dois aspectos principais:

- **Iniciação da fratura:** ocorre quando uma tensão ou deformação unitária elevada se desenvolve em uma região onde o material perdeu ductilidade.
- **Propagação da fratura:** pode se propagar rapidamente, mesmo com tensões moderadas, representando grave risco à integridade estrutural.

3.2.2.5 Resiliência

A resiliência é a capacidade do aço de absorver e restituir energia mecânica enquanto permanece no regime elástico. Corresponde à quantidade de energia elástica armazenada por unidade de volume até o limite de proporcionalidade.

3.2.2.6 Tenacidade

A tenacidade expressa a capacidade total do aço de absorver energia até a ruptura, englobando tanto as deformações elásticas quanto as plásticas. Materiais tenazes são menos suscetíveis a rupturas abruptas, mesmo na presença de defeitos ou concentrações de tensões.

3.2.2.7 Dureza

A dureza é a resistência do aço ao risco, abrasão ou penetração, sendo avaliada, na prática, pela dificuldade que a superfície oferece à penetração de um corpo mais duro. Está relacionada à resistência ao desgaste superficial, mas não deve ser confundida com resistência estrutural global.

3.2.2.8 Resistência ao fogo

Quando submetido a altas temperaturas, como em situações de incêndio, o aço sofre alterações significativas em suas propriedades mecânicas:

- A partir de aproximadamente 100 °C, perde-se o limite de escoamento bem definido, resultando em um diagrama tensão-deformação com curvatura acentuada.
- Com o aumento da temperatura, há redução progressiva do limite de escoamento, da resistência à ruptura e do módulo de elasticidade.

- Acima de 250 a 300 °C, o material também pode apresentar fluência, ou seja, deformações permanentes sob carga constante. Essas mudanças comprometem a estabilidade estrutural, tornando essencial a proteção contra incêndios em estruturas de aço.

Essas mudanças comprometem a estabilidade estrutural, tornando essencial a proteção contra incêndios em estruturas de aço.

3.2.2.9 Resistência à corrosão

Aços-carbono comuns, sem proteção por pintura ou revestimento, apresentam baixa resistência à corrosão, isto é, sofrendo oxidação rápida quando expostos ao ambiente, o que pode comprometer a integridade estrutural devido à perda de seção.

A proteção é geralmente feita por meio de:

- Sistemas de pintura, incluindo preparação adequada da superfície, aplicação de primer e camadas de acabamento.
- Galvanização, com aplicação de camada de zinco.
- Adição de elementos de liga, como o cobre, que favorecem a formação de películas protetoras naturais.

3.2.2.10 Soldabilidade

Os aços estruturais são, em geral, materiais soldáveis, mas é fundamental selecionar processos de soldagem adequados, compatíveis com a composição química do material. Devido à importância crescente da soldagem nas estruturas, as formulações químicas dos aços modernos são desenvolvidas com o objetivo de garantir boas condições de soldabilidade. De forma geral:

- Aços-carbono com até 0,25 % de carbono e 0,80 % de manganês são normalmente soldados sem necessidade de cuidados especiais.
- Para teores de carbono superiores a 0,30 %, é necessário realizar preaquecimento e resfriamento controlado, a fim de evitar baixa ductilidade e o surgimento de trincas.
- Nos aços de baixa liga, a soldagem é viável desde que sejam adotados eletrodos adequados e procedimentos compatíveis.

3.2.2.11 Fadiga

A fadiga é um fenômeno associado à redução progressiva da resistência de um material submetido a esforços repetidos ou ciclos sucessivos de carregamento, podendo levar à ruptura mesmo sob tensões inferiores às determinadas em ensaios estáticos convencionais. Esse efeito é especialmente relevante em estruturas sujeitas a ações dinâmicas, como pontes, sendo, em muitos casos, determinante no dimensionamento de seus elementos e detalhes estruturais.

A resistência à fadiga pode ser significativamente reduzida em regiões com:

- concentração de tensões;
- variações bruscas de geometria;
- corrosão localizada;
- descontinuidades geométricas;
- imperfeições de fabricação, montagem ou soldagem.

Detalhes construtivos inadequados e soldas mal executadas contribuem para a diminuição dessa resistência, uma vez que a soldagem pode alterar a microestrutura do aço e gerar tensões residuais.

3.2.3 Causas e mecanismos de deterioração

Para a adequada inspeção de pontes metálicas, é essencial que o inspetor reconheça os principais mecanismos de deterioração do aço, bem como suas causas, formas de manifestação e implicações estruturais. A correta identificação desses processos permite avaliar a gravidade dos danos observados, compreender sua evolução provável e subsidiar decisões de manutenção, recuperação ou reforço.

Nesta seção são apresentadas, de forma sucinta, as manifestações patológicas mais recorrentes em estruturas de aço, incluindo corrosão, trincas por fadiga, efeitos de sobrecargas, danos por colisões, danos associados a altas temperaturas e deficiências em ligações estruturais.

3.2.3.1 Corrosão

A corrosão constitui a principal causa de perda de seção resistente em elementos de aço e ocorre, predominantemente, em função da exposição do material a ambientes úmidos e à alternância de ciclos de molhagem e secagem. Trata-se de um processo espontâneo de natureza eletroquímica, no qual o aço atua como ânodo, sofrendo oxidação pela perda de elétrons para agentes oxidantes presentes no meio, resultando na formação de óxidos comumente denominados ferrugem.

Esse fenômeno pode ser compreendido como uma interação destrutiva entre o material metálico e o ambiente, resultando não apenas de reações químicas ou eletroquímicas, mas também de ações físicas ou mecânicas. A deterioração provocada por esse fenômeno compromete a integridade estrutural com o tempo, podendo se manifestar como:

- perda progressiva de seção resistente;
- destacamento ou falha de sistemas de proteção superficial;
- surgimento de fissuras e descontinuidades;
- redução da capacidade resistente e da vida útil da estrutura.

A degradação associada à corrosão (Figura 3.31) tende a ser progressiva e, em muitos casos, autoacelerante, exigindo monitoramento e ações corretivas pontuais para evitar falhas estruturais mais graves.

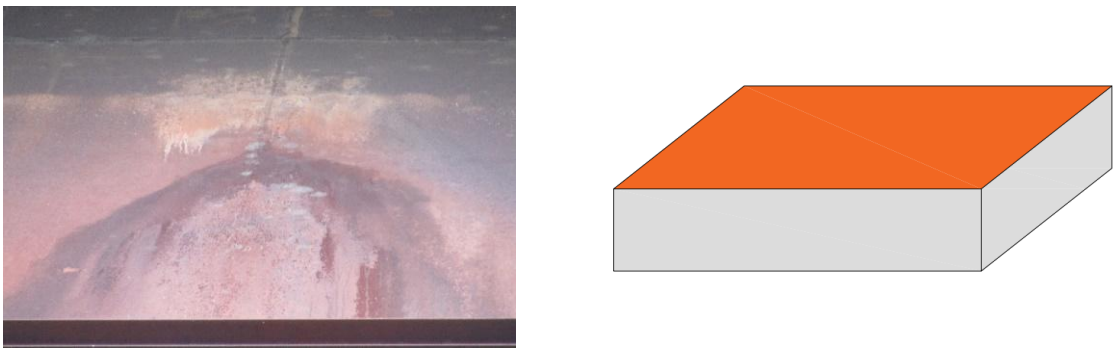
Figura 3.31 Exemplo de manifestações patológicas na estrutura metálica devido à corrosão

A corrosão pode ocorrer sob diferentes formas e o conhecimento delas é importante no estudo de um processo corrosivo. A caracterização da forma de corrosão auxilia no esclarecimento do mecanismo e na adoção de medidas eficazes de prevenção e controle.

Algumas das diferentes formas com que a corrosão pode se apresentar são: uniforme ou generalizada, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular, intragranular, filiforme e por esfoliação.

A. Corrosão uniforme ou generalizada

A corrosão uniforme (Figura 3.32), ou generalizada, é a forma mais comum e a menos agressiva observada em pontes metálicas. Essa forma de corrosão provoca perda de espessura relativamente homogênea de material ao longo da superfície exposta, resultando em redução gradual e uniforme da espessura dos elementos. Uma das causas mais prováveis é a exposição do aço carbono, sem qualquer tipo de proteção, a ambientes agressivos.



(a) (b)

Figura 3.32 Exemplo de corrosão uniforme em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com corrosão uniforme; (b) representação esquemática do processo de corrosão uniforme

Fontes: (a) SGE (2025), (b) Adaptado de Gentil (1996)

B. Corrosão por placas

A corrosão por placas (Figura 3.33) ocorre em pontos específicos da superfície de aço, sendo caracterizada pela formação de placas de corrosão pouco aderentes, que se desprendem continuamente. Esse processo resulta em perda de seção do material ou escavação localizada. Um exemplo desse tipo de deterioração é apresentado na Figura 3.33(a), enquanto a Figura 3.33(b) apresenta uma representação esquemática desse mecanismo.

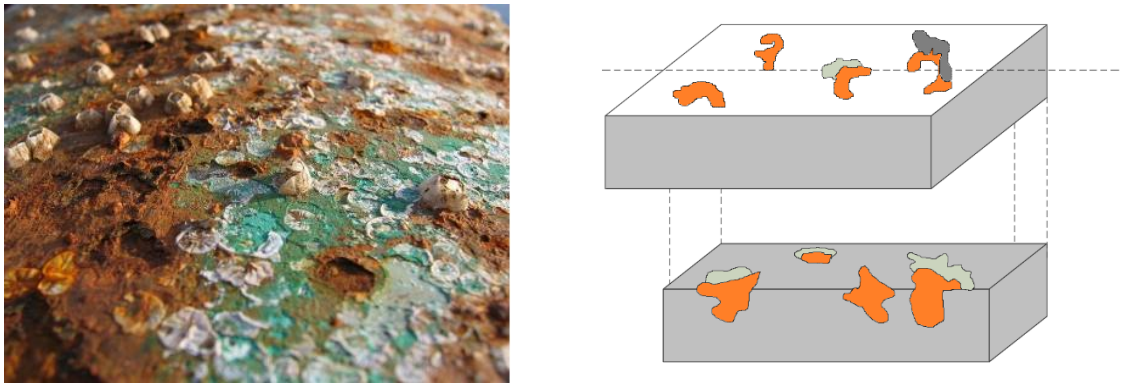
(a) (b)

Figura 3.33 Exemplo de corrosão por placas em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com destacamento de placas de corrosão; (b) representação esquemática da corrosão por placas

Fontes: Adaptado de Gentil (1996)

C. Corrosão alveolar

A corrosão alveolar (Figura 3.34) é uma forma de corrosão localizada que penetra camadas mais profundas do aço em comparação com a formação de placas. Apesar disso, o diâmetro dos alvéolos – cavidades arredondadas formadas na superfície de aço – costuma ser maior que sua profundidade, que ainda não é considerada muito acentuada. Esse tipo de corrosão pode comprometer a integridade do material ao longo do tempo. Um exemplo desse tipo de deterioração é apresentado na Figura 3.34(a), enquanto a Figura 3.34(b) ilustra esquematicamente o mecanismo de formação desses alvéolos.



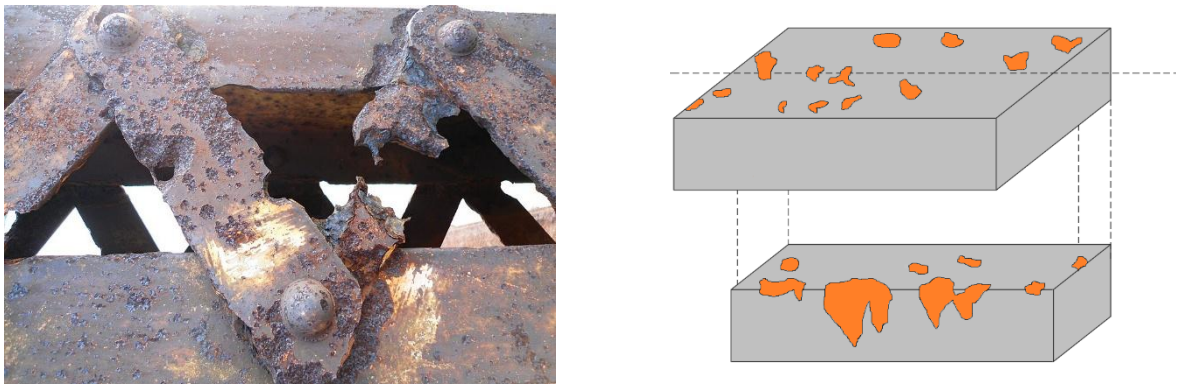
(a) (b)

Figura 3.34 Exemplo de corrosão alveolar em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com cavidades decorrentes de corrosão alveolar; (b) representação esquemática do processo de corrosão alveolar

Fontes: Adaptado de Gentil (1996)

D. Corrosão puntiforme ou por pites

A corrosão puntiforme (Figura 3.35), também conhecida como corrosão por pites, distingue-se da alveolar pelo fato de a profundidade das cavidades ser, geralmente, maior que seu diâmetro na superfície. Um exemplo desse tipo de deterioração é apresentado na Figura 3.35(a), enquanto a Figura 3.35(b) apresenta uma representação esquemática do mecanismo de formação dos pites.



(a) (b)

Figura 3.35 Exemplo de corrosão puntiforme (pites) em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com ocorrência de pites; (b) representação esquemática da corrosão puntiforme

Fontes: (a) Frodesiak (2013) e (b) Adaptado de Gentil (1996)

Esse tipo de corrosão ocorre frequentemente em conjunto com uma corrosão mais branda, como a uniforme, o que dificulta sua detecção visual em inspeções rotineiras. Caracteriza-se por ataques extremamente localizados, que se aprofundam de forma acelerada, podendo comprometer gravemente a integridade da estrutura e até levar à ruptura do elemento afetado.

E. Corrosão intergranular

A corrosão intergranular (Figura 3.36) caracteriza-se pelo ataque preferencial às regiões de contorno dos grãos da rede cristalina do aço, preservando, inicialmente, o interior dos grãos. Esse tipo de corrosão é favorecido pela atuação conjunta de um meio agressivo e de tensões residuais ou aplicadas, normalmente associadas a processos de soldagem, encruamento, tratamentos térmicos inadequados ou carregamentos estruturais.

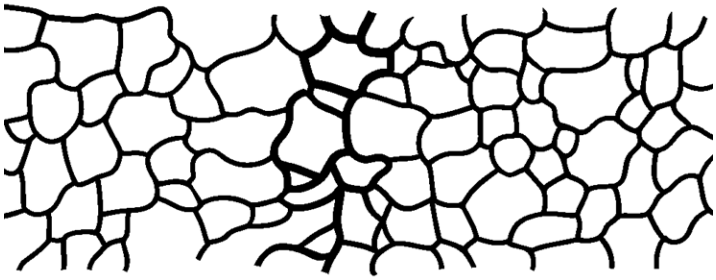


Figura 3.36 Esquema de representação da corrosão intergranular em estruturas metálicas

Fonte: Adaptado de Gentil (1996)

À medida que o ataque progride ao longo dos contornos de grão, ocorre degradação significativa das propriedades mecânicas do material, tornando-o suscetível à ruptura frágil sob esforços relativamente baixos, fenômeno conhecido como corrosão sob tensão.

F. Corrosão intragranular

Corrosão intragranular (Figura 3.37) é um tipo de corrosão que se desenvolve no interior dos grãos da estrutura cristalina do metal, ao contrário da intergranular, que ocorre nos contornos dos grãos. Esse ataque interno compromete diretamente as propriedades mecânicas do material, tornando-o mais frágil.

Como consequência, a peça metálica pode fraturar quando submetida a esforços mecânicos, podendo gerar efeitos severos na estrutura.

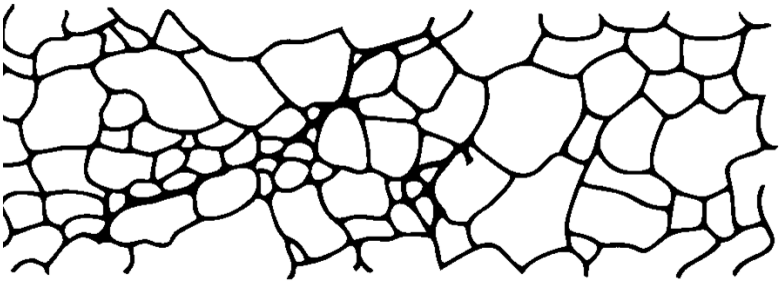


Figura 3.37 Esquema de representação da corrosão intragranular em estruturas metálicas

Fonte: Adaptado de Gentil (1996)

G. Corrosão filiforme

Corrosão filiforme (Figura 3.38) manifesta-se sob a forma de finos filamentos que se propagam em diferentes direções sobre a superfície de aço, sem se cruzarem. Esse tipo de corrosão é típico em estruturas metálicas revestidas com filmes protetores, como tintas, metais ou polímeros.

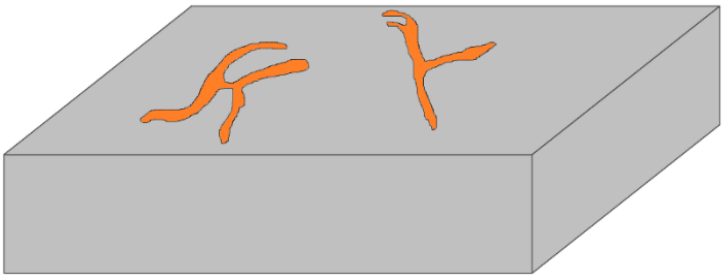


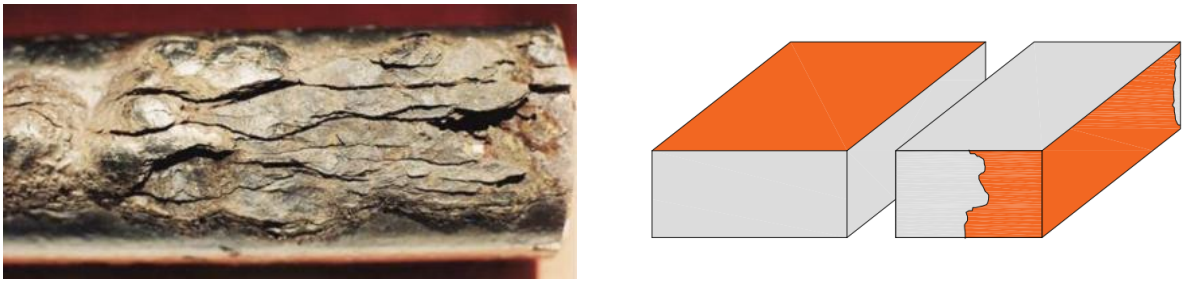
Figura 3.38 Esquema de representação da corrosão filiforme

Fonte: Adaptado de Gentil (1996)

H. Corrosão por esfoliação

Corrosão por esfoliação (Figura 3.39) é um tipo de corrosão que se processa paralelamente à superfície do metal, atingindo preferencialmente chapas e componentes extrudados. Esse fenômeno ocorre com maior intensidade em materiais cujos grãos foram alongados e achatados durante processos de fabricação, como laminação ou extrusão.

A propagação da corrosão entre as camadas de grãos pode levar ao destacamento em forma de “folhas” ou “lascas” do material de aço. Um exemplo desse tipo de deterioração é apresentado na Figura 3.39(a), enquanto a Figura 3.39(b) apresenta uma representação esquemática desse mecanismo.



(a) (b)

Figura 3.39 Exemplo de corrosão por esfoliação em estruturas metálicas: (a) superfície metálica com destacamento lamelar causado pela corrosão; (b) representação esquemática do processo de corrosão por esfoliação

Fontes: Adaptado de Gentil (1996)

I. Classificação segundo as causas predominantes

A corrosão também pode ser classificada conforme suas causas, que variam de acordo com o ambiente, a presença de organismos e as condições de esforço a que o material está submetido. A seguir, apresenta-se algumas das principais causas associadas aos diferentes tipos de corrosão:

- **Corrosão ambiental:** esse tipo de corrosão afeta, prioritariamente, metais em contato direto com o solo ou com a água. É causada principalmente pela presença de umidade, oxigênio, resíduos provenientes da própria rodovia e excrementos de pássaros.
- **Corrosão bacteriológica:** decorre da ação de microrganismos presentes em ambientes específicos como pântanos, solos ácidos, águas estagnadas ou contaminadas.
- **Corrosão sob tensões de tração:** conhecida como *stress corrosion*, ocorre quando o aço é submetido a elevadas tensões de tração em ambientes com agentes oxidantes. É o tipo de corrosão mais temido em cabos utilizados em estruturas protendidas e estaiadas.
- **Corrosão galvânica:** é o tipo de corrosão que ocorre quando metais diferentes estão em contato elétrico e expostos a um meio condutor (como a água), fazendo com que um deles corroa mais rapidamente.

3.2.3.2 Trincas por fadiga

As trincas por fadiga correspondem à manifestação patológica associada à nucleação e à propagação progressiva de fissuras em elementos submetidos a carregamentos cíclicos e flutuações de tensão. Em estruturas metálicas, essas trincas geralmente se iniciam em detalhes construtivos ou descontinuidades geométricas que concentram tensões, podendo evoluir de forma gradual até atingir condições críticas de ruptura.

O desenvolvimento dessas trincas pode permanecer pouco perceptível nos estágios iniciais, tornando essencial a realização de inspeções criteriosas em regiões suscetíveis à concentração de tensões. A presença de corrosão associada tende a acelerar a propagação das fissuras e aumentar a severidade do dano.

Entre os principais fatores relacionados ao surgimento e à propagação de trincas por fadiga, destacam-se:

- elevada amplitude na variação de tensões;
- alta frequência de tráfego de veículos pesados, especialmente caminhões;
- presença de detalhes construtivos que concentram tensões;
- qualidade inferior do material empregado;
- deficiências na execução de soldas;
- idade avançada da estrutura e seu histórico de carregamentos ao longo do tempo.

No caso das pontes e viadutos ferroviários, o aumento das cargas por eixo, da quantidade de veículos em circulação e das velocidades operacionais, registrados nos últimos anos, justifica a crescente preocupação com essas estruturas quanto ao estado limite de fadiga (Junqueira, 2019). Atenção também deve ser dada às obras rodoviárias, sobretudo em vias sem monitoramento do peso dos veículos.

Segundo a *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA), os principais fatores que governam a resistência à fadiga em um determinado ponto de um elemento ou conexão são o número de ciclos de tensão, a magnitude da variação de tensões e a categoria do detalhe crítico de fadiga associado ao elemento analisado (AREMA, 2015). Esses detalhes críticos devem ser evitados nos projetos ou, quando isso não for possível, devem ser considerados com redução de resistência à fadiga.

Nas inspeções de pontes em aço, ou em estruturas mistas de aço e concreto, as equipes de inspeção devem dar atenção especial à identificação de detalhes críticos de fadiga e à possível ocorrência de trincas nessas regiões. O Quadro AN 1 do Anexo A apresenta os detalhes críticos de fadiga indicados pela AREMA, nos quais as setas representam a direção das solicitações nos elementos analisados.

3.2.3.3 Sobrecargas excessivas

Sobrecargas excessivas ocorrem quando a ponte é submetida a cargas significativamente superiores àquelas previstas em projeto. O aço, como material estrutural, comporta-se de forma elástica até atingir o seu limite de escoamento. Quando carregada até atingir este limite, a estrutura se deforma e retorna à sua forma inicial após a remoção da carga.

Ultrapassado o limite de escoamento, a estrutura permanece deformada e a deformação que ocorre é a plástica, ou seja, permanente. Deformações plásticas causadas por sobrecargas excessivas podem ser observadas em elementos estruturais submetidos à tração ou à compressão.

- **Elementos tracionados:** as deformações se manifestam por alongamentos e redução da seção transversal.
- **Elementos comprimidos:** a deformação plástica pode se expressar na forma de flambagem.

Quando excessivas, essas deformações plásticas podem evoluir até o colapso do elemento estrutural, comprometendo a integridade e a segurança da obra como um todo.

3.2.3.4 Danos por colisões, altas temperaturas e ligações de aço

Danos por colisões ocorrem quando elementos estruturais não estão devidamente protegidos contrachoques de veículos, tornando-se suscetíveis a danos desta natureza. Embora tais danos sejam, em geral, facilmente identificáveis visualmente, sua avaliação precisa somente é possível após a remoção de detritos ou elementos soltos que possam obstruir a inspeção adequada da superfície metálica. A Figura 3.40 apresenta um exemplo típico de dano por colisão em estrutura de aço.

Figura 3.40 Exemplo de danos por colisão em elementos de pontes metálicos

Elementos de aço também podem sofrer deformações severas quando expostos a altas temperaturas. Além do amolecimento e alongamento do metal, o calor extremo pode provocar torções e empenamentos, comprometendo também os pontos de conexão, como rebites e parafusos. Quando submetido à compressão, o aço pode apresentar flambagem, especialmente em seções delgadas, como a alma de vigas longitudinais.

A resistência do aço estrutural começa a ser significativamente afetada a partir de aproximadamente 315 °C. Até essa temperatura, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade sofrem apenas reduções moderadas, da ordem de até 10 %. Entre 315 °C e 538 °C, ocorre uma queda acentuada das propriedades mecânicas, podendo o limite de escoamento e o módulo de elasticidade reduzir-se para cerca de 75 % dos valores originais. Acima de 538 °C, o comprometimento da capacidade resistente torna-se crítico. Para efeito de comparação, incêndios envolvendo combustíveis líquidos podem ultrapassar 800 °C, e incêndios com madeira podem atingir temperaturas superiores a 1.000 °C, superando amplamente os limites seguros para o aço estrutural.

Nas ligações de aço, as patologias mais recorrentes estão associadas a erros de concepção, corrosão, defeitos de fabricação de soldas e ligações parafusadas ou falhas de montagem. Na Figura 3.41, observa-se uma patologia decorrente de erro de execução. Quando uma estrutura é projetada, as ligações de aço são detalhadas e dimensionadas de acordo com os carregamentos previstos em projeto. Qualquer modificação no tipo de ligação durante a fase de execução, sem o devido respaldo técnico, pode comprometer o desempenho estrutural, tornando a ponte susceptível a patologias não previstas originalmente.

Figura 3.41 Exemplo de danos em ligações parafusadas

As duas formas mais comuns de ligação em estruturas de aço são:

- **Ligações parafusadas:** a transmissão dos esforços ocorre por meios indiretos, geralmente por atrito ou cisalhamento nas superfícies de contato. Sendo assim, as patologias associadas a este tipo de ligação envolvem problemas de resistência no fuste dos parafusos (região do furo) e fragilidade na chapa de ligação, além de relaxação dos parafusos, perda de elementos, erros de execução ou projeto e deformações localizadas.
- **Ligações soldadas:** os esforços atuantes são transmitidos diretamente por meio do cordão de solda, fazendo com que as peças ligadas se comportem como um único elemento estrutural. Os principais danos observados nesse tipo de ligação incluem fissuras no cordão de solda, fraturas nas regiões soldadas e deformações indesejadas provocadas por tensões residuais ou execução inadequada.

Em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos, como pontes e viadutos, é fundamental considerar os efeitos da fadiga dos materiais e da relaxação dos elementos de fixação, que podem comprometer significativamente o desempenho estrutural das ligações ao longo do tempo.

Outro dano recorrente nas ligações de aço é a corrosão das peças componentes. Conforme abordado neste capítulo, a corrosão pode se manifestar de diversas formas, com distintos níveis de severidade, dependendo das condições ambientais e das características do material. Na Figura 3.42, observa-se um exemplo de corrosão por esfoliação em uma ligação parafusada de uma ponte de aço.

Figura 3.42 Corrosão por esfoliação em ligações parafusadas

3.3 MADEIRA

A madeira constitui um dos materiais estruturais mais antigos empregados na construção de pontes, mantendo aplicação relevante em determinados contextos rodoviários brasileiros, especialmente em regiões de baixa densidade viária e difícil acesso logístico. Embora represente parcela reduzida do total de pontes no país, sua presença é significativa em trechos específicos da malha federal, demandando abordagem técnica própria quanto ao comportamento estrutural, durabilidade e inspeção.

De modo geral, essas pontes encontram-se implantadas em rodovias de baixo volume de tráfego, frequentemente caracterizadas por vias de leito natural. Nessas condições, fatores como disponibilidade regional de material, viabilidade econômica e facilidade executiva influenciam diretamente a adoção da madeira como solução estrutural.

Por se tratar de material anisotrópico, higroscópico e de origem biológica, o desempenho da madeira está diretamente associado à espécie empregada, ao teor de umidade, ao tratamento preservativo e às condições ambientais de exposição.

3.3.1 Distribuição das pontes de madeira no Brasil

As pontes de madeira sob administração federal apresentam maior concentração na Região Norte, com ocorrência predominante nos estados da Amazônia Legal. Verificam-se ainda registros pontuais nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste (Figura 3.43).

Figura 3.43 Desenho esquemático da distribuição de pontes de madeira no Brasil

Fonte: Coordenação de Planejamento (COPLAN) – consulta fevereiro de 2026

Essa distribuição está relacionada a:

- disponibilidade local de matéria-prima;
- histórico construtivo das rodovias federais;
- características hidrológicas regionais;
- viabilidade técnico-econômica frente a alternativas estruturais.

A predominância em vias de leito natural implica maior exposição a condições ambientais severas, como elevada umidade, variações sazonais e presença de material particulado, fatores que influenciam diretamente os mecanismos de deterioração e as estratégias de manutenção.

3.3.2 Características e desempenho do material

A madeira apresenta elevada relação resistência/peso, facilidade de processamento e montagem, além de ser recurso natural renovável amplamente disponível em determinadas regiões do país. Tais características contribuem para sua viabilidade técnica em situações específicas.

Entre os principais aspectos favoráveis destacam-se:

- boa resistência mecânica associada à baixa massa específica;
- facilidade executiva e adaptabilidade a intervenções;
- desempenho satisfatório frente a impactos e cargas de curta duração;
- integração paisagística e disponibilidade regional.

Por outro lado, o material apresenta limitações inerentes à sua natureza:

- tendência à fluência sob carregamento permanente;
- variações dimensionais associadas ao teor de umidade;
- suscetibilidade ao ataque de agentes biológicos;
- sensibilidade à ação do fogo.

Essas características estão diretamente vinculadas às propriedades físicas e mecânicas específicas de cada espécie e às condições de exposição da estrutura.

3.3.3 Durabilidade e prevenção da deterioração

Por ser material de origem biológica, a madeira está sujeita à degradação provocada por agentes físicos, químicos e biológicos, tais como fungos apodrecedores, insetos xilófagos, organismos marinhos perfuradores, intempéries e ação do fogo. A intensidade e a velocidade da deterioração dependem do teor de umidade, da ventilação, da espécie utilizada, do detalhamento construtivo e do tratamento preservativo adotado.

As medidas voltadas ao aumento da durabilidade devem ser consideradas desde as etapas iniciais de projeto e construção. De modo geral, a prevenção ou redução da biodeterioração pode envolver:

a) Utilização de espécies com alta resistência natural, embora isso não elimine os riscos relacionados a fenômenos físicos e químicos.

b) Aplicação de produtos químicos, como preservantes, retardantes de chama e revestimentos protetores.

c) Modificação permanente da estrutura química dos polímeros da madeira.

3.3.4 Considerações para inspeção

Embora a madeira corresponda a parcela limitada do acervo nacional de pontes, os inspetores devem estar aptos a reconhecer e registrar as manifestações patológicas típicas desse material, incluindo perda de seção, deformações excessivas, fissuração, ataque biológico e deterioração em regiões de apoio e conexões.

3.3.5 Propriedades físicas

A madeira apresenta propriedades físicas que influenciam diretamente seu comportamento estrutural, destacando-se: classificação botânica, anatomia, características de crescimento e teor de umidade.

3.3.5.1 Classificação da madeira

As madeiras empregadas estruturalmente são provenientes de árvores fanerógamas exógenas, cujo crescimento ocorre por meio da formação de anéis concêntricos, característica que permite a obtenção de peças serradas com orientação definida das fibras. As principais espécies comerciais utilizadas na construção classificam-se em dois grandes grupos:

- **Gimnospermas (coníferas):** caracterizam-se por estrutura anatômica predominantemente composta por traqueídes, resultando, em geral, em madeira de menor densidade e maior homogeneidade estrutural. Comercialmente são denominadas *softwoods*.
- **Angiospermas (folhosas):** apresentam estrutura anatômica mais complexa, com presença de vasos condutores, normalmente associada a maior densidade e resistência mecânica. São conhecidas comercialmente como *hardwoods*. No Brasil, diversas espécies desse grupo são tradicion almente denominadas “madeiras de lei”.

A distinção entre *softwoods* e *hardwoods* refere-se à classificação botânica e não implica, necessariamente, diferença direta de dureza ou resistência mecânica.

3.3.5.2 Anatomia da madeira

A madeira é material heterogêneo constituído por células organizadas predominantemente no sentido longitudinal do tronco. Sua estrutura anatômica influencia diretamente o comportamento mecânico, a permeabilidade e a durabilidade. Entre os principais elementos anatômicos destacam-se:

- **Células ocas (celulose e lignina):** garantem alta resistência com baixa densidade.
- **Anéis de crescimento:** alternância entre lenho claro (primavera) e escuro (verão), visíveis na seção transversal.
- **Alburno:** parte externa ativa, responsável pelo transporte de seiva; geralmente mais clara e permeável ao tratamento.
- **Cerne:** parte interna inativa, dá suporte à árvore e é mais escura e resistente à decomposição.
- **Veios (grãos):** fibras orientadas longitudinalmente, conferem maior resistência mecânica.
- **Raios lenhosos:** células que vão do centro à casca, dão resistência transversal.
- **Medula**: centro inicial da árvore, mais resistente à deterioração.
- **Canais de resina:** presentes em coníferas produzem resina (ausentes nas *hardwoods*).
- **Casca:** camada externa de proteção - parte interna que transporta nutrientes.

A compreensão desses elementos é fundamental para interpretação de fissuras, perda de seção e manifestações patológicas observadas em inspeção.

3.3.5.3 Características de crescimento

Irregularidades decorrentes do crescimento natural da árvore podem comprometer o desempenho estrutural, especialmente quando localizadas em regiões tracionadas ou de maior solicitação. Algumas delas incluem:

- **Nós e buracos de nós:** resultam do crescimento da madeira ao redor de galhos incorporados ao tronco, provocando desvios nas fibras. Variam quanto à dimensão, forma e posição na seção transversal, podendo assumir geometrias circulares ou alongadas e reduzir a resistência local.
- **Grão inclinado:** ocorre devido ao afilamento natural da árvore ou quando a madeira é serrada em direção não paralela às fibras.
- **Fendas, trincas e descolamentos:** são separações das células ao longo do sentido das fibras, geralmente causadas por secagem rápida ou desigual, provocando contrações diferentes nos sentidos radial e tangencial. As trincas e fendas se desenvolvem atravessando os anéis de crescimento, enquanto os descolamentos ocorrem entre eles.
- **Madeira de reação:** tipo de madeira anormal que se forma em árvores inclinadas, onde a medula se encontra deslocada do centro. Esse tipo de madeira tende a ser gelatinosa e apresenta trincas transversais durante a secagem.

Durante a inspeção, deve-se avaliar a influência dessas características na capacidade resistente efetiva do elemento estrutural.

3.3.5.4 Teor de umidade

O teor de umidade constitui um dos parâmetros mais relevantes para o desempenho estrutural da madeira, influenciando diretamente:

- estabilidade dimensional;
- variação de peso;
- resistência mecânica;
- resistência à decomposição.

A madeira é material higroscópico, estabelecendo equilíbrio com a umidade relativa do ambiente. Variações no teor de umidade provocam retrações e expansões dimensionais, especialmente nas direções radial e tangencial, podendo gerar fissuração, empenamento e perda de contato em ligações estruturais.

Teores elevados favorecem o desenvolvimento de fungos apodrecedores e reduzem a resistência mecânica, além de intensificarem os efeitos de fluência sob carregamento permanente.

A redução da umidade pode ocorrer de forma natural, por meio da secagem ao ar, ou artificialmente, mediante secagem controlada em estufa. Para aplicação estrutural, recomenda-se que a madeira seja empregada com teor de umidade compatível com as condições ambientais de serviço, de modo a minimizar variações dimensionais e degradação prematura.

3.3.6 Propriedades mecânicas

O comportamento estrutural da madeira é definido por suas propriedades mecânicas, fortemente influenciadas pela orientação das fibras, pelo teor de umidade e pela presença de descontinuidades naturais. Destacam-se o comportamento ortotrópico, a resposta à fadiga, a resistência a impactos e a fluência.

3.3.6.1 Comportamento ortotrópico

A madeira é material heterogêneo e ortotrópico, apresentando propriedades mecânicas distintas segundo três direções principais:

- longitudinal (paralela às fibras);
- radial;
- tangencial.

A maior resistência e rigidez ocorrem na direção longitudinal, em função do alinhamento das fibras celulares ao longo do tronco. Nas direções radial e tangencial, os valores de resistência são significativamente inferiores.

Em elementos estruturais correntes, as peças são usualmente serradas com orientação longitudinal predominante das fibras, razão pela qual os ensaios mecânicos e parâmetros de dimensionamento concentram-se nessa direção. Entretanto, solicitações transversais e efeitos locais devem ser considerados na avaliação estrutural.

3.3.6.2 Características de fadiga

A madeira apresenta comportamento satisfatório sob carregamentos cíclicos moderados, sendo, em geral, menos sensível à fadiga do que materiais metálicos. Em estruturas usuais, a presença de defeitos naturais – como nós, grãos inclinados e fissuras – tende a influenciar de forma mais significativa a resistência do que os efeitos de fadiga propriamente ditos.

Assim, a fadiga raramente constitui o mecanismo predominante de falha em pontes de madeira, especialmente quando submetidas a volumes de tráfego reduzidos.

3.3.6.3 Resistência a impacto

A madeira apresenta boa capacidade de absorção de energia, podendo suportar ações de curta duração superiores às cargas permanentes de serviço. Essa característica decorre da sua estrutura fibrosa e da capacidade de deformação antes da ruptura.

Entretanto, impactos repetitivos ou de elevada intensidade podem provocar fissuração, esmagamento localizado e dano à estrutura celular, resultando em perda de capacidade resistente.

3.3.6.4 Características de fluência

A fluência é o fenômeno em que uma peça de madeira, sob carga constante, apresenta um aumento gradual da deformação com o tempo. Isso é particularmente visível em madeiras verdes, que podem sofrer deflexões significativas se secarem enquanto estão sob carga. Nesses casos, é comum que a deformação inicial dobre com o passar do tempo. Por isso, em projetos, considera-se muitas vezes o dobro da deformação elástica inicial para acomodar a fluência. Já peças parcialmente secas podem apresentar alguma fluência, enquanto as que foram completamente secas mostram pouca ou nenhuma deformação adicional permanente ao longo do tempo.

3.3.7 Causas e mecanismos de deterioração

Apesar de ser um material bastante eficiente para aplicações estruturais, como em pontes, a madeira pode sofrer deteriorações caso não receba tratamento adequado, sendo especialmente suscetível à ação de fungos, insetos e outros agentes biológicos. Mesmo com tratamento superficial, o interior da peça ainda pode estar exposto a riscos, caso esses organismos consigam atravessar a camada externa. A suscetibilidade da madeira varia conforme a espécie e a sua classificação de qualidade.

A preservação da madeira contribui para o aumento de sua resistência contra organismos deterioradores, por meio do tratamento aplicado. O aparecimento de problemas patológicos pode estar relacionado a uma ou mais falhas ocorridas durante o processo construtivo, sendo consequência da ação de agentes físicos, químicos, mecânicos ou biológicos.

Assim, compreender os mecanismos de deterioração é essencial para a aplicação de um tratamento adequado, ressaltando a importância da inspeção e da manutenção periódica.

A deterioração da madeira consiste em um processo que compromete negativamente suas propriedades, sendo causada, em geral, por dois tipos principais de agentes: bióticos e abióticos. Na Figura 3.44 são apresentadas as principais características que distinguem a ação desses agentes no processo de deterioração da madeira.

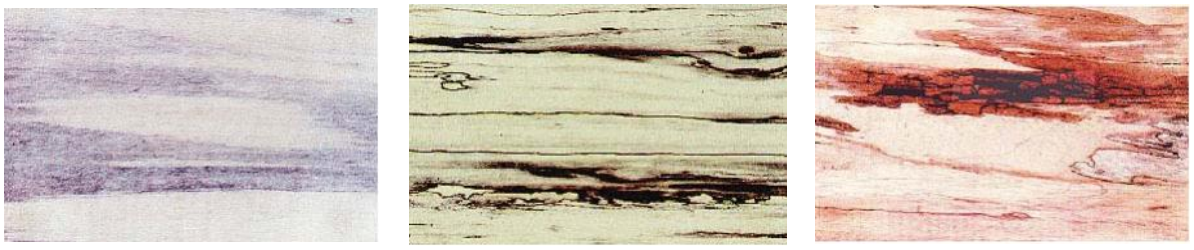
Figura 3.44 Agentes de deterioração da madeira

Fonte: Calil Júnior *et al*. (2006)

3.3.7.1 Agentes bióticos

A. Apodrecimento por fungos

O ataque por fungos constitui o mecanismo mais recorrente de deterioração biológica da madeira, podendo, em estágios avançados, comprometer significativamente a seção resistente (Figura 3.45).



(a) (b) (c)

Figura 3.45 Apodrecimento da madeira causado por fungos: (a) alteração de coloração; (b) degradação das fibras da madeira; (c) deterioração avançada com desagregação do material

Fonte: Calil Júnior (2014)

O desenvolvimento fúngico depende da presença simultânea de condições ambientais favoráveis, destacando-se:

- **Oxigênio:** indispensável à atividade metabólica dos fungos. Em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio, a atividade tende a ser reduzida ou inibida, situação normalmente observada apenas em peças permanentemente submersas ou enterradas.
- **Temperatura:** o desenvolvimento dos fungos é favorecido na faixa de 24 °C a 29 °C. Em temperaturas inferiores a 0 °C, a atividade fúngica é interrompida, e acima de 49 °C os fungos são eliminados, condições normalmente alcançadas apenas em processos industriais, como a secagem em estufa.
- **Alimento:** a própria madeira constitui o substrato nutritivo dos fungos, razão pela qual o uso de preservantes é fundamental para inibir seu desenvolvimento.
- **Umidade:** é o fator isolado mais determinante para o crescimento fúngico. A madeira precisa ter ao menos 20 % de umidade para permitir o crescimento fúngico, o qual se intensifica acima de 30 %. Chuvas, neve e fontes como condensação ou contato com o solo aumentam essa umidade, especialmente em fissuras e juntas, favorecendo o surgimento dos fungos.

Os principais indícios de apodrecimento incluem:

- alteração de coloração;
- amolecimento superficial;
- perda de coesão das fibras;
- redução da resistência mecânica.

B. Infestação de insetos

A infestação por insetos xilófagos constitui mecanismo relevante de deterioração biológica, podendo provocar perda significativa de seção resistente e comprometimento da capacidade estrutural (Figura 3.46).

Diversos organismos utilizam a madeira como fonte de alimento ou abrigo, destacando-se cupins, formigas carpinteiras e outros insetos perfuradores. Diferentemente do ataque por fungos, a infestação pode ocorrer mesmo em condições de umidade moderada, dependendo da espécie envolvida.

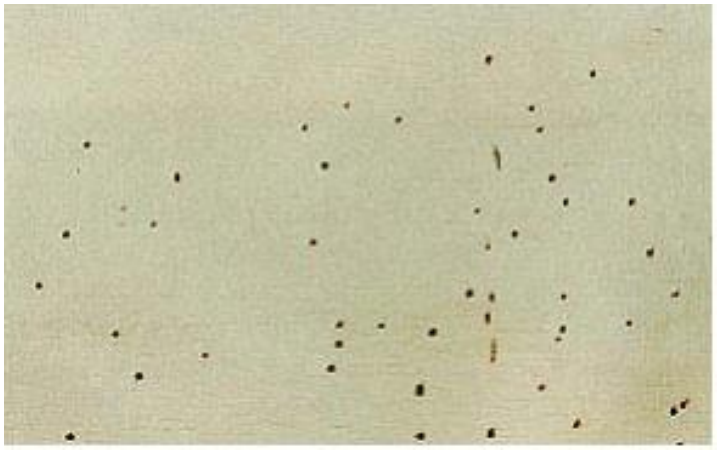


Figura 3.46 Infestações de insetos

Fonte: Calil Júnior (2014)

C. Furadores marinhos

Este agente é raramente encontrado, uma vez que as pontes estão, em sua maioria, situadas sobre cursos de água doce. Os organismos envolvidos são, basicamente, moluscos e crustáceos. Esses organismos têm potencial altamente destrutivo, sendo capazes de deteriorar completamente estacas e estruturas de madeira em questão de poucos meses.

3.3.7.2 Agentes abióticos

A. Abrasão mecânica

A abrasão mecânica constitui mecanismo de deterioração associado ao desgaste superficial progressivo dos elementos estruturais, resultando em redução da seção resistente e comprometimento do desempenho estrutural (Figura 3.47).

Nas pontes de madeira, o desgaste mais recorrente ocorre na superfície de rolamento, em decorrência do tráfego de veículos, especialmente em vias de leito natural, onde a presença de material particulado intensifica o processo abrasivo.

Figura 3.47 Abrasão mecânica

Fonte: Bigelow *et al.* (2007)

Podem ainda contribuir para danos mais severos:

- sobrecarga de veículos;
- recalques diferenciais;
- impactos diretos;
- ação de detritos transportados pelo fluxo do curso d'água.

Em inspeções, deve-se avaliar:

- redução visível da espessura da peça;
- exposição de fibras;
- perda de uniformidade superficial;
- comprometimento da capacidade resistente em regiões críticas.

B. Luz ultravioleta

A exposição prolongada à radiação ultravioleta (UV) promove degradação fotoquímica da lignina presente na camada superficial da madeira, resultando em fragilização, perda de coesão das fibras e alteração de coloração (Figura 3.48). Esse processo afeta predominantemente a superfície exposta, caracterizando-se por aspecto acinzentado, fissuração superficial e desprendimento de fibras. Em geral, o dano apresenta profundidade limitada e exerce influência reduzida sobre a capacidade estrutural global.

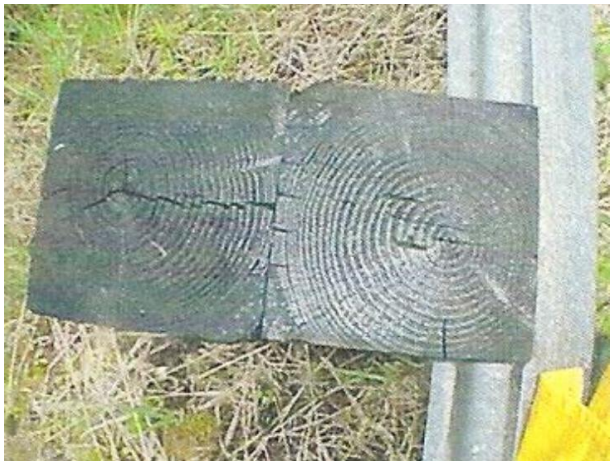


Figura 3.48 Topo de pilares danificados pela luz ultravioleta

Fonte: Brashaw *et al*. (2012)

Entretanto, quando associado à abrasão, intemperismo ou ausência de manutenção, a remoção progressiva da camada degradada pode resultar em diminuição das dimensões da peça e exposição de camadas internas à ação da umidade e de agentes biológicos.

Durante a inspeção, deve-se avaliar:

- presença de fissuração superficial;
- desprendimento de fibras;
- redução local de seção em regiões mais expostas;
- ausência ou falha de proteção superficial (revestimentos ou tratamentos protetivos superficiais).

C. Corrosão

A corrosão de conectores metálicos constitui mecanismo indireto de deterioração da madeira, ocorrendo na interface madeira–metal quando há presença de umidade (Figura 3.49). O processo corrosivo resulta na liberação de produtos de corrosão que podem provocar:

- escurecimento da madeira adjacente;
- degradação localizada das paredes celulares;
- aumento da retenção de umidade na região de contato;
- redução da resistência na zona afetada.

Figura 3.49 Manchas na madeira por corrosão

Fonte: SHUPE *et al. (*2008)

Além da perda de seção do próprio conector metálico, a deterioração da madeira na interface pode comprometer a eficiência da ligação estrutural.

Durante a inspeção, deve-se observar:

- manchas escurecidas ao redor de parafusos, pregos ou chapas metálicas;
- presença de ferrugem;
- folgas nas ligações;
- amolecimento localizado da madeira na interface.

D. Degradação química

A degradação química da madeira decorre do contato com substâncias agressivas, como ácidos ou bases, capazes de alterar sua composição estrutural. Em pontes rodoviárias, esse mecanismo é pouco frequente, ocorrendo principalmente em situações excepcionais, como derramamentos acidentais de produtos químicos ou exposição a efluentes contaminados.

As bases tendem a degradar componentes como hemicelulose e lignina, podendo provocar alteração de coloração e perda de integridade superficial. Já os ácidos afetam principalmente a celulose e a hemicelulose, resultando em redução de resistência mecânica e perda de massa.

E. Remoção de madeira

A remoção parcial de material em elementos estruturais constitui mecanismo de comprometimento associado a intervenções posteriores à construção, tais como instalação de utilidades, adaptações funcionais ou reparos inadequados.

Cortes, entalhes ou perfurações executadas sem análise estrutural podem reduzir significativamente a seção resistente, especialmente quando localizados em regiões tracionadas ou de maior solicitação.

A diminuição da seção transversal de vigas, longarinas ou travessas pode resultar em:

- redução da capacidade resistente;
- aumento das tensões atuantes;
- incremento das deformações;
- alteração do comportamento estrutural previsto em projeto.

F. Movimento de nós e distorções

A utilização de madeira com elevado teor de umidade pode resultar em movimentações dimensionais após a instalação, à medida que o material atinge equilíbrio higroscópico com o ambiente.

A secagem sob restrição estrutural pode provocar:

- retração diferencial nas direções radial e tangencial;
- fissuração longitudinal;
- empenamentos e torções;
- deslocamento relativo de nós;
- rupturas localizadas em regiões de maior solicitação.

Essas deformações podem alterar o alinhamento dos elementos, comprometer o desempenho das ligações e gerar redistribuição de esforços não prevista em projeto.

Durante a inspeção, devem ser observados empenamentos excessivos, desalinhamentos e abertura de juntas associadas à variação de umidade.

G. Instabilidade ou deslocamentos

A instabilidade estrutural pode manifestar-se por deslocamentos laterais acentuados, rotação excessiva de elementos ou comportamento tipo pórtico, frequentemente associados a:

- ausência ou deterioração de elementos de contraventamento;
- cortes ou remoções indevidas;
- perda de rigidez em ligações;
- degradação localizada de seções resistentes.

Deslocamentos excessivos também podem estar relacionados a sobrecargas, recalques diferenciais ou perda de capacidade resistente ao longo do tempo.

Durante a inspeção, devem ser avaliados o prumo dos pilares, o alinhamento longitudinal das vigas e a integridade do sistema de contraventamento.

H. Fissuração

As fissuras em elementos de madeira são frequentemente decorrentes de variações de umidade e secagem após a instalação. Podem ocorrer no sentido longitudinal ou transversal às fibras.

De modo geral, fissuras superficiais associadas à retração não implicam, isoladamente, perda significativa de capacidade resistente. Entretanto, sua avaliação deve considerar:

- profundidade e extensão;
- localização na seção transversal;
- ocorrência em regiões tracionadas ou próximas a ligações;
- possibilidade de retenção de umidade no interior da fissura.

I. Danos devido ao fogo

A exposição ao fogo provoca carbonização da camada superficial da madeira, formando uma zona carbonizada que atua como isolante térmico e retarda a elevação de temperatura no núcleo da seção (Figura 3.50).

Figura 3.50 Seção transversal de madeira submetida ao fogo

Fonte: Pinto e Calil Junior (2004)

Em elementos de grande seção, a baixa condutividade térmica da madeira contribui para que parte significativa do núcleo interno mantenha propriedades mecânicas residuais por determinado período.

Entretanto, a avaliação pós-incêndio deve considerar:

- profundidade da camada carbonizada;
- redução efetiva de seção resistente;
- integridade das ligações metálicas;
- presença de fissuração associada ao choque térmico.

A verificação da seção remanescente é fundamental para determinar a necessidade de reforço ou substituição do elemento.

4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS COMPLEMENTARES

4.1 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

4.1.1 Geral

Nos trechos correntes da rodovia, o pavimento constitui um sistema estrutural formado por múltiplas camadas – revestimento, base, sub-base e subleito – que trabalham em conjunto para absorver, redistribuir e transmitir as cargas do tráfego ao terreno.

Sobre as pontes, o pavimento desempenha funções distintas daquelas observadas nos trechos correntes da rodovia. Diferentemente do pavimento apoiado sobre o solo, ele não integra um sistema dimensionado para redistribuir as cargas do tráfego por meio de sucessivas camadas estruturais. No tabuleiro, atua principalmente como camada funcional de rolamento, contribuindo para a regularização da superfície, o conforto e a segurança do tráfego. Além disso, participa da transmissão e da distribuição local das cargas dos veículos para a laje do tabuleiro. Sua contribuição estrutural é limitada e está associada principalmente à proteção da laje contra o desgaste, à estanqueidade do sistema e à mitigação de concentrações de tensões superficiais.

Durante a inspeção, o pavimento deve ser analisado não apenas como um elemento funcional, mas também como um indicador indireto do comportamento da estrutura subjacente.

Defeitos recorrentes, localizados ou de rápida evolução podem estar associados a problemas estruturais na laje do tabuleiro, tais como fissuração, deformações excessivas ou falhas de estanqueidade, devendo ser interpretados como sinais de alerta para a necessidade de investigações complementares.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam exemplos de danos no pavimento associados, respectivamente, à degradação de uma junta longitudinal e à ruína localizada de uma laje, evidenciando o papel do pavimento como indicador de anomalias estruturais durante as inspeções.

(a) vista superior (b) vista inferior

Figura 4.1 Danos no pavimento rodoviário devido à degradação da junta longitudinal: (a) vista superior do pavimento asfáltico com falhas alinhadas à junta longitudinal; (b) vista inferior da estrutura evidenciando a junta longitudinal com processo de degradação avançado

(a) vista superior (b) vista inferior

Figura 4.2 Danos no pavimento rodoviário devido à ruína da laje: (a) vista superior evidenciando buraco na pista; (b) vista inferior da estrutura mostrando a ruína da laje

4.1.2 Trincas devido à junta de dilatação

Quando as juntas de dilatação da ponte são recobertas pelo pavimento, a movimentação natural da estrutura fica restringida, o que leva ao surgimento de fissuras no revestimento asfáltico (Ferreira, 2013). Essas fissuras, geralmente transversais, aparecem na região correspondente à junta de dilatação e, se não houver manutenção adequada, podem evoluir e causar danos mais severos à estrutura. A Figura 4.3 ilustra esse tipo de manifestação patológica no pavimento. Na Figura 4.3(a) observa-se a fissuração inicial alinhada à junta de dilatação, enquanto a Figura 4.3(b) apresenta uma trinca mais desenvolvida no pavimento decorrente da movimentação da junta.

(a) (b)

Figura 4.3 Trincas no pavimento junto à junta de dilatação: (a) fissuração inicial alinhada à junta de dilatação; (b) trinca mais desenvolvida no pavimento associada à movimentação da junta

4.1.3 Região de transição ponte-aterro

A região de transição entre a ponte e o aterro de acesso constitui um dos pontos mais sensíveis do sistema viário. Diferenças de rigidez entre a estrutura da ponte e o maciço do aterro, recalques diferenciais, falhas na drenagem e deficiência de compactação do aterro de acesso favorecem o surgimento de irregularidades no pavimento nessa região.

Entre os problemas mais recorrentes (Figura 4.4), destacam-se:

- o desempenho insuficiente das lajes devido à fragilidade do material do aterro;
- a formação de vazios na cabeceira da ponte por compactação inadequada;
- erosão do aterro de acesso;
- falhas no sistema de drenagem;
- selagem deficiente das juntas;
- tráfego com cargas elevadas e variações volumétricas decorrentes de efeitos térmicos.

Essas condições favorecem o surgimento de danos na entrada da ponte, tais como buracos na pista de acesso, fissuras e desníveis acentuados.

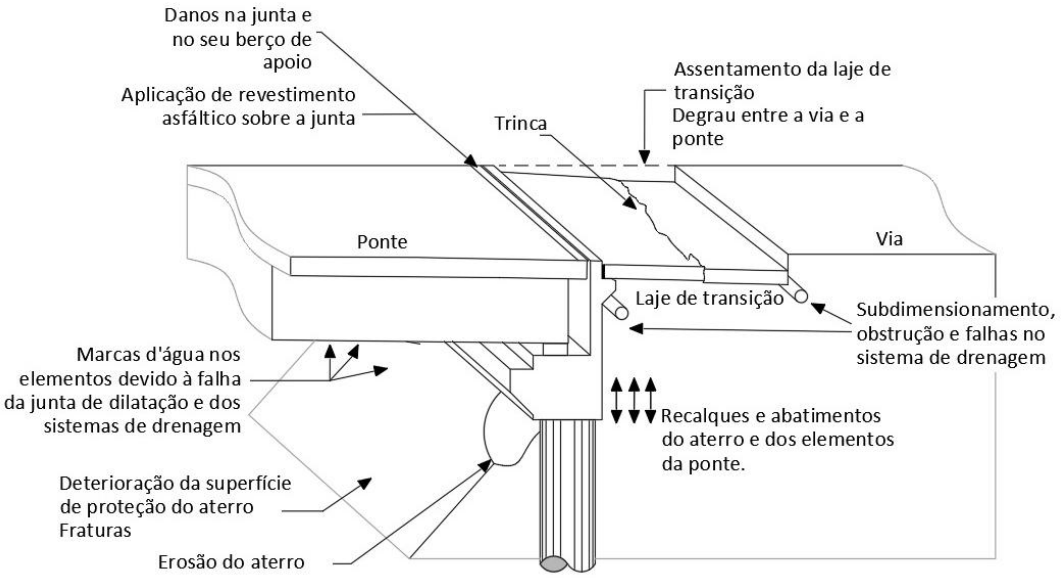


Figura 4.4 Esquema das manifestações patológicas frequentes nas proximidades da ponte

A Figura 4.5 apresenta exemplos de manifestações patológicas no pavimento na região de ligação entre a ponte e a rodovia, decorrentes dos fatores anteriormente mencionados.

(a) (b)

Figura 4.5 Manifestações patológicas no pavimento na região do encontro das pontes: (a) danos ao pavimento associados à instabilidade do talude e (b) fissuração do pavimento associada à laje de transição

Na inspeção, deve-se observar atentamente:

- a regularidade da superfície na aproximação da ponte;
- a presença de desníveis ou degraus na ligação com o tabuleiro;
- sinais de erosão ou deficiência de drenagem no aterro de acesso;
- a condição da laje de transição, quando existente.

4.1.4 Falhas localizadas no pavimento

As falhas localizadas no pavimento do tabuleiro incluem panelas, buracos, desplacamentos, ondulações restritas e deteriorações pontuais junto a barreiras, dispositivos de drenagem e juntas de dilatação. Essas manifestações podem resultar da infiltração de água, da perda de aderência entre camadas, de falhas construtivas ou da ação repetida do tráfego.

Embora, em muitos casos, apresentem extensão limitada, tais falhas são relevantes no contexto da inspeção de pontes, pois favorecem a entrada de água na estrutura, aceleram processos de deterioração do concreto e de corrosão das armaduras, além de impactarem a segurança e o conforto dos usuários.

Durante a inspeção, essas ocorrências devem ser registradas quanto à sua localização, extensão e severidade, avaliando-se sua possível relação com deficiências no sistema de drenagem, no funcionamento de elementos complementares ou nas manifestações patológicas na própria estrutura do tabuleiro.

Esse tipo de dano, ilustrado na Figura 4.6, é classificado como de severidade elevada, pois compromete o desempenho do pavimento, potencializa a infiltração de água na estrutura e pode resultar no aumento da frequência e dos custos das intervenções de manutenção.

(a) (b)

Figura 4.6 Falhas e defeitos no pavimento rodoviário: (a) deterioração localizada do revestimento asfáltico; (b) degradação do pavimento com perda de material

4.2 PAVIMENTO FERROVIÁRIO

4.2.1 Geral

O pavimento de uma ponte ferroviária corresponde à extensão da via permanente sobre a ponte. Seus principais componentes, nesse caso, são os trilhos, os acessórios de fixação e, na maioria dos casos, os dormentes e o lastro. O tabuleiro de uma ponte ferroviária deve ter funções essenciais como: distribuir as cargas provenientes da via permanente e da circulação dos trens para a superestrutura e mesoestrutura da ponte; e preservar o alinhamento e o nivelamento dos trilhos.

Existem três principais categorias de tabuleiros de pontes ferroviárias, sendo:

- estrado com lastro;
- estrado sem lastro;
- estrado com fixação direta.

Dessas três categorias, as pontes de estrado com lastro e de estrado sem lastro são as mais comuns, sendo os estrados de fixação direta utilizados apenas em soluções especiais.

O papel do estrado como interface entre o trem e a superestrutura da ponte é crucial. Sujeitos à ação direta do trem, os pavimentos das pontes ferroviárias tendem a desenvolver defeitos mais rapidamente e demandar mais manutenção do que os demais elementos da estrutura da ponte. Além disso, danos menos aparentes na estrutura principal da ponte podem resultar em defeitos mais aparentes no pavimento ferroviário da ponte. Desta forma, um defeito no estrado pode indicar uma condição mais crítica na estrutura principal. Por estas razões, é importante que o pavimento ferroviário de cada ponte ferroviária seja cuidadosamente inspecionado regularmente.

Este capítulo descreve inicialmente as três categorias principais de tabuleiros de pontes ferroviárias e, em seguida, analisa quais defeitos procurar no pavimento ferroviário durante a inspeção desse elemento. Nesta seção serão definidas as categorias de tabuleiro, identificados os componentes típicos e discutidas as vantagens e desvantagens de cada configuração.

4.2.1.1 Estrado com lastro (ponte lastrada ou lastreada)

O estrado com lastro consiste em trilhos fixados a dormentes convencionais apoiados em um leito de lastro, o qual é confinado por um tabuleiro que está conectado à estrutura da ponte (Figura 4.7). Em algumas pontes, este tabuleiro é parte integrante da própria estrutura e contribui para resistir a esforços de cisalhamento e flexão, bem como por conter a seção de lastro. Este é normalmente o caso em pontes de aço, mistas e de concreto. Contudo, em algumas pontes metálicas, o tabuleiro apenas suporta o lastro e transfere a carga para a estrutura principal abaixo, sem contribuir com qualquer resistência estrutural para o vão.

Figura 4.7 Estrado com lastro

As pontes com estrado lastrado apresentam diversas vantagens e são amplamente utilizadas em linhas de alto volume de tráfego, carga por eixo e velocidade, destacando-se:

- Elevada capacidade de amortecimento proporcionada pelo lastro, reduzindo os impactos transmitidos à estrutura.
- Menor suscetibilidade da estrutura principal a defeitos gerados por juntas de trilho, rodas defeituosas e falhas de amortecimento dos veículos ferroviários.
- Facilidade de manutenção da geometria da via, sendo possível utilizar na ponte os mesmos equipamentos empregados na via fora da ponte.
- Possibilidade de correção do nivelamento por meio da regularização do lastro, sem prejuízo estrutural.

No entanto, algumas limitações devem ser consideradas na concepção e manutenção desse tipo de estrado:

- Aumento significativo do peso próprio devido ao lastro, exigindo maior capacidade portante da estrutura da ponte e elevando o custo construtivo.
- Risco de retenção de umidade quando a drenagem é inadequada, podendo gerar deterioração prematura da estrutura principal.
- Altura total elevada do estrado, restringindo sua aplicação em locais com folgas verticais reduzidas.

O conhecimento dessas características é essencial para o processo de inspeção, projeto e manutenção de pontes ferroviárias com estrado lastrado, devendo-se avaliar periodicamente o confinamento do lastro, o funcionamento da drenagem e a preservação da geometria da via.

4.2.1.2 Estrado sem lastro (ponte de estrado aberto ou open deck)

O estrado sem lastro, também denominado estrado aberto ou open deck, caracteriza-se pelo apoio direto dos dormentes - geralmente de madeira ou poliméricos - sobre as longarinas da ponte (Figura 4.8). Os estrados abertos são normalmente usados em longarinas de aço ou concreto, entretanto as pontes de concreto sem lastro são menos usuais. Ao contrário do estrado com lastro, o estrado sem lastro não contribui para a resistência estrutural do vão. As longarinas, em tabuleiros abertos, estão sujeitas a maiores forças de flexão e cisalhamento, bem como amplificações dinâmicas decorrentes da passagem dos trens. Geralmente, os dormentes são fixados nas longarinas por meio de entalhes na madeira em profundidade suficiente para restringir a sua movimentação lateral e suportar os esforços horizontais.

Figura 4.8 Estrado sem lastro

O estrado aberto apresenta características que justificam sua ampla utilização em determinadas condições de projeto e operação:

- Menor peso próprio, reduzindo as cargas transmitidas aos elementos principais da ponte.
- Facilidade de instalação e montagem da superestrutura da ponte.
- Custo inicial de construção geralmente inferior ao de estrados com lastro ou com fixação direta.
- Adequação em trechos com restrições de gabarito inferior, devido à menor altura total do estrado em relação aos sistemas lastrados.

Algumas limitações importantes devem ser consideradas na adoção de estrados abertos, destacando-se a maior dificuldade para a manutenção dos dormentes entalhados e para ajustar e manter a geometria da via na ponte e em suas transições, bem como o desempenho inferior no amortecimento dos impactos gerados pela passagem dos trens, o que resulta em maior diferença de rigidez entre a ponte e os demais trechos da via.

4.2.1.3 Estrado com fixação direta

No estrado com fixação direta (Figura 4.9), os trilhos são ancorados diretamente na estrutura principal da ponte, sem a utilização de dormentes ou camada de lastro intermediária. Essa configuração é menos comum e é adotada, normalmente, quando o gabarito superior ou inferior é restrito, ou ainda em condições especiais de operação em ferrovias de alta velocidade e sistemas metroviários, por exemplo.

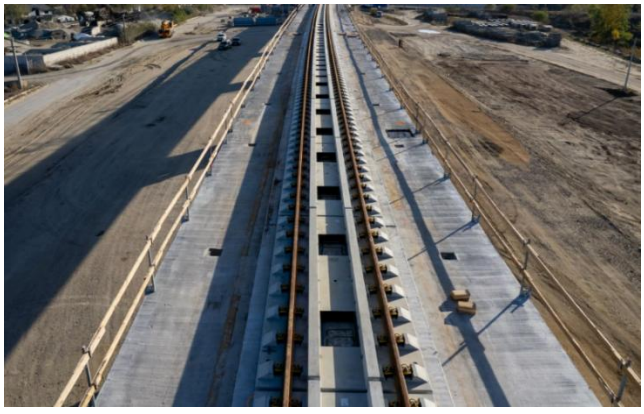


Figura 4.9 Estrado com fixação direta

Fonte: Slab Track Austria (2025)

Quando corretamente instalados e mantidos, os estrados de fixação direta proporcionam excelente manutenção da geometria da via.

Apesar do desempenho geométrico favorável, algumas limitações devem ser consideradas:

- Maior complexidade de instalação e manutenção em comparação com estrados convencionais.
- Baixa capacidade de amortecimento dos impactos gerados pela passagem dos trens.
- Introdução de rigidez elevada na via permanente, devido à ausência de elementos de distribuição e absorção de esforços.

Devido à natureza proprietária da maioria dos sistemas de fixação direta, e à significativa variação entre seus projetos, não é possível fornecer uma diretriz abrangente para inspeção direta da plataforma de fixação. Este documento apresenta apenas considerações gerais e recomendações básicas. Para procedimentos específicos de inspeção e manutenção, recomenda-se consultar diretamente o fabricante e especialistas do sistema em uso.

4.2.2 Manifestações patológicas em pavimentos ferroviários (anomalias)

Existem várias maneiras pelas quais o tabuleiro de uma ponte ferroviária pode desenvolver defeitos. Devido à variedade de configurações estruturais e condições operacionais, é inviável apresentar neste manual todas as formas possíveis de deterioração. Dessa forma, apresentam-se a seguir as manifestações patológicas mais recorrentes, com o objetivo de fornecer orientação inicial aos processos de inspeção e avaliação do pavimento ferroviário, sem pretensão de esgotar o tema.

4.2.2.1 Geometria de via-alinhamento, greide da via e bitola

Independentemente do tipo de estrado, a manutenção da geometria da via – compreendendo o alinhamento dos trilhos, o greide da via e a bitola – constitui o critério primário para avaliar a condição do pavimento ferroviário. O objetivo principal de um tabuleiro é manter a geometria da linha férrea sobre a ponte e a perda de qualquer um desses três atributos deve levantar preocupações e pode indicar que o estrado ou a estrutura principal desenvolveu alguma anomalia. Durante as inspeções, deve-se verificar minuciosamente:

- **Posicionamento da grade de dormentes e trilhos:** importante que ela esteja centralizada entre os elementos principais da superestrutura da ponte.
- **Alinhamento dos trilhos:** observando oscilações ou desalinhamentos ao longo da via.
- **Curvatura e superelevação:** quaisquer alterações devem ser avaliadas em vias curvas.
- **Greide:** deve observar os pontos altos e baixos da via, bem como quaisquer desnivelamentos longitudinais ou transversais.

Manifestações patológicas no alinhamento dos trilhos ou no greide da via poder ser um indicador da existência de uma anomalia na estrutura da ponte, como recalque ou falha de algum elemento estrutural da ponte. A localização das anomalias de geometria de via deve ser anotada antes da inspeção do restante da estrutura.

Ainda dentro das anomalias de geometria de via nós temos a bitola aberta, bitola fechada, descasamento das pontas de trilhos em juntas, desnivelamento do perfil longitudinal Figura 4.10(a), desnivelamento transversal Figura 4.10(b), desnivelamento periódico ou sequencial na superelevação, desalinhamento em curva, desalinhamento em tangente, excesso de superelevação em tangente, em curva circular ou na espiral, deficiência de superelevação e variação do grau de curvatura, entre outros. Para todos os casos citados, devem ser observados os parâmetros-limite conforme ABNT NBR 16387.

(a) (b)

Figura 4.10 Desnivelamento da via: (a) longitudinal e (b) transversal

4.2.2.2 Trilho

Os defeitos em trilhos são classificados em duas categorias: internos e externos (superficiais), conforme descrito na ABNT NBR 7640. A inspeção dos trilhos em pontes ferroviárias deve ser realizada por um inspetor de via qualificado. Desta forma, a inspeção do trilho não será abordada em profundidade nesta seção.

Em algumas situações, um defeito no tabuleiro ou na estrutura principal resultará num desgaste incomum do trilho. Se for encontrado desgaste incomum no trilho, sua localização deverá ser anotada antes de inspecionar o restante da estrutura para que o inspetor possa procurar uma possível causa raiz. A Figura 4.11 ilustra um exemplo desse cenário, apresentando (a) fratura no trilho e (b) defeito superficial no trilho.

(a) (b)

Figura 4.11 (a) fratura no trilho e (b) defeito superficial no trilho

4.2.2.3 Contratrilhos

O contratrilho funciona como um trilho auxiliar, posicionado próximo ao trilho de rolamento, na região de abrangência da ponte e serve para guiar os rodeiros em caso de descarrilamento, auxiliando na transposição da ponte (Figura 4.12). Dessa forma, evita que o veículo saia da estrutura da ponte ou colida com seus elementos, reduzindo o risco de acidentes graves e protegendo a composição, a própria ponte e seu entorno. As inspeções nos contratrilhos devem observar, no mínimo, os requisitos contidos na ABNT NBR 16836.

Figura 4.12 Via com contratrilho sobre ponte

4.2.2.4 Estrado com lastro

A. Vazamento de lastro

Juntas defeituosas, desnivelamentos, danos mecânicos e corrosão podem gerar buracos nos tabuleiros, resultando em perda de lastro. Vazamentos de lastro prejudicam o suporte dos dormentes, resultando em desnivelamentos na via (Figura 4.13). Geralmente, os vazamentos não são imediatamente aparentes na parte superior da ponte, tornando importante inspecionar a parte inferior do tabuleiro de lastro para detectar buracos.

Figura 4.13 Falha em junta provocando a fuga de lastro

B. Defeitos no guarda-lastro

Os guarda-lastros são componentes essenciais na preservação da via permanente em uma ponte de estrado com lastro. A perda do guarda-lastro pode levar ao enfraquecimento dos ombros de lastro, ao desnivelamento e à diminuição da estabilidade da via.

Os defeitos mais recorrentes em guarda-lastro incluem:

- **Falha por sobrecarga de lastro:** guarda-lastro de concreto tendem a falhar quando submetidos à carga excessiva de lastro. O aumento progressivo de material sobrecarrega o elemento, provocando rotação para fora da via e podendo evoluir para falha total.
- **Lascamentos, fissuras e desplacamentos:** guarda-lastro executado com concreto de baixa qualidade ou expostos à umidade excessiva pode apresentar degradação superficial ao longo do tempo. Embora fissuras e desplacamentos leves normalmente não representem risco imediato à circulação ferroviária, a fragmentação progressiva na região das juntas pode evoluir até causar perda de lastro, devendo ser monitorada e corrigida preventivamente.

C. Carga excessiva de lastro

Uma das vantagens de um tabuleiro lastreado é que quantidades razoáveis de lastro podem ser adicionadas para corrigir defeitos de nivelamento na superfície da via. Contudo, o acúmulo excessivo de material pode aumentar significativamente a carga transmitida à estrutura da ponte. Normalmente, as pontes lastreadas são projetadas com 20 a 45 cm de lastro sob as dormentes, e valores superiores a essa faixa elevam as tensões no reservatório de lastro (tabuleiro), na estrutura principal e na subestrutura da ponte.

O lastro adicional pode:

- Em uma estrutura pode ser distribuído uniformemente ao longo da ponte, como resultado de um levantamento dos trilhos.
- Em alguns casos, o lastro adicional é empilhado em um ponto baixo criado pelo rebaixamento de uma área da ponte.
- Obstruir sistemas de drenagem, sistemas de sinalização ou passarelas de serviço.

No primeiro caso, o inspetor deve verificar a profundidade do lastro e solicitar a avaliação da estrutura para ver se as tensões adicionais são significativas. No segundo caso, a concentração de lastro indica que o acúmulo é consequência de um defeito em outra parte da ponte e é importante determinar qual defeito está causando o ponto baixo. No último caso, deve ser indicada a limpeza do excesso de material para que não sejam comprometidos os demais sistemas.

D. Lastro colmatado

Com o tempo, a rocha de lastro sofre degradação, com excesso de finos, ou retém materiais estranhos, como poeiras, lodo, ou lama, caracterizando a colmatagem do lastro. O lastro colmatado reduz a sua capacidade de confinamento e de drenagem, além de reter a umidade, acelerando a degradação dos elementos do tabuleiro, da via permanente e da estrutura principal da ponte (Figura 4.14).

Figura 4.14 Retenção de umidade decorrente de lastro contaminado

E. Drenagem deficiente

A drenagem deficiente é um fator importante que contribui para muitos defeitos do tabuleiro, incluindo lastro contaminado com finos, deterioração dos dormentes e do estrado, desplacamento do concreto, corrosão e degradação das juntas. As falhas de drenagem podem ocorrer por diferentes motivos: projeto inadequado; execução incorreta da impermeabilização ou de elementos de drenagem; ou, ainda, obstrução progressiva do sistema ao longo do tempo, mesmo quando originalmente projetado e instalado de forma correta. Em geral, a drenagem deixa de funcionar antes que o restante da ponte atinja o fim de sua vida útil.

A inspeção do sistema de drenagem é dificultada pelo fato de que a maior parte dos drenos e da impermeabilização se encontra sob o lastro, inviabilizando sua observação direta. Os primeiros sinais de má drenagem são normalmente defeitos como eflorescência na parte inferior do tabuleiro de concreto ou corrosão em uma bandeja de lastro de aço. Um inspetor pode verificar se há água nos drenos do tabuleiro imediatamente após uma chuva, porém a ausência de fluxo não elimina a possibilidade de acúmulo de água em outras áreas do tabuleiro, sendo necessária avaliação complementar.

4.2.2.5 Estrado sem lastro

Os principais defeitos observados em dormentes de madeira de pontes ferroviárias com estrado sem lastro incluem: dormentes inservíveis, danos provocados por fogo, dano mecânico, dormentes inclinados e deslizantes, e dormentes fendilhados e rachados. Embora essas manifestações também possam ocorrer em estrados com lastro, tendem a apresentar maior criticidade em estrados sem lastro, exigindo atenção especial durante as inspeções e avaliações de campo.

A. Dormentes inservíveis

A decomposição da madeira ocorre quando a estrutura celular das fibras é degradada por ação fúngica, resultando na perda progressiva de resistência mecânica. Esse processo geralmente se inicia no cerne não tratado dos dormentes, especialmente nas regiões adjacentes aos furos dos elementos de fixação, como os *tirefonds*.

À medida que a deterioração avança, tornam-se visíveis sinais externos, como o corte das fibras sob as placas de apoio, indicando comprometimento interno da madeira. Com a progressão do dano, os dormentes passam a apresentar esmagamento sob os trilhos, provocando o afrouxamento das fixações das placas de apoio dos trilhos, comprometendo a estabilidade da bitola e da superfície da via (Figura 4.15).

Figura 4.15 Dormente deteriorado

Fonte: Material de treinamento MRS (2004)

B. Dano de fogo

Os dormentes de madeira em pontes ferroviárias com estrado aberto, principalmente, representam uma fonte significativa de material combustível, altamente suscetível à ignição em caso de incêndio. A queima desses elementos compromete diretamente o apoio dos trilhos, podendo resultar em deformações ou fraturas (Figura 4.16).

O aquecimento dos trilhos e dos componentes metálicos da estrutura induz tensões térmicas adicionais, que podem comprometer os sistemas de fixação dos dormentes e gerar esforços não previstos nos apoios. A expansão térmica dos trilhos, especialmente em trechos com trilhos contínuos soldados, pode provocar instabilidades laterais que, ao interagir com os elementos estruturais da ponte, podem causar danos mecânicos relevantes e comprometer a integridade da superestrutura.

Figura 4.16 Dormente totalmente consumido pelo fogo

Fonte: Notícia Ferroviária (2025)

C. Dano mecânico

Danos mecânicos em dormentes ocorrem, predominantemente, em função de sobrecargas repetitivas ou impactos de elevada intensidade. Esses danos podem se manifestar de diversas formas, incluindo fraturas longitudinais ou transversais, esmagamento localizado sob placas de apoio e danos associados a eventos de descarrilamento.

Diferentemente do corte das fibras da madeira causado por processos de deterioração, o corte mecânico induzido pelas placas de apoio é geralmente localizado e ocorre em áreas específicas do tabuleiro, como nas extremidades da ponte ou em regiões de juntas. Esse tipo de dano é resultado de pressões excessivas, frequentemente associadas a irregularidades geométricas, como desníveis nas entradas da ponte ou juntas defeituosas.

Os dormentes quebrados podem indicar sobrecarga, subdimensionamento do elemento ou ainda anomalias externas ao dormente, como má ancoragem do trilho, juntas defeituosas ou carga excessiva. Assim como no corte mecânico das fibras, a ruptura do dormente deve ser interpretada como possível sintoma de uma condição mais abrangente.

Os danos provocados por descarrilamentos apresentam ampla variabilidade, podendo ir desde pequenos vincos superficiais nos dormentes até a destruição completa do tabuleiro (Figura 4.17).

Figura 4.17 Condição extrema de dormentes e fixações quebradas por descarrilhamento

Fonte: G1 (2025)

Após qualquer ocorrência de descarrilamento, é imprescindível realizar uma inspeção minuciosa da ponte, abrangendo:

- verificação de dormentes quebrados ou deslocados;
- avaliação da integridade das fixações e das placas de apoio;
- inspeção de dormentes tortos ou desalinhados;
- identificação de espaçadores danificados;
- verificação de perda ou redução da bitola.

D. Dormentes inclinados e deslizantes

Os dormentes em uma ponte de estrado aberto devem ser espaçados uniformemente e alinhados ao trilho. Os dormentes deslizantes se afastarão ao longo da ponte, e os dormentes tortos ficarão fora de alinhamento com o trilho. Os dormentes em uma ponte de estrado aberto deslizarão e inclinarão se não estiverem devidamente fixados à estrutura principal da ponte ou fixadas por um espaçador de dormentes eficaz (Figura 4.18).

Dormentes deslizantes representam uma preocupação tanto para os trens quanto para os trabalhadores que andam no tabuleiro da ponte, uma vez que o deslocamento pode abrir vãos significativos, deixando o trilho sem o devido suporte e criando aberturas capazes de provocar a queda de pessoas. Já a inclinação dos dormentes afetará a bitola dos trilhos e causará danos mecânicos aos dormentes, às placas dos dormentes e à base do trilho.

Adicionalmente, nas condições de estrado não lastrado, devem ser realizados entalhes com dimensão adequada nos dormentes (Figura 4.19), de forma a restringir as movimentações laterais, fixando-os com capacidade adequada de suportar os esforços transversais ao eixo da ferrovia (Figura 4.20).

Figura 4.18 Defeitos de fixação e rotação do dormente

Figura 4.19 Entalhamento de dormente de madeira

Fonte: Material de treinamento MRS (2004)

Figura 4.20 Fixação adequada entre dormentes

E. Dormentes fendilhados e rachados

O fendilhamento corresponde à separação das fibras da madeira causada pelo encolhimento decorrente da secagem. Embora, isoladamente, as fendas normalmente não são um problema, mas facilitam a penetração de umidade e os contaminantes, acelerando o processo de degradação do dormente.

As rachaduras, por sua vez, caracterizam-se pela separação completa da madeira que se estende de uma face a outra do dormente (Figura 4.21). Os dormentes podem rachar gravemente quando sobrecarregados ou sujeitos a mudanças de temperatura e umidade. A rachadura dos dormentes pode resultar no afrouxamento dos *tirefonds* da placa de apoio dos trilhos, na perda da restrição lateral e longitudinal do trilho e oferecer um local para o início da decomposição.

Figura 4.21 Rachadura nos dormentes de madeira

4.2.2.6 Estrado com fixação direta

As fixações em pontes com estrado de fixação direta devem ser inspecionadas cuidadosamente quanto a danos causados por impacto. Esses danos podem ser rachaduras nos componentes de fixação, incluindo soldas e parafusos. Também podem ocorrer danos na própria superestrutura na área dos fixadores, especialmente se estes forem soldados à superestrutura da ponte.

4.3 JUNTAS DE DILATAÇÃO

Segundo a norma DNIT 092 – ES, uma junta de dilatação é definida como uma separação física entre duas partes de uma estrutura, permitindo que elas se movimentem de forma independente, sem a transferência de esforços entre si. Embora não desempenhem função estrutural, as juntas de dilatação são essenciais para assegurar o desempenho adequado das pontes. Sua execução visa prevenir a ocorrência de fissuras, sobretudo aquelas originadas por variações térmicas e retração hidráulica.

Esses dispositivos são aplicados, sobretudo, em elementos estruturais de grande extensão, como tabuleiros contínuos, devendo permitir a livre movimentação da estrutura, além de assegurar estanqueidade, resistência ao desgaste, baixo nível de ruído e facilidade de manutenção. Com a consolidação do aço e do concreto como principais materiais estruturais, a utilização de juntas de dilatação tornou-se indispensável, em razão da maior sensibilidade dessas estruturas às variações térmicas (Lee Kelly *et al*., 2019; Cordeiro; Souza; Osório, 2019).

Apesar dos avanços tecnológicos no campo estrutural e do aumento significativo do volume de tráfego, os sistemas de inspeção e manutenção das juntas de dilatação nem sempre evoluíram de forma equivalente. Essa defasagem contribui para que as juntas se tornem pontos críticos da ponte, frequentemente associados a falhas recorrentes e à deterioração de elementos adjacentes (Ferreira, 2013; Cordeiro; Souza; Osório, 2019).

Falhas como aberturas inadequadas, deterioração ou ausência do material de vedação e infiltrações de água podem provocar desagregação do concreto, surgimento de saliências e depressões no pavimento e o desenvolvimento de tensões tangenciais não previstas em projeto. Dessa forma, as juntas de dilatação demandam atenção especial durante as inspeções, uma vez que suas patologias estão comumente relacionadas a dimensionamento inadequado, falhas construtivas, impactos de veículos pesados e ausência de manutenção sistemática, com impactos diretos na segurança, no conforto dos usuários e na durabilidade da obra (Tejedor, 2013).

4.3.1 Transição para o pavimento

As juntas de dilatação localizadas na camada de transição desempenham papel fundamental na integração entre o tabuleiro e o pavimento de encontro, estabelecendo uma interface crítica para o desempenho funcional da estrutura. Conforme descrito por Ferreira (2013), essas juntas são submetidas simultaneamente às solicitações transmitidas pela própria junta e às provenientes do pavimento da via.

A camada de transição, por sua vez, é o elemento que mais sofre com essas solicitações, sendo comum a ocorrência de patologias como fissuração ou ruptura, especialmente na ausência de manutenção adequada. A deterioração dessa camada pode evoluir para o desprendimento da seção (Figura 4.22), comprometendo a integridade do sistema.

(a) (b)

Figura 4.22 Deterioração da camada de transição entre a junta da ponte e o pavimento: (a) deterioração localizada com perda de material; (b) degradação progressiva da camada de transição

Além disso, as anomalias nessa região podem provocar danos nos sistemas de fixação e nas bordas das juntas, incluindo fissuração nos lábios poliméricos. Em casos em que são utilizadas cantoneiras, podem ser observadas fissuras e até rupturas desses componentes metálicos. Tais danos afetam diretamente a funcionalidade da junta e podem, ainda, provocar reflexos negativos no pavimento asfáltico, como ressaltos, trepidações e risco de acidentes, evidenciando a importância da camada de transição na durabilidade e segurança das pontes (Ferreira, 2013).

4.3.2 Falhas por geometria, movimentação e fixação

Uma anomalia bastante frequente em pontes e viadutos é o recobrimento indevido das juntas de dilatação com pavimento asfáltico. Essa situação geralmente ocorre durante intervenções de recapeamento realizadas para melhorar as condições de rolamento das pistas. Entretanto, é comum que o órgão responsável pela obra realize o recapeamento contínuo ao longo da pista, sem respeitar a presença das juntas de dilatação, aplicando a nova camada de asfalto diretamente sobre elas (Cordeiro; Souza; Osório, 2019).

Esse recobrimento impede a movimentação adequada das juntas, essencial para acomodar variações térmicas e outros deslocamentos estruturais. Como consequência, os esforços que deveriam ser absorvidos pelas juntas acabam sendo transferidos ao pavimento asfáltico, provocando o abatimento localizado da camada de rolamento e o surgimento de fissuras e aberturas (Figura 4.23). De acordo com Ferreira (2013), esse tipo de patologia pode comprometer significativamente o conforto e a segurança dos usuários, ocasionando trepidações, sobressaltos e, em situações mais críticas, aumentando o risco de acidentes.

(a) (b)

Figura 4.23 Recobrimento da junta de dilatação com material betuminoso: (a) fissuração do pavimento alinhada à junta recoberta; (b) degradação do recobrimento betuminoso com abertura de trinca no pavimento

A restrição dos movimentos nas juntas de dilatação é outra patologia relevante, que pode comprometer a funcionalidade e a durabilidade das pontes. Esse impedimento pode ocorrer por diversos fatores: falhas de execução, dimensionamento inadequado ou acúmulo de detritos no interior da junta, afetando diretamente os graus de liberdade (Ferreira, 2013).

Durante o dimensionamento das juntas de dilatação, é fundamental que o projetista estabeleça corretamente os espaçamentos necessários para permitir os deslocamentos térmicos e estruturais. A não observância desse critério pode resultar em aberturas excessivamente estreitas ou amplas, dificultando ou até impedindo a atuação adequada do material de vedação, comprometendo assim a movimentação da junta (Ferreira, 2013).

Ferreira (2013) ressalta ainda que o acúmulo de detritos – oriundos de precipitações, tráfego de veículos e circulação de pedestres – é um fator crítico na restrição do movimento (Figura 4.24). Já Laner (2001), complementa apontando que a presença de umidade, aliada à colmatação causada pelos resíduos acumulados, pode acelerar o processo de desagregação das paredes da junta, agravando ainda mais a restrição de movimentação e favorecendo o surgimento de outras patologias.

A forma de fixação das juntas de dilatação à estrutura da ponte é um fator fundamental para garantir a resistência aos esforços transmitidos e o conforto dos usuários durante a passagem dos veículos. Quando ocorre o afrouxamento ou danificação dos elementos de fixação, essa falha pode comprometer o desempenho da junta de dilatação e da estrutura como um todo (Cordeiro; Souza; Osório, 2019).

(a) (b)

Figura 4.24 Condições observadas em juntas de dilatação: (a) acúmulo de detritos no interior da junta; (b) deterioração do sistema de junta

De acordo com Santos (2008), um dos indícios mais comuns da ocorrência desse tipo de patologia é a emissão de sons durante a passagem dos veículos, conhecidos como “batimentos”, ou ainda a sobre-elevação da junta, indicando que há desaperto ou falha de ancoragem dos sistemas de fixação (Figura 4.25).

(a) (b)

Figura 4.25 Desaperto das fixações da junta de dilatação: (a) abertura na região da junta devido à falha de fixação; (b) sobre-elevação do elemento da junta decorrente do desaperto das ancoragens

Fonte: (a) Santos (2008) e (b) SGE – DNIT

4.3.3 Ausência de juntas

Em algumas situações – e não somente em obras antigas – observa-se a ausência de um material com elasticidade suficiente para permitir a adaptação da junta, o que provoca um desgaste acelerado na região do elemento (Figura 4.26). Este problema também pode ocorrer em obras nas quais a junta foi coberta, restringindo sua liberdade de movimentação e resultando na fissuração do revestimento da via (Ferreira, 2013).

(a) (b)

Figura 4.26 Ausência de junta de dilatação em ponte: (a) abertura na interface entre o pavimento e a estrutura; (b) descontinuidade longitudinal evidenciando a ausência de sistema de junta de dilatação

4.3.4 Impermeabilidade e drenagem

Em elementos da superestrutura, nos encontros ou em regiões situadas sob as juntas de dilatação, há maior probabilidade de ocorrência de infiltrações, especialmente quando a junta não garante a devida estanqueidade. Na Figura 4.27, observa-se a percolação da água através das juntas, atingindo elementos da superestrutura e o encontro.

Esse tipo de dano geralmente está associado a outras patologias nas juntas de dilatação, como rupturas parciais, falhas nos elementos de fixação ou deterioração da camada de transição, que comprometem a impermeabilidade (Ferreira, 2013). Segundo Souza e Ripper (1998), a ausência de estanqueidade pode estar relacionada à falta de um detalhamento adequado durante o projeto das vedações, o que compromete a execução e, posteriormente, permite a passagem de água pelo estrado de pontes e viadutos, atingindo outros elementos das pontes.

(a) (b)

Figura 4.27 Infiltração nos elementos devido à ausência ou ineficiência de junta de dilatação: (a) marcas de escorrimento e infiltração na região da junta; (b) percolação de água atingindo o encontro da ponte

Ferreira (2013) reforça que a perda de impermeabilidade dificilmente ocorre de forma abrupta. Em geral, está vinculada à manifestação progressiva de outras anomalias, como fissuras ou falhas de fixação, que acabam permitindo a infiltração. A continuidade desse processo pode expor não apenas o concreto estrutural, mas também aparelhos de apoio à ação da água, comprometendo o desempenho e a durabilidade da estrutura.

4.3.5 Deterioração dos selantes

A deterioração dos selantes é uma patologia recorrente em juntas de dilatação, sendo facilmente percebida pelos usuários devido ao aumento do ruído e à sensação de descontinuidade durante a passagem dos veículos. Conforme ilustrado na Figura 4.28, essa condição compromete o conforto na trafegabilidade e pode causar falta de aderência entre os pneus e a pista, além de permitir infiltrações de água para o interior da estrutura, favorecendo, inclusive, o aparecimento de vegetação na região da junta (Ximenes, 2011).

As juntas de dilatação devem garantir uma dirigibilidade suave, não devendo gerar desconforto ou oferecer resistência ao tráfego. No entanto, quando os selantes estão danificados, tornam-se um ponto crítico para o surgimento de novas anomalias. Ferreira (2013) destaca que infiltrações provenientes de falhas nos selantes podem evoluir para problemas mais graves, como o crescimento de vegetação ou o comprometimento de outros elementos estruturais.

(a) (b)

Figura 4.28 Selantes elastoméricos deteriorados em juntas de dilatação: (a) deterioração do selante com perda de material; (b) falha do selante evidenciando abertura na região da junta

As falhas mais comuns nos selantes, incluem (DER – SP, 2006):

- rompimento por tração ou compressão;
- extrusão do material;
- endurecimento ou oxidação;
- perda de aderência às bordas do concreto;
- quantidade insuficiente de selante na junta;
- formação de espaços que acumulam materiais incompressíveis.

Essas condições afetam a estanqueidade da junta, contribuem para a degradação progressiva do sistema como um todo e interferem diretamente na durabilidade e na segurança da obra.

4.4 APARELHOS DE APOIO

Segundo a norma DNIT 091– ES, os aparelhos de apoio são elementos que realizam a ligação entre a superestrutura e a mesoestrutura ou infraestrutura em pontes que não são do tipo aporticado.

Suas principais funções consistem em:

- transferir as cargas da superestrutura para as estruturas inferiores;
- possibilitar deslocamentos longitudinais da superestrutura, decorrentes de retração, variações de temperatura, expansão e contração térmica; e
- permitir as rotações da superestrutura, causadas pelas deformações resultantes das cargas permanentes e móveis.

Os aparelhos de apoio são elementos estruturais de difícil inspeção, e as causas da sua deterioração podem ser inerentes à própria estrutura (falhas de execução, utilização inadequada ou erros humanos) ou ações externas ao longo das etapas de concepção, execução ou durante a vida útil da obra (Machado; Sartorti, 2010). As deficiências nesses dispositivos comprometem a liberdade de movimentação da superestrutura, podendo ocasionar elevadas tensões na interface com o apoio, o que gera fissuras, esmagamento e desagregação do concreto nas zonas de contato. Assim, a realização de manutenções e limpezas periódicas torna-se imprescindível, uma vez que os aparelhos de apoio desempenham um papel fundamental na durabilidade das pontes (Laner, 2001).

Cordeiro (2014) propõe uma classificação das anomalias em aparelhos de apoio com base em quatro grupos:

- falhas de construção, instalação ou colocação;
- falhas de funcionamento;
- falhas no material constituinte;
- falhas na base de assentamento.

Dessa forma, a partir dessa classificação, é possível identificar os danos que possam ocorrer nos aparelhos de apoio e, consequentemente, determinar o tratamento adequado. Em outra perspectiva, Vieira (2013) ressalta que as anomalias observadas nos aparelhos

de apoio também se estendem à zona envolvente do elemento e às bases de assentamento. Neste sentido, as manifestações patológicas dos aparelhos de apoio serão apresentadas de acordo com as abordagens de Cordeiro (2014) e Vieira (2013), classificando os danos conforme suas causas e as regiões onde se localizam.

Devido às dificuldades e aos altos custos envolvidos na substituição dos aparelhos de apoio, a norma DNIT 091 – ES estabelece que, caso as deficiências não comprometam o comportamento da estrutura nem apresentem fissuras localizadas na região do apoio, a substituição pode, em princípio, ser adiada, desde que os resultados das verificações estruturais e de uma inspeção detalhada sejam satisfatórios.

4.4.1 Falhas construtivas, de instalação e funcionamento

As falhas construtivas e de instalação podem gerar danos nos aparelhos de apoio e comprometer o bom funcionamento do elemento. Cordeiro (2014) aponta como possíveis causas:

- fixações provisórias dos aparelhos de apoio não removidas;
- defeito de geometria ou de execução das bases de assentamento;
- aparelhos fixos com o lado menor não paralelo ao eixo do pilar;
- inversão da colocação do aparelho de apoio;
- fixações deficientes ao aparelho de apoio.

Na Figura 4.29, observa-se uma falha de instalação, na qual o aparelho de apoio foi posicionado sem paralelismo em relação ao eixo do pilar, condição que pode gerar danos progressivos ao longo do funcionamento do sistema.

Figura 4.29 Aparelho de apoio não paralelo ao eixo do pilar

Uma falha de execução que também pode ser observada nos sistemas de apoio é a ausência do aparelho de apoio, que obrigatoriamente deveria estar presente. A Figura 4.30 exemplifica um caso em que o dispositivo foi previsto em projeto, mas não foi instalado.

Figura 4.30 Aparelho de apoio inexistente

No caso de manifestações patológicas nos aparelhos de apoio decorrentes de falhas de concepção ou de funcionamento, podem ser apontados os seguintes fatores:

- inclinação desajustada dos rolos ou roletes;
- desalinhamento dos eixos dos roletes em dispositivos multidirecionais;
- inclinação excessiva do pêndulo;
- impedimento do deslocamento ou da rotação devido ao acúmulo de detritos;
- impedimento do deslocamento ou da rotação por corrosão excessiva;
- distorção elevada do Neoprene;
- deformação lateral excessiva da almofada de Neoprene dentro da panela;
- deslocamento excessivo do aparelho de apoio móvel;
- falta de lubrificação;
- compressão elevada do neoprene.

A Figura 4.31 ilustra um caso em que o aparelho de apoio apresenta impedimento ao deslocamento ou à rotação devido ao acúmulo de detritos. Verifica-se que a presença de materiais depositados compromete o funcionamento adequado do dispositivo, afetando não apenas o aparelho de apoio, mas também todo o sistema estrutural.

(a) (b)

Figura 4.31 Aparelho de apoio com movimentação impedida por depósito de detritos: (a) acúmulo de detritos na região do aparelho de apoio; (b) obstrução do deslocamento do aparelho de apoio devido ao depósito de materiais

Outra manifestação patológica frequentemente observada é a compressão elevada do Neoprene, ilustrada na Figura 4.32.

Figura 4.32 Aparelho de apoio de Neoprene com elevada compressão

Essa anomalia pode gerar vínculos indesejados entre os elementos estruturais, podendo desencadear fissuras e até rupturas na viga ou pilar, na região do apoio. A compressão excessiva do Neoprene pode ser caracterizada por variações na espessura da camada de borracha, resultantes de uma distribuição desigual de pressão sobre o elemento.

4.4.2 Falhas nos materiais

As falhas nos materiais constituintes dos aparelhos de apoio podem ser classificadas conforme o tipo de material utilizado – aço, concreto ou neoprene fretado. Neste sentido, as anomalias identificadas são apresentadas a seguir de acordo com o material constitutivo de cada elemento.

4.4.2.1 Aparelhos de apoio de aço

Vieira (2013) aponta como manifestações patológicas relacionadas aos aparelhos de apoio metálicos:

- corrosão dos elementos metálicos constituintes dos aparelhos de apoio;
- deficiência da proteção anticorrosiva;
- mau estado de conservação das soldas;
- posicionamento incorreto de componentes;
- fissuração em elementos do aparelho de apoio;
- excessos de rotação ou de deslocamento horizontal;
- arqueamento da chapa de deslizamento.

Um dos principais problemas relacionados ao uso de articulações metálicas é sua elevada dependência de manutenções constantes e criteriosas, já que seu desempenho pode ser comprometido pela presença de detritos e pela corrosão. Esses fatores, frequentemente, reduzem significativamente a eficiência do componente, podendo até levar ao colapso da peça.

Quando houver viabilidade técnica para intervenção recomenda-se contemplar, no mínimo, os seguintes aspectos (Machado; Sartorti, 2010):

- realizar uma inspeção detalhada;
- análise estrutural do sistema;
- remoção de detritos para garantir o livre funcionamento de todos os elementos móveis;
- tratamento das áreas corroídas, incluindo jateamento abrasivo e aplicação de pintura anticorrosiva.

A Figura 4.33 apresenta um exemplo de um aparelho de apoio do tipo rolo metálico danificado por corrosão.

Figura 4.33 Aparelho de apoio rolo metálico com corrosão

4.4.2.2 Aparelhos de apoio de concreto

As manifestações patológicas observadas em aparelhos de apoio de concreto podem ser semelhantes àquelas verificadas em outros elementos estruturais de concreto, ou ainda, específicas desses dispositivos. Conforme mencionado por Vieira (2013), as patologias mais comuns incluem o esmagamento ou fissuração dos cantos, a degradação do concreto de revestimento na zona central e corrosão das armaduras.

Embora tenham sido amplamente utilizados, os aparelhos de apoio de concreto vêm sendo gradualmente substituídos, principalmente devido à frequência das manifestações patológicas, à dificuldade de tratamento desses danos e à crescente adoção dos aparelhos de Neoprene, que tendem a demandar menor manutenção.

Além disso, é comum observar falhas humanas durante a execução de estruturas de concreto, que contribuem para o surgimento de patologias, somadas aos efeitos de agentes externos. Entre os principais danos observados estão fissuras e corrosão das armaduras. As fissuras são recorrentes em estruturas de concreto devido à baixa resistência do material à tração, que pode levar ao colapso súbito e frágil. Outro problema frequente é a desagregação, caracterizada pela deterioração do concreto por separação de seus componentes.

A Figura 4.34 exemplifica um dano em aparelho de apoio de concreto armado, evidenciando a degradação do concreto e a exposição das armaduras em um aparelho do tipo pêndulo de concreto.

Figura 4.34 Aparelho de apoio do tipo pêndulo com concreto desagregado e armadura exposta

4.4.2.3 Aparelhos de apoio de neoprene fretado

O neoprene é um dos materiais constituintes mais utilizados em aparelhos de apoio, destacando-se pela sua composição com diversos elementos que, embora proporcionem versatilidade, também estão sujeitos a diferentes manifestações patológicas (Vieira, 2013). Os aparelhos de apoio de Neoprene se diferenciam dos demais por sua elevada capacidade de suportar longos períodos sem manutenção, característica que os torna menos vulneráveis a falhas frequentes que afetam outros dispositivos. Mesmo quando produzidos com materiais de menor qualidade, é raro que apresentem colapso total. No entanto, como qualquer sistema estrutural, estão sujeitos a falhas, podendo se tornar prematuramente inservíveis em decorrência de diversos fatores (Machado; Sartorti, 2010). As anomalias mais comuns de aparelhos de apoio de Neoprene fretado são:

A. Elevada distorção (superior à metade da altura do aparelho de apoio)

Este tipo de dano pode ser caracterizado por uma deformação por cisalhamento, que provoca deslocamento horizontal e/ou o levantamento da borda menos comprimida (Figura 4.35).

Figura 4.35 Aparelho de apoio com distorção

Para a avaliação do deslocamento horizontal, deve-se verificar:

- a relação entre a espessura do aparelho e o deslocamento horizontal provocado pelo cisalhamento (com a base fixada ao eixo de referência);
- a condição de não levantamento da borda menos comprimida, comparando-se as tangentes das rotações resultantes das cargas permanentes totais, com o valor limite de rotação estabelecido no Anexo A.22 da ABNT NBR 9062.

B. Deslocamento sobre o suporte

O aparelho de apoio pode se mover em relação à sua base de assentamento, deixando de atuar na posição prevista em projeto. A Figura 4.36 apresenta um exemplo dessa ocorrência.

Figura 4.36 Aparelho de apoio deslocado da posição

C. Elevada compressão do neoprene

Caracteriza-se pela redução significativa da espessura efetiva do elastômero durante o carregamento, podendo resultar em vínculos indesejados entre os elementos estruturais e aumento de esforços na região do apoio.

D. Fissuração do neoprene ou rasgos nas camadas do material

Quando o Neoprene apresenta rasgos, fendilhamentos ou fissuras nas camadas internas ou externas, há comprometimento da distribuição de tensões e da capacidade de acomodação de deslocamentos. A Figura 4.37, exemplifica esse tipo de anomalia.

Figura 4.37 Aparelho de apoio com rasgos no elastômero

Outras manifestações patológicas observadas são:

- perfuração ou picagem das chapas interiores e exteriores;
- corrosão das chapas interiores e exteriores;
- descolagem da vulcanização das chapas interiores;
- degradação das chapas de deslizamento, das guias ou dos batentes;
- fissuração e rotura dos cantos;
- oxidação dos elementos de aço;
- permanência das fixações provisórias;
- degradação, deslocamento ou escorregamento das folhas de PTFE (teflon).

4.4.3 Falhas na base de assentamento

Cordeiro (2014) aponta como manifestações patológicas associadas às falhas na base de assentamento o deslocamento das mesas de apoio, a presença de umidade decorrente da água estagnada e o acúmulo de detritos vegetais, os quais comprometem a eficiência dos aparelhos de apoio. A Figura 4.38 ilustra um exemplo desse tipo de anomalia, evidenciando a presença de detritos na base de assentamento do aparelho.

(a) (b)

Figura 4.38 Acúmulo de detritos na base de assentamento do aparelho de apoio: (a) presença de detritos na região de apoio; (b) depósito de materiais e deterioração na base de assentamento

A obstrução na base de assentamento dos aparelhos de apoio impede os movimentos longitudinais, transversais ou qualquer rotação, comprometendo o adequado funcionamento desse elemento. A acumulação de detritos deve ser prevista em projeto, de forma a evitar que a restrição de movimentos acelere o surgimento de outras anomalias, como fissuras nos elementos estruturais (Vieira, 2013).

Outras manifestações patológicas relacionadas à base de assentamento incluem a ausência de paralelismo, deficiência de planicidade, dimensões da base inferiores às dos aparelhos de apoio, danos relativos à conservação, rotura parcial, fissuração e afundamento do apoio.

4.5 SISTEMA DE DRENAGEM

Uma manifestação patológica recorrente em pontes é a insuficiência do sistema de drenagem, que pode provocar a infiltração de água pluvial na superestrutura. Esta patologia pode ser apresentada nas seguintes formas:

- ausência de pingadeiras na borda da laje do tabuleiro;
- falta de um sistema de drenagem satisfatório;
- captação da água pluvial pela linha d'água sem direcionamento adequado para destino final;
- ausência de previsão de sistema de drenagem no projeto.

A Figura 4.39 ilustra um exemplo de falhas no sistema de drenagem, enquanto a Figura 4.40 apresenta outro caso semelhante, evidenciando problemas de drenagem em estruturas.

Figura 4.39 Exemplo de falhas no sistema de drenagem

Figura 4.40 Exemplo de falhas no sistema de drenagem

A fim de prevenir falhas nos sistemas de drenagem e evitar o acúmulo ou infiltração de água, é necessário adotar algumas medidas preventivas (Laner, 2001):

- garantir que todas as superfícies horizontais apresentem declividade mínima suficiente para promover o escoamento da água;
- nos muros de contenção, prever orifícios de drenagem em quantidade e espaçamento adequados;
- implantar canais semicirculares nas superfícies planas do tabuleiro, direcionando o fluxo hídrico para o sistema de coleta;

- projetar vertedores de muros de modo a impedir que a água escoa pelas faces externas de concreto;
- assegurar que nenhum elemento estrutural permaneça em contato direto com águas não drenadas.

4.6 DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

As manifestações patológicas observadas nos dispositivos de segurança – tais como barreiras rígidas, guarda-corpos, defensas metálicas e demais elementos de proteção – variam conforme o tipo de material empregado na sua fabricação e o tipo de solicitação ao qual estão submetidos. Esses dispositivos desempenham papel essencial na proteção dos usuários, da estrutura e do entorno, motivo pelo qual seus danos devem ser identificados, classificados e registrados de forma sistemática durante as inspeções.

Entre as anomalias mais recorrentes destacam-se:

- desagregação, fissuração ou destacamento do concreto em barreiras rígidas, conforme a Figura 4.41;
- deformações, corrosão, rupturas ou falhas de ancoragem em guarda-corpos e defensas metálicas, como ilustrado na Figura 4.42;
- ausência, deslocamento ou descontinuidade de trechos de dispositivos de segurança;
- impactos ou amassamentos decorrentes de colisões;
- perda de desempenho devido à corrosão ou deterioração de pintura/proteção anticorrosiva;
- instalações improvisadas ou soluções que não atendem a normas técnicas vigentes.

Figura 4.41 Exemplo de concreto desagregado na barreira New Jersey

Figura 4.42 Exemplo de guarda-corpo metálico danificado e ancoragem inadequada da defensa metálica

5 CONCEITOS BÁSICOS DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE PONTES

Ponte é a estrutura projetada e construída para garantir a continuidade de uma via de comunicação, permitindo a transposição de obstáculos naturais ou artificiais que impedem o seu traçado direto. Esses obstáculos podem incluir rios, braços de mar, vales profundos, rodovias, ferrovias, entre outros. Quando o obstáculo transposto não envolve corpos d´água, a estrutura costuma ser denominada viaduto.

Do ponto de vista estrutural, as pontes são tradicionalmente analisadas a partir de três grandes regiões, definidas conforme suas funções e componentes: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 Principais elementos estruturais de uma ponte: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura

- **Superestrutura:** reúne todos elementos diretamente relacionados à transposição do vão, podendo ter função estrutural, como as lajes e as vigas, ou função complementar, como o pavimento, passeios, barreiras de proteção, dispositivos de drenagem ou de iluminação, entre outros.
- **Mesoestrutura:** diz respeito aos apoios intermediários que fazem a ligação entre a superestrutura e a infraestrutura, sendo constituída principalmente pelos pilares, encontros e aparelhos de apoio.

- **Infraestrutura:** compreende os elementos do sistema de fundação da ponte como blocos, sapatas, cintas de ligação, tubulões, estacas, entre outros. Sua principal função é transmitir as cargas provenientes da mesoestrutura para o material com capacidade de carga resistente, neste caso o solo ou a rocha, garantindo a estabilidade da obra.

Os procedimentos de inspeção também são comumente apresentados de acordo com cada região da ponte, considerando a frequente correlação entre os mecanismos de degradação e o comportamento estrutural específico de cada região. Para além da estrutura propriamente dita da ponte, podem ainda ser inspecionados os cursos d'água, os encontros e outros elementos situados na interface entre a via e a ponte, que possam influenciar o comportamento ou acelerar a degradação dessas estruturas.

Cabe ao inspetor associar o conhecimento das propriedades dos materiais e suas manifestações patológicas, apresentadas nos Capítulos 3 e 4 deste manual, ao comportamento estrutural particular da ponte em questão. Esse entendimento é fundamental para orientar a avaliação da gravidade do dano, conforme a importância estrutural do elemento inspecionado.

O comportamento estrutural dos elementos é abordado juntamente com as noções básicas sobre os esforços atuantes em cada sistema, seguidas das diretrizes para sua avaliação, organizadas por região estrutural. Cada elemento é descrito segundo sua função estrutural ou complementar com destaque para as observações exigidas na inspeção e exemplificação das patologias mais recorrentes.

Do ponto de vista funcional, as pontes podem ser classificadas segundo diferentes critérios, como finalidade (rodoviária, ferroviária, passarela), material de construção (concreto, aço, madeira), tipo estrutural (viga, arco, estaiada, suspensa), tempo de uso (definitiva ou provisória), fixidez ou mobilidade do tabuleiro, entre outros critérios.

A Figura 5.2 apresenta os principais elementos de uma ponte e seu enquadramento nas três regiões estruturais.

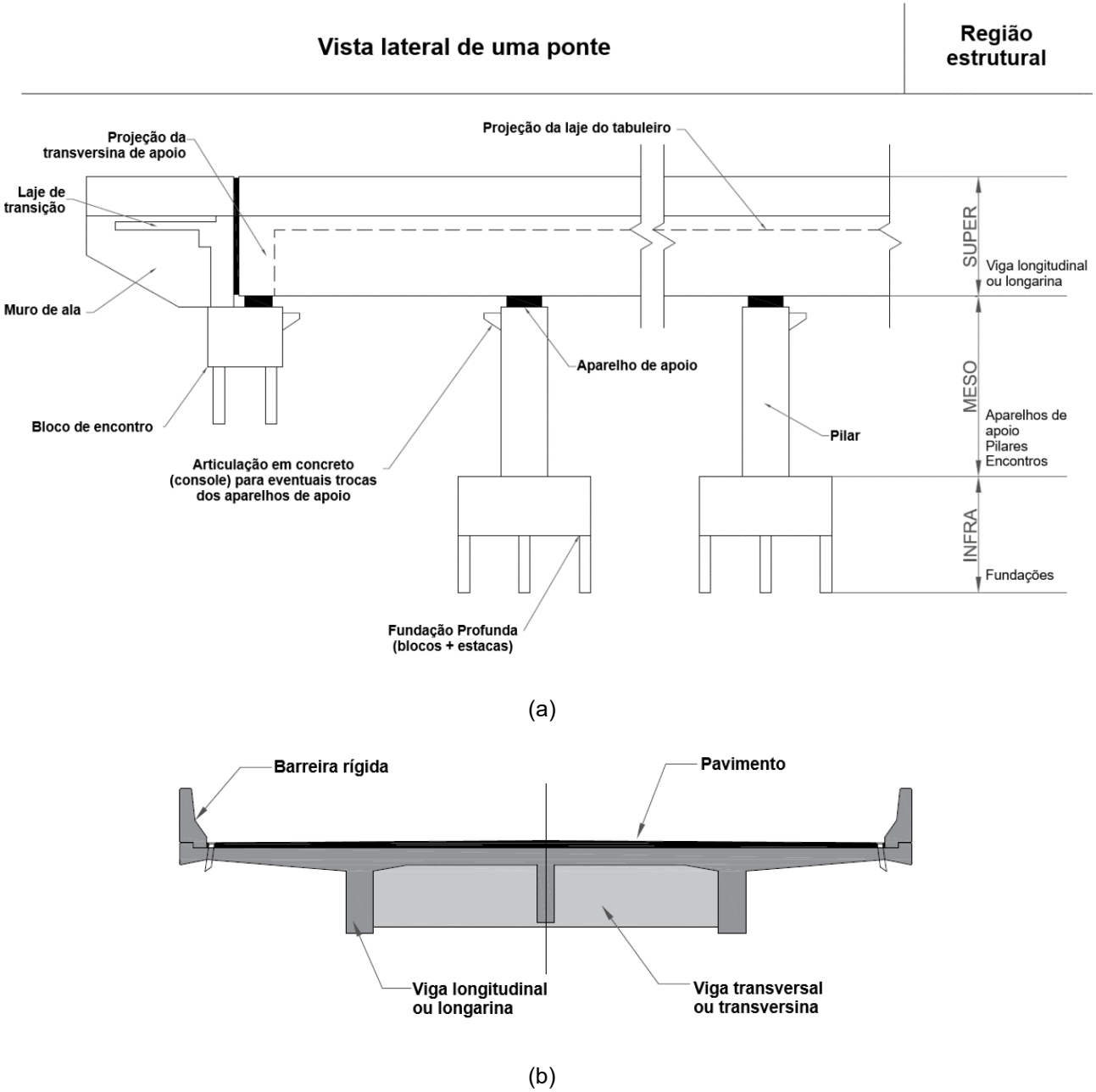


Figura 5.2 Principais elementos de uma ponte rodoviária: (a) vista lateral de uma ponte; (b) seção transversal do tabuleiro

5.1 SUPERESTRUTURA

A superestrutura de uma ponte compreende todos os elementos estruturais situados acima dos apoios, cuja função é transmitir as cargas provenientes da pista, ao longo dos vãos, para a mesoestrutura. A transmissão pode ocorrer por meio de esforços de compressão, tração, flexão ou pela combinação dessas solicitações.

A superestrutura pode ser subdividida em dois componentes:

- **Estrutura principal:** composta por elementos com a função de vencer o vão livre da ponte, como vigas, placas, arcos, vigas-caixão, entre outros. Esses elementos são responsáveis por resistir diretamente às solicitações estruturais – momentos fletores, esforços cortantes e torções – transmitindo as cargas aos apoios.
- **Estrutura secundária:** também denominada tabuleiro ou estrado, é o conjunto de elementos que recebe diretamente as cargas de tráfego e as transmite à estrutura principal. Engloba lajes, pistas de rolamento, juntas de dilatação, dispositivos de drenagem, sinalização, iluminação, sistemas de segurança e a transição entre a rodovia e a ponte.

Nas pontes de concreto armado, especialmente, os termos superestrutura, tabuleiro e estrado são frequentemente utilizados como sinônimos, já que vigas e lajes são, ao mesmo tempo, os elementos que vencem o vão e que recebem e transmitem as cargas da pista. De acordo com essa caracterização, a superestrutura define a denominação do sistema estrutural da ponte, agrupados em três tipos básicos: os sistemas de pontes em viga, de pontes em arco e de pontes pênseis ou estaiadas.

A. Pontes em viga

Pontes em viga são superestruturas caracterizadas por transmitirem as cargas da pista verticalmente aos apoios da infraestrutura, predominantemente por meio de esforços de compressão. Essas pontes geralmente possuem vinculações que não transmitem momentos fletores da superestrutura para a infraestrutura, o que confere simplicidade ao seu comportamento estrutural. Podem assumir diferentes configurações, tais como:

- pontes em laje, geralmente em concreto (Figura 5.3);
- pontes em viga-caixão, de concreto ou aço (Figura 5.4);
- pontes em viga, que podem ser de madeira, concreto ou aço (Figura 5.5);
- pontes em treliça, geralmente de madeira ou aço (Figura 5.6).

(a) (b)

Figura 5.3 Superestrutura – Ponte em laje: (a) de concreto; (b) de concreto protendido

(a) (b)

Figura 5.4 Superestrutura – Ponte em viga-caixão em: (a) concreto; (b) aço

(a) (b)

Figura 5.5 Superestrutura – Ponte em viga em: (a) concreto; (b) aço

(a) (b)

Figura 5.6 Superestrutura – Ponte em viga. Treliça em: (a) aço; (b) madeira

Fonte: (a) SGE – DNIT; (b) Skidmore, Owings & Merrill (2023)

B. Pontes em arco

Pontes em arco são estruturas cuja superestrutura transmite as cargas diagonalmente à infraestrutura, por meio de esforços inclinados predominantemente de compressão. Esse tipo de estrutura se destaca por sua forma curva, que permite uma distribuição eficiente dos esforços, reduzindo significativamente a atuação da flexão. Devido a essa predominância de compressão, os arcos suportam grande parte das ações aplicadas e as transferem para as fundações. As pontes em arco podem ser construídas com madeira, concreto ou aço, conforme as condições do projeto e os materiais disponíveis (Figura 5.7).

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 5.7 Superestrutura – Pontes em arco: (a), (b) em aço; (c), (d) de concreto; (e), (f) madeira

Fonte: (a) ate (d): SGE – DNIT; (e) ate (f): Iwakuni City Tourism Promotion Division (2020) e Western Wood Structures (2022)

C. Pontes pênseis e estaiadas

Pontes pênseis e pontes estaiadas constituem sistemas estruturais nos quais o tabuleiro é sustentado por cabos tracionados, sendo as cargas transferidas à infraestrutura por meio de torres e ancoragens. As solicitações de tração dos cabos de suspensão são transmitidas às ancoragens, após provocarem esforços de compressão nas torres intermediárias.

- **Pontes pênseis (suspensas):** consistem em estruturas em que o tabuleiro é sustentado por cabos verticais atirantados, conectados a cabos principais parabólicos, chamados cabos portantes. Esses, por sua vez, estão apoiados sobre torres de sustentação que absorvem esforços de compressão, enquanto as ancoragens nas extremidades resistem às forças de tração. O tabuleiro, geralmente metálico, pode adotar seções em caixão celular ou treliça, e exige alta rigidez à torção, uma vez que essas pontes são sensíveis a ações de vento, podendo sofrer movimentos indesejados no tabuleiro. Trata-se de um sistema capaz de vencer vãos de várias centenas de metros, com estruturas esbeltas, apresentando alto grau de hiperestaticidade e grande liberdade geométrica.
- **Pontes estaiadas:** o tabuleiro é sustentado por estais, que são cabos ancorados ao topo das torres ou ao longo de sua altura. Trata-se de um sistema semelhante a uma viga atirantada em múltiplos pontos, frequentemente adotado para vencer vãos muito grandes. Os estais transferem diretamente os esforços para as torres em compressão. A montagem é feita progressivamente, com autoequilíbrio das forças horizontais, dispensando ancoragens massivas ou cimbramentos durante a execução.

A Figura 5.8 apresenta exemplos de pontes pênseis e estaiadas, destacando suas diferentes composições e modos de transferência de cargas.

Um bom conhecimento da função de cada elemento estrutural e das vantagens e limitações da utilização de cada material, é indispensável para a interpretação das anomalias e danos detectados nas inspeções. A distinção entre concreto armado e concreto protendido é meramente didática: ambos utilizam o mesmo concreto, com a diferença de que, no concreto armado convencional, as armaduras são todas passivas e, no concreto protendido, há armaduras passivas e armaduras ativas, constituídas por fios ou cabos protendidos, que introduzem uma força de compressão na estrutura.

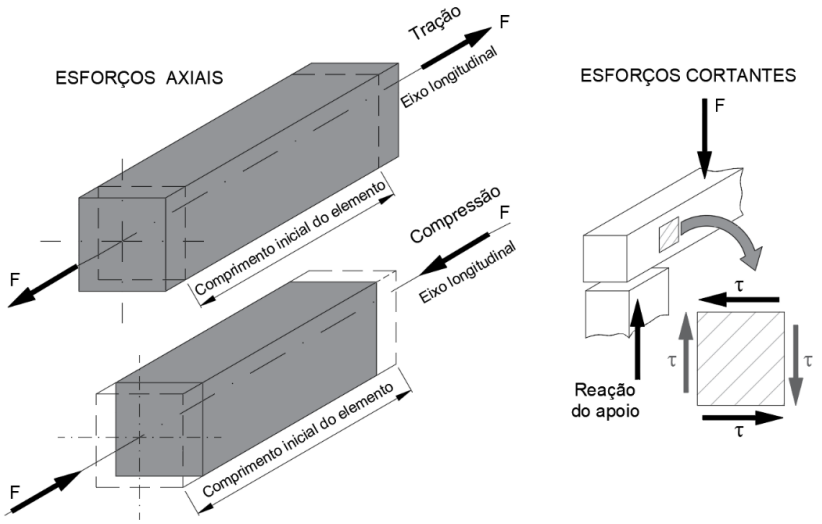
A divisão dos sistemas de pontes está diretamente relacionada à forma como as cargas são transmitidas aos apoios. Cada elemento estrutural da ponte é projetado para resistir a uma combinação específica de tensões básicas resultantes de forças axiais (tração e compressão) e esforços cortantes. As demais solicitações, como momentos fletores e momentos torsores, decorrem da combinação dessas tensões básicas.

(a) (b)

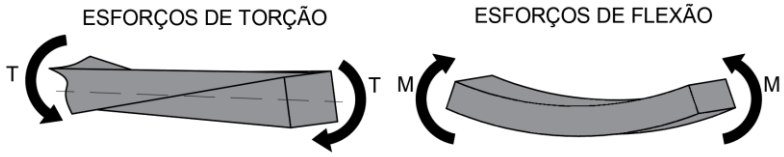
Figura 5.8 Superestrutura – Ponte: (a) pênsil; (b) estaiada

Fonte: (a) SEMIL (2023) e (b) SGE – DNIT

As Figura 5.9 e Figura 5.10 ilustram, de forma esquemática, a distribuição dos esforços nos diferentes sistemas estruturais, facilitando a compreensão das formas características adotadas na utilização dos diversos materiais em cada elemento da ponte.



(a)



(b)

Figura 5.9 Distribuição dos esforços: (a) tensões básicas; (b) solicitações secundárias

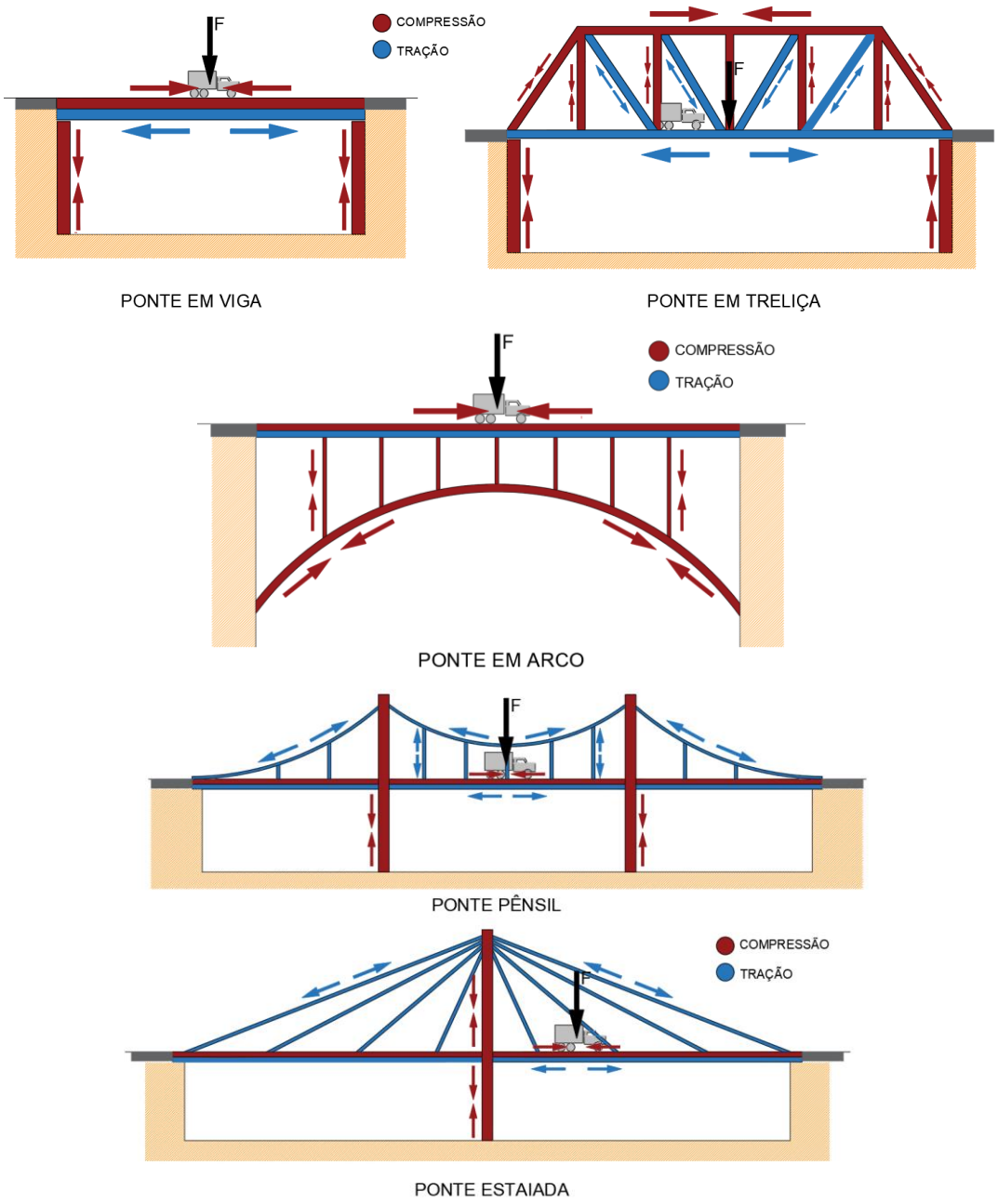


Figura 5.10 Distribuição dos esforços em diferentes sistemas de pontes

5.1.1 Estrutura principal de concreto

As superestruturas em pontes de concreto armado podem assumir diversas formas, entre as quais se destacam vigas em T, placas, vigas retangulares, vigas-calha, arcos, pórticos rígidos e vigas-caixão. Cada uma dessas formas é projetada para resistir a solicitações específicas, sendo os momentos fletores, as forças cortantes e os momentos de torção as ações mais comuns em vigas e lajes. Já os arcos trabalham predominantemente à compressão, embora possam estar sujeitos também a momentos fletores, dependendo da geometria e das condições de apoio.

5.1.1.1 Vigas T em concreto armado

A viga em T é uma forma de seção transversal especialmente adequada ao concreto armado e ao concreto protendido parcialmente, sendo particularmente eficiente na absorção de momentos fletores positivos. Quando solidarizada à laje do tabuleiro, esta atua como banzo comprimido da viga principal longitudinal (ou longarina), enquanto o banzo tracionado se localiza na parte inferior da alma. A espessura da alma é determinada principalmente pelas exigências de espaço necessárias para acomodar o banzo tracionado, desde que este não se prolongue lateralmente sob a forma de abas ou mesas.

Quanto à resistência ao cisalhamento, recomenda-se o uso de almas delgadas em vez de espessas, uma vez que a quantidade de armadura transversal necessária é praticamente independente da espessura da alma. Além disso, se observam aberturas de fissuras de cisalhamento menores em almas delgadas. Naturalmente, a alma deve possuir espessura suficiente para resistir às tensões principais de compressão inclinadas.

Nas vigas protendidas, a largura do banzo tracionado pode ser influenciada por critérios adicionais, como a necessidade de manter compressão residual no banzo inferior após atuação de cargas móveis, e de evitar excesso de tensões de compressão pelo peso próprio, prevenindo a ocorrência de deformações lentas que possam causar uma curvatura ascendente da viga (flecha negativa). Esse tipo de problema foi observado em diversas pontes pioneiras de concreto protendido, cujos tabuleiros precisaram ser posteriormente corrigidos.

As vigas T pré-moldadas (Figura 5.11 e Figura 5.12) são geralmente produzidas em canteiros localizados nas proximidades das obras, para onde são transportadas após a cura. O posicionamento dessas vigas é feito por meio de treliças de grande porte ou por guindastes potentes. Por limitações de peso e de uso das treliças, o comprimento das vigas, em geral, limita-se a 45 metros. A laje do estrado pode ser pré-moldada ou moldada no local, sendo posicionada sobre as vigas e conectada a elas por meio de armaduras de espera.

Antigamente era comum completar a laje estrutural com painéis moldados *in loco* entre vigas. Esse procedimento foi abandonado, pois, embora houvesse protensão transversal para solidarizar as mesas das vigas pré-moldadas com as lajes concretadas entre vigas, há uma tendência à fissuração nessas ligações. A carbonatação, comum nesse tipo de ponte, evidencia longos trechos de fissuras nas ligações.

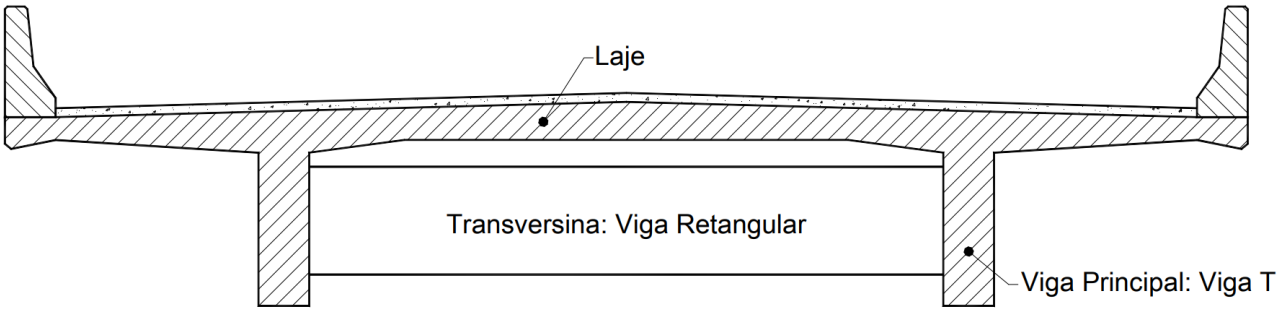


Figura 5.11 Seção transversal da viga T de concreto armado

Figura 5.12 Viga I ou T de concreto armado (estrutural)

Nas vigas principais, há três tipos de armaduras (Figura 5.13):

- **Armaduras de flexão:** localizadas no fundo das vigas, nos vãos, e no topo das vigas, nos apoios.
- **Armaduras de força cortante:** preferencialmente compostas apenas por estribos, mas podendo ser parcialmente em estribos e parcialmente em barras dobradas. Os estribos também garantem a ligação das almas das vigas com as lajes.
- **Armaduras de pele:** posicionadas nas faces laterais das vigas, com a função de combater os efeitos da temperatura, da retração e da torção.

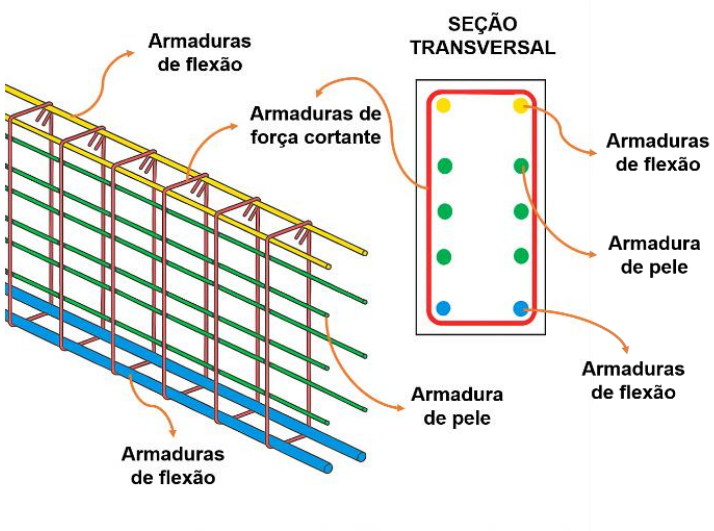


Figura 5.13 Representação esquemática das armaduras de uma viga principal de concreto armado

Nas transversinas, há armaduras de flexão localizadas no fundo e no topo, armaduras de pele nas faces, além de estribos que garantem a conformação da peça e a absorção das forças cortantes.

5.1.1.2 Placas em concreto armado

As placas são utilizadas como lajes nos tabuleiros das pontes, apoiando-se sobre o vigamento da superestrutura e, geralmente, apresentando extremidades em balanços transversais. A espessura média dessas lajes varia de 20 a 25 cm no trecho central, aumentando até cerca de 40 cm nas regiões de apoio.

5.1.1.3 Vigas retangulares em concreto armado

As vigas retangulares aparecem com maior frequência como elementos secundários, especialmente as transversinas, ou em componentes da infraestrutura, como as vigas-trave. São utilizadas em transversinas que não estão ligadas à laje da superestrutura e, na infraestrutura, em vigas-trave e contraventamentos.

5.1.1.4 Vigas-calha em concreto armado

As vigas-calha são, em geral, pré-moldadas, autoportantes e dispensam o uso de escoramentos e formas. Após o posicionamento, são preenchidas com concreto e solidarizadas às lajes do tabuleiro.

5.1.1.5 Arco em concreto armado

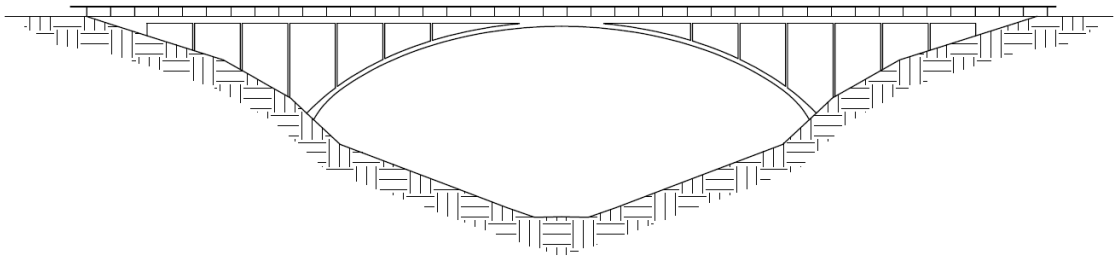
O arco é um elemento estrutural curvo – de geometria parabólica, elíptica ou circular – que pode, quando bem dimensionado, trabalhar quase exclusivamente à compressão, comportamento altamente compatível com o concreto armado. No entanto, devido a imposições geométricas e topográficas, os arcos raramente operam em compressão pura, estando também sujeitos a momentos fletores.

As pontes em arco podem ter tabuleiro superior, intermediário ou inferior; neste manual, serão abordados apenas os casos com tabuleiro superior, nos quais as cargas permanentes e móveis são transmitidas aos arcos por meio de vigas longitudinais e pilares com pequeno espaçamento. Nos arcos desconectados do vigamento principal e, consequentemente, do tabuleiro, as vigas de contraventamento são de extrema importância para garantir estabilidade transversal e reduzir os efeitos de segunda ordem.

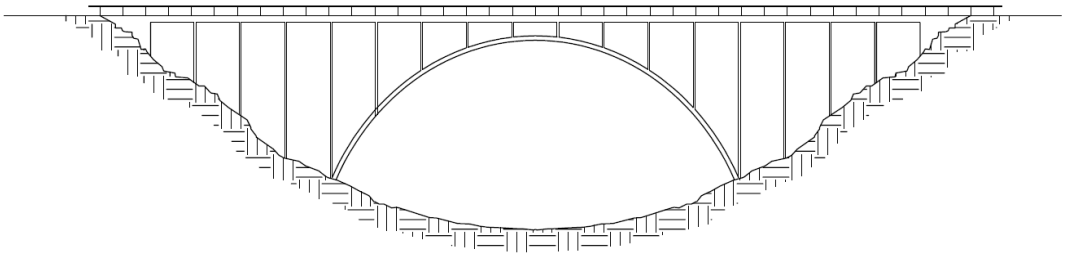
O uso de pontes em arco tornou-se menos frequente ao longo do tempo, principalmente em razão do avanço da tecnologia do concreto protendido, possibilitando a ampliação dos vãos alcançados por pontes em viga, anteriormente restritos aos arcos. De modo geral, os arcos são recomendados para travessias em vales profundos, com tabuleiro superior, em situações nas quais os empuxos horizontais possam ser resistidos por fundações economicamente viáveis, como em solos competentes ou em rocha. Em terrenos planos, as pontes em arco geralmente adotam o tabuleiro inferior, integrado ao sistema estrutural, funcionando como um tirante para conter os empuxos horizontais do arco.

Apesar do bom desempenho estrutural, o arco apresenta como desvantagem o elevado custo associado à construção das fôrmas e do cimbramento, o que contribuiu para a redução de seu uso. No entanto, a partir da década de 1990, houve uma retomada da aplicação desse sistema, especialmente em grandes vãos, impulsionada por métodos construtivos modernos, como execução em balanço sucessivo e aduelas pré-moldadas.

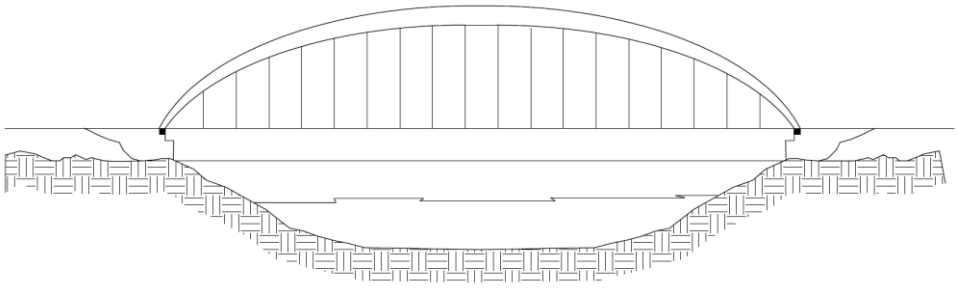
A Figura 5.14 apresenta os principais tipos de pontes em arco.



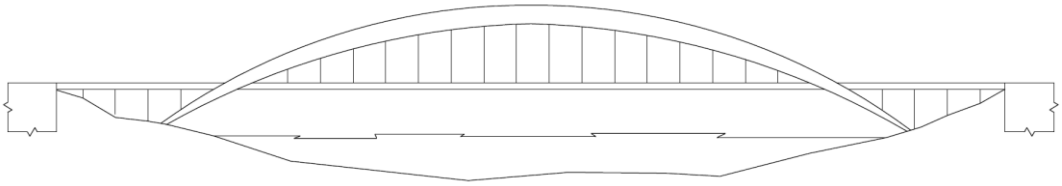
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.14 Tipos de pontes em arco: (a) ponte em arco com tabuleiro superior ligado ao arco; (b) ponte em arco com tabuleiro superior desligado ao arco; (c) ponte em arco com tabuleiro inferior; (d) ponte em arco com tabuleiro intermediário

De acordo com sua função estrutural na ponte, os arcos podem ser classificados como elementos da mesoestrutura ou da superestrutura, sendo equivalentes a pilares com grande curvatura. Quando há uma adequada relação entre os carregamentos e a curvatura do arco, resultam estruturas eficientes e econômicas, capazes de vencer grandes vãos. As seções transversais dos arcos podem assumir diferentes geometrias – quadradas, retangulares, do tipo abóbada alveolar e até mesmo circulares – a escolha depende de critérios estruturais, arquitetônicos e construtivos.

Armaduras em elementos de pontes em arco

- **Arcos:** utilizam-se armaduras corridas, com reforços localizados que acompanham a geometria dos arcos. As armaduras principais situam-se na parte inferior e superior da seção, sendo dimensionadas para flexão composta, com predominância de esforços de compressão. Estribos e armaduras de pele complementam a armadura principal dos arcos.
- **Pilares:** aplica-se armadura convencional, composta por barras longitudinais (aços verticais) e estribos para confinamento.
- **Tabuleiro:** as armaduras são semelhantes às já descritas para superestruturas em lajes moldadas no local e para superestruturas em vigas em T. Apesar das pequenas dimensões dos vãos, deve-se atentar para o fato de que os arcos, atuando como apoios elásticos, alteram significativamente as envoltórias de esforços convencionais.
- **Vigas de contraventamento:** utilizam-se armaduras convencionais distribuídas por todo o perímetro da seção, com destaque para as regiões inferior e superior das vigas, onde há maior solicitação.

Os arcos conectados ao vigamento longitudinal e, consequentemente, ao estrado, trabalham em condições mais favoráveis do que os arcos isolados. Isso se deve ao ganho de resistência proporcionado pela incorporação do estrado em seções fortemente solicitadas, além de garantirem um contraventamento mais eficaz no topo da estrutura.

5.1.1.6 Vigas-caixão em concreto armado

As vigas-caixão, em geral monocelulares, são soluções esteticamente agradáveis e estruturalmente recomendadas para pontes em curva e para vãos maiores. Em concreto armado, são normalmente especificadas para vãos superiores a 25 metros, e em concreto protendido, para vãos acima de 35 metros. Podem ser moldadas no local, com escoramento, ou pré-moldadas em segmentos (aduelas), posteriormente transportadas e posicionadas na estrutura. Por meio do processo construtivo de avanços sucessivos, esse tipo de estrutura tem vencido vãos da ordem de 250 metros (Figura 5.15).

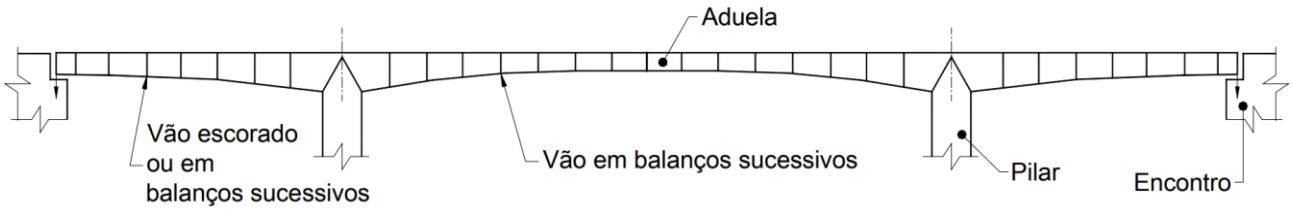


Figura 5.15 Seção longitudinal de estrutura contínua construída com balanços sucessivos

As vigas-caixão podem ser isostáticas, com um único vão e extremidades em balanço, ou contínuas, com dois ou mais vãos (Figura 5.16), com balanços ou apoiadas diretamente nos encontros. São compostas por vigas longitudinais, laje superior, laje inferior, transversinas de apoio, transversinas extremas e transversinas centrais, estas últimas, recomendadas para vãos superiores a 40 metros.

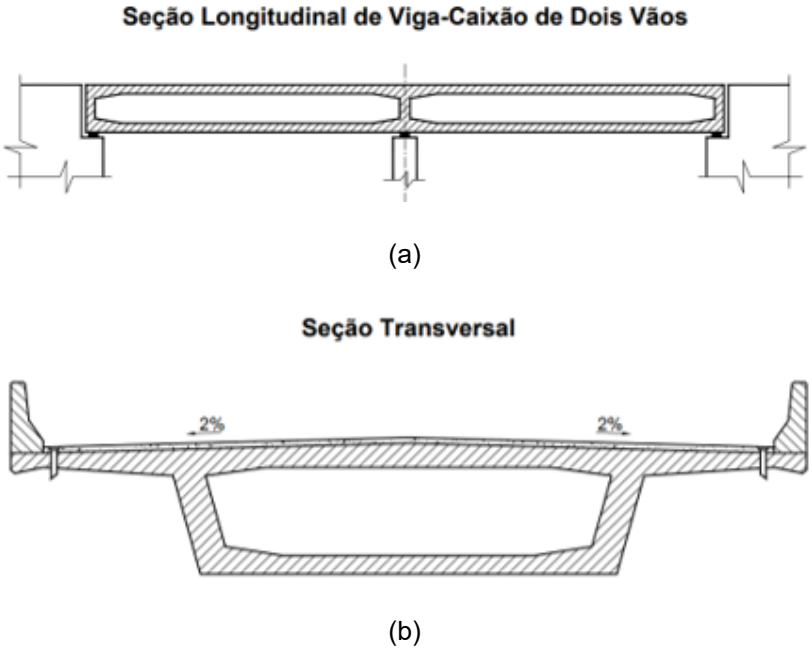


Figura 5.16 Viga-caixão de dois vãos: (a) seção longitudinal; (b) seção transversal

A seção transversal dessas vigas é geralmente trapezoidal, com abas superiores em balanço, combinando armaduras passivas com cabos de protensão de alta resistência, formando uma seção capaz de suportar toda a largura do tabuleiro. Em pontes de largura elevada, a parte inferior pode ser subdividida com almas internas, configurando uma viga-caixão multicelular.

Durante muito tempo, as vigas-caixão foram projetadas com concepção e detalhamento inadequados: as armaduras de flexão eram concentradas apenas nas nervuras, as lajes inferiores eram excessivamente esbeltas e pouco armadas, e as armaduras de pele eram pouco densas e insuficientes. Atualmente, regulamentos e normas técnicas estabelecem diretrizes para o correto detalhamento das vigas-caixão, incluindo critérios para armaduras mínimas.

Essas vigas podem ser moldadas *in loco* ou produzidas por métodos segmentares. A construção segmentada, amplamente utilizada, permite produzir cada aduela individualmente e conectá-la às anteriores por protensão, sendo indicado para locais de difícil acesso, como terrenos íngremes ou áreas ambientalmente sensíveis, onde o uso de cimbramento seria inviável.

Os segmentos possuem largura e altura completas da seção transversal da ponte. Em tabuleiros muito largos, pode-se empregar múltiplas células ou vigas caixão justapostas, com juntas longitudinais preenchidas por concretagem moldada no local. O comprimento de cada segmento depende do método construtivo adotado, da disponibilidade de equipamentos e das restrições logísticas de transporte. Durante a montagem, cada novo segmento é suportado por segmentos já instalados, garantindo a estabilidade da estrutura ao longo da execução.

Patologias frequentes por falha de armadura

- **Laje superior:** quando parte das armaduras de flexão longitudinal nos apoios não é distribuída por toda a largura da laje, surgem fissuras transversais. Em geral, as próprias armaduras de flexão da laje são suficientes para absorver as tensões de torção do caixão, não devendo ocorrer fissuras longitudinais.
- **Laje inferior:** quando parte das armaduras de flexão longitudinal nos vãos não é distribuída por toda a largura da laje, também surgem fissuras transversais. Diferentemente da laje superior, as armaduras de flexão não são suficientes para absorver as tensões de torção do caixão, salvo se tiverem sido convenientemente reforçadas, é comum a ocorrência de fissuras longitudinais.

5.1.2 Estrutura principal de concreto protendido

No concreto protendido, são amplamente utilizados elementos estruturais submetidos principalmente a momentos fletores, forças cortantes e momentos de torção, tais como vigas I, vigas T, lajes moldadas no local, lajes alveolares e vigas celulares. Essas tipologias são aplicáveis à superestrutura, sendo as vigas I e T, em geral, pré-moldadas.

5.1.2.1 Vigas I ou T para concreto protendido

As vigas do tipo I ou T, dispostas em número mínimo de duas ou em múltiplos (Figura 5.17), são vinculadas monoliticamente às lajes, promovendo aumento da resistência e da rigidez global da estrutura. As vigas transversais, quando existentes e usualmente denominadas transversinas, podem ser conectadas às lajes ou executadas de forma independente, conforme critérios de viabilidade construtiva.

Superestruturas em vigas T podem apresentar comportamento isostático, em sistemas de um único vão, ou contínuo, quando compostas por dois ou mais vãos. Esse arranjo estrutural permite, com economia significativa de material, vencer vãos da ordem de 45 metros, sendo o limite condicionado principalmente à capacidade das treliças de lançamento.

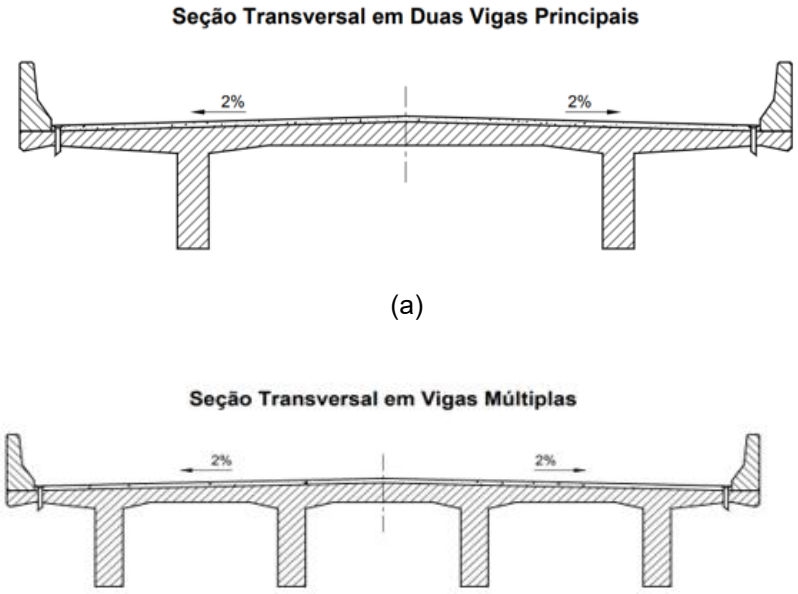


Figura 5.17 Seções transversais de tabuleiros de pontes com diferentes sistemas estruturais: (a) duas vigas principais; (b) vigas múltiplas

As vigas I (Figura 5.18) atuam como elementos principais da superestrutura, sustentando diretamente o tabuleiro. Geralmente moldadas em fábrica, com protensão realizada em pistas, podem vencer vãos de até cerca de 45 metros, embora, na prática, limitações logísticas de transporte restrinjam sua aplicação a aproximadamente 30 metros. Esse tipo de viga é amplamente utilizado nos Estados Unidos, onde existem seções padronizadas definidas pela AASHTO.

As vigas *bulb-tee* apresentam seção transversal em “T”, com espessamento em forma de bulbo na base da alma, o que confere maior eficiência estrutural e possibilita vencer vãos de até cerca de 60 metros. No Brasil, observa-se maior preferência pelas vigas T convencionais, que oferecem maior flexibilidade na definição das dimensões do talão, da mesa e da alma, permitindo melhor aproveitamento estrutural da viga (Figura 5.18).

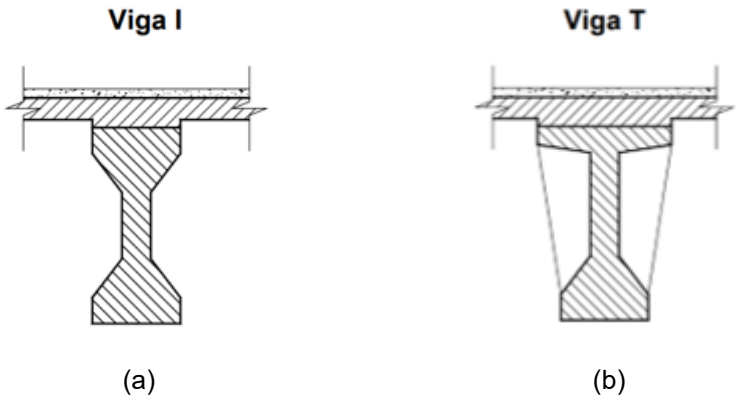


Figura 5.18 Seções transversais de vigas em concreto protendido: (a) viga tipo I; (b) viga tipo T

Na Figura 5.19, identifica-se a disposição das vigas pré-moldadas e da laje estrutural moldada sobre as pré-lajes, ilustrando como esses elementos colaboram na estruturalmente.

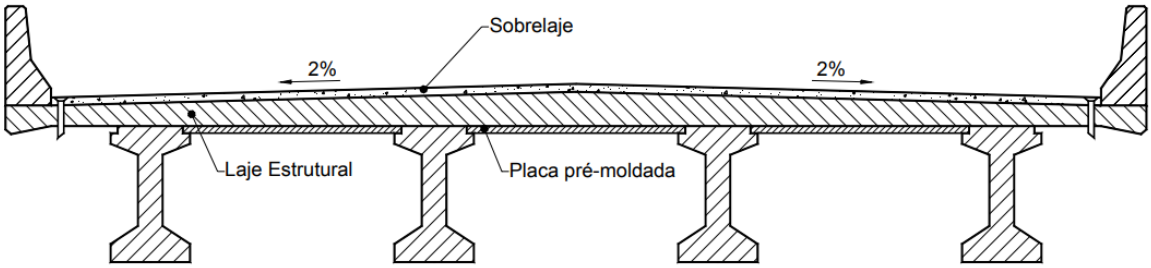


Figura 5.19 Seção transversal de vigas pré-moldadas e laje estrutural moldada sobre pré-lajes

Em outra configuração, as vigas podem atuar em conjunto com lajes estruturais moldadas entre elas, conforme apresentado na Figura 5.20.

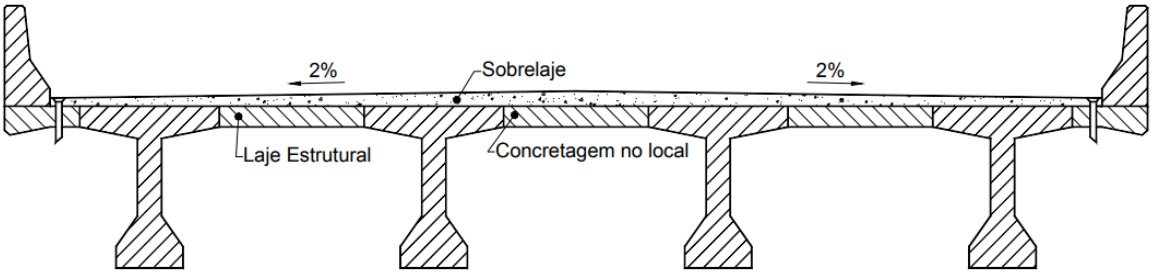


Figura 5.20 Seção transversal de laje estrutural moldada entre vigas

5.1.2.2 Lajes moldadas em concreto protendido

A superestrutura em laje é uma das soluções mais simples, composta exclusivamente por uma laje estrutural, sem vigas longitudinais ou transversais (Figura 5.21). Construída com formas simples, é indicada apenas para vencer pequenos vãos, geralmente da ordem de 10 metros. As superestruturas em laje podem ser isostáticas, com um único vão (ou múltiplos vãos separados por juntas), ou contínuas, com dois ou mais vãos interligados.

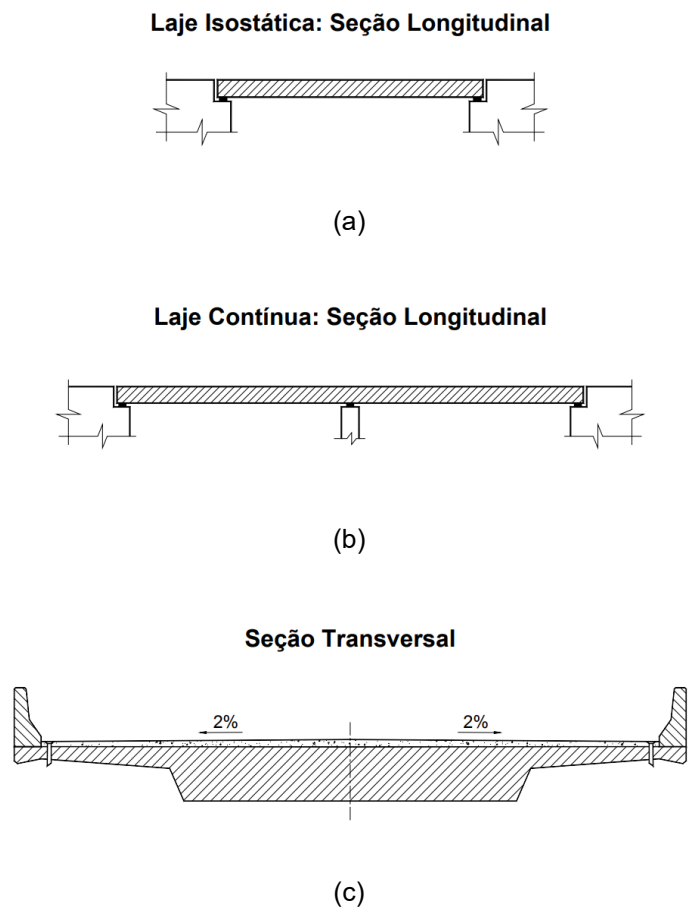
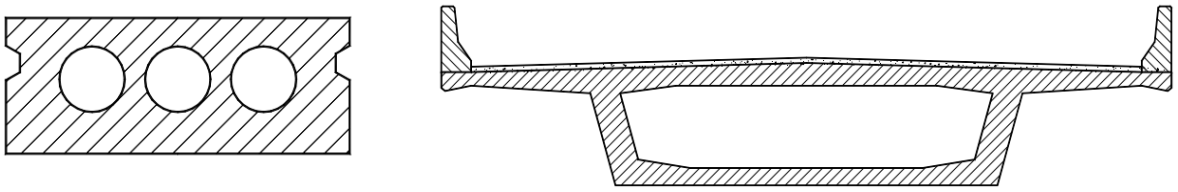


Figura 5.21 Esquemas de lajes em pontes: (a) laje isostática – seção longitudinal; (b) laje contínua – seção longitudinal; (c) seção transversal da laje

Nas pontes em laje isostáticas, a armadura principal localiza-se no fundo da laje, no sentido longitudinal, estendendo-se de apoio a apoio. As armaduras secundárias, de menor dimensão, são dispostas no sentido transversal. Já nas pontes em laje contínuas, as armaduras principais continuam no sentido longitudinal, mas sua posição varia: ficam no fundo da laje nos vãos e no topo da laje sobre os apoios.

5.1.2.3 Lajes alveolares em concreto protendido

As lajes alveolares constituem sistemas estruturais completos, desempenhando simultaneamente o papel de laje e vigas, dispensando a presença de vigamento longitudinal e transversal. A Figura 5.22 apresenta a forma da seção transversal típica das lajes alveolares e da viga-caixão.



(a) (b)

Figura 5.22 Seção transversal de elemento laje: (a) laje alveolar; (b) seção caixão

As lajes alveolares podem ser executadas de duas formas:

- **Pré-moldadas:** quando compostas por elementos de largura reduzida, exigem a execução de uma laje estrutural superior que promova a solidarização entre os painéis (Figura 5.23);
- **Moldadas no local:** sobre escoramento, quando ocupam toda a largura do tabuleiro e recebendo apenas uma sobrelaje para fechamento (Figura 5.24).

As principais vantagens desse sistema são:

- estética arquitetônica;
- simplicidade construtiva;
- economia de materiais (proporcionada pelos vazios internos que reduzem o consumo de concreto e o peso próprio da estrutura).

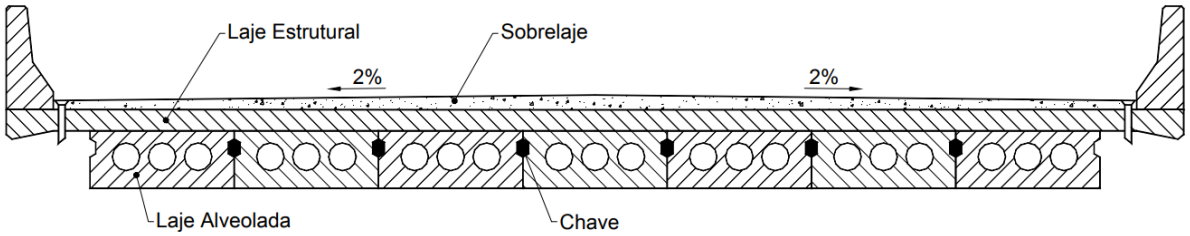


Figura 5.23 Seção transversal de laje alveolar de elementos pré-moldados

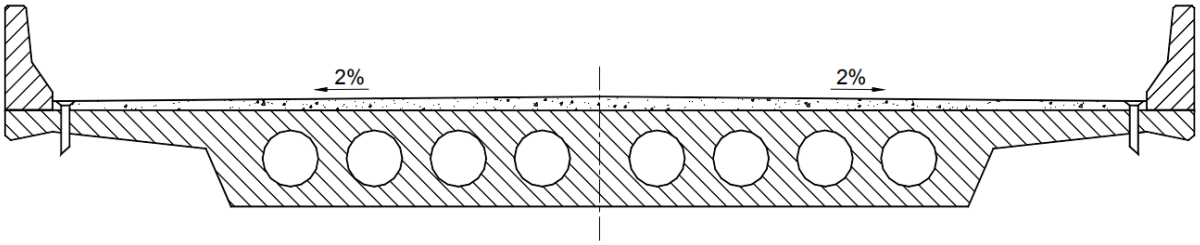


Figura 5.24 Seção transversal de laje alveolar moldada no local

As lajes alveolares são usualmente empregadas em vãos da ordem de 20 a 30 metros, com altura aproximada de 1,20 metros. Os elementos são acoplados lateralmente por meio de “chaves” de concreto, sendo recomendável o uso de armaduras de espera e a execução de uma laje superior para garantir o comportamento solidário da estrutura. Este tipo de solução é isostático, indicada para vãos de até 25 metros.

As armaduras principais das lajes alveolares são compostas por fios aderentes protendidos, localizados no fundo dos elementos e tensionados em pista, nas fábricas. As armaduras secundárias incluem estribos e barras de aço convencionais posicionadas nas faces laterais e no topo, conferindo conformação e resistência adicional à peça.

5.1.2.4 Vigas celulares pré-moldadas protendidas

As superestruturas compostas por vigas celulares pré-moldadas são, em geral, isostáticas e constituídas por elementos retangulares protendidos, contendo um único vazio interno, geralmente também de forma retangular. O topo e o fundo desses elementos funcionam como mesas, enquanto as paredes laterais, atuam como almas das vigas. Como ordem de grandeza, as dimensões desses elementos podem variar conforme segue:

- largura: entre 90 a 120 cm;
- altura: entre 60 a 150 cm;
- espessura das mesas e das almas: entre 8 a 15 cm.

Os elementos pré-moldados podem ser dispostos na seção transversal de duas maneiras: justapostos (Figura 5.25), ou separados, (Figura 5.26).

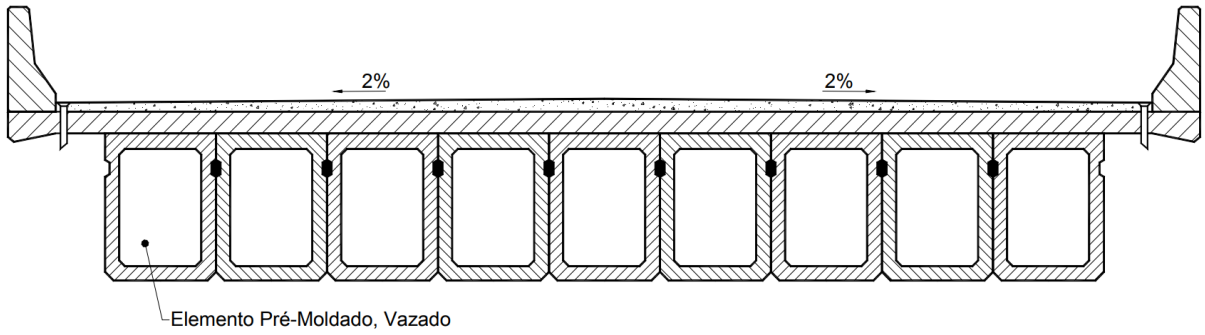


Figura 5.25 Seção transversal de elementos justapostos

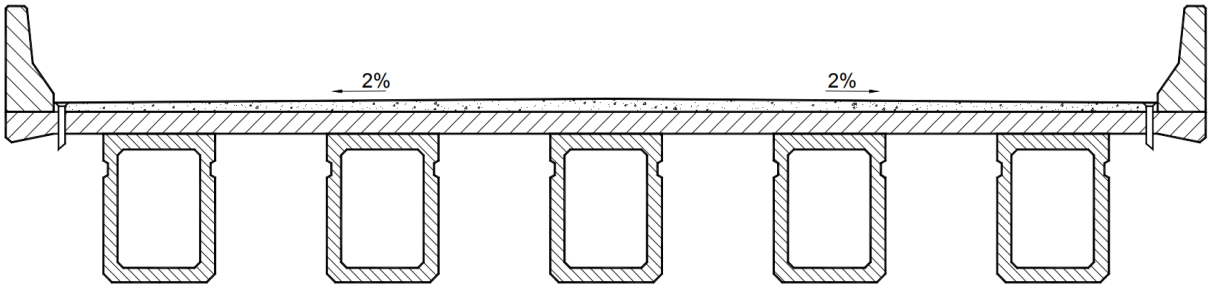


Figura 5.26 Seção transversal de elementos separados

A. Configuração com vigas justapostas

Nas pontes com vigas celulares justapostas, os elementos são colocados lado a lado, sem espaçamento entre eles. Em algumas aplicações, a mesa superior de cada viga permanece exposta e atua diretamente como laje de rolamento. Essa configuração é adequada para vãos de 6 a 40 metros.

Na configuração com elementos justapostos, os painéis pré-moldados protendidos são colocados lado a lado e tornam-se monolíticos por meio de “chaves” de concreto moldadas no local, bem como pela execução de uma laje superior em concreto armado, que é solidária aos elementos por meio de armaduras de espera. É indispensável a previsão de drenos na parte inferior de cada elemento, garantindo o escoamento adequado de água.

B. Configuração com vigas separadas

Em pontes com vigas celulares separadas, as vigas são normalmente espaçadas de 0,60 a 1,80 metros, sendo utilizada uma laje moldada no local para garantir a ação composta. Essa aplicação é prática para vãos de 7,5 a 26 metros. Fôrmas removíveis ou permanentes são utilizadas entre as vigas para sustentar a laje até a cura do concreto.

C. Emprego no Brasil

Embora aptas a vencer vãos de até cerca de 40 metros, as vigas celulares pré-moldadas não são amplamente empregadas no Brasil, possivelmente devido à falta de padronização e continuidade nas encomendas para obras desse tipo.

Para vãos menores, de até cerca de 25 metros, o número de elementos pode ser reduzido, sendo possível o seu espaçamento na seção transversal. Intervalos entre 50 cm e 150 cm entre elementos têm sido utilizados com sucesso. Nessa configuração, apenas a laje superior, em concreto armado convencional e ligada aos elementos protendidos por armaduras de espera, é responsável por garantir o comportamento solidário da estrutura.

D. Armaduras

- **Armaduras principais:** fios protendidos aderentes, posicionados na mesa inferior e na parte inferior das almas.
- **Armaduras secundárias:** compreendem estribos, armaduras de pele e armaduras de espera, que garantem a integridade estrutural e a união entre os elementos.

5.1.3 Estrutura principal metálica

A estrutura principal metálica de pontes e viadutos é composta por elementos que podem ser, de forma geral, classificados em dois grupos:

- **Elementos lineares (hastes ou barras):** trabalham predominantemente à tração ou compressão ao longo de seu eixo.
- **Elementos planos (placas ou chapas):** são solicitados por esforços distribuídos, com flexão, cisalhamento ou torção.

Entre os elementos metálicos carregados axialmente destacam-se as treliças e as grelhas planas. Os elementos solicitados por compressão (pilares, arcos e fundações), também são axiais e podem ser executados em aço ou concreto armado. Assim, a forma destes elementos em aço segue o que já foi citado na seção 5.1.1 deste manual, para concreto.

Entre os elementos que não atuam axialmente, destacam-se as vigas metálicas, que são solicitadas por cargas transversais, resultando em momentos fletores e esforços cortantes. Em alguns casos, essas vigas também podem estar submetidas à torção. Nas estruturas metálicas de pontes e viadutos, é comum o uso de vigas de alma cheia, com seções transversais do tipo I, H, T ou U, dimensionada principalmente para resistir à flexão.

Outro tipo frequente são as seções caixão ou tubulares retangulares, que apresentam dois eixos de simetria e oferecem bom desempenho tanto em relação à flexão quanto à torção, sendo indicadas para vãos maiores ou situações com carregamentos assimétricos.

5.1.3.1 Treliças metálicas

Treliças são estruturas compostas por elementos retos dispostos de modo a formar triângulos, cuja função principal é transmitir cargas por meio de forças axiais de tração e compressão nas barras. Este sistema estrutural é amplamente utilizado em pontes metálicas, devido à sua eficiência mecânica e à economia de material.

Do ponto de vista teórico, considera-se que os elementos das treliças são interligados por nós articulados, sem atrito, e que as cargas externas atuam exclusivamente nesses nós. Nessa idealização, as barras estão sujeitas apenas a esforços axiais de tração ou compressão, sem a ocorrência de flexão ou torção. Na prática, entretanto, as ligações entre os elementos tendem a apresentar comportamento rígido, introduzindo momentos fletores nos nós. Ainda assim, em razão da elevada esbeltez das barras, tais efeitos de flexão são, em geral, pouco significativos e não descaracterizam a treliça como uma estrutura predominantemente axial (Figura 5.27).

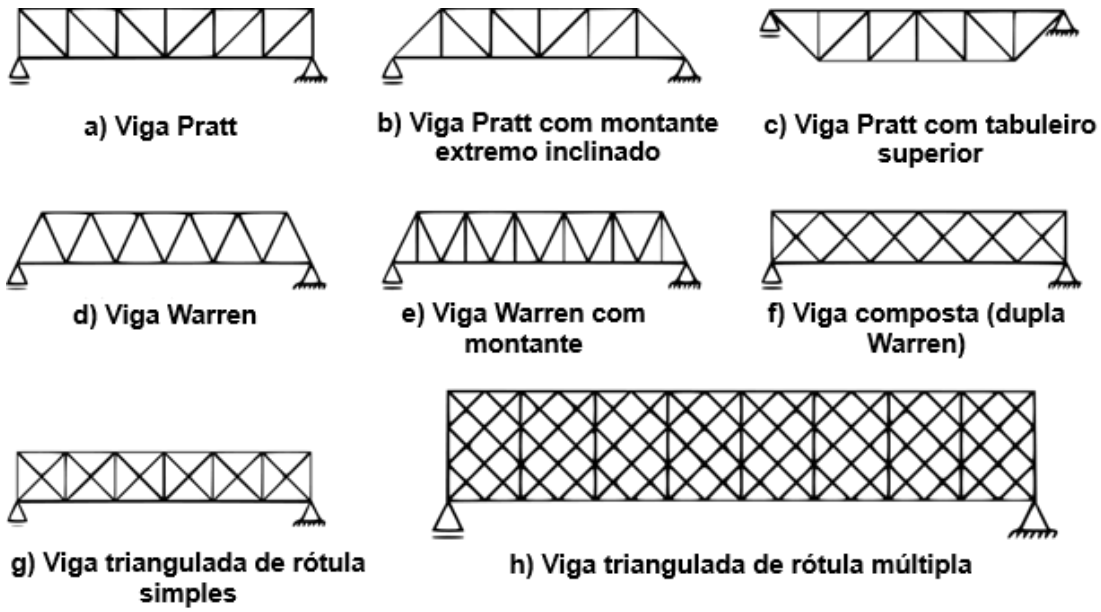


Figura 5.27 Tipos de estruturas de vigas treliçadas metálicas

Fonte: Pereira (2018)

A treliça pode ser definida como uma associação estável de elementos retos que compõem triângulos, apresentando as seguintes características principais:

- os eixos dos elementos são retos e concorrem em pontos denominados nós;
- os carregamentos são aplicados somente nos nós;
- as barras trabalham predominantemente à tração ou compressão, sem flexão significativa;
- na prática, as ligações apresentam certa rigidez, sujeitas a momentos fletores indesejáveis, porém de pequena magnitude, geralmente absorvidos pelas próprias dimensões dos elementos e pelas técnicas de acoplamento empregadas.

A superestrutura de uma ponte em treliça é constituída por duas treliças longitudinais paralelas, pelo tabuleiro e pelos sistemas de contraventamento. Esse tipo de estrutura pode ser empregado para vencer desde pequenos até grandes vãos, sendo configurado como sistema de um único vão, múltiplos vãos isostáticos, vãos contínuos ou ainda em soluções em balanço associadas a vãos isostáticos.

As treliças oferecem duas vantagens estruturais principais:

- predominância de esforços axiais nos elementos estruturais, permitindo grande eficiência do material;
- geometria de alma aberta, que possibilita altura estrutural maior em comparação com vigas de alma cheia de mesmo peso, resultando em maior rigidez e menores deformações.

Como limitações, as treliças apresentam maior custo de fabricação e manutenção. Em sua forma básica, são compostas por banzo superior, banzo inferior, diagonais e, eventualmente, montantes verticais. Diversos arranjos foram desenvolvidos ao longo do tempo, muitos dos quais ainda levam o nome de seus projetistas originais.

Em uma treliça isostática, o banzo inferior é geralmente tracionado, enquanto o superior é comprimido. Quanto às diagonais e montantes, regras práticas podem indicar o tipo de esforço predominante; no entanto, devido à variabilidade das cargas móveis, esses elementos podem estar tracionados ou comprimidos dependendo da posição das cargas. A Figura 5.28, apresenta um esquema completo de um vão de ponte em treliça.

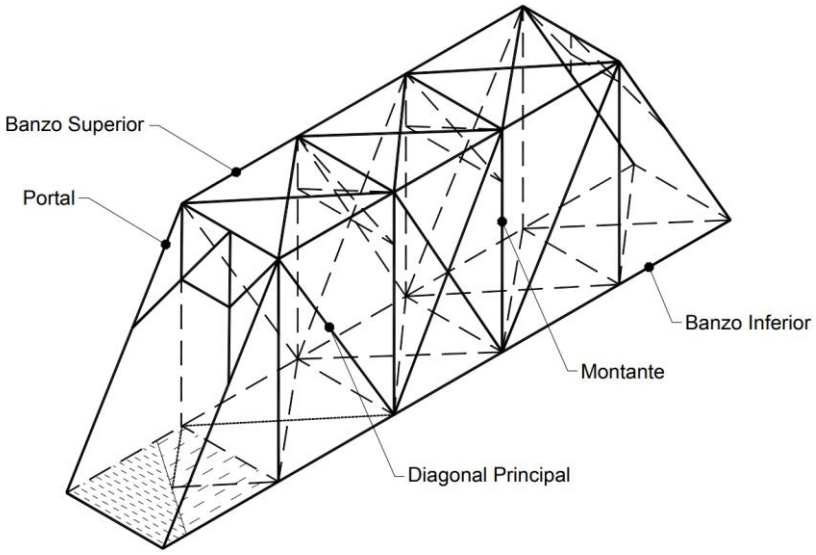


Figura 5.28 Representação gráfica dos elementos constituintes de uma treliça

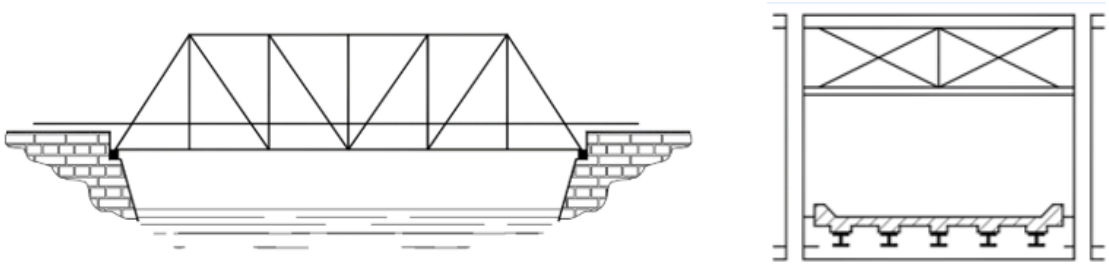
Os tipos de treliças podem ser classificados conforme dois critérios principais: (a) posição relativa do tabuleiro e (b) geometria da disposição das diagonais.

A. Posição relativa do tabuleiro:

Refere-se à localização do tabuleiro em relação às treliças longitudinais:

- Tabuleiro inferior com contraventamento superior

O tabuleiro é posicionado entre as duas treliças. Essa solução é adotada quando há restrições de gabarito inferior (Figura 5.29).

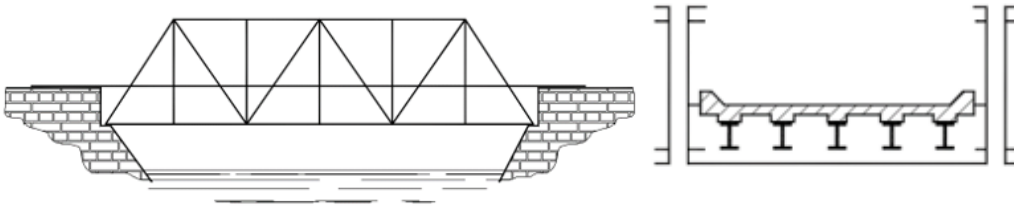


(a) (b)

Figura 5.29 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro inferior e contraventamento superior: (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal do sistema estrutural

- Tabuleiro inferior sem contraventamento superior

Estas treliças apresentam altura reduzida em relação ao modelo com contraventamento superior. Deixaram de ser projetadas em novas obras, sendo substituídas por superestruturas com vigas múltiplas (Figura 5.30).

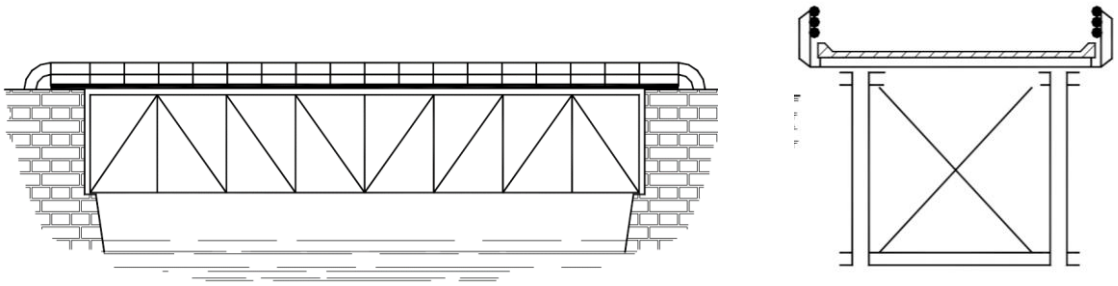


(a) (b)

Figura 5.30 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro inferior e sem contraventamento superior: (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal

- Tabuleiro superior

O tabuleiro principal é apoiado sobre as treliças. Não há restrições de gabarito vertical, e o gabarito horizontal pode ser ampliado com o alargamento do tabuleiro, sem necessidade de deslocar as treliças (Figura 5.31).



(a) (b)

Figura 5.31 Esquema de ponte em treliça com tabuleiro superior: (a) vista longitudinal da estrutura; (b) seção transversal

B. Geometria

A classificação geométrica se baseia no arranjo das diagonais:

- Treliça Pratt

Possui diagonais tracionadas e montantes comprimidos. Para carregamentos usuais, essa definição corresponde ao arranjo, oferecendo boa eficiência estrutural, já que os montantes, comprimidos, são mais curtos que as diagonais, tracionadas (Figura 5.32).

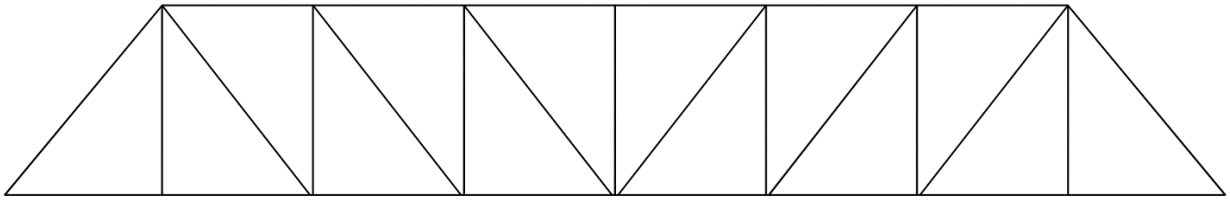


Figura 5.32 Esquema de treliça do tipo Pratt

- Treliça Howe

Arranjo oposto ao Pratt: diagonais comprimidas e montantes tracionados. Indicada para cargas e geometrias específicas (Figura 5.33).

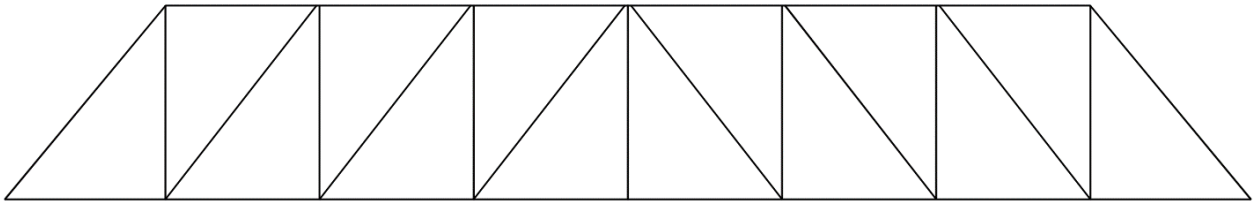


Figura 5.33 Esquema de treliça do tipo Howe

- Treliça Warren

Possui diagonais alternadas em compressão e tração. Pode ser complementada por elementos verticais para reforço ou controle da deformação (Figura 5.34).

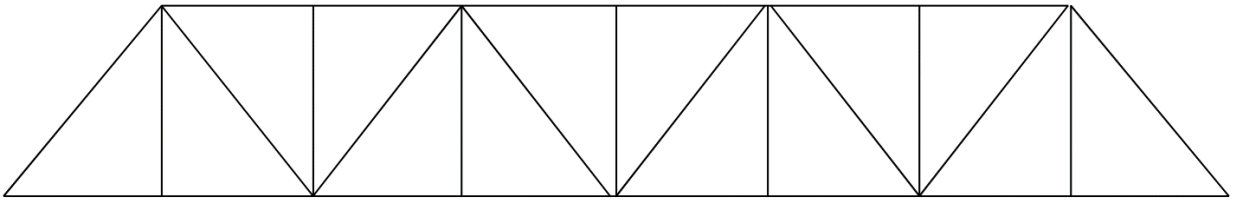


Figura 5.34 Esquema de treliça do tipo Warren

- Treliça K

Indicada quando a altura da célula é de duas a três vezes o seu comprimento, resultando em diagonais que formam um padrão em “K” (Figura 5.35).

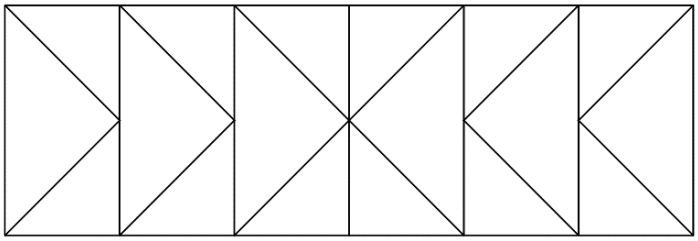


Figura 5.35 Esquema de treliça do tipo K

C. Elementos estruturais na ponte em treliça

- **Elementos principais:** duas treliças longitudinais e um vigamento do tabuleiro.
- **Elementos secundários:** contraventamentos inferior e superior, responsáveis por estabilidade lateral e resistência a ações transversais.

5.1.3.2 Grelhas planas metálicas

As grelhas planas são formadas por vigas dispostas em direções ortogonais e/ou oblíquas, responsáveis por suportar cargas aplicadas perpendicularmente ao seu plano. Esse tipo de estrutura é amplamente utilizado nas superestruturas de pontes.

As grelhas estão sujeitas simultaneamente a deformação axial, flexão e torção, em razão da interação entre as vigas e da sua capacidade de distribuir esforços entre múltiplos elementos (Figura 5.36).

Figura 5.36 Tabuleiro metálico tipo grelha plana

Fonte: SGE – DNIT

5.1.3.3 Vigas mistas múltiplas de perfis laminados

As vigas mistas múltiplas de perfis laminados constituem uma solução indicada para vãos curtos, geralmente entre 10 e 15 metros. Os vãos são, em geral, isostáticos, e as vigas metálicas são dispostas em múltiplos perfis, rigidamente conectados à laje de concreto, formando um sistema misto aço-concreto.

Para aumentar a capacidade resistente desses perfis, é possível a adição de chapas soldadas nos flanges. No entanto, essa solução requer uma análise criteriosa das possibilidades de ocorrência de fadiga e das fissuras associadas a esse fenômeno. A Figura 5.37 apresenta um esquema da seção transversal típicas de vigas mistas múltiplas com perfis laminados. A Figura 5.38 mostra exemplos reais desse tipo de solução estrutural.

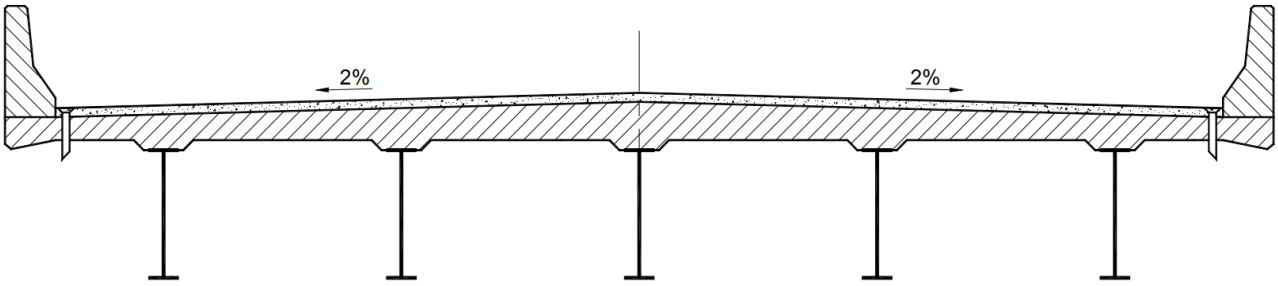


Figura 5.37 Seção transversal de vigas mistas múltiplas de perfis laminados

Figura 5.38 Exemplo de vigas mistas múltiplas de perfis laminados

Os elementos principais do sistema são as vigas longitudinais, enquanto os elementos secundários correspondem às transversinas, que podem ser classificadas como intermediárias ou extremas, dependendo da sua posição ao longo do tabuleiro.

5.1.3.4 Vigas mistas de chapas soldadas

As vigas mistas de chapas soldadas, por não apresentarem limites fixos de altura ou forma, podem ser projetadas com altura variável, o que permite vencer vãos maiores, sejam eles isostáticos ou contínuos. Com o aumento de altura das vigas, aumenta também a probabilidade de ocorrência de flambagem lateral das almas. Para evitar esse tipo de instabilidade, diferentes recursos podem ser empregados:

- aumento da espessura da alma;
- instalação de enrijecedores, que podem ser verticais ou horizontais, dispostos em ambos os lados da alma ou apenas em um dos lados.

As conexões entre as almas e os flanges, entre as almas e os enrijecedores, bem como entre as almas e as transversinas, que anteriormente eram feitas com rebites ou parafusos, atualmente são executadas por meio de soldagem, conferindo maior rigidez e continuidade estrutural.

As pontes com vigas mistas de chapas soldadas podem empregar duas vigas principais ou múltiplas vigas. Quando há apenas duas vigas principais, torna-se necessária a introdução de longarinas (vigas longitudinais intermediárias) apoiadas nas transversinas, para evitar carregamentos concentrados na laje (Figura 5.39). A Figura 5.40 ilustra um exemplo de aplicação real desse tipo de estrutura.

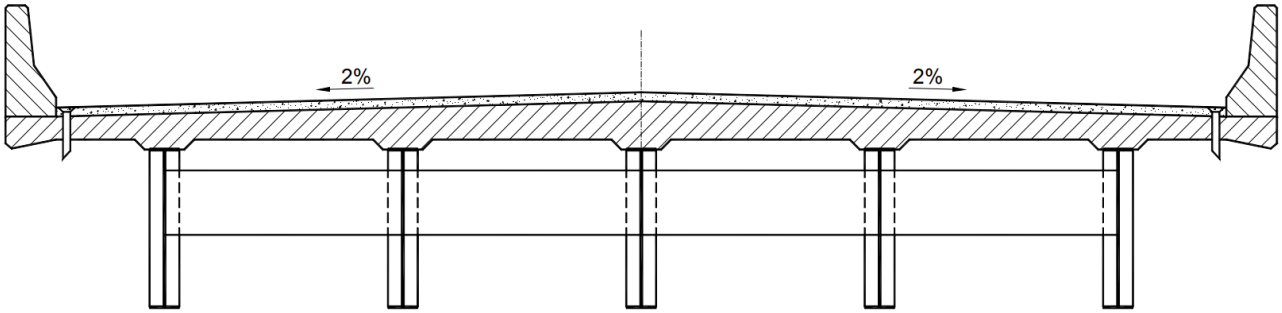


Figura 5.39 Seção transversal de vigas mistas múltiplas de chapas soldadas

Figura 5.40 Exemplo de vigas mistas múltiplas de chapas soldadas

Fonte: ECOPONTES

Os elementos principais são as vigas principais soldadas e, em pontes curvas, também as transversinas, que desempenham papéis fundamentais:

- resistir às solicitações de torção típicas de tabuleiros curvos;
- garantir o correto posicionamento e estabilidade das vigas durante a construção;
- contribuir para a distribuição das cargas móveis na fase de serviço.

Os elementos secundários correspondem às transversinas intermediárias, geralmente soldadas aos enrijecedores transversais das vigas principais, com as mesmas finalidades: assegurar o posicionamento e a estabilidade estrutural durante a construção e promover uma distribuição mais eficiente das cargas móveis na fase de serviço.

5.1.3.5 Vigas-caixão metálicas

A superestrutura em viga-caixão consiste, basicamente, em um caixão metálico, de forma retangular ou trapezoidal, constituído por duas vigas laterais, uma chapa metálica inferior e um elemento superior (Figura 5.41).

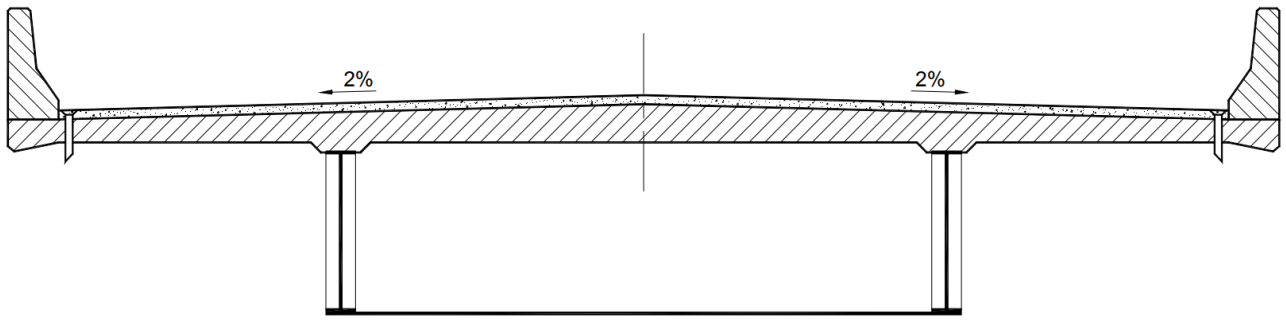


Figura 5.41 Seção transversal de viga-caixão com caixão único

Para o elemento superior, existem pelo menos três possibilidades:

- laje de concreto armado;
- chapa metálica, ou
- placa ortotrópica.

Todas com largura superior à do caixão. Esse elemento é ligado elasticamente às vigas laterais, transformando-as em vigas mistas e, consequentemente, aumentando sua capacidade resistente.

Todas as ligações estruturais são atualmente soldadas, e as vigas, bem como a chapa inferior, devem ser enrijecidas nas zonas de compressão. As lajes ortotrópicas também requerem enrijecimento. Por razões estéticas, todos os enrijecedores são soldados no interior do caixão. Além disso, todas as vigas-caixão devem possuir aberturas de acesso ao seu interior, a fim de possibilitar inspeções.

A ilustração da seção transversal de viga-caixão com caixão duplo pode ser conferida na Figura 5.42.

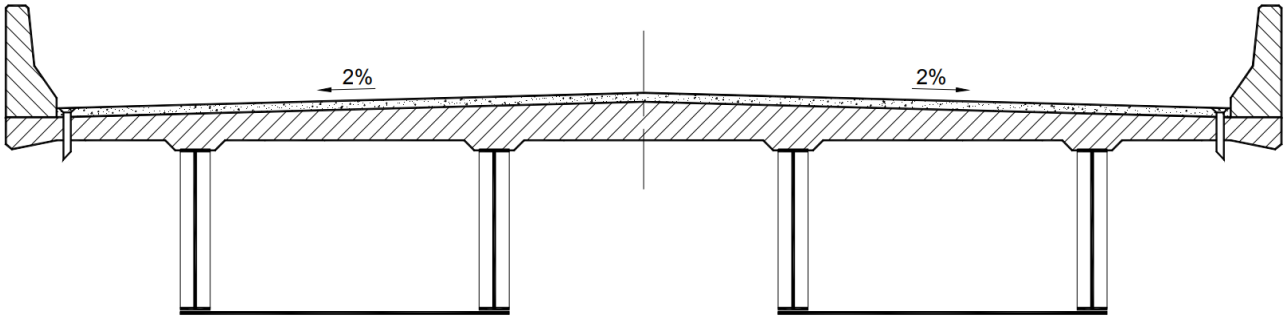


Figura 5.42 Seção transversal de viga-caixão com caixão duplo

As soluções estruturais em vigas-caixão são visualmente elegantes e adequadas para estruturas curvas e de grandes vãos. No Brasil, uma obra pioneira nesse tipo estrutural é a Ponte Iapu – Ipatinga / MG, com vários vãos contínuos de 80 m. Já o recorde mundial de vãos em viga-caixão reta com altura variável pertence à Ponte Rio-Niterói (Figura 5.43), com três vãos contínuos de 200 m - 300 m - 200 m.

Figura 5.43 Exemplo de seção transversal em caixão metálico – Ponte Rio-Niterói

Os elementos principais de uma viga-caixão são todos os seus componentes longitudinais. Em pontes curvas, os diafragmas assumem papel estrutural essencial, atuando como importantes enrijecedores do caixão. Esses diafragmas podem ser constituídos por chapas enrijecidas ou quadros compostos por cantoneiras, vigas em T e chapas. Em pontes retas, os diafragmas são considerados elementos secundários.

5.1.3.6 Arcos metálicos

Os arcos metálicos são estruturas curvas utilizadas para vencer grandes vãos, podendo apresentar geometrias parabólicas, circunferenciais ou elípticas. Assim como nos arcos de concreto, seu comportamento estrutural é caracterizado pela predominância de esforços de compressão ao longo do eixo curvo, acompanhados de componentes horizontais significativos.

Nas pontes metálicas, os arcos são frequentemente empregados como elementos principais de suporte ao tabuleiro. As pontes em arco geralmente exigem uma fundação sólida, capaz de resistir às elevadas cargas diagonais concentradas. A definição dos tipos de arco metálico segue os mesmos critérios apresentados para as estruturas de concreto, conforme descrito na subseção 5.1.1.5.

5.1.4 Estrutura principal especial

As pontes estaiadas caracterizam-se pela sustentação do tabuleiro por cabos inclinados (estais) ancorados em um, dois ou mais mastros. A partir desses mastros partem os cabos que se ligam ao tabuleiro da estrutura, transmitindo a ele as cargas permanentes e móveis (Figura 5.44). Nessa configuração, os estais trabalham à tração, enquanto o mastro e o tabuleiro encontram-se submetidos à compressão, comportamento semelhante ao de uma treliça em balanço.

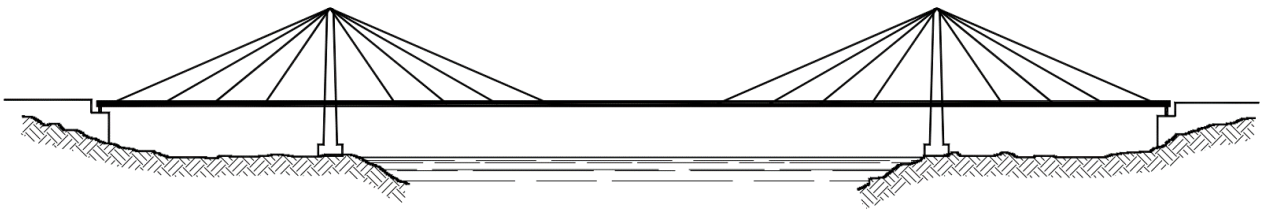


Figura 5.44 Desenho esquemático de uma estrutura especial estaiada

Uma das maiores vantagens construtivas das pontes estaiadas é a possibilidade de execução progressiva do tabuleiro, com equilíbrio das forças horizontais a cada etapa construtiva. Essa característica reduz a necessidade de estruturas auxiliares de suporte, como cimbramentos ou ancoragens maciças, facilitando a construção em áreas de difícil acesso ou com interferências urbanas.

Um exemplo desse sistema pode ser observado na Ponte Anita Garibaldi, BR-101/SC (Figura 5.45).

Figura 5.45 Ponte Anita Garibaldi, BR101 – SC

A tipologia das pontes estaiadas é definida de acordo com a distribuição dos estais em relação ao mastro, podendo assumir três configurações principais (Figura 5.46)

- **Harpa (a):** os estais são distribuídos ao longo de toda a altura do mastro, mantendo inclinações praticamente constantes e conferindo simetria à estrutura. O sistema proporciona organização racional das ancoragens, embora as inclinações reduzidas possam diminuir a eficiência estrutural.
- **Leque (b):** todos os estais convergem para o topo do mastro e se irradiam para o tabuleiro. Esse sistema oferece elevada eficiência estrutural e simplicidade visual, no entanto, apresenta dificuldades na execução devido ao acúmulo de ancoragens em um único ponto, o que demanda detalhamento e seções robustas no topo do mastro.
- **Semileque (c):** adota uma distribuição intermediária, concentrando os estais apenas na parte superior do mastro. Trata-se da configuração mais utilizada no Brasil, pois combina boa eficiência estrutural do sistema em leque com a maior facilidade de execução e detalhamento do sistema em harpa, resultando em uma solução tecnicamente adequada e economicamente vantajosa.

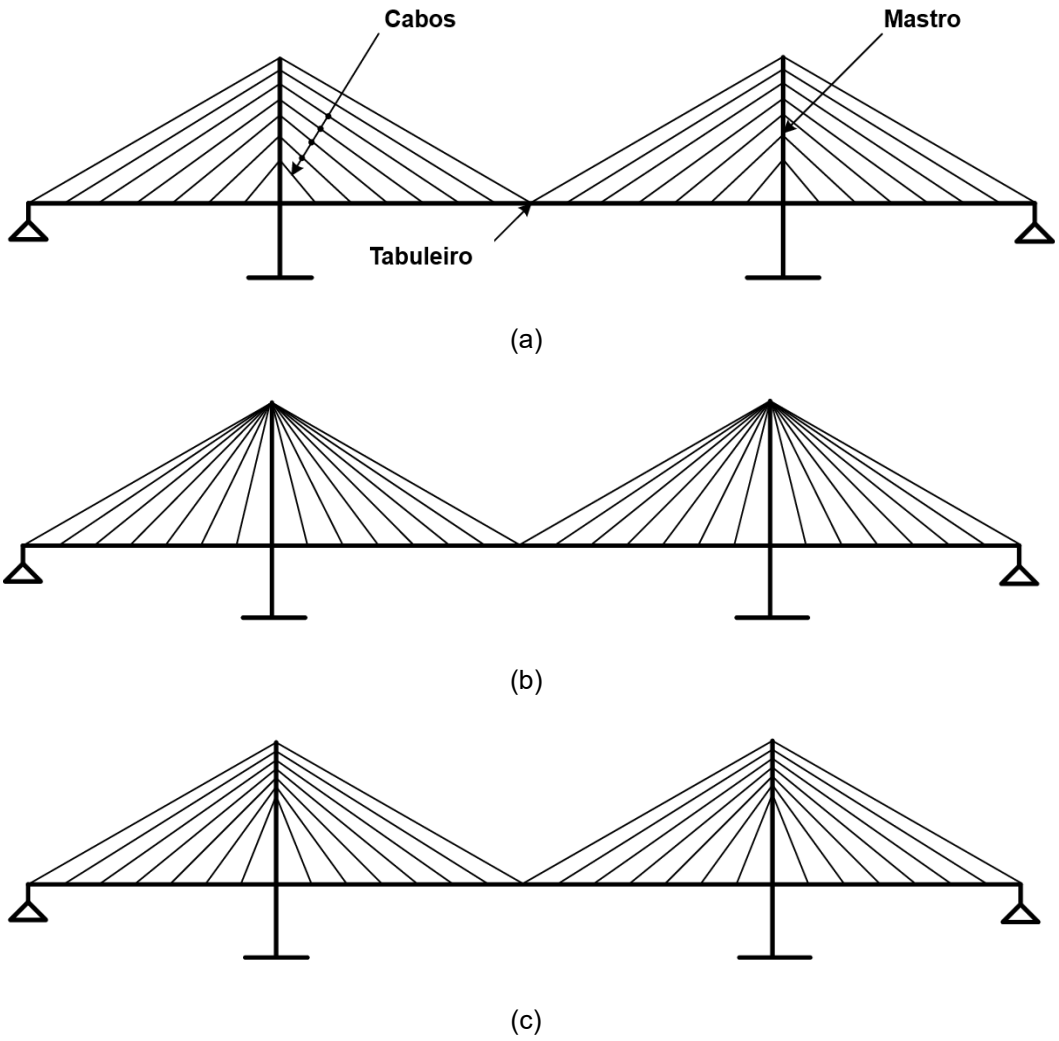


Figura 5.46 Desenho esquemático das configurações de pontes estaiadas: (a) em harpa; (b) em leque; (c) em semileque

As pontes pênseis são estruturas especiais que também utilizam cabos como elementos principais de sustentação, no entanto, diferenciam-se das estaiadas pela presença de cabos verticais (pendurais), que transferem as cargas do tabuleiro para cabos principais parabólicos (Figura 5.47). Enquanto nas estaiadas os cabos são inclinados e conectados diretamente ao tabuleiro, nas pênseis o carregamento é transmitido indiretamente, via pendurais.

Esses elementos apresentam comportamento estrutural altamente dependente da estabilidade aerodinâmica, uma vez que os cabos principais, apesar de suportarem eficientemente as cargas verticais por tração, praticamente não oferecem rigidez à flexão, o que torna o conjunto estrutural sensível à ação dos ventos. Isso impõe a necessidade de vigamentos com elevada rigidez à torção, geralmente em seções de treliça ou caixão metálico celular, para reduzir efeitos vibratórios indesejados.

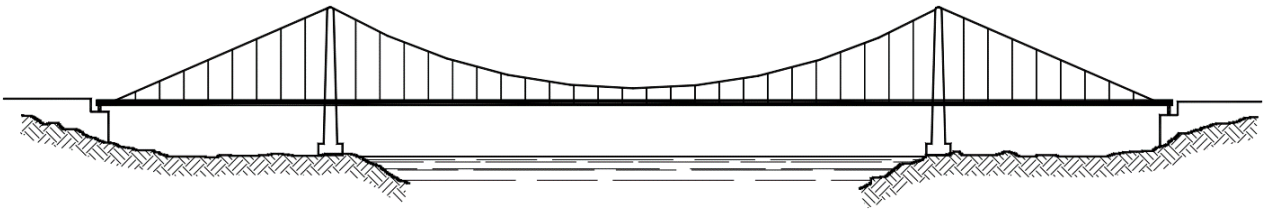


Figura 5.47 Desenho esquemático de uma estrutura especial de ponte pênsil

Os cabos principais podem ser apoiados em selas situadas no topo de torres e ancorados em maciços externos localizados nas extremidades da ponte. Alternativamente, nas pontes pênseis autoancoradas, as ancoragens são feitas diretamente na superestrutura, dispensando maciços externos (Figura 5.48).

Figura 5.48 Ponte Pênsil Hercílio Luz – Florianópolis, SC

5.1.5 Estrutura secundária

As estruturas secundárias englobam os elementos complementares à estrutura principal de uma ponte, desempenhando papel fundamental na funcionalidade, segurança e durabilidade da construção. Compõem esse grupo: os tabuleiros, as lajes, a pista de rolamento, as juntas de dilatação, os sistemas de drenagem, os dispositivos de segurança, a sinalização, a iluminação e a transição entre a rodovia e a estrutura.

5.1.5.1 Tabuleiro

O tabuleiro é o componente da ponte que serve de superfície de rolamento para o tráfego, devendo garantir segurança, continuidade e conforto. Sua principal função estrutural é transmitir as cargas permanentes e móveis aos demais elementos da ponte.

Usualmente, o tabuleiro é composto por lajes associadas a um sistema estrutural complementar, que atua em conjunto com a superestrutura. Em algumas tipologias, como nas pontes em laje de concreto armado, o tabuleiro e a superestrutura formam uma única unidade que distribui as cargas diretamente para os apoios, sem distinção entre os dois elementos.

Os tabuleiros podem ser classificados em dois tipos, conforme sua interação com a superestrutura:

- **Tabuleiros compostos**: atuam em conjunto com os elementos de apoio, contribuindo para a capacidade resistente da superestrutura.
- **Tabuleiros não compostos**: não são integrados aos elementos de apoio e, portanto, não contribuem para a resistência global da superestrutura.

Os materiais mais comuns utilizados na construção de tabuleiros de pontes são: concreto, aço e madeira. Além desses, o polímero reforçado com fibras (PRF) também tem sido utilizado em algumas aplicações, embora seu uso ainda seja pouco frequente.

A. Tabuleiros de concreto

Os tabuleiros de concreto são comuns devido à versatilidade do material, que permite a execução moldado *in loco* ou por pré-moldagem, com diferentes formas e dimensões. Essa adaptabilidade garante flexibilidade de projeto e de métodos construtivos.

Embora o concreto apresente bom desempenho à compressão, ele é fraco à tração, razão pela qual os tabuleiros necessitam de armaduras convenientemente dispostas para resistir a esses esforços e garantir o desempenho estrutural. A adição de armaduras torna viável a utilização do concreto em tabuleiros, mas também representa uma das principais causas de deterioração precoce, especialmente devido à corrosão das armaduras, frequentemente apontada como o principal mecanismo de degradação desses elementos.

Do ponto de vista executivo, os tabuleiros de concreto podem ser classificados nos seguintes tipos principais:

- laje moldada *in loco* em concreto armado;
- laje pré-moldada em concreto aramado;
- laje pré-moldada em concreto protendido;
- laje moldada *in loco* sobre painéis de concreto protendido (pré-lajes).

Do ponto de vista estrutural, o comportamento e a manifestação de fissuras dependem da direção predominante da armadura:

- Em tabuleiros apoiados sobre vigas longitudinais ou vigas-caixão, a armadura principal é transversal ao tráfego; portanto, as fissuras longitudinais são as mais críticas.
- Em tabuleiros apoiados sobre transversinas, a armadura principal é paralela ao tráfego; nesse caso, as fissuras mais perigosas são transversais.

1. Tabuleiros em laje de concreto armado moldados in loco

Nesse sistema, o tabuleiro é executado diretamente no local da ponte, por meio da utilização de fôrmas que recebem as armaduras convencionais e o concreto fresco. Após a cura, o elemento atinge a resistência necessária para desforma. Esse método é amplamente empregado em pontes correntes e favorece a continuidade estrutural entre tabuleiro e superestrutura. Existem dois tipos de fôrmas utilizadas:

- **Removíveis:** geralmente feitas de madeira ou compensado, são retiradas após a cura do concreto.
- **Permanentes:** são chapas metálicas onduladas, instaladas entre os membros da superestrutura, que permanecem incorporadas ao elemento, sem exercer função estrutural.

2. Tabuleiros em laje de concreto armado pré-moldado

Os tabuleiros pré-moldados são fabricados fora do local de instalação da ponte, sendo posteriormente transportados e posicionados com o auxílio de sistemas de içamento. Após a instalação, são fixados à superestrutura por meio de:

- sistemas de nivelamento e rejuntamento, e
- conexões mecânicas (como cliques), ou ainda
- concretagem de nichos deixados nos painéis para passagem das armaduras de espera.

Esse processo garante a solidarização do painel com a estrutura principal, permitindo a transferência eficiente de esforços.

3. Tabuleiros em laje de concreto armado pré-moldado e protendido

Nesse tipo de laje, além das armaduras passivas convencionais, há armaduras ativas protendidas, aplicadas por:

- pré-tensionamento (tensionamento antes da concretagem), ou
- pós-tensionamento (tensionamento após a cura).

A protensão introduz compressão adicional, reduz a fissuração e possibilita maiores vãos e menor espessura, aumentando a durabilidade e a eficiência estrutural.

4. Tabuleiros em laje moldada *in loco* sobre painéis de concreto protendido (pré-lajes)

As pré-lajes são painéis pré-moldados de pequena espessura (aproximadamente 7 cm), apoiados sobre as vigas principais e utilizados como formas permanentes, já contendo parte das armaduras definitivas. Possuem vãos usuais inferiores a 3,0 metros. Esse sistema é muito empregado em pontes com múltiplas vigas próximas, devido à rapidez construtiva e redução de escoramentos.

Após sua instalação, aplica-se uma camada superior de concreto moldado *in loco*, que:

- completa a espessura da laje;
- incorpora armaduras adicionais;
- garante o comportamento solidário do conjunto;
- proporciona superfície adequada de rolamento.

B. Tabuleiros metálicos

Os tabuleiros metálicos podem ser constituídos por chapas maciças de aço ou por sistemas em grelhas metálicas. Foram amplamente empregados em pontes antigas e em pontes móveis, tendo seu uso reduzido após a popularização dos tabuleiros de concreto. Ainda assim, consistem em uma alternativa eficiente quando se busca redução de peso próprio da estrutura, permitindo que a ponte suporte maiores cargas móveis.

Apesar dessa vantagem, os tabuleiros metálicos apresentam algumas limitações:

- Maior suscetibilidade à corrosão e à deterioração, especialmente quando a grelha é aberta e permite a passagem de água para os aparelhos de apoio e infraestrutura.

- Risco de escorregamento e geração de ruído quando molhados.
- Possibilidade de trincas por fadiga, principalmente em soldas.
- Quando preenchidos com concreto para mitigar ruído, escorregamento e corrosão, perdem o benefício da leveza.

Existem quatro tipos principais de tabuleiros metálicos:

1. Tabuleiros ortotrópicos

São constituídos por uma chapa metálica fina e plana, reforçada com nervuras longitudinais e transversais. Ele trabalha em conjunto com a superestrutura metálica da ponte, funcionando como a mesa superior do sistema estrutural.

2. Tabuleiros com chapa metálica embutida

Comuns em pontes mais antigas, esses tabuleiros são constituídos por chapas metálicas de forma côncava, fixadas à estrutura do piso, sobre as quais é executada uma camada de concreto armado. As chapas são, em geral, rebitadas à superestrutura e dispõem de orifícios centrais destinados à drenagem. Embora esse tipo de solução não seja mais adotado em projetos recentes, diversos tabuleiros com essas características ainda se encontram em operação.

3. Tabuleiros de aço corrugado

São constituídos por chapas onduladas de aço, cobertas por brita ou asfalto. A espessura da cobertura varia ao longo da largura da via para garantir o caimento transversal adequado. Não utilizam armaduras e podem ser soldados à superestrutura metálica ou fixados a estruturas de madeira. A leveza e facilidade executiva são suas principais vantagens; porém, o acúmulo de água nas ondulações favorece a corrosão e reduz a vida útil, exigindo manutenção frequente.

4. Tabuleiros de grelha metálica

São os mais comuns entre os tabuleiros de aço, combinando leveza e resistência. As grelhas podem ser abertas, parcialmente preenchidas ou totalmente preenchidas com concreto, e são encontradas com frequência em pontes móveis ou reabilitadas, já que reduzem a carga permanente e aceleram o processo de instalação. Os tipos incluem: grelhas metálicas soldadas, grelhas metálicas rebitadas, grelhas preenchidas com concreto e sistemas patenteados.

C. Tabuleiro de madeira

A madeira pode ser uma escolha vantajosa como material para tabuleiros de pontes por diversas razões. Trata-se de um material leve, renovável e resistente à ação de agentes descongelantes, que normalmente deterioram o concreto e o aço, além de permitir fabricação simples, independente das condições climáticas. A madeira também apresenta boa capacidade de suportar cargas relativamente elevadas por curtos períodos, quando comparada a outros materiais estruturais.

Os tabuleiros de madeira são mais comuns em pontes locais, com tráfego reduzido, ou em contextos onde se deseja manter a estética da madeira. Geralmente são chamados de tábuas ou piso de madeira, referindo-se especificamente à parte da estrutura que recebe as cargas dos veículos. Esses tabuleiros costumam ser considerados não-compostos, devido à baixa eficiência na transferência de esforços de cisalhamento entre o tabuleiro e a superestrutura, causada pelo tipo de fixação adotado.

Os principais tipos de tabuleiros de madeira são:

1. Tabuleiros transversais

Consistem em pranchas de madeira dispostas transversalmente à direção do tráfego. Essas tábuas são fixadas individualmente à superestrutura, com o uso de pregos grandes ou grampos, dependendo do material da estrutura de apoio. Em algumas situações, adiciona-se uma camada longitudinal de madeira com aproximadamente 5 cm de espessura sobre as tábuas, ao longo da largura do tabuleiro, para distribuir melhor a carga e servir de base para revestimento asfáltico.

2. Tabuleiros laminados com pregos

Neste sistema, as pranchas de madeira são posicionadas verticalmente e unidas lateralmente por pregos passantes, formando uma seção sólida. Quando apoiados sobre vigas de madeira, cada tábua é fixada com pregos inclinados; sobre vigas metálicas, utilizam-se parafusos de fixação apenas para ancoragem, sem gerar ação composta. As lamelas são posicionadas perpendicularmente às vigas.

3. Tabuleiros de maneira laminada colada

São elementos estruturais feitos com lâminas de madeira coladas com adesivos impermeáveis. Normalmente medem cerca de 1,22 metros de largura e podem ser instalados transversal ou longitudinalmente, conforme a orientação da superestrutura. Em certos casos, os painéis são unidos com cavilhas.

A fixação dos painéis pode ocorrer por: pregos ou parafusos, parafusos invertidos, cantoneiras metálicas com parafusos e placas de madeira auxiliar. Quando os painéis são dispostos longitudinalmente sem apoio por vigas, apoiando-se apenas nos encontros ou pilares, o sistema se comporta como uma laje contínua.

4. Tabuleiros laminados protendidos

Utilizam tábuas de madeira serrada ou lamelada, comprimidas transversalmente por barras de aço de alta resistência (pós-tensionadas). As pranchas, usualmente dispostas longitudinalmente, são perfuradas para a passagem das barras, que são tensionadas com macacos hidráulicos. A ancoragem é feita com canais metálicos ou placas de apoio, criando atrito suficiente entre as pranchas para garantir a integridade estrutural.

As barras de protensão são posicionadas com espaçamento médio de 610 mm. Essas peças podem ser usadas tanto como parte do tabuleiro quanto como a própria superestrutura em pontes de vãos curtos. São comuns sobre treliças ou sistemas com múltiplas vigas.

5. Tabuleiros com madeira estrutural composta

Incluem produtos como madeira laminada colada com lâminas finas e madeira composta por tiras paralelas prensadas com adesivo. Esses tabuleiros podem ser formados por séries paralelas de vigas em "T" ou seções tipo caixa, orientadas na direção do tráfego e com curvatura definida conforme o projeto da ponte.

A ligação entre essas vigas se dá por laminação protendida, com barras ou cordoalhas de aço passando pelas abas superiores ou pelas laterais das seções. Essas armaduras são ancoradas com chapas metálicas ou canais, com porcas duplas, e dispositivos de ancoragem com cunhas em uma das extremidades para garantir o tensionamento. Em geral, as barras são revestidas com epóxi para proteção contra corrosão.

D. Tabuleiros de polímero reforçado com fibras

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) têm sido utilizados tanto na recuperação e reforço de estruturas existentes quanto na construção de novas pontes. Os tabuleiros em PRF são geralmente produzidos a partir de perfis pultrudados, podendo assumir geometrias variadas, como núcleo tipo colmeia, seções trapezoidais ou vigas tipo “I” com dupla alma, configuradas em painéis estruturais do tipo sanduíche.

Existem três principais tipos de tabuleiros em compósito de PRF:

1. Painel tipo sanduíche com núcleo em colmeia

Este tipo de painel oferece ampla flexibilidade quanto à espessura do tabuleiro. Contudo, o processo de fabricação manual exige atenção rigorosa no controle de qualidade, especialmente na colagem das faces superior e inferior ao núcleo.

2. Painel tipo sanduíche com núcleo maciço

O núcleo é composto por espuma ou outros materiais de preenchimento. A fabricação ocorre por meio do processo de moldagem por infusão de resina assistida a vácuo.

3. Painel tipo sanduíche com núcleo oco

Os painéis com núcleo oco são formados por seções modulares que incorporam perfis pultrudados moldados de forma integrada.

E. Tabuleiro misto ou ligado

O tabuleiro misto é aquele que está estruturalmente ligado aos elementos que o suportam, funcionando como um único elemento estrutural; ao mesmo tempo em que transfere as cargas, o tabuleiro solidário contribui para o aumento da capacidade resistente dos referidos elementos estruturais.

Nas estruturas de concreto – moldadas no local ou pré-moldadas – a monoliticidade do tabuleiro com as vigas é obtida por meio da concretagem simultânea do estrado e das vigas, ou por meio da utilização de armaduras de espera, que tornam solidários o tabuleiro e as vigas. Praticamente todas as estruturas de pontes em concreto são monolíticas.

Nas estruturas mistas, compostas por vigas de aço e tabuleiro de concreto, a solidarização é realizada por meio de conectores metálicos. No caso de utilização de lajes pré-moldadas, essas são dotadas de aberturas a intervalos regulares, permitindo a passagem e aplicação dos conectores.

F. Tabuleiro desligado

O tabuleiro desligado é aquele que não atua de forma composta com os elementos estruturais que o sustentam, desempenhando apenas a função de distribuir e transmitir as cargas verticais para as vigas ou demais componentes da superestrutura. Nesse caso, não há contribuição do tabuleiro para o aumento da capacidade resistente ou da rigidez global da estrutura.

Esse tipo de solução é pouco usual em pontes modernas, já que a solidarização entre tabuleiro e vigas, quando possível, normalmente resulta em maior eficiência estrutural e uso mais econômico dos materiais.

5.1.5.2 Juntas de dilatação

As juntas de dilatação são separações físicas entre duas partes de uma estrutura, permitindo que essas partes se movimentem livremente sem a transmissão de esforços entre elas (DNIT 092 – ES). Têm a função de atenuar os efeitos das variações térmicas e da retração, possibilitando a divisão do estrado em trechos isostáticos, a definição de sistemas estruturais distintos em um mesmo tabuleiro e o desempenho de um papel relevante na transição entre a rodovia e a ponte.

A presença de material rígido ou de material de preenchimento que tenha perdido sua elasticidade pode produzir tensões indesejáveis na estrutura, ocasionando fissuras nas lajes adjacentes à junta, com possibilidade de propagação às vigas e aos pilares próximos. Por isso, os sistemas de vedação e preenchimento das juntas devem ser projetados para acomodar a amplitude dos movimentos a que estarão sujeitos, garantindo também a transição suave entre os acessos e a ponte, bem como entre os diferentes trechos do tabuleiro por elas divididos.

Nos projetos de pontes com grande comprimento, são previstas interrupções estruturais no tabuleiro para permitir os deslocamentos decorrentes da variação de temperatura, retração e fluência do concreto. Nestes locais são posicionadas as juntas de dilatação, especialmente nas regiões das juntas do vigamento principal.

São componentes que exigem constante observação e manutenção, pois geralmente apresentam vida útil reduzida. Existem diversos tipos de juntas, mas, de forma geral, podem ser classificadas em duas categorias principais:

- **Juntas fechadas:** projetadas para serem estanques.
- **Juntas abertas:** que permitem a livre passagem de água e detritos.

A. Juntas abertas

As juntas abertas permitem a passagem da água e dos detritos por meio do vão existente entre os seguimentos do tabuleiro. Sua utilização é restrita, pois favorece a deterioração precoce de elementos da infraestrutura, em função da infiltração e do acúmulo de materiais.

Essas juntas possuem superfícies verticais expostas, que podem apresentar bordas em concreto armado expostas ou protegidas por cantoneiras metálicas. Além das limitações inerentes a esse tipo de junta, os impactos recorrentes das rodas dos veículos contra os cantos das juntas contribuem significativamente para a redução de sua vida útil (DNIT 092 – ES).

Há dois tipos de juntas abertas: as juntas definidas por fôrmas e dispositivos de proteção dos cantos, e as juntas com chapas dentadas, também conhecidas como *finger plate joints*.

1. Juntas definidas por fôrmas

As juntas definidas por fôrmas (Figura 5.49) consistem em simples aberturas localizadas entre pequenos vãos isostáticos ou entre a laje de transição e os vãos extremos da ponte. Seu uso é admissível apenas quando os deslocamentos do tabuleiro são muito reduzidos, uma vez que não proporcionam vedação adequada, permitindo a passagem de água e detritos.

As bordas dessas juntas podem apresentar cantos desprotegidos ou receber reforços localizados, como concreto especial, lábios poliméricos ou cantoneiras metálicas, com o objetivo de reduzir o desgaste causado pelo impacto das rodas dos veículos.

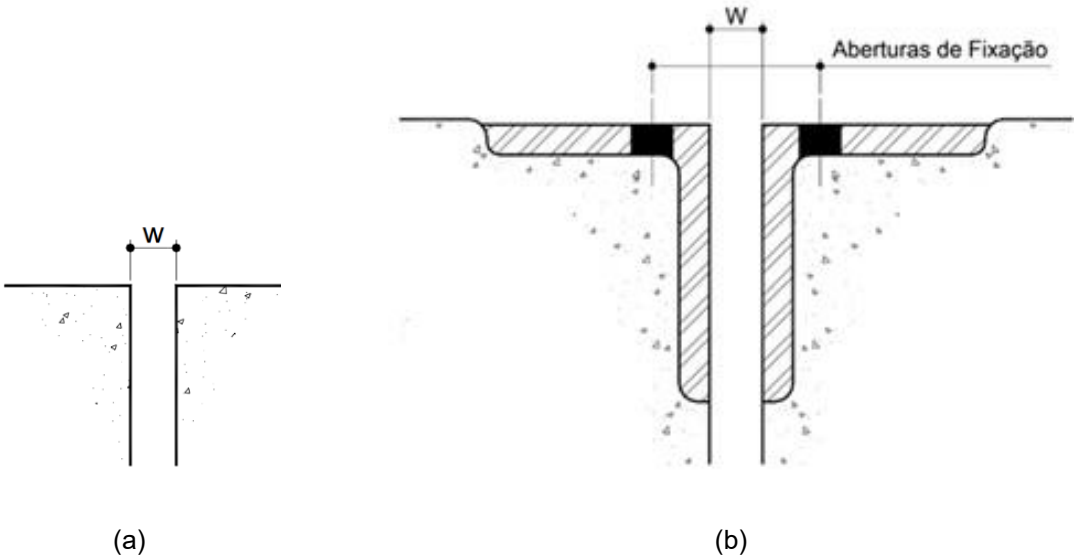


Figura 5.49 Esquema representativo de juntas definidas por fôrmas: (a) junta aberta, sem proteção; (b) junta aberta, com cantoneiras de proteção

2. Juntas em chapas dentadas

As juntas em chapas dentadas são utilizadas em pontes de grandes vãos, nas quais são exigidas maiores movimentações de abertura. Esse tipo de junta é constituído, essencialmente, por duas chapas metálicas com encaixes do tipo macho e fêmea, dispostas com extremidades em balanço ou apoiadas, de modo a acompanhar os deslocamentos longitudinais do tabuleiro. As chapas dentadas em balanço são indicadas para aberturas menores, enquanto aquelas dotadas de suporte auxiliar são recomendadas para movimentações mais significativas (Figura 5.50).

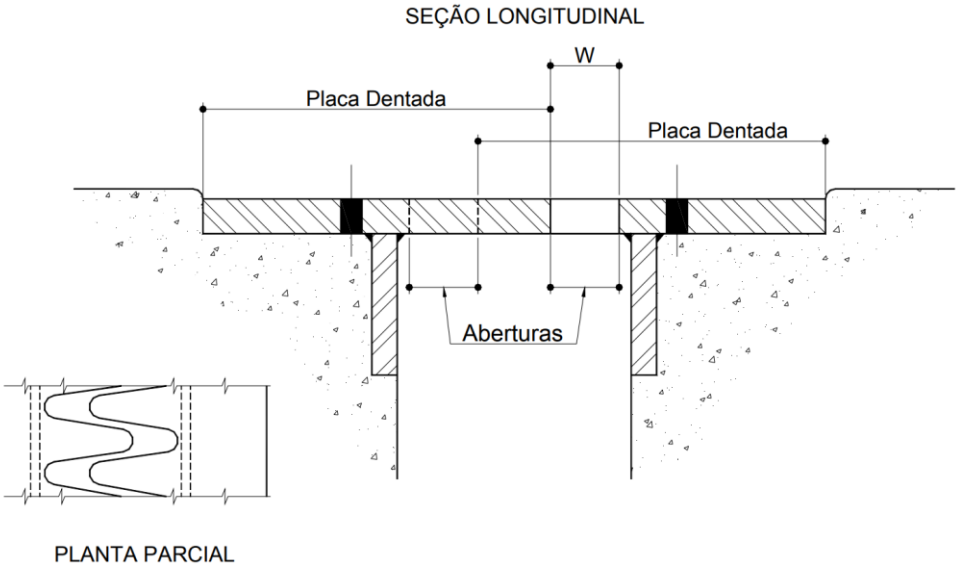


Figura 5.50 Esquema representativo de juntas em chapas dentadas

B. Juntas fechadas

As juntas fechadas são projetadas para impedir a passagem de água e detritos. Existe grande variedade de sistemas de juntas de dilatação fechadas, produzidas por diferentes fabricantes. Essa diversidade decorre do alto custo desses dispositivos, de sua vida útil relativamente curta, e da sensibilidade a falhas de projeto, instalação e manutenção, fatores que podem reduzir significativamente o bom desempenho. Em razão disso, novos modelos surgem com frequência.

Apesar da variedade, os sistemas de juntas podem ser agrupados em alguns tipos principais, apresentados a seguir, com enfoque nos modelos mais representativos.

1. Juntas elastoméricas de compressão

As juntas elastoméricas de compressão são constituídas por um bloco contínuo, retangular e alveolar de neoprene, como o tipo indicado na Figura 5.51. O perfil com aberturas permite que o bloco, inserido sob compressão e trabalhando sempre comprimido, acompanhe os movimentos de expansão e contração da ponte, recuperando-se completamente após as distorções provocadas pela movimentação da superestrutura.

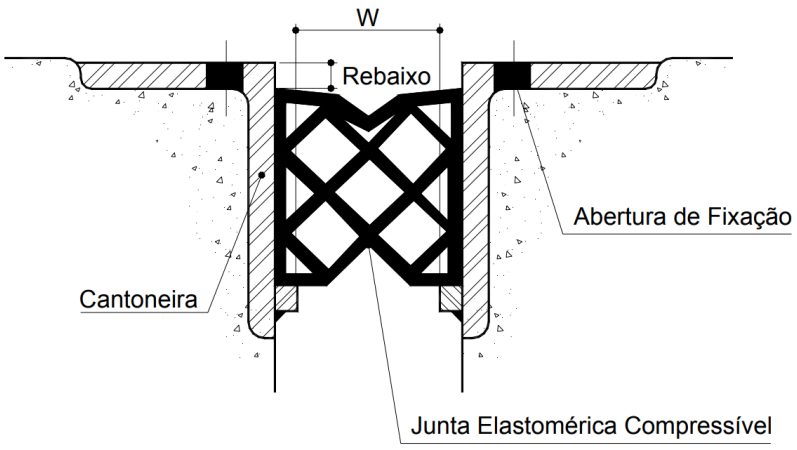


Figura 5.51 Esquema representativo de juntas elastoméricas em compressão

Esse bloco de neoprene deve ser confinado adequadamente, preferencialmente entre cantoneiras de aço, que protegem os cantos das juntas contra impactos. Como alternativa, pode ser instalado em berços especiais de concreto armado ou blocos contínuos de concreto polimérico, desde que garantida a fixação e o confinamento longitudinal. As juntas de compressão estão disponíveis em diversos formatos e tamanhos, sendo classificadas segundo a abertura máxima tolerável, geralmente limitada a aproximadamente 5 cm.

2. Junta tipo “JEENE”

A junta JEENE (Junta Elástica Expansível Nucleada Estrutural) é um tipo especial de junta elastomérica de compressão, constituída de três elementos básicos: câmara elástica, adesivo e sistema de pressurização ou nucleação (Figura 5.52). A câmara elástica é geralmente confeccionada em elastômero, como policloropreno (Neoprene), com características geométricas, de dureza e de alongamento ajustadas conforme a movimentação esperada para cada caso. Essa câmara pode conter uma ou mais cavidades suplementares, conforme a necessidade do projeto.

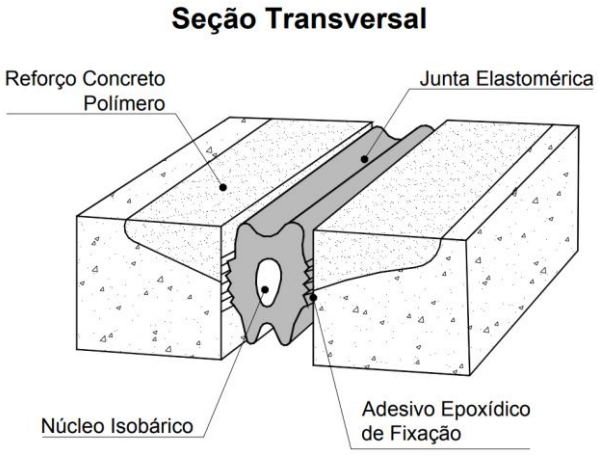


Figura 5.52 Desenho esquemático da seção transversal da junta tipo "JEENE"

O adesivo, de natureza epoxídica de alto desempenho, é responsável pela fixação da junta à sede. Já a pressurização ou nucleação tem como função obrigar a junta a dilatar-se contra as paredes da sede, comprimindo o adesivo e garantindo sua aderência. Esse processo é realizado por meio de ar comprimido e válvulas, e também pode ser utilizado para preencher os espaços vazios entre a câmara e a sede.

Nas pontes, a instalação da junta do tipo JEENE é feita com a execução de lábios poliméricos, conforme ilustrado na Figura 5.53, que mostra o detalhe típico em pontes com extremos em balanços. O processo de execução da junta é representado esquematicamente na Figura 5.54.

Os catálogos comerciais da junta JEENE são amplamente disponíveis e apresentam instruções claras. Esse tipo de junta já foi aplicado em diversas obras, demonstrando comportamento e durabilidade satisfatórios para aberturas da ordem de 6 cm.

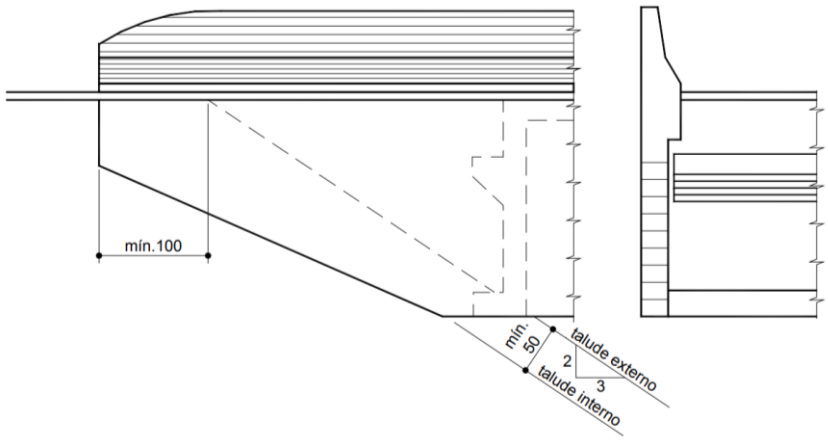


Figura 5.53 Desenho esquemático do detalhe de pontes com extremo em balanço

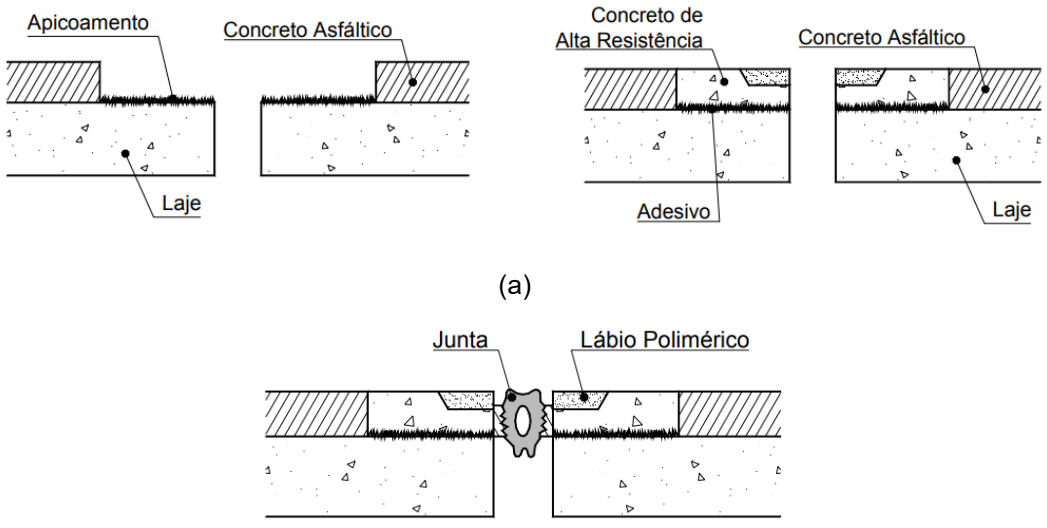
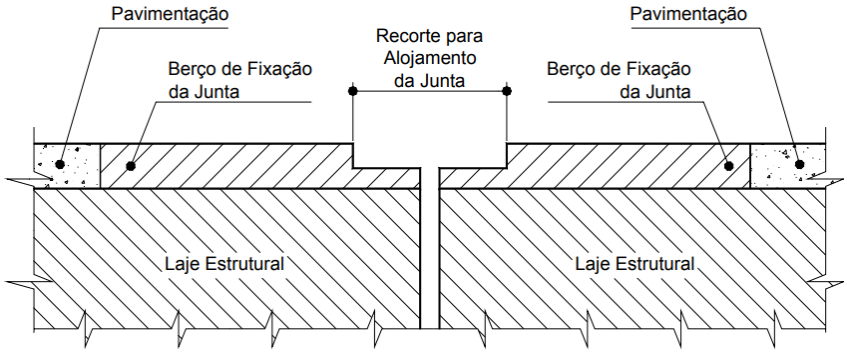


Figura 5.54 Desenho esquemático do processo de execução: (a) detalhe do alojamento (b) juntas do tipo "JEENE"

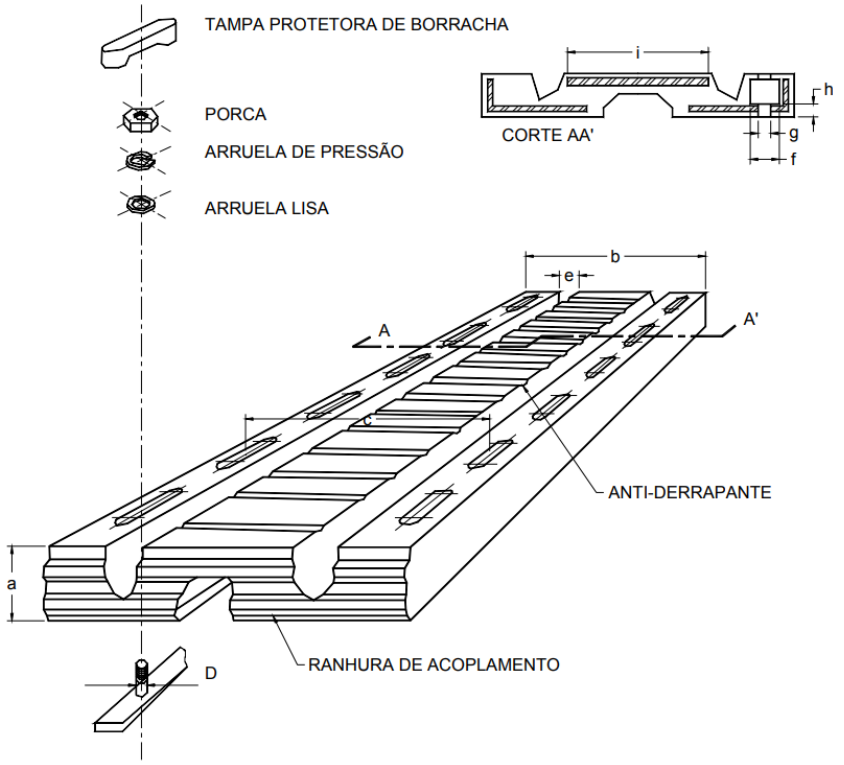
3. Juntas em monobloco de elastômero e aço

Inicialmente conhecidas como Transflex, essas juntas passaram a ser fabricadas com diferentes denominações comerciais, como Transiflex, Traflex e Juntaflex. Atualmente, são produzidas por diversas empresas brasileiras.

Trata-se de dispositivos de expansão e vedação indicados para acomodar grandes movimentações estruturais, sendo fabricadas em monobloco de elastômero estruturado com chapas de aço fretantes. A combinação dos materiais proporciona alta flexibilidade e resiliência, enquanto as subdivisões das chapas metálicas internas permitem graus de liberdade para flexão longitudinal (Figura 5.55).



(a)



(b)

Figura 5.55 Detalhes de junta de dilatação monobloco em elastômero e aço: (a) seção transversal da junta no tabuleiro; (b) componentes e esquema de montagem do sistema de junta

As juntas podem ser classificadas em:

- **Simples:** constituídas por dois blocos de elastômero.
- **Múltiplas:** compostas por vários blocos interligados.

Para facilitar os deslocamentos, apresentam reentrâncias nas faces superior e inferior, sendo fundamental que as reentrâncias superiores permaneçam livres de detritos, a fim de não comprometer o funcionamento da junta.

A fixação é realizada por parafusos ancorados em berços de concreto, cujas dimensões e detalhes de instalação estão especificados em catálogos dos fabricantes. Essas juntas são fornecidas em módulos de 1,00 m de comprimento, o que possibilita a realização de recuperações parciais em caso de falhas localizadas.

Apesar de apresentarem alto custo, são recomendadas quando a estrutura exige absorção de grandes deslocamentos. Quando bem dimensionadas, corretamente instaladas e submetidas a manutenção adequada, essas juntas oferecem desempenho confiável e longa vida útil.

4. Juntas em placas de aço deslizantes

As juntas em placas de aço deslizantes são compostas por duas chapas metálicas sobrepostas, sendo que uma desliza sobre a outra para acomodar os movimentos da estrutura, com capacidade de absorver movimentações de até 10 cm. Essas chapas são fixadas em cantoneiras ancoradas na superestrutura.

Em algumas configurações, as placas podem apresentar formato dentado, funcionando como pentes metálicos que se encaixam entre si no mesmo nível, o que melhora a continuidade da superfície de rolamento e reduz os impactos provenientes do tráfego.

Para garantir a durabilidade e o bom desempenho da junta, é essencial que a placa superior seja posicionada de modo a ser a primeira a ter contato com os pneus, evitando danos por impacto. Embora essas juntas permitam a movimentação estrutural, para que possam ser classificadas como juntas fechadas é necessário o uso de uma fita ou folha vedante de neoprene, que impede a passagem de água e detritos pelas aberturas. A Figura 5.56 ilustra os detalhes construtivos dessas juntas, evidenciando o arranjo das placas metálicas e o posicionamento do vedante.

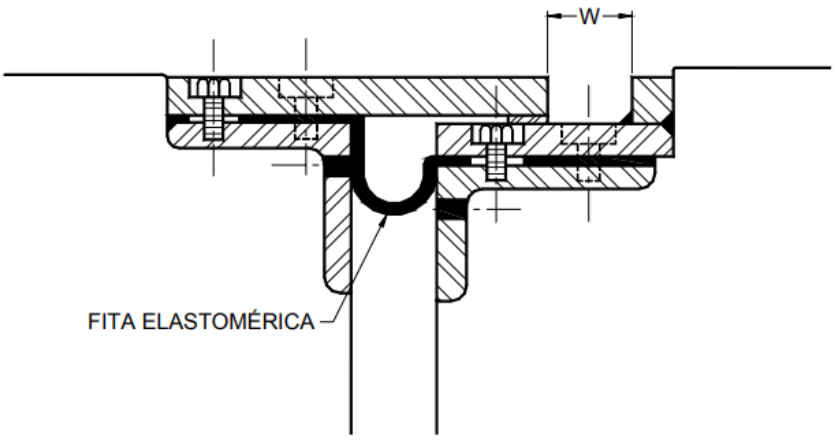


Figura 5.56 Detalhes de juntas em placas de aço deslizantes

5. Juntas elastoméricas modulares

As juntas elastoméricas modulares são dispositivos desenvolvidos para acomodar grandes movimentações estruturais, ao mesmo tempo em que suportam as cargas transmitidas pelas rodas dos veículos. Esse tipo de junta é composto por blocos vazados de neoprene, interligados por peças metálicas e apoiados sobre um sistema estrutural próprio que garante sua estabilidade e funcionalidade.

A movimentação típica dessas juntas varia de 10 cm a 60 cm, podendo, em casos específicos, acomodar deslocamentos ainda maiores. Sua configuração modular permite adaptabilidade a diferentes condições de projeto e facilita intervenções e manutenções por segmentos. A Figura 5.57 apresenta os detalhes construtivos de uma junta elastomérica modular, evidenciando a disposição dos blocos de neoprene, os elementos metálicos de conexão e o sistema de apoio.

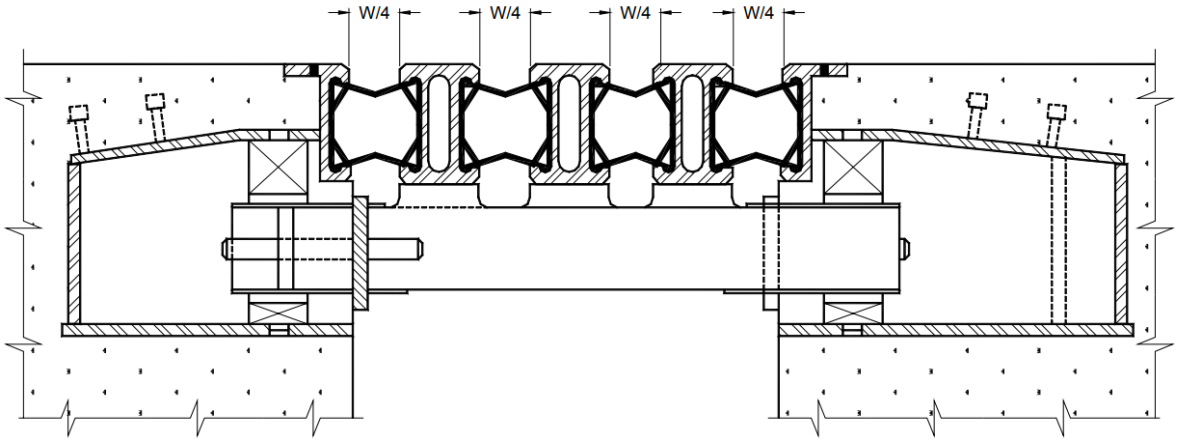


Figura 5.57 Detalhes de juntas em elastoméricas modulares

6. Juntas denteadas (*finger joints*)

As juntas denteadas, também conhecidas como *finger joint*, são constituídas por duas chapas metálicas, cada uma fixada em uma extremidade da estrutura e livre na outra. As extremidades livres dessas chapas possuem dentes intercalados (macho e fêmea), saliências e reentrâncias com geometria complementar, que se encaixam de forma precisa e permitem a acomodação dos deslocamentos longitudinais do tabuleiro.

Para que essa junta atue como um sistema fechado, é indispensável a instalação de uma calha de drenagem que colete e conduza adequadamente as águas pluviais. O desempenho adequado das juntas denteadas depende de sua execução precisa e de uma manutenção constante. A obstrução da calha, o acúmulo de detritos ou deformações decorrentes do desgaste nos dentes podem:

- comprometer o funcionamento do encaixe;
- gerar ruídos excessivos sob as cargas de tráfego;
- provocar impactos e esforços adicionais nas chapas;
- levar ao travamento ou quebra dos elementos, com risco de acidentes.

5.1.5.3 Sistemas de drenagem

Os sistemas de drenagem têm por finalidade remover de forma rápida e eficiente as águas pluviais do tabuleiro, evitando a formação de lâminas d'água que possa provocar acidentes, além de prevenir a deterioração da superestrutura e da infraestrutura causada pela permanência e infiltração de água – frequentemente contaminada por resíduos de tráfego. A drenagem deve abranger toda a superfície do tabuleiro, incluindo as regiões sob juntas não seladas, o entorno dos encontros e os muros da ala. Os dispositivos mais comuns utilizados na drenagem do tabuleiro incluem:

A. Drenagem natural

Em tabuleiros curtos, situados em trechos de greide com inclinação superior a 2 %, a drenagem pode ocorrer apenas por gravidade, dispensando drenos ou dispositivos especiais. Mesmo nesses casos, deve-se garantir a inspeção periódica das superfícies de escoamento, assegurando que não haja locais propícios ao acúmulo de água ou detritos.

B. Drenagem de pontes rurais: somente drenos

Utilizam-se tubos, geralmente com 10 cm de diâmetro, espaçados a cada 4,0 m nos dois alinhamentos transversais da pista. Esses tubos devem ser suficientemente longos para impedir que o escoamento impulsionado pelo vento atinja o fundo da laje ou a face da viga mais próxima, podendo receber pequenas grelhas na parte superior. Por se tratar de sistemas simples, os drenos devem permanecer visíveis e acessíveis para inspeção e desobstrução periódica, evitando entupimentos que potencializam corrosão da superestrutura.

Quando posicionados diretamente sobre as saias de aterro, deve-se verificar a possibilidade de erosões. Em estruturas celulares, deve-se garantir a existência e o bom funcionamento dos drenos. Em viadutos, é essencial verificar o correto posicionamento dos drenos para evitar o escoamento direto sobre pistas inferiores; caso isso ocorra, deve-se avaliar a viabilidade de seu bloqueio ou redirecionamento.

C. Drenagem de pontes urbanas

Em pontes urbanas ou em obras sobre sistemas viários complexos, são empregados sistemas completos de drenagem, com componentes como: bueiros, tubulações de saída, tubos de descida que conduzem a água até redes de drenagem urbana, tampões de inspeção para manutenção, canaletas ou calhas, suportes e ferragens de fixação. A declividade longitudinal (greide) e a inclinação transversal do tabuleiro são fatores importantes para facilitar o escoamento da água.

Esses sistemas devem prever caixas e tampões de inspeção em intervalos regulares, permitindo acesso para limpeza e verificação. A ausência desses dispositivos prejudica a manutenção, podendo comprometer a durabilidade da estrutura.

D. Drenagem de juntas

Algumas juntas, como as do tipo denteado ou deslizante, permitem a passagem de água. Nesse caso, são utilizadas calhas ou canaletas específicas sob a junta, destinadas a captar e conduzir essa água, garantindo o funcionamento como junta fechada. Essas calhas devem permitir inspeção visual direta e remoção de detritos acumulados, condição indispensável para prevenir infiltrações e corrosão de componentes estruturais próximos.

E. Drenagem da subestrutura

A drenagem do material de aterro atrás de encontros ou muros de ala é fundamental para evitar o acúmulo de água e o aumento de empuxo lateral. Essa drenagem é geralmente feita por meio de tubos perfurados, tecidos geotêxteis ou drenos embutidos na subestrutura. Para fins de manutenção, os drenos devem ser inspecionáveis pelo menos em suas extremidades, com possibilidade de limpeza.

Aspectos de inspeção e manutenção

A eficiência dos sistemas de drenagem depende não apenas do dimensionamento adequado, mas também da facilidade de acesso para inspeção, limpeza e substituição de componentes, sendo a obstrução por detritos a principal causa de falhas.

Assim, recomenda-se que todo sistema de drenagem seja projetado com pontos acessíveis para inspeção, calhas desobstruíveis, tubulações com caixas de inspeção, tampões removíveis e dispositivos passíveis de limpeza sem demolição. A manutenção preventiva deve ser periódica e registrada, uma vez que falhas de drenagem estão diretamente relacionadas a patologias graves em tabuleiros, aparelhos de apoio e elementos da subestrutura.

5.1.5.4 Dispositivos de segurança

Os dispositivos de segurança em pontes podem ser classificados em duas categorias:

- **Para veículos:** guarda-rodas, barreiras e defensas.
- **Para pedestres:** guarda-corpos metálicos ou de concreto.

Historicamente, as pontes rodoviárias eram protegidas apenas por guarda-rodas e guarda-corpos padronizados de baixa altura, geralmente em concreto armado, que atuavam mais como elementos de balizamento do que de contenção.

A partir da década de 1970, passaram a ser adotadas barreiras de concreto rígidas padronizadas, reconhecidas internacionalmente pelo desempenho seguro frente a impactos veiculares. Além delas, as defensas metálicas flexíveis tornaram-se comuns em pontes metálicas e em rodovias, com o objetivo de conter e redirecionar veículos desgovernados, aumentando significativamente a segurança.

Os guarda-corpos, destinados exclusivamente à proteção de pedestres, são atualmente utilizados em passarelas e passeios laterais de pontes. Podem ser metálicos, de concreto, madeiras ou alvenaria, a depender das exigências de segurança, das ações ambientais e da durabilidade pretendida. Além dos sistemas de contenção, outros elementos complementam a segurança viária:

- **Calçadas e meios-fios:** proporcionam segurança a pedestres, inspetores e equipes de manutenção. Além disso, direcionam a água da superfície para o sistema de drenagem. Os meios-fios atuam como barreira secundária contra a invasão de veículos às calçadas, protegendo os pedestres. Normas antigas previam faixas estreitas de inspeção (cerca de 30 cm de largura), pouco eficientes em situações de impacto lateral.
- **Sinalização:** informa aos motoristas eventuais restrições e condições da ponte ou da rodovia, como limite de peso e restrições de faixa, placas de velocidades, altura livre, largura disponível, passagens estreitas ou túneis, placas informativas, de direção e de obstáculos.
- **Iluminação:** essencial para a segurança operacional, especialmente em pontes urbanas ou com tráfego intenso. Os tipos mais comuns incluem: iluminação rodoviária geral, sinalização luminosa de controle de tráfego, luzes de obstrução aérea, luzes de navegação (em pontes sobre rios ou canais navegáveis), iluminação de placas, luzes de advertência para operação de pontes móveis (como pontes levadiças).

Aspectos de inspeção e manutenção

Para garantir o desempenho ao longo da vida útil, os dispositivos de segurança devem ser inspecionados periodicamente, com atenção especial para:

- **Barreiras e defensas:** avaliar deformações, corrosão, ancoragens soltas, impacto de veículos e falhas de continuidade dos elementos.
- **Guarda-corpos:** verificar corrosão, descontinuidades, perda de fixação, espaçamento inadequado entre barras e danos por colisões.
- **Calçadas e meios-fios:** observar desgastes, desplacamentos, fissuras, desprendimentos e obstrução que impeça a drenagem superficial.
- **Sinalização e iluminação:** checar visibilidade, funcionamento de luminárias, reposição de elementos danificados e remoção de obstruções visuais (vegetação, publicidade, sujeira).

A segurança da ponte depende não apenas do dimensionamento adequado desses dispositivos, mas também de sua instalação correta, inspeção periódica e manutenção preventiva, que asseguram proteção eficiente a motoristas, pedestres, inspetores e equipes de operação.

5.2 MESOESTRUTURA

A mesoestrutura é o conjunto de elementos responsáveis por transmitir as ações da superestrutura para a infraestrutura, funcionando como peças carregadas axialmente, com capacidade de absorver solicitações horizontais que provocam momentos fletores. Os elementos que compõem a mesoestrutura são: aparelhos de apoio, pilares e encontros.

5.2.1 Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio são dispositivos que realizam a transição entre a superestrutura e a mesoestrutura ou, em pontes não aporticadas, diretamente com a infraestrutura. Funcionam como elementos intermediários entre os vigamentos principais e os pilares ou encontros, possibilitando a transmissão de esforços ao mesmo tempo em que permitem os deslocamentos e rotações previstos em projeto. De forma geral, suas funções fundamentais são:

- transmitir as cargas da superestrutura para a mesoestrutura ou infraestrutura;
- permitir os movimentos longitudinais da superestrutura decorrentes da retração do concreto, variações de temperatura, fluência, efeitos da proteção e outras deformações;
- permitir as rotações do tabuleiro, resultantes das deflexões causadas por cargas permanentes e cargas móveis.

A adoção de aparelhos de apoio é indispensável para que a estrutura da ponte se comporte como previsto nas análises estruturais. Diferentemente de edifícios usuais – nos quais articulações são frequentemente modeladas apenas como simplificação matemática, sem correspondência direta na execução –, as pontes exigem dispositivos reais de apoio que permitam os movimentos previstos. Isso se deve ao fato de que, em estruturas com grandes vãos e cargas significativas, os efeitos secundários decorrentes da ausência de articulações reais não podem ser desprezados.

Os aparelhos de apoio podem ser classificados em fixos e móveis, de acordo com o modo como restringem ou permitem os deslocamentos da superestrutura:

- **Apoios fixos:** restringem os deslocamentos horizontais, impedindo o movimento do tabuleiro em uma ou mais direções, ao mesmo tempo em que permitem as rotações necessárias.
- **Apoios móveis:** permitem deslocamentos controlados no plano horizontal, acompanhando a movimentação da estrutura decorrente de variações térmicas, retração, fluência e demais efeitos de deformação, sem comprometer a integridade dos elementos

5.2.1.1 Aparelhos de apoio fixos

Os aparelhos de apoio fixos restringem os deslocamentos horizontais, impedindo o movimento do tabuleiro em uma ou mais direções, ao mesmo tempo em que permitem as rotações necessárias. Os modelos mais simples são popularmente conhecidos como articulações, enquanto os modelos mais sofisticados incluem os aparelhos de apoio metálicos. As articulações podem ser feitas de chumbo ou concreto.

A. Articulações de chumbo

As articulações de chumbo foram amplamente utilizadas antes da disseminação de apoios de concreto e de elastômero (como o Neoprene). Consistiam basicamente em placas

retangulares de chumbo, dimensionadas para tensões de compressão da ordem de 100 kg/cm² (ou 1 kN/cm²), com espessura inicial aproximada de 2 cm.

Apesar de inicialmente atenderem ao propósito de transmissão de cargas e liberação de rotação, essas placas apresentaram um comportamento inadequado com o tempo: o chumbo sofria escoamento plástico, deformando-se gradativamente até assumir a forma de uma lâmina irregular e delgada. Essa mudança geométrica comprometia o funcionamento do apoio, tornando o sistema instável e imprevisível (Figura 5.58).

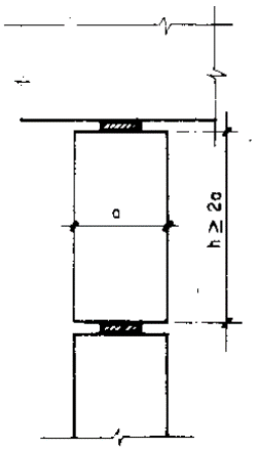


Figura 5.58 Detalhe da vista longitudinal da articulação de chumbo

Fonte: El Debs e Takeya (2009)

B. Articulações de concreto

As articulações de concreto são dispositivos rígidos que, ao contrário dos aparelhos metálicos, são moldados juntamente com a estrutura principal, utilizando o mesmo material. Por essa razão, possuem elevada capacidade resistente e podem ser adotados em situações de solicitações mais intensas. No entanto, sua aplicação tem sido gradualmente reduzida devido à vulnerabilidade a danos e à dificuldade de inspeção e manutenção. Podem ser classificadas nos seguintes tipos: Freyssinet, Mesnager, de contato de superfícies cilíndricas, de contato simples, e blindada ou Burkhardt.

- Articulações Freyssinet

A articulação Freyssinet é um modelo fixo de concreto que funciona por meio de uma redução da seção transversal da peça a ser articulada no ponto de ligação da viga com o apoio. Geralmente possui 2 cm de altura e, é projetada para trabalhar sob tensões elevadas, promovendo plastificação da seção reduzida, condição desejável para permitir a rotação do elemento e o desenvolvimento de pequenos momentos transmitidos à estrutura (Figura 5.59).

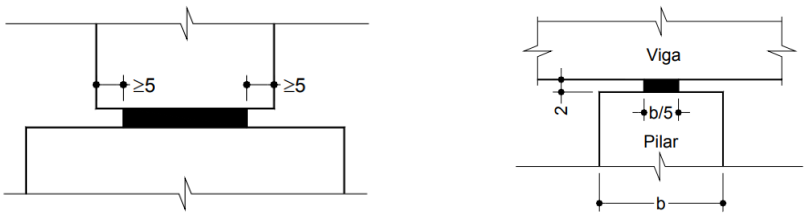


Figura 5.59 Articulação Freyssinet: (a) corte transversal; (b) vista longitudinal

O uso de barras de aço passantes tornou-se um hábito generalizado, embora desnecessário e, segundo estudos teóricos e experimentais, possa até prejudicar o funcionamento da articulação. Trata-se de uma solução de baixo custo e alta confiabilidade.

- Articulações Mesnager

As articulações Mesnager são dispositivos fixos utilizados para permitir pequenas rotações entre elementos estruturais, diferindo das articulações Freyssinet por transmitirem esforços por meio da aderência proporcionada por barras cruzadas ancoradas nos blocos estruturais (Figura 5.60). Essas barras são responsáveis pela transferência de força normal e esforço cortante entre os blocos conectados, atuando como o único mecanismo resistente entre as partes articuladas.

Ao contrário das articulações Freyssinet, em que o concreto participa da transmissão de esforços, nas articulações Mesnager o concreto serve apenas como proteção para as armaduras, não tendo papel estrutural na transferência de cargas. Devido à sua dependência exclusiva da aderência das barras, o uso da articulação Mesnager é mais restrito, sendo adequado para situações com menores demandas estruturais ou rotações controladas. Sua eficiência depende diretamente da qualidade da execução e da proteção contra corrosão das armaduras.

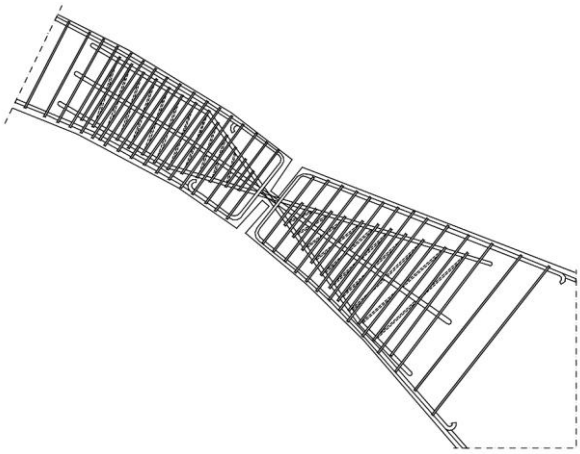


Figura 5.60 Detalhe do corte transversal e vista longitudinal da articulação Mesnager

- Articulações de contato de superfícies cilíndricas

As articulações de contato de superfícies cilíndricas permitem a rotação entre elementos estruturais por meio do contato indireto entre duas superfícies curvas, sendo uma convexa e a outra côncava. Podem ser executadas em concreto armado ou concreto armado com blindagem, e são dimensionadas para suportar elevadas tensões de compressão, conforme demonstrado pela teoria de Hertz, sendo, portanto, necessário o uso de concreto de alta qualidade (Figura 5.61).

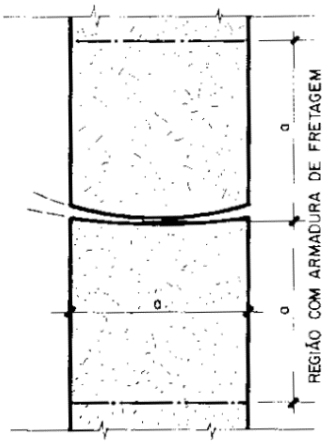


Figura 5.61 Detalhe da articulação de contato de superfície

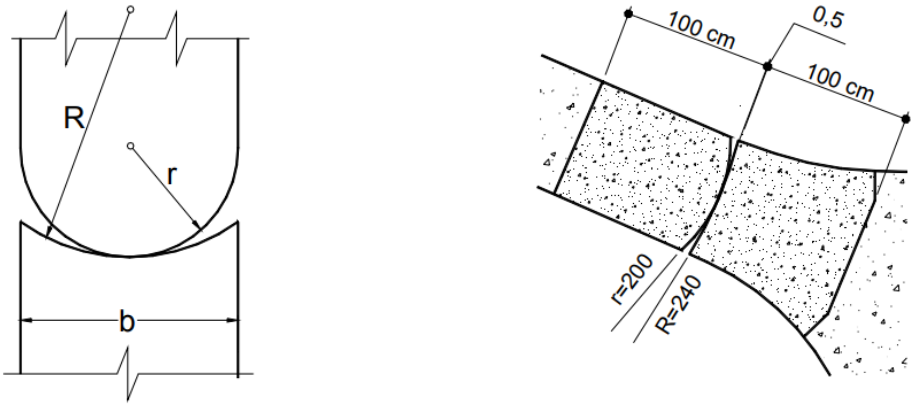
Fonte: El Debs e Taketya (2009)

As superfícies cilíndricas devem apresentar acabamento cuidadoso para assegurar uma distribuição adequada das tensões de contato. Além disso, é possível aplicar revestimentos com chapas finas de aço ou de chumbo, com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade da articulação.

- Articulações de contato

As articulações de contato são dispositivos fixos cujo funcionamento baseia-se predominantemente na compressão direta entre superfícies planas ou curvas, dispensando a participação estrutural das armaduras (não representadas nos esquemas). São recomendadas quando há necessidade de grandes rotações, sob esforços transversais e forças axiais reduzidas (Figura 5.62).

Nas articulações de grande porte, para evitar concentrações indesejadas de tensões causadas por imperfeições construtivas, é comum a utilização de uma placa intermediária de chumbo ou aço entre as superfícies cilíndricas.



(a) (b)

Figura 5.62 Detalhe das articulações de contato: (a) esquema geométrico da articulação; (b) detalhe dimensional da superfície de contato

- Articulação blindada ou articulação Burkhardt

Esse modelo utiliza duas chapas de aço, geralmente com espessura de 8 mm, envolvendo as superfícies cilíndricas de contato, proporcionando maior resistência e durabilidade (Figura 5.63).

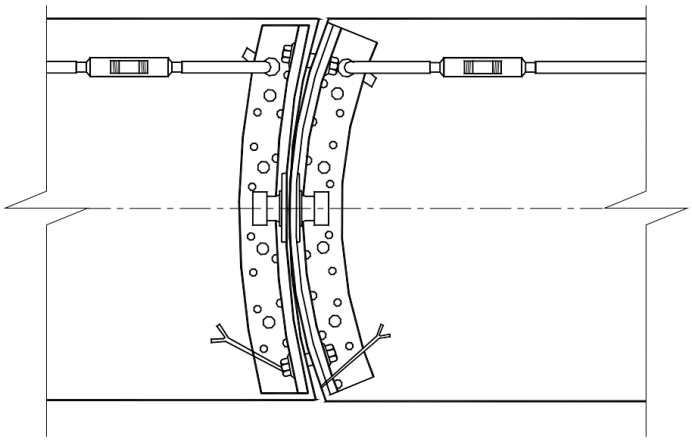


Figura 5.63 Detalhe da articulação do tipo Blindada (ou Burkhardt)

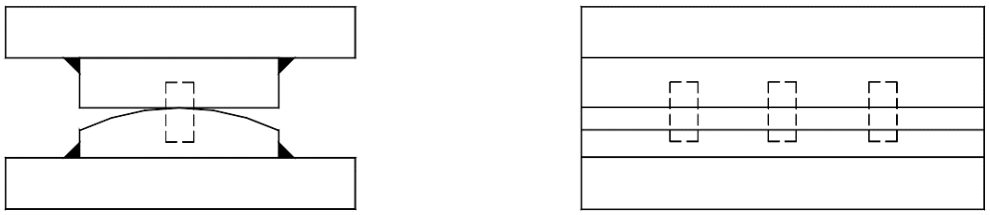
C. Articulações metálicas

As articulações metálicas são aparelhos de apoio fixos que permitem rotações controladas da superestrutura, sendo formados a partir da combinação adequada de chapas e roletes de aço. Para articulações fixas, utilizam-se chapas com cavidades usinadas e lubrificadas que acomodam os roletes.

Outra configuração possível envolve duas chapas metálicas: uma com superfície plana e a outra com superfície curva e convexa (Machado e Sartori, 2010). Alguns tipos básicos de articulações metálicas fixas, com liberdade de rotação, são apresentados a seguir:

- Articulação sem rolo metálico

Dispositivo que permite a rotação, mas impede o deslocamento horizontal, normalmente utilizado em apoios fixos (Figura 5.64).

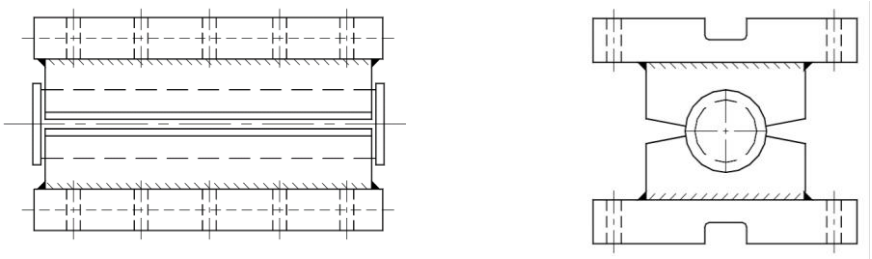


(a) (b)

Figura 5.64 Esquema de articulação sem rolo metálico: (a) funcionamento da articulação em seção; (b) vista em planta do sistema

- Articulação com rolo metálico

Constituída por dois níveis de rolos metálicos dispostos entre três placas paralelas (Figura 5.65). Esse sistema pode ser projetado para permitir movimentos horizontais em múltiplas direções, sendo utilizado quando há necessidade de acomodar deslocamentos longitudinais e transversais.

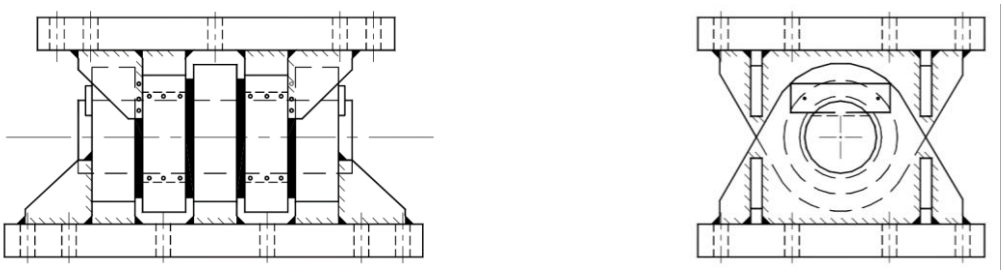


(a) (b)

Figura 5.65 Detalhe de articulações com rolo metálico: (a) vista longitudinal do sistema; (b) vista transversal da articulação

- Articulações para cargas verticais reversíveis: compressão ou tração

Essas articulações são projetadas para resistir a esforços verticais alternados, podendo atuar tanto à compressão quanto à tração, conforme ilustrado na Figura 5.66 a seguir.



(a) (b)

Figura 5.66 Detalhe de articulação submetida a cargas verticais reversíveis: (a) vista longitudinal do sistema; (b) vista transversal da articulação

5.2.1.2 Aparelhos de apoio móveis

Os aparelhos de apoio móveis permitem deslocamentos controlados no plano horizontal, acompanhando a movimentação da estrutura decorrente de variações térmicas, retração, fluência e demais efeitos de deformação, sem comprometer a integridade dos elementos. Eles podem ser classificados como de deslizamento, de rolamento, pendulares, elastoméricos e de neoprene fretado, conforme detalhado a seguir.

A. Aparelhos de apoio de deslizamento

Os primeiros aparelhos de apoio de deslizamento foram utilizados em estruturas com pequenos vãos, antes da introdução das placas de neoprene fretado. Esses dispositivos consistiam, basicamente, em duas placas de aço polido com um lubrificante entre elas. As placas eram sobrepostas, sendo uma fixada na superestrutura e a outra na mesoestrutura ou infraestrutura. O lubrificante entre elas tem a função de facilitar o deslizamento relativo entre as superfícies metálicas (Figura 5.67).

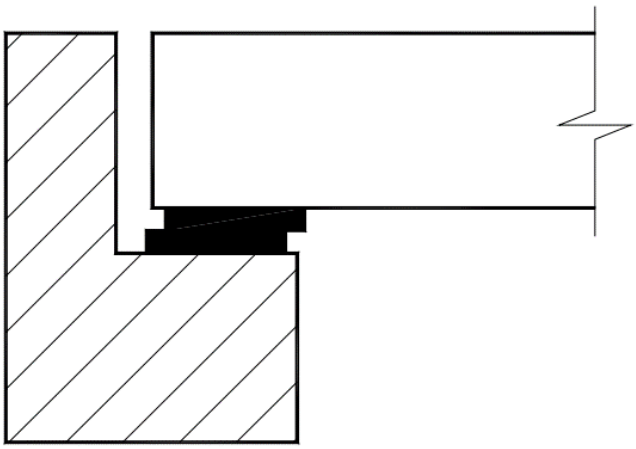


Figura 5.67 Detalhe de aparelhos de apoio de deslizamento

Após a montagem, essas placas eram centradas considerando uma temperatura média, buscando compatibilizar os deslocamentos térmicos. No entanto, com o tempo, a camada lubrificante tende a se contaminar com poeira e umidade, favorecendo o acúmulo de detritos. Isso compromete o deslizamento e provoca corrosão nas peças metálicas, tornando o apoio originalmente deslizante ineficaz e, muitas vezes, inservível (DNIT 091 – ES).

Com o desenvolvimento de novos materiais, o lubrificante convencional passou a ser substituído pelo teflon, que oferece baixo atrito e elevada capacidade de deslocamento em curtos períodos de tempo. No entanto, trata-se de um material com baixa resistência mecânica e confiabilidade limitada.

É importante destacar que todos os aparelhos de apoio de deslizamento devem obrigatoriamente ser equipados com batentes, a fim de restringir deslocamentos excessivos e evitar danos à estrutura.

B. Aparelhos de apoio de rolamento

Os aparelhos de apoio de rolamento utilizam elementos cilíndricos metálicos que permitem movimentos de translação horizontal, reduzindo o atrito entre a superestrutura e o apoio. Podem apresentar articulações com rolo único ou com rolos múltiplos, conforme a magnitude das cargas envolvidas.

- Articulação de rolo único

Esse é o tipo mais simples de apoio por rolamento, pois um único rolo consegue absorver simultaneamente os movimentos de rotação e translação da superestrutura, além de

suportar a reação vertical da ponte. Devido à sua capacidade limitada de suporte, é geralmente utilizado em situações de pequenas cargas (Figura 5.68).

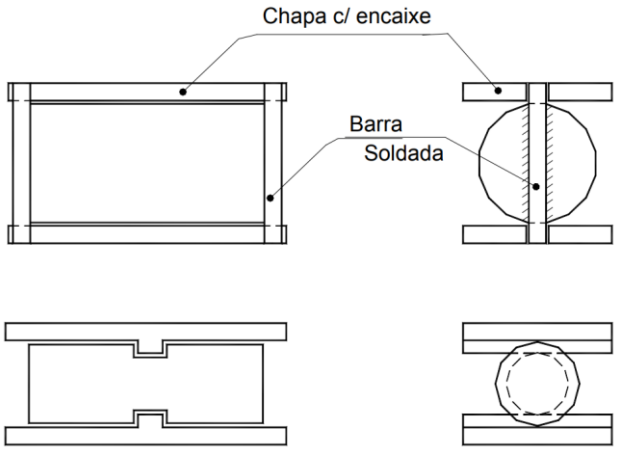


Figura 5.68 Detalhes de aparelhos de apoio de rolo único

- Articulação de rolos múltiplos

Quando um único rolo não é suficiente para suportar a reação vertical, utilizam-se rolos múltiplos (Figura 5.69). Nesse caso, como a rotação da superestrutura é impedida, torna-se necessário incorporar uma rótula ao sistema, o que acarreta maior complexidade e eleva o custo de usinagem do aparelho de apoio.

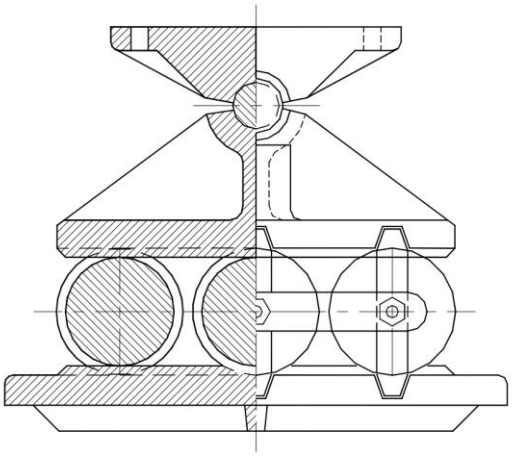


Figura 5.69 Detalhes de aparelhos de apoio de rolo múltiplos

C. Aparelhos de apoio pendulares

Os aparelhos de apoio pendulares podem ser executados em concreto ou aço, e têm como característica principal a transmissão de esforços verticais, permitindo pequenas rotações e deslocamentos horizontais controlados, conforme descrito a seguir.

- Apoios pendulares de concreto

Os apoios pendulares de concreto são peças prismáticas que se articulam duplamente na base e no topo, no sentido longitudinal, funcionando como dois blocos de apoio dispostos de forma oposta pelas bases. Esses apoios são vinculados à superestrutura e à infraestrutura por meio de uma das articulações já descritas anteriormente, como: articulação de contato, com placas de chumbo, articulação blindada, tipo Mesnager ou tipo Freyssinet. Também podem ser utilizados elementos de elastômero como meio de articulação (DNIT 091 – ES).

O uso de apoios pendulares de concreto apresenta certas limitações geométricas e físicas, sobretudo no que se refere aos deslocamentos admissíveis, motivo pelo qual seu uso é mais adequado em estruturas com movimentações restritas. O pêndulo de concreto (Figura 5.70) atua como elemento de transmissão vertical de esforços entre a superestrutura e a infraestrutura, possibilitando pequenos movimentos relativos por meio das articulações nas extremidades.

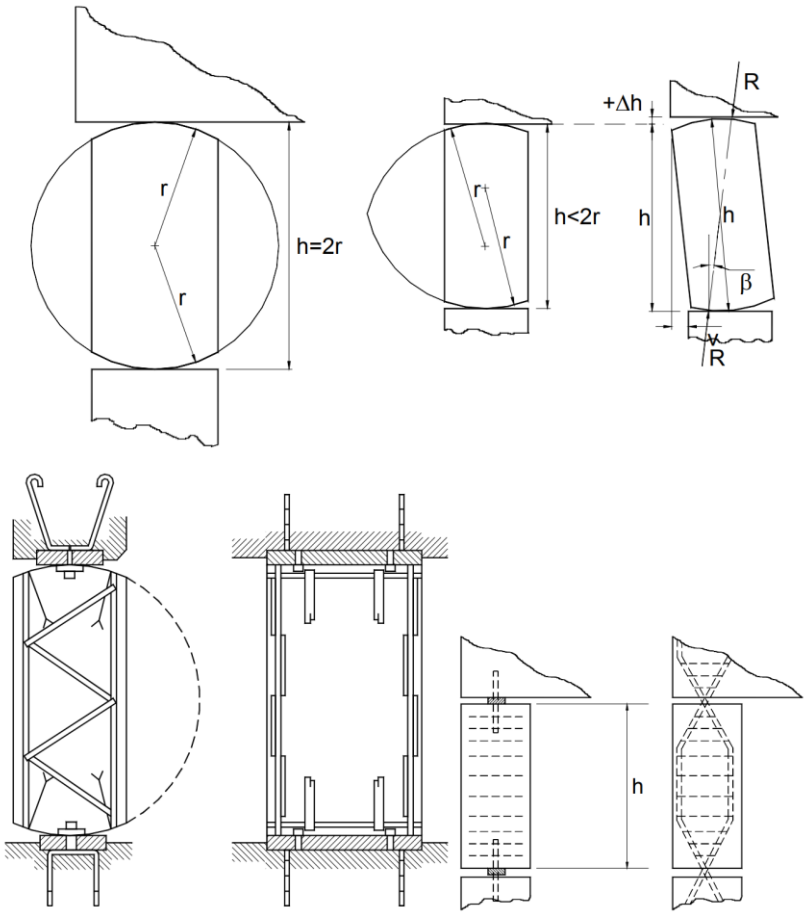


Figura 5.70 Detalhes para aparelhos de apoio pendulares de concreto

- Apoios pendulares de aço

Os apoios pendulares metálicos são dispositivos capazes de permitir a transmissão dos esforços verticais e acomodar movimentos de rotação por meio de mecanismos articulados, cuja geometria é projetada especificamente para cada aplicação estrutural. Esses dispositivos podem empregar superfícies curvas, componentes articulados ou sistemas de pinos e roletes, garantindo o movimento relativo entre a superestrutura e a mesoestrutura de forma controlada. A forma e o funcionamento desses apoios variam conforme a aplicação estrutural e podem ser observados na Figura 5.71.

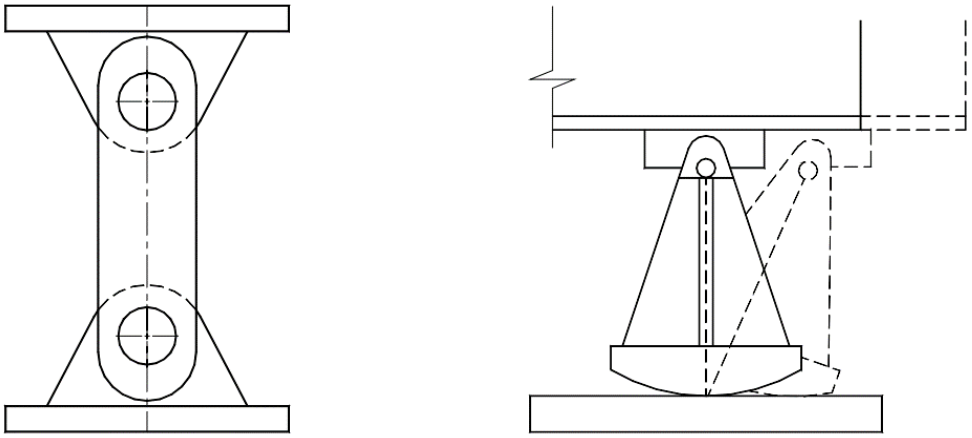


Figura 5.71 Aparelho de apoio pendular de aço: (a) vista frontal do sistema; (b) esquema de funcionamento com deslocamento e rotação

D. Aparelhos de apoio elastoméricos

Os aparelhos de apoio elastoméricos são o tipo mais simples de apoio utilizado em pontes. Consistem, basicamente, em blocos retangulares ou circulares, compostos por camadas de material elastomérico (geralmente Neoprene), separadas por chapas de aço de pequena espessura. O elastômero pode ser natural ou sintético, desde que apresente elevada e resistência às intempéries.

Quando reforçados por chapas de aço, os aparelhos de apoio elastoméricos são conhecidos como aparelhos de elastômero fretado, conforme nomenclatura da ABNT. As chapas atuam restringindo a deformação lateral do elastômero, aumentando a capacidade resistente do apoio e permitindo o uso de dimensões compatíveis com estruturas de concreto.

O neoprene é um elastômero sintético, obtido a partir do policloropreno, com propriedades elásticas semelhantes às da borracha natural, porém com características adicionais importantes, como alta resistência ao envelhecimento e grande resistência às intempéries. Apresenta ainda módulos de elasticidade muito baixos nos sentidos transversal e longitudinal, o que lhe confere grande capacidade de deformação nessas direções, funcionando como elemento de articulação elástica, capaz de acomodar:

- **Translação:** devido à retração do concreto, variações térmicas e fluência.
- **Rotação:** decorrente das flechas produzidas pelas cargas permanentes e móveis.

A tensão admissível de compressão do neoprene é da mesma ordem de grandeza da observada em concretos usuais, o que possibilita o uso de placas com dimensões compatíveis com as exigências das estruturas de concreto. Além disso, sua elevada durabilidade reduz a necessidade de manutenções frequentes, sendo os cuidados exigidos semelhantes à manutenção da própria estrutura, ao contrário dos apoios metálicos que demandam maior rigor.

Para solicitações de apoio de baixa intensidade, e quando se utilizam placas de pequena espessura, é possível empregar exclusivamente o Neoprene. No entanto, em situações mais comuns, como em pontes, é usual o uso de placas de Neoprene intercaladas com chapas de aço vulcanizadas, formando o Neoprene fretado.

Atualmente, normas como a ABNT NBR 19783 e a Euronorma EN 1337, estabelecem critérios de dimensionamento, fabricação e controle de qualidade, tornando esses dispositivos mais confiáveis e mais duráveis. Na Figura 5.72 são representados os comportamentos dos aparelhos de elastômero fretado para diversos tipos de solicitações.

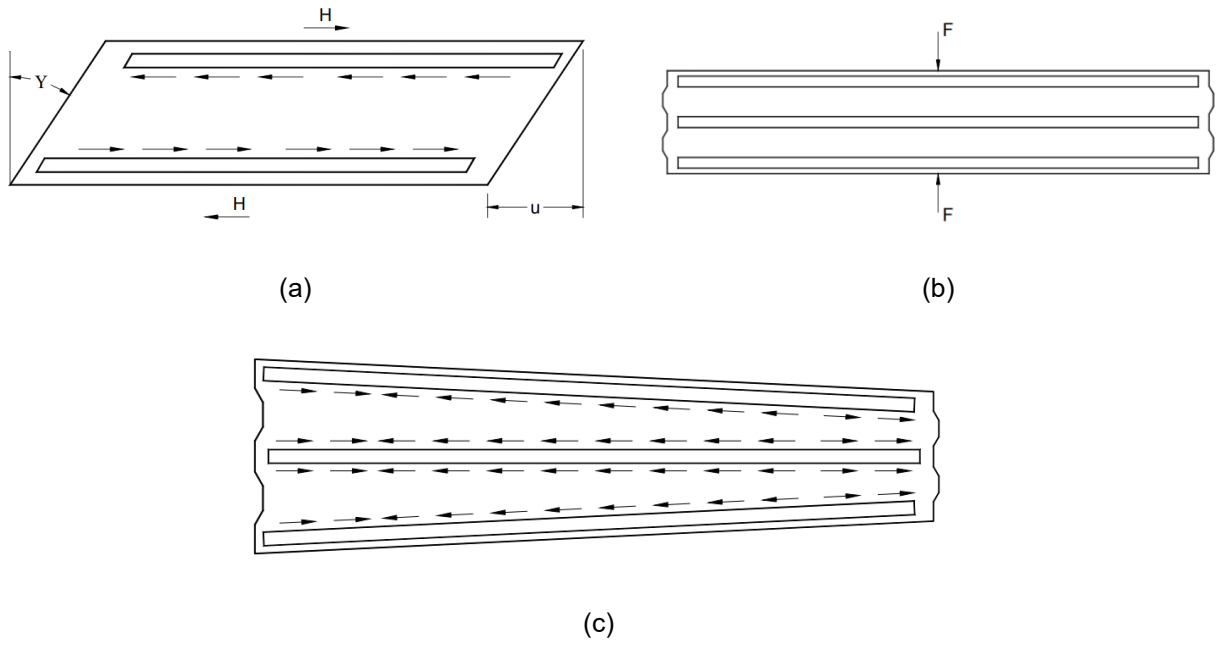


Figura 5.72 Comportamento dos aparelhos de apoio de elastômero fretado para diversas solicitações: (a) comportamento ao cisalhamento; (b) comportamento à compressão; (c) comportamento à rotação

E. Aparelhos de apoio de neoprene contido (*Neotopflager* ou *Pot Bearings*)

Os aparelhos de apoio de Neoprene contido, também conhecidos como *Neotopflager* ou *Pot Bearings*, são dispositivos mais sofisticados, desenvolvidos a partir da década de 1950, que integram duas propriedades essenciais aos aparelhos de apoio: a capacidade de permitir rotações com baixa resistência e a eficiente transmissão das reações de apoio em uma área bem definida.

Sua configuração básica é composta por um recipiente metálico (vaso de aço), no interior do qual se encontra um disco de elastômero não fretado, selado por uma tampa ou êmbolo metálico na parte superior. Sob elevadas cargas de compressão, o elastômero confinado passa a se comportar de maneira semelhante a um fluido, distribuindo uniformemente os esforços. A estanqueidade entre o disco e a tampa é fundamental, evitando o extravasamento do material, que se comportaria como um líquido viscoso caso não estivesse confinado.

A versão padrão desses aparelhos permite apenas a rotação. As forças verticais são absorvidas pelo disco elastomérico confinado, enquanto os esforços horizontais são transmitidos diretamente da tampa para a estrutura metálica do vaso (Figura 5.73). Quando necessário, podem receber dispositivos complementares para:

- restringir deslocamentos parciais;
- permitir movimentação em um ou dois eixos;
- atuar como apoio fixo.

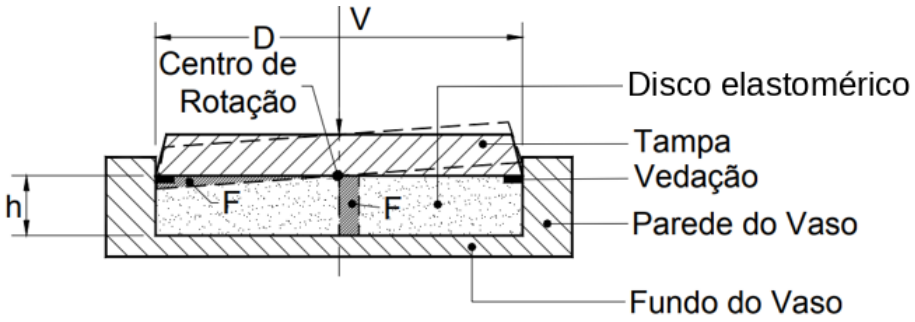


Figura 5.73 Detalhe de aparelho de apoio de Neoprene contido

No Brasil, fabricantes como Usimec e Vasoflon produzem diferentes configurações desses apoios. Entre as variações principais, destacam-se: neoprene contido fixo, neoprene contido móvel em uma direção e neoprene contido móvel. Entre as vantagens técnicas destacadas pela fabricante, incluem-se:

- capacidade de absorver recalques diferenciais moderados nas fundações, promovendo uma redistribuição uniforme das tensões na base dos pilares;
- possibilidade de grandes deslocamentos horizontais e rotações significativas;
- alta capacidade de carga (podendo atingir até 5.000 tf);
- dimensões compactas e baixo peso próprio, o que facilita sua instalação e manuseio em obras.

Esses aparelhos representam uma evolução tecnológica no campo dos dispositivos de apoio estrutural, sendo amplamente utilizados em pontes e viadutos de grande porte devido à sua eficiência mecânica e desempenho durável.

5.2.2 Pilares

Os pilares são elementos da mesoestrutura da ponte, usualmente construído na posição vertical, pois é nessa direção que atua a maior parte dos esforços que deve suportar. São responsáveis por transmitir as cargas da superestrutura, recebidas por meio dos aparelhos de apoio, até a infraestrutura.

Podem ser isolados, maciços ou aporticados, e cada linha transversal de apoio do tabuleiro corresponde um ou mais pilares. A escolha do número de pilares, bem como da necessidade de travamentos, depende de diversos fatores, como largura do tabuleiro, altura dos pilares, condições arquitetônicas, hidrológicas, geotécnicas e nível de tráfego. Em viadutos urbanos, por exemplo, utiliza-se frequentemente um único pilar central, reduzindo interferências no espaço urbano.

Nas pontes cujo sistema estrutural principal é em pórtico, a ligação entre a superestrutura e a mesoestrutura é feita de forma monolítica, formando nós rígidos. Já nas estruturas compostas por vigas isoladas ou contínuas, as reações são transferidas aos pilares por meio de aparelhos de apoio, os quais podem ser de dois tipos:

- rótulas, que permitem apenas a rotação da viga;
- apoios, que permitem rotação e translação.

Do ponto de vista conceitual, os pilares também podem ser entendidos como elementos que minimizam o vão livre da superestrutura, tornando-a mais econômica e reduzindo deformações. A mesoestrutura pode adotar diferentes configurações de pilares, descritas a seguir.

5.2.2.1 Pilares isolados ou apenas contraventados

Esse tipo de apoio consiste em pilares dispostos individualmente, podendo apresentar contraventamentos para melhorar a estabilidade estrutural (Figura 5.74).

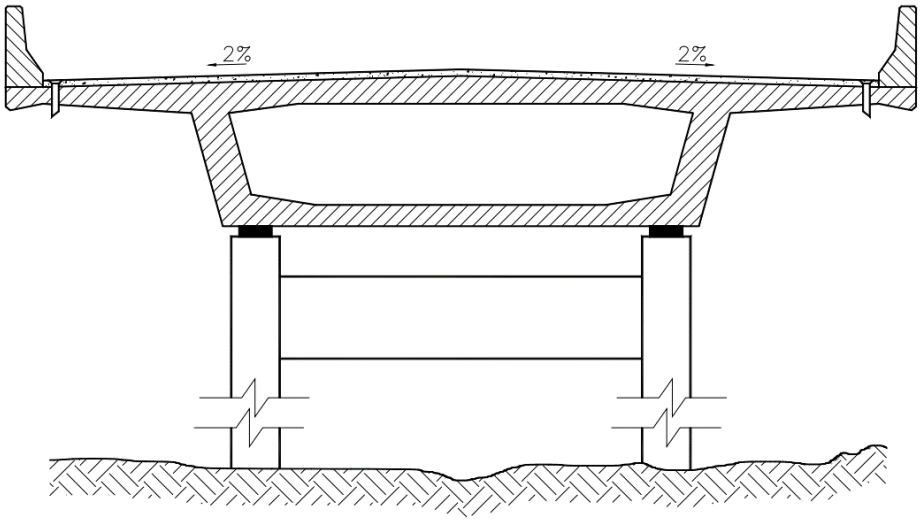


Figura 5.74 Esquema de pilares isolados ou apenas contraventados

5.2.2.2 Pilares isolados com viga-travessa

Nesse sistema, os pilares isolados são interligados no topo por uma viga-travessa, que distribui os esforços provenientes da superestrutura (Figura 5.75).

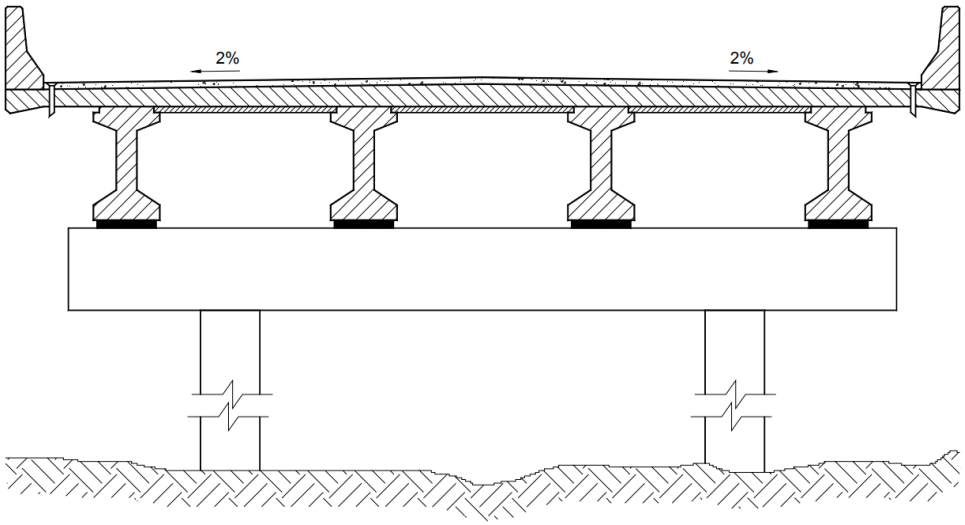


Figura 5.75 Esquema de pilares isolados com viga-travessa

5.2.2.3 Pilar único com viga-travessa

Esse arranjo adota um único pilar central, geralmente de maior robustez, que apoia diretamente a viga-travessa responsável pela sustentação do tabuleiro (Figura 5.76).

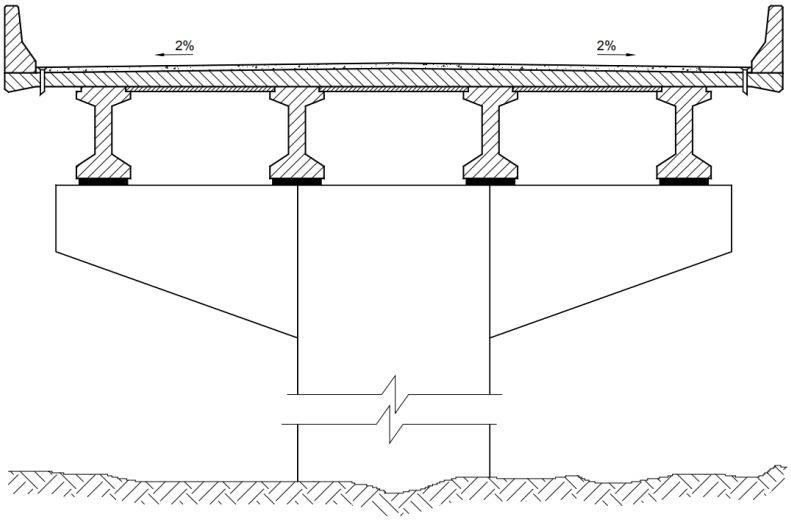


Figura 5.76 Esquema de pilar único com viga-travessa

5.2.2.4 Pilar parede, maciço ou celular

Os pilares do tipo parede costumam se estender ao longo de toda a largura da superestrutura (como lajes, vigas T ou vigas em caixão). Dependendo da concepção adotada, podem estar alinhados com a superestrutura, ultrapassá-la lateralmente ou apresentar largura inferior à dela. Trata-se de um elemento de apoio do tipo parede, podendo ser maciço ou do tipo celular (ocos), conforme a demanda estrutural e geotécnica (Figura 5.77).

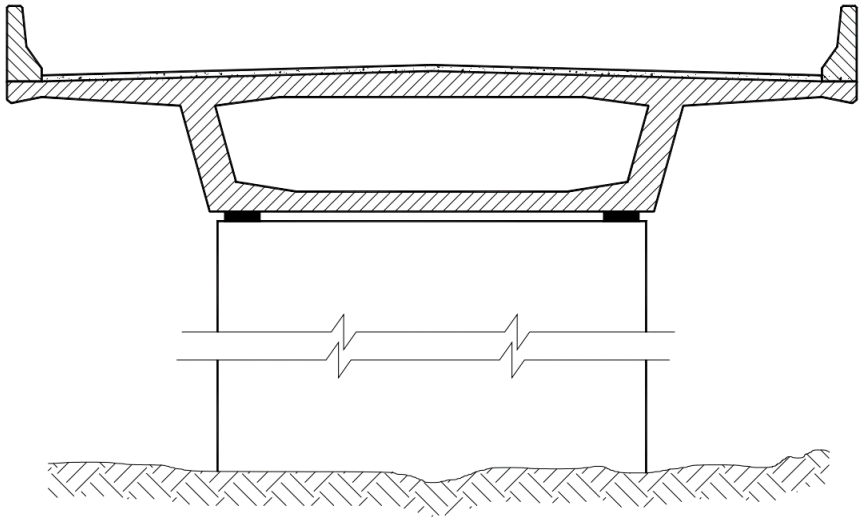


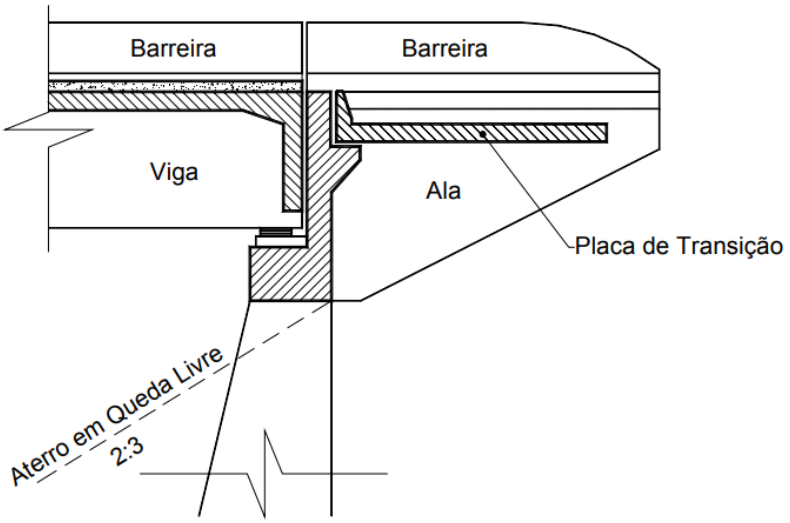
Figura 5.77 Esquema de pilar parede, maciço ou celular

5.2.3 Encontros

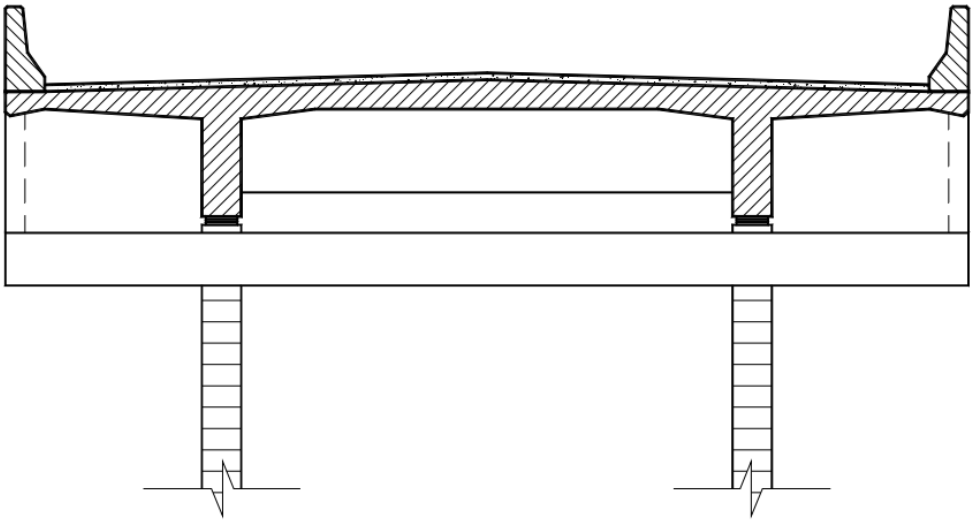
Os encontros sustentam as extremidades do tabuleiro e atuam como elementos de contenção dos acessos rodoviários. No entanto, por razões econômicas, no Brasil, apenas nas obras de maior porte é comum o uso de encontros estruturais. Nas obras correntes, esses encontros são substituídos pela combinação entre extremos em balanço da surperestrutura e por aterros em queda livre, frequentemente executados com compactação inadequada e sem proteção efetiva contra a erosão.

Apesar do uso crescente de lajes de transição, esse conjunto aterro/ponte ainda apresenta funcionamento deficiente, resultando em recalques diferenciais, desconforto ao usuário e impactos veiculares no acesso da estrutura.

A Figura 5.78 apresenta um desenho esquemático dos cortes de pontes com falso encontro ou encontro leve, evidenciando essa solução, frequentemente adotada em obras de menor porte.



(a)



(b)

Figura 5.78 Desenho esquemático dos cortes de pontes com falso encontro ou encontro leve: (a) corte longitudinal; (b) corte transversal

A Figura 5.79 ilustra cortes de pontes com encontro especial, aplicados em situações que exigem maior desempenho ou estabilidade. Já a Figura 5.80 mostra um desenho esquemático de cortes de pontes com extremo em balanço, solução amplamente difundida, porém que requer atenção especial aos aterros adjacentes.

Nota: as ilustrações não apresentam juntas de dilatação nem os dispositivos de proteção das saias de aterro.

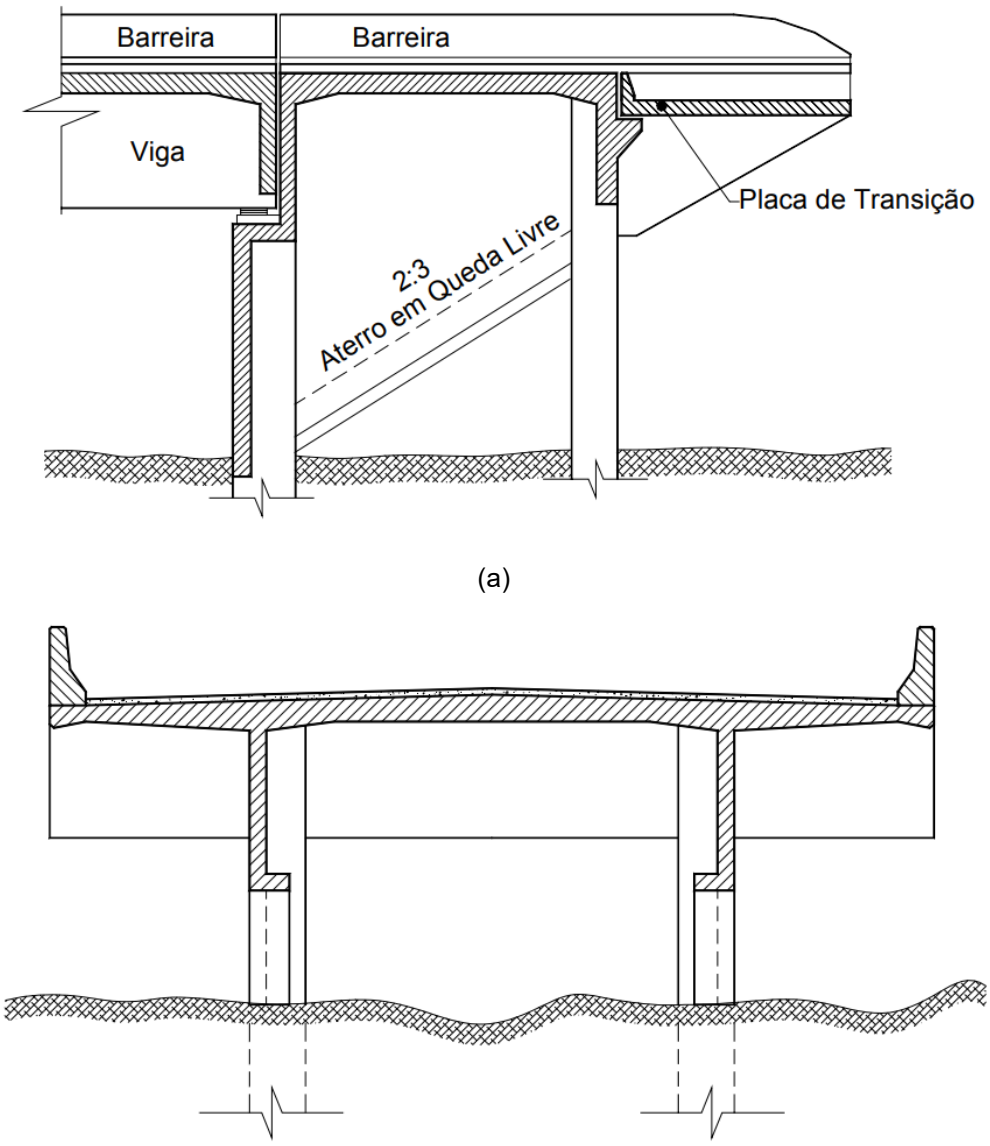


Figura 5.79 Desenho esquemático dos cortes de pontes com encontro especial: (a) corte longitudinal; (b) corte transversal

O encontro tem a função de estabilizar o aterro nas extremidades do vão, ao mesmo tempo em que oferece suporte às extremidades da superestrutura. Sua configuração construtiva é determinada por fatores como a altura do aterro, a elevação da estrutura, a magnitude das reações nos apoios e as deformações longitudinais da superestrutura que precisam ser acomodadas.

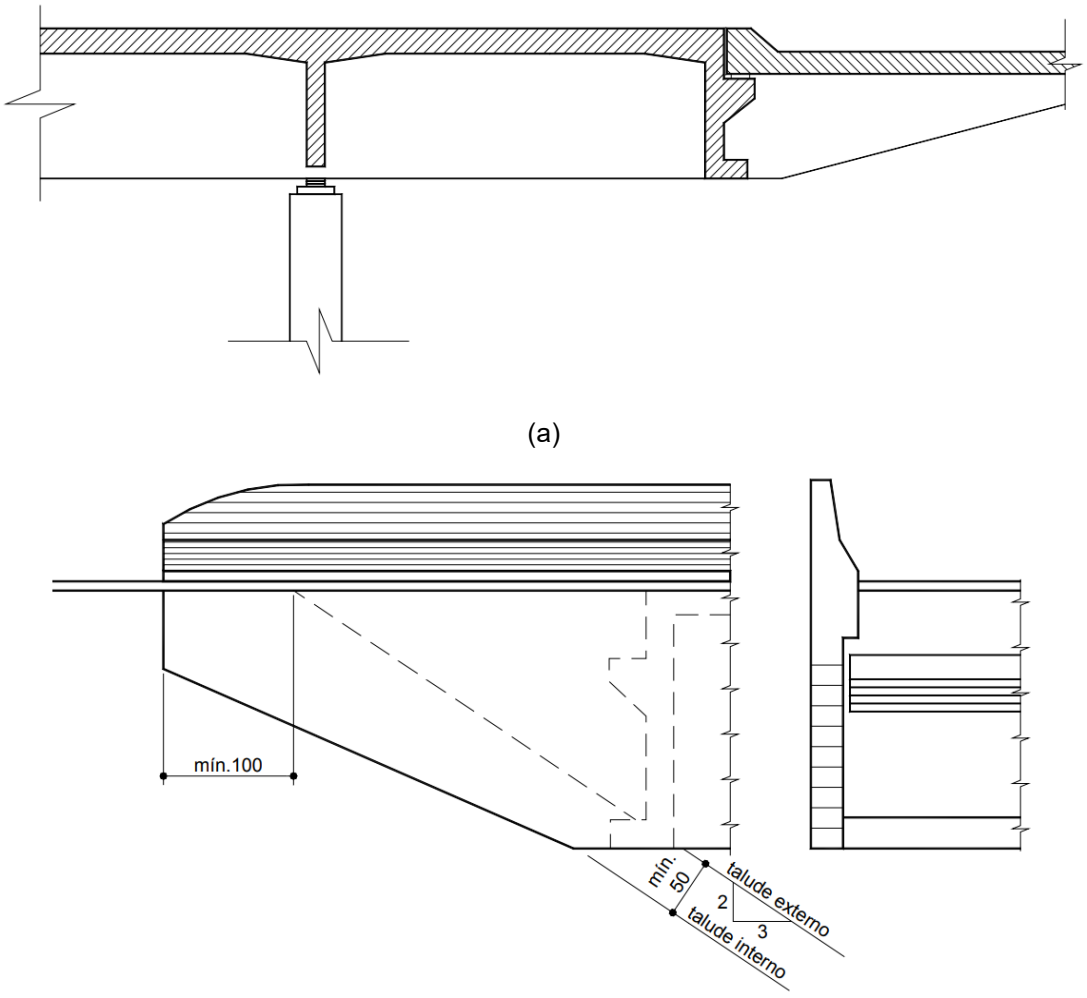


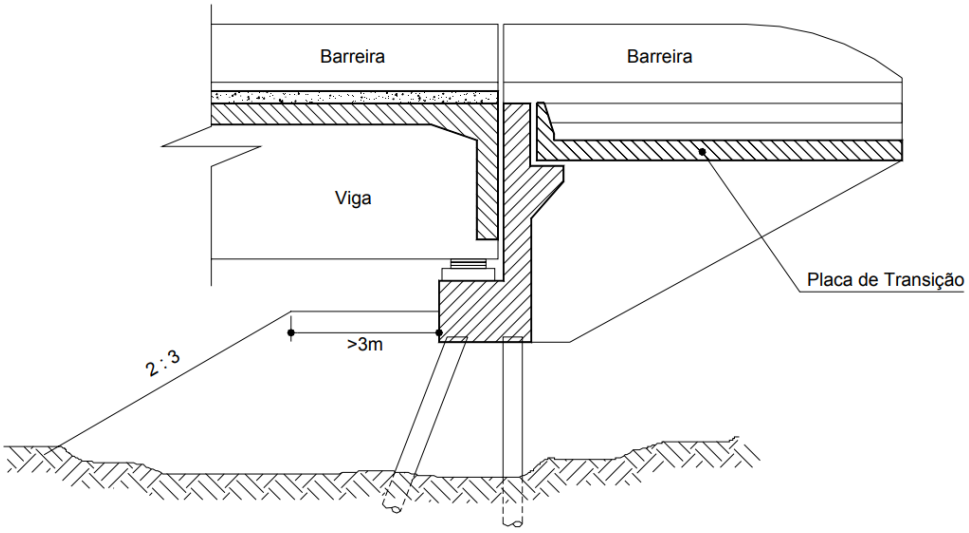
Figura 5.80 Desenho esquemático dos cortes de pontes com extremo em balanço: (a) corte longitudinal; (b) detalhe da Ala

5.2.3.1 Encontros em aterros estabilizados

Considera-se aterro estabilizado, para este tipo de encontro, o aterro executado com solo selecionado e com todos os cuidados de compactação. Após a conclusão do aterro, procede-se ao recorte necessário para o encaixe da ponte e do próprio encontro.

O encontro é constituído por um bloco corrido de concreto armado, de comprimento maior que a largura do estrado da ponte e com um recorte para abrigar sua superestrutura. Lateralmente, duas alas de concreto armado têm a função de conter um aterro residual. O apoio da ponte no encontro se dá por meio de almofadas de concreto e aparelhos de apoio. O bloco corrido, através de estacas ou de tubulões, estará apoiado em terreno natural, situado abaixo da configuração final da travessia (Figura 5.81).

A estabilidade dos vãos extremos depende diretamente da integridade do aterro compactado, motivo pelo esse elemento deve ser inspecionado periodicamente, especialmente quanto a recalques diferenciais, erosões e falhas de drenagem.



NOTA: Não estão apresentadas as juntas

Figura 5.81 Corte longitudinal esquemático de encontros em aterros estabilizados

5.2.3.2 Encontros vazados

Os encontros vazados são, na realidade, apoios extremos com estabilidade própria: têm capacidade de absorver as reações da ponte, solicitações normais e horizontais, bem como as solicitações dos empuxos de terra e da sobrecarga.

O encontro compõe-se de uma viga-travessa, alas laterais, pilares e fundações. A viga-travessa é uma viga larga, com recorte para abrigar a superestrutura da ponte e de comprimento um pouco maior que a largura do tabuleiro. Por meio de almofadas de concreto e de aparelhos de apoio, suporta o vão extremo da ponte e, complementada por duas alas laterais de concreto armado, contém o aterro de acesso (Figura 5.82).

Não dispondo de parede frontal, o encontro permite que a saia do aterro caia livremente na altura entre terreno natural e fundo da viga-travessa. A viga-travessa está apoiada em pilares, e estes em fundações diretas ou em blocos sobre estacas ou tubulões, como mostrado no corte transversal da Figura 5.83.

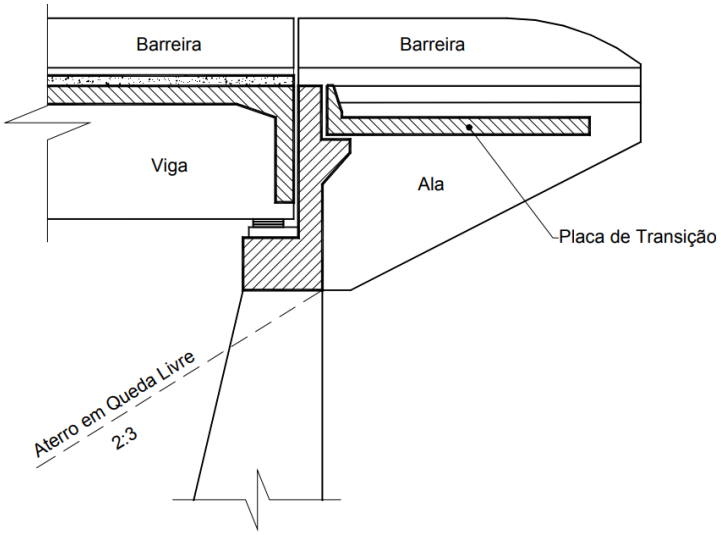


Figura 5.82 Corte longitudinal em encontros vazados

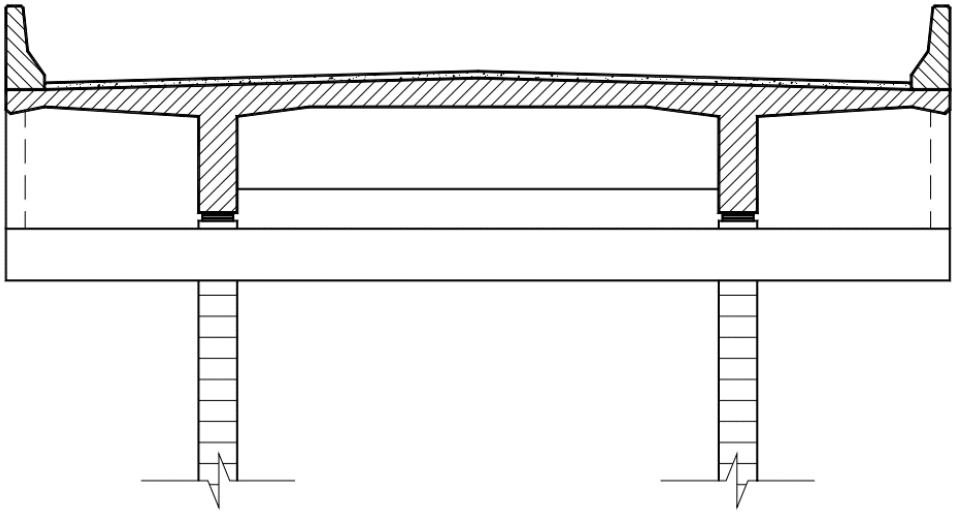


Figura 5.83 Corte transversal em ponte com encontros vazados

5.2.3.3 Encontros de contenção, sem tabuleiro

Os encontros de contenção, sem tabuleiro, são estruturas similares aos encontros vazados, acrescidos de paredes frontais para impedir a queda livre dos aterros de acesso (Figura 5.84). A escolha do sistema estrutural depende da altura de aterro a ser arrimado, podendo-se empregar:

- muros de gravidade (muros de peso);
- paredes de concreto armado apoiadas em pilares;
- paredes apoiadas em contrafortes.

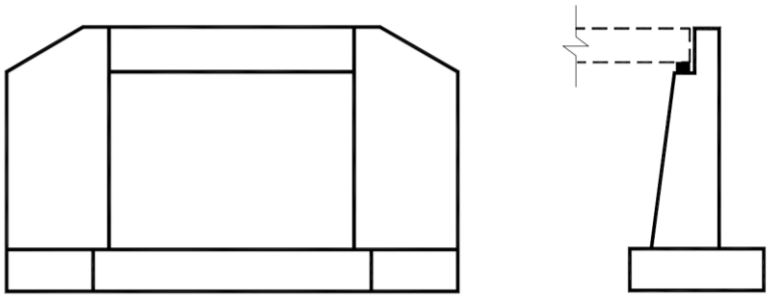


Figura 5.84 Vista frontal: (a) corte longitudinal; (b) encontros de contenção sem tabuleiro

Todos esses sistemas são complementados por alas laterais. A fundação dos muros de gravidade é corrida e direta, enquanto pilares e contrafortes podem ser apoiados em fundações diretas, blocos ou sapatas, ou ainda em fundações profundas com blocos sobre estacas ou tubulões.

5.2.3.4 Encontros fechados, com tabuleiro completo

São estruturas fechadas, com parede frontal, paredes laterais, cortina e alas. O suporte do tabuleiro é realizado por, no mínimo, quatro pilares apoiados em fundações diretas (blocos, sapatas, tubulões), ou em blocos de coroamento sobre estacas, que transferem as cargas ao terreno.

Nessas estruturas o aterro de acesso desce livremente a partir do fundo da cortina e, não atingindo a parede frontal do encontro, pode reduzir as solicitações horizontais, dependendo da relação comprimento/altura do encontro (Figura 5.85).

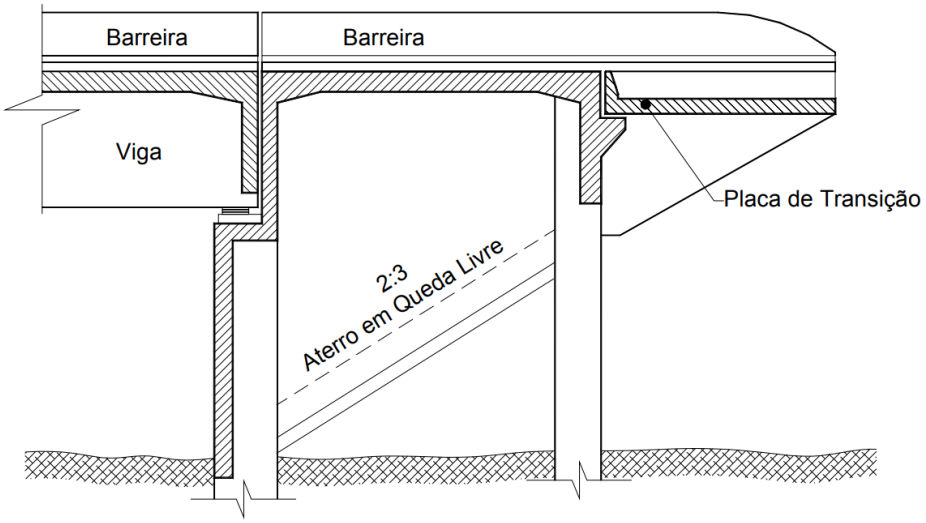


Figura 5.85 Corte longitudinal de encontros fechados com tabuleiro completo

5.3 INFRAESTRUTURA

A infraestrutura das pontes é composta principalmente pelas fundações, cuja função é transmitir ao solo as cargas oriundas da superestrutura e da mesoestrutura. As fundações são fundamentais para garantir a estabilidade da ponte, uma vez que sustentam toda a estrutura. Podem ser classificadas em dois grupos principais: fundações diretas (ou rasas) e fundações profundas, conforme discutido a seguir.

5.3.1 Fundações diretas

As fundações diretas, também chamadas de rasas ou superficiais, são geralmente executadas em concreto armado e assentadas diretamente sobre o solo com capacidade de suporte adequada, em profundidades consideradas pequenas. Os principais tipos de elementos de fundação direta são sapatas e blocos de fundação, construídos a partir de escavações realizadas até a cota de apoio.

A profundidade mínima de instalação deve atender à seção 6.4.2 da ABNT NBR 6122, transcrito a seguir:

"A base de uma fundação deve ser assente a uma profundidade tal que garanta que o solo de apoio não seja influenciado pelos agentes atmosféricos e fluxos d'água. Nas divisas com terrenos vizinhos, salvo quando a fundação for assente sobre rocha, tal profundidade não deve ser inferior a 1,5 m".

Esse requisito também se aplica a estruturas como muros de arrimo e encontros do tipo gravidade. Sendo estruturas enterradas, a inspeção das fundações diretas fica limitada à observação de indícios de descalçamento, erosão (solapamento) ou recalques diferenciais.

Esse tipo de fundação é empregado quando as camadas resistentes do solo ou o afloramento rochoso estão próximas à superfície, permitindo uma solução simples e econômica. Em regiões sujeitas a geadas, a base da fundação deve ser posicionada abaixo da profundidade máxima da linha de congelamento.

5.3.2 Fundações profundas

As fundações profundas são indicadas quando as camadas de solo resistente estão localizadas em maior profundidade ou quando as características do solo superficial não apresentam capacidade de suporte satisfatória. Nessas situações, escavações profundas para fundações diretas se tornam impraticáveis ou antieconômicas, justificando o emprego de estacas ou tubulões.

As estacas são elementos longos e esbeltos, que podem ser cravados ou moldados no local, capazes de transferir cargas ao solo por meio de resistência de ponta ou atrito lateral ao longo do fuste. Podem ser constituídas de diferentes materiais: estacas de madeira (atualmente em desuso), estacas de aço (em perfil ou trilho) e estacas de concreto (pré-moldadas ou moldadas *in loco*). Os tubulões são elementos maciços, geralmente circulares, com grande diâmetro (entre 1,20 m e 1,80 m).

Os principais tipos utilizados em pontes são:

- **Estacas cravadas:** estacas de madeira, estacas de aço e estacas pré-moldadas de concreto armado.
- **Estacas moldadas *in loco*:** estacas tipo Franki, estacas escavadas com uso de lama bentonítica, estacas escavadas com injeção, microestacas, estacas tipo raiz e estacas mistas.
- **Tubulões:** tubulões não revestidos, tubulões revestidos com camisa de concreto, tubulões revestidos com camisa de aço.

Por serem geralmente elementos confinados e não aparentes, a inspeção das fundações profundas limita-se à observação das suas partes expostas, como:

- o estado dos comprimentos livres de estacas visíveis;
- patologia nos materiais, como corrosão do concreto ou desgaste mecânico;
- interações com variações do nível d’água, especialmente na zona de flutuação;
- ligação entre estacas e blocos de coroamento, verificando sinais de fissuras, deslocamentos ou degradação de armaduras expostas.

6 EQUIPAMENTOS E ACESSOS PARA INSPEÇÃO

A execução de inspeções em pontes exige não apenas conhecimento técnico, mas também condições adequadas de segurança, registro e acesso aos elementos estruturais. Dessa forma, a seleção criteriosa de equipamentos, ferramentas e métodos de acesso influencia diretamente a qualidade das avaliações, a confiabilidade dos dados coletados e a integridade física da equipe em campo.

Este capítulo apresenta os principais equipamentos utilizados nas inspeções, diferenciando aqueles de uso geral dos recursos especiais aplicados em casos de maior complexidade, além de descrever os meios e dispositivos empregados para garantir o acesso seguro a todas as regiões relevantes da estrutura.

6.1 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADOS NAS INSPEÇÕES

As inspeções são atividades voltadas ao levantamento de dados e à investigação das condições gerais e específicas das pontes. Para sua execução, devem ser utilizados equipamentos e ferramentas compatíveis com o tipo, inspeção e com o nível de detalhamento requerido, em conformidade com a ABNT NBR 9452.

De modo geral, os equipamentos e ferramentas utilizados podem ser classificados em dois grupos:

- equipamentos e ferramentas comuns (ou de uso geral);
- equipamentos especiais, utilizados em inspeções de maior complexidade.

Os equipamentos destinados ao acesso do inspetor aos diferentes elementos da estrutura são tratados especificamente na seção 6.2.

6.1.1 Equipamentos e ferramentas comuns (uso geral)

Os equipamentos e ferramentas comuns são aqueles empregados rotineiramente nas inspeções visuais e nos levantamentos de campo. Para fins operacionais, são agrupados nas seguintes categorias: limpeza, investigação, visibilidade, medição, documentação e complementares, conforme descrito a seguir.

6.1.1.1 Equipamentos e ferramentas de limpeza

São usados para limpar áreas, permitir a visualização dos elementos de forma adequada, remover sujeiras e detritos soltos, tintas e produtos da corrosão do aço. Como exemplo, têm-se as escovas, vassouras, palhas de aço, lixadeiras e lixas (Figura 6.1).

Figura 6.1 Exemplos de equipamentos e ferramentas de limpeza

6.1.1.2 Equipamentos e ferramentas de investigação

São instrumentos usados para examinar os diversos atributos da estrutura. Possibilitam medir alinhamentos verticais, verificar elementos soltos e até mesmo transportar ou acessar pequenas ferramentas. Como exemplos, incluem-se o canivete, o martelo, o martelete, o nível, a chave de fenda, o cinto porta-ferramentas e os prumos (Figura 6.2).

Figura 6.2 Exemplos de equipamentos e ferramentas de investigação

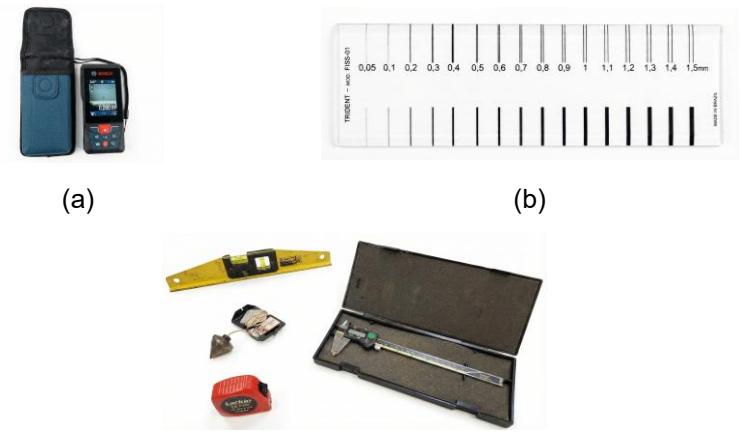
6.1.1.3 Equipamentos e ferramentas de visibilidade

São equipamentos usados para visualizar áreas a longas distâncias, normalmente na etapa de reconhecimento prévio e na inspeção visual detalhada, sendo o principal deles o binóculo. Outros equipamentos usados para inspeção de áreas inacessíveis ou escuras são as lunetas, lentes com iluminação, espelhos de inspeção e lanternas (Figura 6.3).

Figura 6.3 Exemplos de equipamentos de visibilidade

6.1.1.4 Equipamentos e ferramentas de medição

Os instrumentos de medição são utilizados para dimensionar os elementos, aferir a inclinação de subestruturas, classificar fissuras, medir a temperatura do ambiente e dos elementos, entre outras funções. Exemplos desses instrumentos são a trena de mão, trena a laser, paquímetro, fissurômetro (régua graduada para medição da abertura de fissuras), fio de prumo, nível de pedreiro e termômetros (Figura 6.4).



(a) (b)

(c)

Figura 6.4 Instrumentos de medição: (a) trena a laser; (b) fissurômetro; (c) nível, fio de prumo, trena e paquímetro digital

6.1.1.5 Equipamentos e ferramentas de documentação

Para o registro dos dados coletados na inspeção e a posterior compilação das informações, são comumente utilizados pranchetas, fichas cadastrais, lápis, borracha, esquadros, giz e câmera fotográfica digital ou dispositivo móvel com câmera de boa resolução (Figura 6.5).

(a) (b)

Figura 6.5 Câmeras utilizadas para registro fotográfico: (a) câmera digital; (b) câmera estabilizadora portátil

Quando utilizados sistemas informatizados de gestão de pontes, devem ser empregados dispositivos eletrônicos compatíveis com o preenchimento dos formulários digitais. Recomenda-se que a equipe disponha de equipamentos de reserva, em razão das condições adversas do ambiente de campo.

6.1.1.6 Equipamentos complementares

Incluem os Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e os Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), indispensáveis à segurança da equipe de inspeção. É comum o uso de repelentes, kits de primeiros socorros e materiais de higiene pessoal. Entre os EPIs mais utilizados, destacam-se: capacete, protetor auricular, óculos, luvas, perneiras e botas de segurança.

Equipamentos adicionais podem ser necessários em circunstâncias especiais. Por exemplo, cintos de segurança e talabartes são indispensáveis para trabalhos em altura, enquanto máscaras de ventilação forçada (máscaras de ar mandado) são necessárias em acessos a espaços onde não é possível garantir a segurança respiratória por outros meios.

6.1.2 Equipamentos especiais

Os equipamentos especiais são empregados em inspeções de maior complexidade, normalmente em pontes de médio e grande porte, e podem exigir equipes técnicas especializadas. Incluem, entre outros:

- equipamentos para medição remota de grandezas físicas;
- drones;
- veículos subaquáticos;
- equipamentos para ensaios não destrutivos;
- equipamentos para a extração de testemunhos.

Esses e outros equipamentos especiais, bem como exemplos de suas aplicações, são apresentados no Capítulo 8: Técnicas Avançadas de Inspeção.

6.2 ACESSOS PARA AS INSPEÇÕES

As áreas de difícil acesso nas pontes representam um dos principais desafios para a qualidade das inspeções, pois podem limitar a observação direta dos elementos estruturais e introduzir incertezas quanto à sua condição real. Para superar essas limitações, devem ser empregados métodos de acesso e equipamentos que permitam ao inspetor alcançar, com segurança e proximidade adequada, todas as regiões relevantes da estrutura, possibilitando:

- avaliar as condições gerais dos elementos estruturais;
- realizar medições geométricas (comprimentos, áreas e espessuras);
- identificar e coletar informações sobre possíveis anomalias.

Além de garantir o alcance e a qualidade da inspeção, é fundamental que toda a equipe adote uma postura permanente de segurança ao utilizar esses métodos de acesso. Recomenda-se:

- a utilização de equipamentos apropriados à situação;
- a manutenção das áreas de trabalho organizadas e desobstruídas;
- a adoção de procedimentos operacionais padronizados e compatíveis com as normas de segurança.

Sempre que houver necessidade de veículos de apoio, deve-se evitar sua permanência sobre o tabuleiro ou nas cabeceiras da ponte, priorizando locais externos previamente avaliados como seguros.

6.2.1 Equipamentos comuns de acesso

Os equipamentos comuns de acesso incluem escadas, andaimes e plataformas apoiadas ou suspensas. Esses equipamentos permitem posicionar o inspetor próximo o suficiente do elemento para realizar inspeções visuais detalhadas, com possibilidade de contato direto com a superfície (inspeção tátil). A seleção entre esses meios deve considerar a altura da estrutura, a extensão da área a ser inspecionada, o tempo de montagem e as possíveis interferências com o tráfego ou com o curso d'água.

Conforme práticas do *Bridge Inspector's Reference Manual* – BIRM (FHWA, 2022), recomenda-se usar escadas (Figura 6.6) apenas em trechos que possam ser alcançados com segurança (sem necessidade de esforço excessivo ou inclinação excessiva do corpo) e sua instalação com inclinação aproximada de 1:4 (1 unidade horizontal para 4 unidades verticais). Antes do uso, a escada deve ser inspecionada, verificando-se apoios firmes em superfície estável, integridade dos montantes e degraus e fixação adequada à estrutura quando necessário.

Figura 6.6 Utilização de escada para acesso

Fonte: Acervo do LAB INFRA

Plataformas apoiadas (Figura 6.7) ou suspensas são alternativas eficazes para acessar estruturas com altura inferior a 12 metros, que estão acima do nível do solo e com pouco tráfego próximo ao local.

Figura 6.7 Utilização de plataformas apoiadas para acesso

Fonte: FHWA (2022)

Devem ser projetadas, montadas e inspecionadas por pessoal qualificado, em conformidade com a legislação de segurança do trabalho vigente e com as instruções do fabricante. Além disso, de acordo com o BIRM (2022), é importante garantir pisos contínuos, guarda-corpos, rodapés e pontos de ancoragem para sistemas de proteção contra quedas.

A seleção do tipo de plataforma (apoiada ou suspensa) deve seguir uma análise mais detalhada, considerando parâmetros como obstáculos no terreno, condições do curso d'água, e viabilidade econômica. Quando os obstáculos tornam o acesso com plataformas apoiadas inviável, a opção recai naturalmente sobre plataformas suspensas. Para os demais casos, é importante comparar o custo unitário de cada solução (plataformas apoiadas em m³ e suspensas em m²), o reaproveitamento dos equipamentos ao longo dos vãos e as condições de mobilidade e estabilidade necessárias.

6.2.2 Plataformas elevatórias

As plataformas elevatórias (Plataformas de Trabalho Aéreo) são equipamentos mecânicos formados por uma plataforma ou cesta de trabalho acoplada a um sistema de elevação (lança hidráulica articulada ou telescópica, tesoura, mastro, entre outros). São usadas para posicionar o inspetor em diferentes níveis do sistema de piso (laje, longarinas e transversinas) e em outros elementos da ponte, em áreas onde o acesso é inviável por outros meios mais simples, como as escadas e andaimes.

De acordo com o BIRM (2022), as plataformas elevatórias (Figura 6.8) apresentam alcances verticais que podem ultrapassar 50 m, permitindo acesso a diferentes níveis de estruturas de alturas elevadas.

(a) (b)

Figura 6.8 Plataforma elevatória utilizada para acesso e inspeção em pontes: (a) plataforma elevatória articulada; (b) utilização da plataforma para inspeção da estrutura da ponte

Fonte: Acervo do LAB INFRA

Em geral, esses equipamentos são projetados para operar sobre terreno relativamente nivelado, embora as versões sobre esteiras, Figura 6.9(a), permitam operação em declividades moderadas e em terrenos irregulares, incluindo margens de cursos d'água. Existem ainda as plataformas elevatórias do tipo tesoura, Figura 6.9(b), adequadas para inspeções com baixa altura livre entre a ponte e o substrato abaixo. Essas plataformas têm um alcance vertical máximo típico de 6 metros e são projetadas para uso em terrenos relativamente planos.

(a) (b)

Figura 6.9 Outros tipos de plataformas elevatórias: (a) sobre esteiras; (b) tipo tesoura

Fonte: FHWA (2022)

Antes da utilização, devem ser verificados o estado geral da máquina, a presença e o correto posicionamento de estabilizadores ou patolas, o funcionamento dos sistemas de comando e de parada de emergência, bem como o uso adequado de sistemas de proteção contra quedas (cinto de segurança tipo paraquedista e ponto de ancoragem). A operação deve ser conduzida por profissional treinado, em conformidade com a legislação de segurança do trabalho vigente e com as instruções do fabricante, observando-se sempre os limites operacionais estabelecidos (carga máxima, inclinação máxima admissível, velocidade do vento etc.).

6.2.3 Barcos e balsas

Os barcos e balsas (Figura 6.10) são utilizados em estruturas extensas que transpõem cursos d'água ou quando o acesso aos elementos da ponte a partir das margens não é viável ou seguro. São especialmente úteis para acesso a pilares, encontros e fundações, facilitando inspeções visuais, registros fotográficos de manifestações patológicas e o apoio a inspeções subaquáticas.

De acordo com o BIRM (2022), essas embarcações podem ser utilizadas isoladamente ou combinadas com outros equipamentos de acesso (como plataformas elevatórias ou veículos de inspeção sob a ponte), funcionando como plataforma de trabalho temporária ancorada na posição de inspeção ou como base de mobilização para inspeções subaquáticas.

Figura 6.10 Utilização de balsas em inspeções

Fonte: FHWA (2022)

6.2.4 Veículos especiais

Veículos especiais de inspeção, como caminhões *Snooper* e *Munck*, permitem acesso rápido e seguro à parte inferior e lateral das pontes, sendo especialmente indicados para grandes vãos ou estruturas elevadas. Os *Snoopers* são projetados para alcançar toda a parte inferior do estrado ou, pelo menos, grande parte dele, enquanto os *Muncks* têm alcance mais limitado, concentrando-se nas faces laterais e regiões próximas.

Em pontes ferroviárias, o acesso pode ser viabilizado por caminhões rodoferroviários (veículos com conjunto de rodas ferroviárias retráteis), também equipados com braços articulados e cestas, que permitem aproximação dos inspetores aos elementos estruturais (Figura 6.11).

Por questões de segurança, antes da utilização de qualquer veículo de inspeção, o BIRM (2022) recomenda que seja feita inspeção prévia do equipamento: verificados os limites de carga do cesto, as restrições de inclinação da superfície de apoio, a presença de linhas elétricas aéreas e a necessidade de treinamento específico do operador. Deve-se sempre utilizar cinturões de segurança com talabarte absorvedor de energia, conforme requisitos ocupacionais aplicáveis.

(a) (b)

Figura 6.11 Veículo Munck rodoferroviário utilizado em inspeções de pontes: (a) posicionamento do veículo sobre a estrutura; (b) acesso à parte inferior do tabuleiro por meio do cesto de inspeção.

Fonte: Acervo do LAB INFRA

Além desses meios, algumas tipologias estruturais impõem restrições adicionais ao acesso, como ocorre em pontes com vigas caixão, abordadas na seção a seguir.

6.2.5 Acesso para inspeção em vigas-caixão

As vigas-caixão constituem um sistema estrutural amplamente utilizado em pontes e viadutos, especialmente em obras que demandam maior rigidez torsional e capacidade resistente, com necessidade de vencer vãos significativos. Apesar dessas vantagens, essa tipologia estrutural representa um dos casos mais críticos do ponto de vista da inspeção, em razão das limitações de acesso a regiões internas e externas inferiores. Entretanto, essas dificuldades não devem justificar a ausência de inspeção: o acesso deve ser promovido e viabilizado, com os meios adequados, de forma a permitir a avaliação completa dos elementos estruturais.

Nas inspeções especiais, em que se exige maior nível de detalhamento e confiabilidade do diagnóstico, deve-se acessar todos os elementos relevantes, garantindo proximidade suficiente para observação direta, registro fotográfico e realização de verificações táteis e medições sempre que aplicável. Recomenda-se que a inspeção contemple as superfícies internas e externas da viga-caixão, de modo a evitar a existência de regiões não avaliadas, conforme orientações do BIRM/FHWA. Assim, quando o acesso não for possível pelos meios usuais, devem ser adotadas alternativas técnicas, incluindo equipamentos especiais e técnicas complementares, de modo a evitar zonas com inspeção limitada (Figura 6.12).

Figura 6.12 Exemplo de viga-caixão com abertura/porta de inspeção

Fonte: FHWA (2022)

Os desafios associados à inspeção de vigas-caixão decorrem, principalmente, de suas características geométricas e construtivas. A presença de seções fechadas ou celulares dificulta o acesso às superfícies internas e às regiões inferiores externas, que são áreas frequentemente suscetíveis a processos de deterioração. As condições de inspeção e o grau de dificuldade de acesso variam significativamente conforme:

- a localização da estrutura (sobre curso d'água, sobre rodovia/ferrovia, em área urbana, sobre vale);
- a altura livre sob a ponte e interferências físicas (vegetação, taludes instáveis, leito do rio, edificações);
- a extensão longitudinal da estrutura e o número de células/compartimentos;
- a existência, posicionamento e dimensões de aberturas de inspeção;
- a presença e o estado de dispositivos de acesso permanentes, tais como escadas internas, passarelas, pontos de ancoragem e guarda-corpos;
- as condições de iluminação, ventilação e drenagem internas;
- a ocorrência de obstruções, resíduos e agentes biológicos.

O acesso ao interior dessas vigas depende da existência e das condições operacionais de aberturas de inspeção, escadas internas, passarelas, sistemas de iluminação e ventilação. Em diversas estruturas, tais dispositivos são inexistentes, insuficientes, inadequados ou encontram-se obstruídos por resíduos, agentes biológicos ou pelo próprio avanço dos mecanismos de degradação. Nesses casos, antes da inspeção propriamente dita, deve ser realizado planejamento específico para viabilizar o acesso e preparar o ambiente, assegurando condições mínimas de segurança e mobilidade. A Figura 6.13 ilustra uma situação de viabilização de acesso à viga caixão pela parte superior do tabuleiro, na via de tráfego.

Figura 6.13 Viabilização de acesso à viga caixão da Ponte sobre o Rio Piquiri BR-272/PR

⚠ ATENÇÃO!

Quando o acesso aos elementos da ponte envolver espaços confinados, deverão ser observados os requisitos da NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados.

Consideram-se espaços confinados os ambientes não projetados para ocupação humana contínua, com meios limitados de entrada e saída e ventilação insuficiente para garantir condições seguras de trabalho.

Em pontes, podem enquadrar-se nessa condição o interior de caixões metálicos ou de concreto, galerias de inspeção e compartimentos similares. As condições de acesso e os riscos associados a esses ambientes devem ser avaliados previamente ao início das atividades de inspeção.

A. Planejamento e preparação para inspeção em vigas-caixão

Para inspeções em vigas-caixão, o planejamento prévio é obrigatório, devendo considerar a estratégia de acesso, a sequência de inspeção, o tempo de permanência no interior da estrutura e os riscos ocupacionais envolvidos. Recomenda-se que o planejamento contemple, no mínimo:

- verificação prévia da existência, localização e condição das aberturas de inspeção;
- análise da necessidade de limpeza e desobstrução de acessos e passagens internas;
- definição de rotas de circulação no interior da viga e avaliação da mobilidade do inspetor (trechos com restrição de altura, presença de diafragmas e travamentos);
- avaliação e dimensionamento dos recursos de iluminação portátil, garantindo iluminação suficiente para inspeção detalhada, registro fotográfico e observação de anomalias;
- verificação de necessidade de ventilação forçada e controle ambiental;
- definição do número mínimo de profissionais, funções, comunicação e resgate;
- seleção de EPIs e EPCs adequados, incluindo cinto paraquedista, talabarte, linha de vida quando aplicável, proteção respiratória e capacetes com iluminação.

B. Condições internas e segurança do inspetor

O interior de vigas caixão pode apresentar condições adversas, tais como ventilação insuficiente, deficiência de oxigênio, presença de gases/vapores/poeiras, umidade elevada, condensação, temperaturas internas elevadas e iluminação inadequada. São também frequentes restrições de mobilidade, deslocamentos em trechos estreitos e posturas forçadas, além da presença de agentes biológicos (morcegos, insetos e roedores), com risco de contato e contaminação.

Em muitos casos, a viga caixão configura ambiente caracterizável como espaço confinado, exigindo procedimentos específicos, equipe treinada, monitoramento atmosférico, ventilação adequada e plano de emergência, conforme boas práticas indicadas pelo BIRM/FHWA para esse tipo de estrutura.

Devem ser asseguradas, no mínimo, as seguintes medidas:

- iluminação adequada e redundante (equipamento reserva);
- condições seguras de circulação interna e mitigação de riscos de queda, aprisionamento e escorregamento;
- inspeção prévia quanto à presença de animais e adoção de medidas de mitigação e proteção;
- interrupção da atividade caso não seja possível garantir condições mínimas de segurança.

C. Regiões críticas e elementos que devem ser acessados

As limitações de acesso em vigas caixão impactam diretamente a qualidade do diagnóstico, podendo dificultar a identificação de anomalias relevantes. Dessa forma, deve-se priorizar o acesso para inspeção detalhada de:

- superfícies internas e externas com evidências de infiltração, umidade, manchas, eflorescências ou lixiviação;
- pontos de drenagem interna, drenos e dispositivos de escoamento (existência, obstrução, acúmulo de resíduos e retorno de água), conforme exemplificado na Figura 6.14;
- regiões próximas a juntas, encontros e apoios, com maior propensão à entrada de água e concentração de esforços;

- regiões internas suscetíveis à corrosão (em estruturas metálicas) e à deterioração acelerada por umidade (em concreto);
- ligações, emendas, enrijecedores, diafragmas internos e transversinas, especialmente em regiões de pilares/encontros;
- regiões com histórico de reparos, reforços ou manifestações patológicas recorrentes;
- faces externas inferiores e laterais, onde podem ocorrer fissuração, desplacamento, destacamentos, corrosão e outros mecanismos de degradação.

Figura 6.14 Drenos internos em vigas caixão

Fonte: FHWA (2022)

D. Mobilização de meios de acesso

Para inspeção das superfícies externas inferiores e laterais de vigas caixão, frequentemente é necessária a mobilização de meios especiais, incluindo:

- veículos de inspeção sob a ponte;
- plataformas elevatórias;
- andaimes suspensos;
- técnicas de acesso por corda;
- barcos, balsas e estruturas temporárias, quando houver transposição de cursos d’água.

Esses recursos devem ser selecionados de acordo com o contexto da estrutura (localização, interferências e condições operacionais), de forma a assegurar o acesso direto às regiões críticas e evitar zonas sem inspeção.

E. Estratégias complementares

Podem ser utilizadas técnicas complementares de modo a garantir a avaliação dos elementos, empregadas para aumentar a confiabilidade da avaliação e orientar intervenções e inspeções futuras, tais como:

- câmeras e sistemas de inspeção remota;
- drones internos ou sistemas de imagem para inspeção em células;
- ensaios não destrutivos aplicáveis;
- recursos adicionais de iluminação e registro, especialmente em ambientes de baixa visibilidade.

F. Recomendações finais

Em pontes com vigas-caixão, as dificuldades de acesso devem ser tratadas como parte integrante do escopo de inspeção. Assim:

- devem ser providos os meios necessários para garantir acesso às superfícies internas e externas, especialmente em inspeções especiais;
- deve-se planejar e preparar previamente o ambiente interno, considerando limpeza, iluminação, ventilação e mobilidade;
- recomenda-se a implantação de dispositivos permanentes de acesso (aberturas adequadas, escadas internas, passarelas, guarda-corpos e pontos de ancoragem) nas fases de projeto, construção, recuperação, reforço ou reabilitação;
- em vigas-caixão metálicas, devem ser asseguradas condições de acesso por abertura/porta de inspeção e observados procedimentos próprios para ambientes caracterizáveis como espaço confinado.

7 INSPEÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CURSOS D'ÁGUA

Os cursos d'água (como rios e córregos) são feições naturais e dinâmicos que, ao alterarem seus níveis, volumes e trajetórias (leitos), podem causar inundações e sérias modificações topográficas. Por isso, devem ser avaliados e monitorados ao longo de toda a vida útil das obras que os atravessam. Toda estrutura que cruza um curso d'água (pontes, pontilhões) é influenciada por esse comportamento em seu projeto, inspeção e manutenção.

Durante grandes cheias, alterações importantes podem ocorrer em curto período de tempo e ameaçar a estabilidade e a segurança das estruturas. Mesmo que essas tenham sido bem projetadas para resistir a todas as forças da correnteza (forças hidrodinâmicas) em modelo inicial de cálculo, mudanças no eixo/traçado do canal principal, erosões e assoreamentos podem provocar o colapso parcial ou total da obra.

Existem dois tipos principais de alterações no leito do rio:

- **Alterações verticais:** mudanças no fundo do canal, como a degradação (rebaixamento do leito) ou o assoreamento (depósito de sedimentos). Ambas podem comprometer a fundação dos pilares. O assoreamento, adicionalmente, reduz a capacidade de escoamento sob a ponte, o que pode desviar a corrente para áreas adjacentes como margens e acessos. Em casos mais extremos, o nível do rio pode se elevar a ponto de gerar esforços indesejáveis sobre o tabuleiro e as vigas da ponte.
- **Alterações laterais:** outro fenômeno crítico é a migração lateral do canal, resultante da erosão das margens ou de mudanças abruptas no trajeto do curso d'água (avulsão), que também pode comprometer os apoios estruturais.

Além dos processos naturais, atividades humanas como a extração (mineração) de materiais em local próximo às estruturas devem ser observadas. Um estudo desses impactos pode ajudar a prever quando a proteção dos pilares e fundações será necessária para evitar ou minimizar problemas futuros.

Assim, uma vez que os cursos d'água apresentam esse comportamento mutável, com alterações contínuas no fluxo e na trajetória, é essencial que as pontes e demais estruturas construídas sobre esses corpos hídricos sejam inspecionadas periodicamente. Essa inspeção deve levar em consideração os efeitos dessas mudanças na forma e no leito do curso d'água (transformações geomorfológicas).

Para subsidiar as inspeções, é fundamental manter um histórico atualizado da geometria do canal (alinhamento, perfil e seções transversais). Isso permite a comparação entre as condições atuais e os registros de referência, como o projeto original ou levantamentos anteriores. Devem ser observadas variações no traçado do canal rio acima (a montante) e rio abaixo (a jusante) da estrutura, além de características dos apoios que possam interferir no escoamento, especialmente em eventos de cheia.

O sovacamento, caracterizado pela remoção de material do leito ou das margens pela ação da correnteza, constitui uma das principais preocupações nas inspeções de estruturas sobre cursos d'água, exigindo verificação de sua presença e extensão junto às fundações. Caso haja sinais de aprofundamento ou solapamento, estes devem ser investigados com sondagens apropriadas e comparados aos limites admissíveis definidos em projeto ou por análises anteriores. Erosões nos taludes, acúmulo de resíduos e vegetação excessiva também devem ser registrados, assim como marcas de cheia (nível máximo atingido pela água), que devem ser referenciadas a cotas fixas da estrutura, por exemplo, o bordo inferior da viga ou do tabuleiro (a superestrutura).

Essas observações permitem avaliar com maior precisão o desempenho da ponte frente às alterações hidrodinâmicas do curso d'água ao longo do tempo e apoiar decisões de manutenção preventiva ou corretiva, bem como estabelecer prioridades de intervenção e necessidades de monitoramento complementar.

7.1 PROPRIEDADES QUE AFETAM OS CURSOS D'ÁGUA

Diversos fatores podem interferir no desempenho hidráulico dos cursos d'água e na estabilidade das estruturas que os cruzam. A seguir, destacam-se as principais propriedades a serem consideradas durante as inspeções, agrupadas por categoria:

A. Fatores do curso d'água

São as características e o comportamento da água e do leito:

- **Velocidade do escoamento:** a velocidade do fluxo, fortemente influenciada pela declividade do leito e pelas alterações naturais ou artificiais no curso d'água, afeta diretamente as taxas e profundidades de socavamento. Em altas velocidades, aumenta-se o risco de descalçamento (solapamento) das fundações.

- **Ações hidráulicas sobre a estrutura:** as forças geradas pelo escoamento podem exercer esforços relevantes nos elementos estruturais, principalmente durante eventos extremos, como cheias.
- **Características físicas do canal:** aspectos como a sinuosidade (curvas) do leito, a declividade, os tipos de solo e rocha presentes nas margens e no fundo do rio, a geometria das margens e a presença de vegetação impactam diretamente a estabilidade do canal e a sua suscetibilidade à erosão.
- **Material do leito:** o tipo de material (areia, argila ou rocha), sua resistência à erosão e sua configuração influenciam as taxas de socavamento. Materiais arenosos são mais suscetíveis à erosão rápida, enquanto solos coesivos e rochas apresentam maior resistência, mas exigem avaliação detalhada.

B. Fatores da estrutura

São os elementos de projeto e construção da própria obra:

- **Dimensões, geometria e alinhamento do canal e da ponte:** o tamanho, a forma e a orientação da superestrutura e das fundações, bem como o alinhamento do fluxo em relação aos encontros e pilares, podem influenciar significativamente o comportamento hidráulico. O desalinhamento do fluxo aumenta o potencial de socavamento e pode comprometer a capacidade hidráulica (vazão) do vão.
- **Abertura hidráulica:** área livre sob a ponte disponível para passagem das vazões, incluindo as cheias. É essencial monitorar alterações na seção transversal do canal ao longo do tempo para avaliar possíveis reduções na capacidade de escoamento.
- **Forma da subestrutura:** pilares largos ou mal alinhados com o fluxo podem aumentar significativamente a profundidade de socavamento. Em contrapartida, pilares com extremidades arredondadas ou pontiagudas tendem a reduzir os efeitos erosivos.
- **Tipo de fundação:** fundações superficiais expostas (descalçadas) representam maior risco estrutural em comparação a fundações profundas, por exemplo, blocos sobre estacas. Conhecer o tipo de fundação é fundamental para interpretar corretamente os riscos associados ao curso d'água.

C. Fatores externos e históricos

São as influências do tempo e das atividades no entorno da ponte:

- **Histórico geomorfológico:** alterações anteriores na localização, na forma e na elevação do canal devem ser conhecidas e monitoradas, pois indicam tendências de comportamento ao longo do tempo.
- **Intervenções humanas e fenômenos naturais:** obras de engenharia (como barragens, canais de desvio, urbanização, estabilização de margens, assim como eventos naturais (como grandes deslizamentos) podem alterar drasticamente o comportamento do curso d'água.
- **Estado das estruturas de controle hidráulico:** se existirem, comportas, barreiras e dispositivos para proteção do canal e da ponte devem ser avaliados quanto à sua eficiência e integridade.
- **Desequilíbrio no transporte de sedimentos:** a extração de materiais do leito (cascalho, areia) ou deslizamentos nas proximidades da ponte podem modificar a dinâmica sedimentar do rio e afetar a estabilidade da estrutura.

7.2 TIPOS DE CURSOS D'ÁGUA

O comportamento de um curso d'água pode ser antecipado, em certa medida, quando se conhece o seu regime hidrológico, o tipo e o perfil de seu canal, pois esses aspectos influenciam diretamente sua dinâmica e potencial de mudança. Os rios podem ser amplamente classificados em quatro categorias principais, de acordo com sua morfologia e tendência de comportamento:

- rios de meandros (ou meandrantes);
- rios trançados (ou entrelaçados);
- rios retos (ou retilíneos);
- rios de montanhas (ou de alta declividade).

7.2.1 Rios de meandros (ou meandrantes)

Rios de meandros (Figura 7.1), ou meandrantes, são cursos d'água de planície caracterizados por um traçado sinuoso, composto por uma sequência de curvas acentuadas (meandros) intercaladas com trechos mais retos ou transicionais.

Em geral, nas margens externas das curvas formam-se poços (áreas mais profundas), devido ao processo de erosão originado pelo escoamento, cujas dimensões variam de acordo com o porte do rio, o raio de curvatura, as condições de fluxo e o tipo de material do leito e das margens.

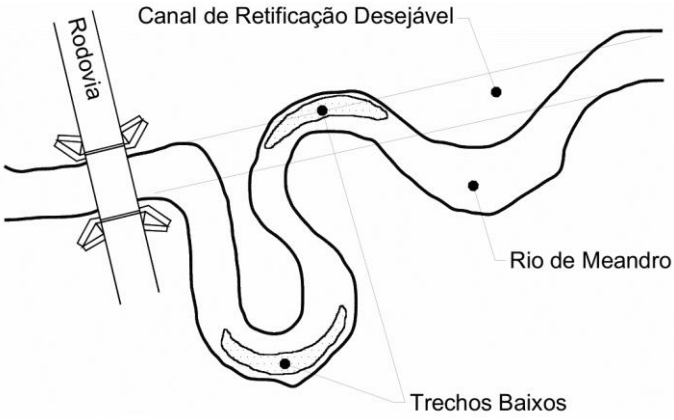


Figura 7.1 Esquema de rios de meandros

Esses rios apresentam velocidades de escoamento relativamente baixas, comportamento previsível e mudanças lentas em sua forma. A exceção ocorre em cheias extremas, quando pode surgir alterações significativas como o corte de um meandro (avulsão) e migrações rápidas do eixo do canal.

7.2.2 Rios trançados (ou entrelaçados)

Rios trançados, ou entrelaçados, são cursos d'água constituídos por múltiplos canais que se separam e se reúnem ao longo do seu desenvolvimento, formando um traçado característico em forma de trança, conforme ilustrado na Figura 7.2. Durante os períodos de cheia, o aspecto trançado torna-se menos perceptível, pois as barras e ilhas (divisores de canal) podem ficar submersos, dando ao rio uma aparência mais retilínea.

Esses rios, em comparação com outros tipos, apresentam as seguintes características:

- possuem maior declividade e velocidades de escoamento mais elevadas;
- transportam volumes significativamente maiores de sedimentos;
- são mais instáveis e difíceis de controlar e tendem a causar maiores problemas de solapamentos e erosões, colocando em risco as estruturas próximas;
- podem demandar intervenções de engenharia para conter ou orientar o escoamento;
- exigem que as pontes e estruturas que os atravessam passem por inspeções e manutenções frequentes, dada a sua natureza dinâmica e agressiva.

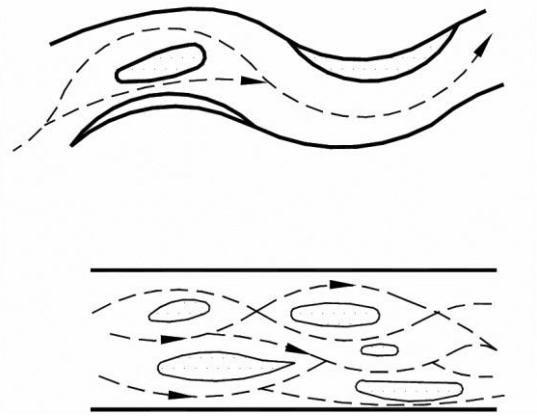


Figura 7.2 Esquema representativo de rios trançados

7.2.3 Rios retos (ou retilíneos)

Os rios retilíneos são, na realidade, pouco comuns na natureza, normalmente restritos a pequenos trechos ou encontrados em transição entre rios de meandros e rios trançados (Figura 7.3). Essa transição está diretamente relacionada à declividade do canal e à velocidade da correnteza.

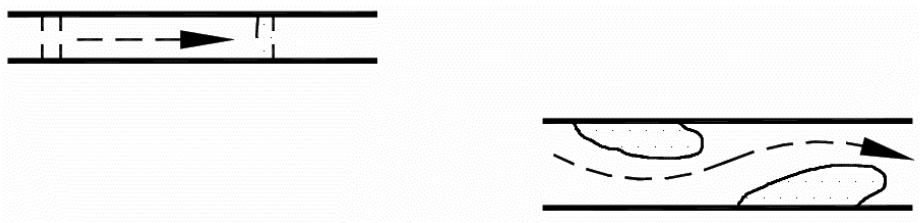


Figura 7.3 Esquema representativo de rios retos

Para manter o alinhamento retilíneo em uma faixa normal de condições hidrológicas, muitas vezes é necessário adotar medidas de controle hidráulico, como a construção de gabiões, enrocamentos (*rip-raps*), espigões e outras estruturas de estabilização do canal.

7.2.4 Rios de montanhas (ou de alta declividade)

Os rios de regiões montanhosas costumam ser confinados por vales estreitos (cânions), formações geológicas rochosas e cachoeiras. Isso os torna estáveis e pouco suscetíveis a alterações significativas em planta (traçado) ou perfil (fundo) em condições de vazão normal. No entanto, durante grandes enchentes, podem ocorrer picos de velocidade e energia, com potencial para transportar grandes blocos e ocasionar mudanças localizadas no leito e nas margens.

7.3 ALTERAÇÕES NOS CURSOS D'ÁGUA: INSTABILIDADE E COLAPSOS DE PONTES

Esta seção descreve alterações em cursos d'água – provocadas pelo homem ou pela natureza – e suas respectivas causas, bem como apresenta medidas para minimizar suas consequências danosas na estabilidade das pontes.

7.3.1 Erosão das margens e migração lateral

A migração lateral do canal (ou mudança horizontal no alinhamento) é uma das formas mais perigosas de ação erosiva que ameaça a estabilidade das travessias. Sua ocorrência é consequência da erosão contínua das margens e pode afetar diretamente os encontros, os pilares e as vias de acesso. A suscetibilidade a esse tipo de erosão é facilmente identificável em locais com solo fraco ou facilmente transportável (carreamento) e com pouca vegetação protetora.

O monitoramento em campo deve incluir os seguintes sinais visuais de instabilidade:

- margens íngremes, com aparência de "corte" recente;
- trincas de tração no topo da margem, paralelas ao rio;
- exposição e escavação sob raízes de árvores na base da margem;
- formação de bancos (barras) de areia no lado interno das curvas, indicando que o material está sendo removido da margem oposta (lado externo).

Quando este tipo de erosão não se estabiliza naturalmente e avança em direção à estrutura, pode haver necessidade de obras de proteção. A estabilização das margens é mais frequentemente efetuada com o uso de gabiões (caixas de tela metálica preenchidas com pedras) ou enrocamentos (conhecidos como *rip-raps*), que podem ser colocados em junto à ponte, rio acima (a montante) ou rio abaixo (a jusante), conforme a necessidade.

Um ponto de atenção máxima é a estabilização das saias dos aterros de acesso (base do talude junto ao rio) que também pode ser realizada com a adequada utilização de gabiões e enrocamentos.

7.3.2 Desalinhamento do canal em relação à ponte

Em geral, as pontes são projetadas para que os eixos de seus pilares estejam alinhados com o eixo do rio, oferecendo a menor resistência possível à água. Quando o curso d'água não cruza o eixo da ponte a 90°, essa é projetada com "esconsidade". Isso significa simplesmente que a ponte é construída "na diagonal" para acompanhar o ângulo do rio. Nesses casos, os encontros e pilares intermediários são alinhados com o fluxo, ou o vão da ponte é aumentado para compensar.

O problema de desalinhamento ocorre quando o canal principal do rio muda de posição ao longo do tempo, passando a atingir a estrutura em um ângulo diferente daquele previsto no projeto, como ilustrado na Figura 7.4. Esse novo alinhamento gera ângulos de ataque desfavoráveis ao fluxo, com duas consequências graves:

- **Aumento do socavamento:** O fluxo "desalinhado" aumenta o potencial de socavamento localizado e de contração (estreitamento do fluxo). Isso cria vórtices (redemoinhos) intensos que escavam o material ao redor dos apoios, ameaçando a estabilidade das fundações. A presença de pilares largos pode agravar drasticamente essa situação.
- **Redução da capacidade de vazão:** O desalinhamento pode fazer com que parte da ponte funcione como um obstáculo, reduzindo a área útil para a passagem da água e aumentando o risco de transbordamento sobre a ponte e acessos.

Uma vez identificada essa mudança, o tratamento deve ser avaliado pela equipe de engenharia. Soluções comuns podem envolver a construção de estruturas de guiamento (como espigões) para redirecionar o fluxo, além de proteções locais contra erosão (como enrocamentos).

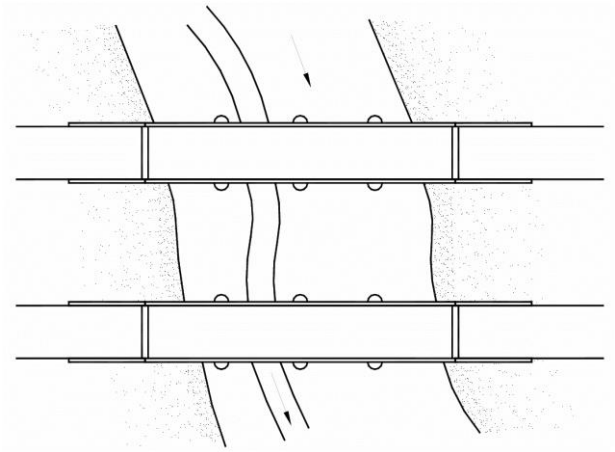


Figura 7.4 Esquema de desalinhamento do canal

7.3.3 Seção de vazão

A seção de vazão é a área útil sob a ponte disponível para a passagem da água. É essencial verificar periodicamente se essa seção continua adequada, inclusive para grandes enchentes. Uma seção de vazão pode se tornar insuficiente por duas causas principais:

- **Estrangulamento pelo projeto:** por motivos econômicos, é comum que a própria ponte cause um leve estreitamento (estrangulamento) na largura natural do rio.
- **Assoreamento e obstrução:** com o tempo, a seção pode ser ainda mais reduzida pelo assoreamento (depósito de sedimentos no leito) ou pelo acúmulo de detritos e vegetação que obstruem o vão.

Uma seção de vazão insuficiente é um risco grave porque provoca o fenômeno da "socavação de contração". Funciona como um bico de mangueira: o estreitamento força a aceleração do fluxo, aumentando drasticamente o seu poder de erosão. Isso pode rebaixar o fundo do rio e solapar (escavar) as fundações dos pilares e dos encontros.

Por isso, o monitoramento é crucial e recomenda-se manter um registro atualizado do regime do rio e de suas mudanças. Um bom método para verificar e controlar o assoreamento consiste em realizar uma batimetria rudimentar (medição da profundidade da seção transversal) em pontos espaçados de cinco a dez metros, dependendo do comprimento da ponte. Para entender o risco de obstrução, é útil manter um registro fotográfico com detalhes de materiais e vegetação flutuante que o rio transporta (carreados), pois eles indicam o potencial de "congestionamento" do vão.

7.3.4 Erosão do fundo do rio

A socavação (erosão do fundo do rio pelo escoamento da água), no que se refere à segurança das pontes, manifesta-se sob três aspectos:

- **Erosão generalizada:** é o rebaixamento generalizado do leito do rio em longo trecho, que afeta a área rio abaixo (a jusante), rio acima (a montante) e sob a ponte. Geralmente é um processo lento, de longo prazo.
- **Erosão de contração:** é o rebaixamento do leito do rio que ocorre apenas sob a ponte, no trecho entre os encontros. É causado pela aceleração do fluxo ao passar pelo estrangulamento (contração) do vão.
- **Erosão localizada:** é o tipo mais comum e perigoso de dano rápido. A erosão ocorre de forma concentrada e limita-se ao material adjacente aos pilares e aos encontros. Ocorre devido à aceleração do fluxo ao redor dos apoios, formando vórtices (redemoinhos) que removem o material do leito de forma concentrada.

A erosão localizada pode ser agravada por geometrias desfavoráveis (a exemplo de pilares largos ou mal alinhados com o fluxo), altas velocidades do fluxo e presença de detritos, vegetação ou, quando aplicável, gelo acumulado. O monitoramento deve considerar medições batimétricas frequentes, uso de hastes de sondagem ou inspeções subaquáticas para avaliar a evolução das cavidades (buracos).

7.4 SOLAPAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

O solapamento de elementos estruturais, principalmente das fundações, é a consequência mais grave da erosão, seja ela generalizada ou localizada. Esse fenômeno ocorre quando a escavação é tão profunda que remove o material de suporte sob a base de um pilar ou encontro, comprometendo diretamente a estabilidade da obra. Por gerar um risco de colapso, é necessário um controle permanente.

O desafio da inspeção

A verificação do solapamento em campo pode ser enganosa e gerar um "falso negativo". Em períodos de estiagem (baixa velocidade da correnteza), o rio pode depositar sedimentos de volta na cavidade (buraco) formada pela socavação. Isso mascara o problema, uma vez que o inspetor pode medir uma profundidade aparentemente segura, mesmo que a fundação já tenha sido solapada (perdido seu apoio) em um evento de cheia anterior.

A dificuldade da verificação depende do local:

- **Em pontes de pequena extensão e rios pouco profundos**, a verificação visual ou com simples hastes de sondagem não apresenta grandes dificuldades.
- **Em pontes extensas e em águas profundas**, pode ser necessário o uso de de equipamentos especializados, como sonares, batimetria de precisão, mergulhadores ou câmeras fotográficas especiais (subaquáticas).

7.5 DANOS CAUSADOS POR EMBARCAÇÕES E BALSEIROS

Danos causados por embarcações

7.5.1 Introdução à inspeção de pontes em cursos d'água navegáveis

As pontes rodoviárias sobre cursos d'água estão sujeitas não apenas às ações de tráfego de veículos e às ações ambientais usuais (vento, temperatura, cheias etc.), mas também à interação com a navegação existente no local. Em diversos rios há tráfego regular de balsas, barcaças, embarcações turísticas entre outras. Esse tráfego, quando não adequadamente considerado no projeto, na operação e na manutenção, pode gerar esforços adicionais e danos relevantes às estruturas.

É comum o registro de incidentes em pontes relacionados a colisões de embarcações (como danos em pilares e sistemas de proteção), além de problemas associados ao socavamento e à perda de material em fundações, intensificados por jatos de hélice próximos à estrutura. Esses eventos evidenciam a necessidade de orientar, de forma clara e padronizada, a atuação das equipes responsáveis pela inspeção de pontes.

Posto isso, este capítulo fornece diretrizes específicas para a inspeção de pontes sujeitas à ação de balsas e outras embarcações. É apresentada a caracterização da navegação sob as pontes (como tipos de embarcações e condições de navegação), os principais mecanismos de ação e as manifestações típicas de dano. Em cada caso, são recomendados procedimentos para avaliação e registro dessas condições.

7.5.2 Caracterização da navegação sob pontes

A compreensão básica de como funciona a navegação no trecho do curso d'água associado à ponte é fundamental para interpretar corretamente os riscos e os danos observados em inspeção. Esta seção apresenta os principais tipos de embarcações, as condições usuais de navegação e a forma como o traçado do canal navegável se relaciona com a geometria da ponte.

7.5.2.1 Tipos de embarcações e operações

Nos rios, canais e reservatórios trafegam diferentes tipos de embarcações. Para fins de inspeção, não é necessário conhecer todos os detalhes náuticos, mas é importante ter uma ideia geral do porte das embarcações e de como elas operam próximo à ponte. Em linhas gerais, podem ser citados:

- **Balsas de travessia:** utilizadas para transporte de veículos e pedestres entre margens. Costumam realizar manobras de aproximação e afastamento perto de rampas ou atracadouros, frequentemente situados nas proximidades de pontes.
- **Barcaças de carga e comboios fluviais:** operam com grande inércia e baixa manobrabilidade, sendo normalmente empurradas por rebocadores.
- **Rebocadores e empurradores:** embarcações de pequeno e médio porte, com hélices potentes e, em alguns casos, empuxo direcional.
- **Embarcações de passageiros e turismo:** barcos ou lanchas que realizam roteiros regulares, muitas vezes com manobras repetitivas em pontos específicos (paradas, mirantes, píeres).
- **Embarcações de serviço:** dragas, embarcações de fiscalização, sondagens ou manutenção, que podem operar por longos períodos próximos à ponte.

Em cada local, o inspetor deve buscar informações junto a operadores de terminais, autoridades de navegação (quando houver) e comunidades locais sobre:

- frequência de passagem;
- horários de maior movimento;
- manobras típicas realizadas nas proximidades da ponte (aproximação, atracação, fundeio, inversão de sentido etc.);
- histórico de incidentes ou quase acidentes (colisões evitadas por pouco, dificuldades em períodos de cheia, dentre outros).

Essas informações ajudam a compreender se a navegação é esporádica ou intensa, se envolve embarcações leves ou de grande porte e quais zonas próximas à ponte são mais críticas do ponto de vista de risco de impacto e de ações hidrodinâmicas.

7.5.2.2 Condições de navegação no curso d'água

Além do tipo de embarcação, as condições locais de navegação influenciam diretamente o comportamento das embarcações e, por consequência, o risco para a ponte. Alguns aspectos relevantes são:

A. Largura e profundidade do trecho navegável

- Cursos d'água estreitos, rasos ou com obstáculos naturais (bancos de areia, rochas, curvas acentuadas) limitam as alternativas de rota das embarcações, aumentando a probabilidade de passarem muito próximas aos pilares.
- Em reservatórios ou trechos largos, o canal de navegação pode ser mais afastado da ponte, reduzindo certos riscos, mas ainda assim podem existir manobras específicas (por exemplo, aproximação de píeres próximos).

B. Condições de correnteza e regime de cheias

- Correntes fortes, principalmente em época de cheias, dificultam o controle da embarcação, especialmente para balsas e comboios fluviais (em algumas situações, a correnteza pode empurrar as embarcações em direção a pilares ou encontros, aumentando o risco de impacto).

C. Interferências antrópicas

- Presença de terminais de balsas, píeres, marinas, áreas de fundeio e zonas de embarque e desembarque próximos à ponte.
- Obras de dragagem, instalação de dutos, cabos ou outros elementos que possam alterar o padrão de escoamento ou as rotas das embarcações.

Para fins de inspeção, é recomendável que as equipes, sempre que possível, façam um reconhecimento prévio da região (por meio de imagens, plantas ou visita em campo) e registrem, de forma sintética, as condições de navegação:

- se o local é canal principal, rota secundária ou apenas área de manobra pontual;
- se existem períodos do ano com navegação mais intensa;
- se há restrições ou recomendações para o tráfego aquaviário sob a ponte.

7.5.2.3 Interação entre a geometria da ponte e do canal

A relação entre a geometria da ponte e o traçado do canal navegável é determinante para o tipo de ação que as embarcações podem exercer sobre a estrutura. Alguns elementos merecem atenção especial:

A. Posicionamento dos pilares em relação ao canal navegável

- Pilares localizados dentro do canal de navegação ou muito próximos a ele estão mais sujeitos a impactos diretos.
- Pilares mais afastados, protegidos por ilhas naturais, defensas ou *dolphins*, tendem a ter menor probabilidade de colisão, mas ainda podem sofrer efeitos de jatos de hélice e de socavamento.

B. Vãos de navegação e gabaritos

- Normalmente, um ou mais vãos são designados como vãos de navegação, onde se espera a passagem da maior parte das embarcações.
- O gabarito vertical (altura livre entre a superfície da água e a parte inferior da superestrutura) e o gabarito horizontal (largura útil para a passagem) devem ser observados na inspeção, considerando variações de nível d'água ao longo do ano. Gabaritos insuficientes podem induzir manobras arriscadas ou desviar o tráfego para zonas não previstas originalmente.

C. Sistemas de proteção à navegação e à estrutura

- Defensas, *dolphins*, estacas-guia de balsas e outros dispositivos têm a função de proteger a ponte ou guiar as embarcações pelo vão adequado.

- A disposição, o estado de conservação e a geometria desses sistemas são fundamentais para entender a exposição da ponte a danos potenciais. Defensas ausentes ou danificadas costumam indicar maior vulnerabilidade a impactos.

D. Alinhamento entre o eixo da ponte e o eixo de escoamento

- Quando o eixo da ponte é muito inclinado em relação ao eixo da corrente e da navegação, as embarcações podem ter maior dificuldade em alinhar sua rota com o vão de navegação, aumentando o risco de colisão lateral em pilares.
- Em rios sinuosos, a ponte muitas vezes se localiza em trechos de curva, o que reforça a atenção às condições de navegação.

Durante a inspeção, recomenda-se que o inspetor registre, de forma esquemática (croquis simples, fotos comentadas), como o canal navegável "enxerga" a ponte: quais vãos são efetivamente utilizados, quais pilares ficam expostos à rota das embarcações e onde se concentram as manobras.

7.5.3 Mecanismos de ação e danos das embarcações na ponte

Esta seção apresenta os principais mecanismos de ação que podem afetar a integridade da estrutura, tendo como base o *Bridge Inspector's Reference Manual* (FHWA, 2022). A compreensão desses mecanismos ajuda o inspetor a observar os danos em campo e a relacioná-los com as causas prováveis.

7.5.3.1 Colisão direta e abrasão

Este é o risco mais evidente. Ocorre quando uma embarcação, balsa ou carga transportada se choca fisicamente contra os pilares (mesoestrutura) ou contra as vigas (superestrutura) da ponte.

- **Onde ocorre:** geralmente, na zona de variação do nível da água (para pilares) ou na parte inferior do tabuleiro (para vigas, em épocas de cheia).
- **A consequência:** o impacto pode causar lascamento do concreto (*spalling*), exposição das barras de aço e, em casos graves, a deformação estrutural, colapso do sistema de proteção ou mesmo o deslocamento da ponte.

Além do choque único, pode ocorrer a abrasão, um dano causado pelo contato repetitivo e frequentemente na linha d'água. Em canais estreitos ou zonas de manobra, cascos de embarcações, cabos de aço de amarração ou barcaças encostadas podem "lixar" a superfície de estruturas como o pilar, reduzindo o cobrimento e a seção resistente.

7.5.3.2 Ações hidrodinâmicas e de propulsão (*prop wash*)

Este é um fenômeno técnico crítico e destrutivo. O termo *prop wash* refere-se à turbulência violenta de água gerada pelas hélices dos motores, especialmente quando embarcações potentes (como rebocadores) estão manobrando para atracar, manter a embarcação contra a corrente ou aproximá-la de rampas e píeres. Nessas condições, podem ocorrer:

- remoção e deslocamento de material de fundo (areia, cascalho, enrocamento), reduzindo a proteção das fundações;
- "jateamento" de superfícies de concreto e aço, levando à perda de cobrimento, desagregação superficial e exposição de armaduras ou de elementos metálicos;
- desarranjo de sistemas de proteção, como colchões Reno, *rip-rap* ou gabiões, que podem ser deslocados, abrindo "janelas" de vulnerabilidade ao socavamento;

Nesses casos, mesmo que o dano inicial seja pequeno, a ação contínua tende a aprofundar cavidades e agravar a exposição das fundações.

7.5.3.3 Recomendações para o inspetor

Sempre que houver suspeita de impacto, recomenda-se ao inspetor:

- registrar o nível d'água aproximado no momento da inspeção;
- anotar a cota em relação à lâmina d'água em que o dano se encontra (por exemplo, 1,0 m acima da lâmina d'água média);
- fotografar o dano com escala (trena, régua, objeto conhecido), para permitir comparações em inspeções futuras.

Quanto aos danos que o inspetor pode investigar:

A. Em aparelhos de apoio e na superestrutura (vigas e tabuleiro)

- deslocamentos anormais de aparelhos, fissuração em encontros, mesoestruturas e diafragmas, associadas a impactos significativos;
- marcas de raspagem ou "concreto lascado" (*spalling*) na parte inferior das vigas (indicativo de embarcações altas que colidiram na ponte, geralmente durante cheias).

B. Na mesoestrutura (pilares)

- manchas de tinta das embarcações;
- marcas de concreto "lascado" (*spalling*) e/ou esmagado no ponto de contato e área com cobrimento danificado (normalmente na zona de variação do nível da água);
- fissuras radiadas (fissuras que se originam no ponto de impacto e se propagam em várias direções), indicando concentração localizada de esforços;
- exposição de armaduras, muitas vezes com início de corrosão.

C. Sinais de *prop wash*

Recomenda-se que o inspetor busque identificar, sempre que possível:

- onde as embarcações costumam manter posição ou realizar manobras intensas;
- sinais de leito rebaixado, escavações localizadas ou deslocamento de material junto aos pilares e blocos;
- desgaste incomum, como perda de cobrimento, coerentes com ação de jato em superfícies submersas e emersa próxima ao nível da água (normalmente possível em águas claras).

7.5.4 Danos em sistemas de proteção

As pontes, em áreas de navegação, costumam dispor de sistemas específicos para proteger a estrutura. Quando danificados ou malconservados, aumentam tanto o risco para a ponte quanto a probabilidade de acidentes de navegação. As duas categorias principais desses sistemas são apresentadas a seguir:

7.5.4.1 *Dolfins* (Barreiras independentes)

Dolfins são estruturas robustas, instaladas dentro d'água, mas fisicamente separadas da ponte, com a função de parar ou desviar a embarcação antes que ela danifique a estrutura da ponte. Geralmente, aparecem como grandes blocos de concreto isolados, cilindros metálicos cheios de areia ou grupos de estacas de madeira ou aço amarradas juntas, em áreas próximas dos pilares.

Os danos mais recorrentes são:

- deslocamento perceptível em planta, com mudança do alinhamento em relação à ponte;
- fissuras, lascamentos ou deformações nas estruturas de concreto ou metálicas;
- inclinação excessiva (perda de prumo), muitas vezes associada a esforços de impacto ou ao arraste do leito por *prop wash*.

7.5.4.2 Defensas

Diferente dos *dolfins*, as defensas (ou *fenders*) são estruturas montadas diretamente nos pilares ou ao redor deles. Elas funcionam como um amortecedor, com o objetivo de absorver a energia de impactos laterais menores e "empurrar" a embarcação de volta para o canal, evitando que o casco raspe diretamente no concreto do pilar. Normalmente, aparecem como estruturas de madeira, borrachas, quadros de aço ou mantas sintéticas fixadas na base do pilar, na zona de flutuação da água.

Os danos mais recorrentes são:

- elementos deformados, amassados ou deslocados, indicando histórico de impactos;
- perda de ancoragens, parafusos, correntes ou cabos, que reduz a capacidade de absorver energia de novas colisões;
- materiais de revestimento (madeira, borracha, plásticos) deteriorados, rachados ou faltantes, expondo a estrutura interna.

Danos causados por balseiros (materiais flutuantes)

7.5.5 Definição de balseiro e contexto hidrológico

Em diversos rios brasileiros, especialmente na Amazônia e em bacias com intensa atividade florestal ou agrícola é comum a formação de balseiros (materiais flutuantes). Neste manual, assim como na norma DNIT 010 – PRO, a expressão balseiro é usada para designar o conjunto de troncos, galhadas, raízes e resíduos diversos que são transportados pela corrente e podem se acumular contra a estrutura da ponte (ver Figura 7.5).

(a) (b)

Figura 7.5 Formação de balseiro sob a Ponte sobre o Rio Iaco (BR-364/AC): (a) vista superior do acúmulo de material; (b) vista em ângulo do balseiro junto ao vão da estrutura

Do ponto de vista hidrológico, a formação de balseiros está diretamente associada ao regime de cheias, à dinâmica de erosão das margens e ao uso e ocupação do solo na bacia de drenagem. Em períodos de cheia, o aumento do nível d'água alcança áreas de várzea e margens instáveis, arrancando árvores, arbustos e resíduos que passam a flutuar e a ser transportados rio abaixo. A disponibilidade de material lenhoso em bacias com exploração madeireira solto tende a ser maior, favorecendo a formação de grandes concentrações de troncos e galhadas.

É importante distinguir balseiros de troncos ou galhadas que passam rapidamente pelo vão de navegação, com pouca tendência de se prender na estrutura. Nesses casos, o efeito direto sobre a ponte costuma ser limitado, embora possa contribuir para desgaste local ou pequenos impactos.

A forma e a intensidade desse acúmulo do material flutuante dependem de diversos fatores locais, entre os quais se destacam:

A. Geometria do rio e da ponte

- rios sinuosos, com ilhas e bancos de areia, favorecem zonas de recirculação onde o balseiro tende a se concentrar;
- pilares posicionados no leito principal, com seções mais agressivas ao escoamento (arestas vivas, blocos de grandes dimensões) aumentam a probabilidade de retenção de material;
- ausência de dispositivos de desvio ou proteção também facilita o "engaiolamento" do material.

B. Condições de vazão e nível d'água

- em cheias rápidas, grandes volumes de material podem chegar em curto intervalo de tempo, formando balseiros extensos;
- em níveis intermediários, é comum que a crista do balseiro fique próxima à lâmina d'água, aumentando a área exposta à correnteza e, consequentemente, os esforços horizontais sobre a estrutura (ver Figura 7.5).

C. Atividades humanas na bacia

- retirada de madeira, limpeza de áreas ribeirinhas e operações de dragagem podem soltar grandes quantidades de troncos e resíduos;
- operações de remoção parcial de balseiros podem, se malconduzidas, deslocar massas de madeira e concentrar esforços em determinados apoios.

7.5.6 Mecanismos de ação de balseiros sobre a ponte

Para efeitos de inspeção, é importante destacar que balseiros não geram apenas problemas associados à obstrução da seção de vazão (como erosões), mas também podem gerar cargas horizontais significativas nos pilares e blocos de fundação, capazes de induzir deslocamentos e fissuração relevante. De forma simplificada, os principais mecanismos de ação são:

7.5.6.1 Aumento da área de arrasto e dos esforços

Quando troncos e galhadas se acumulam contra um pilar ou bloco, eles passam a funcionar, do ponto de vista hidráulico, como uma extensão artificial da seção do apoio, tornando-o mais largo e rugoso. Isso pode ocasionar:

- **Aumento da força horizontal no apoio:** a vazão que contornava um pilar relativamente esbelto passa a empurrar uma massa espessa de madeira. Quanto maior a área frontal, maior tende a ser a força horizontal transmitida ao apoio.
- **Forças de torção no apoio:** o balseiro raramente se acumula de maneira perfeitamente simétrica. Isso pode gerar esforços horizontais assimétricos, com possibilidade de torção e rotações no bloco de fundação.
- **Esforços na superestrutura:** em situações específicas, o acúmulo de balseiros pode elevar o nível da água e gerar esforços horizontais não previstos em projeto nas vigas longarinas/tabuleiro da ponte.

Na prática, o apoio passa a trabalhar sob um carregamento adicional não previsto originalmente, com componentes horizontais capazes de provocar deslocamentos em planta e em prumo, além de danos estruturais, com o surgimento de fissuras.

7.5.6.2 Obstrução da seção de vazão e alteração do escoamento

O acúmulo de materiais flutuantes (balseiros) nos elementos das pontes atua como um obstáculo à passagem da água, reduzindo a seção efetiva de escoamento. Conforme o *Bridge Inspection Reference Manual – BIRM* (FHWA, 2022), isso tende a acelerar o escoamento e intensificar processos de erosão em elementos de fundação, leitos e encontros, podendo afetar também sistemas de proteção.

Mais especificamente, a redução da seção de vazão pode ocasionar:

- **Aceleração de escoamento e erosão de contração (*contraction scour*):** a redução da área útil do fluxo de água o concentra em trechos livres, elevando a velocidade do escoamento junto a pilares, blocos e proteções. Isso favorece a remoção de material do leito, ao longo de toda a seção, ver Figura 7.6(a).
- **Intensificação de erosão localizada (*local scour*):** balseiros também aumentam a intensidade dos vórtices ao redor dos pilares e blocos, intensificando o socavamento localizado. Em casos mais severos, isso pode expor os elementos de fundação e comprometer a estabilidade da estrutura, Figura 7.6(b).

- **Remoção ou desarranjo de proteções:** O escoamento desviado e acelerado pode deslocar enrocamentos e desarranjar proteções de talude e de fundação

(a) (b)

Figura 7.6 Formação de balseiro no bloco de ponte em construção: (a) erosão de contração; (b) erosão localizada

Fonte: FHWA (2022)

O BIRM (2022) ainda ressalta que a acumulação de detritos nos elementos submersos muitas vezes não é visível a partir da superfície. Além disso, no caso de inspeções submersas solicitadas pelos inspetores de rotina, os detritos podem impedir o acesso do mergulhador a partes importantes da subestrutura. Isso reforça a necessidade de a equipe de inspeção investigar o histórico de ocorrência e exige planejamento específico para remoção do balseiro.

7.5.6.3 Recomendações para o inspetor

Em pontes onde há histórico ou probabilidade elevada de formação de balseiros, a inspeção não pode se limitar à simples verificação visual da presença de materiais flutuantes. É necessário planejar a atividade para avaliar adequadamente os mecanismos de ação, inclusive com base em registro consistente de informações. A seguir são apresentadas diretrizes práticas para a atuação das equipes de inspeção:

- **Levantar informações históricas:** verificar acúmulo de balseiros e o padrão de cheias (frequência, duração, níveis atingidos) em registros anteriores de inspeção, junto à comunidade ou em órgãos de fiscalização.

- **Analisar o contexto hidrológico e de uso do solo:** o tipo de bacia (florestal, agrícola, urbana), a existência de atividades madeireiras, desmatamento de margens, limpeza de áreas ribeirinhas.
- **Identificar os elementos mais expostos:** pilares e blocos situados no leito principal, sistemas de proteção (defensas, *dolphins*, estacas-guia) que possam reter materiais flutuantes, trechos onde o canal afunila, em alinhamento com a ponte.
- **Identificar danos nos elementos de apoio e proteção da ponte:** inspecionar visualmente o alinhamento dos elementos de apoio em planta e em prumo (por meio de referências simples, como cordas, visadas etc.); identificar a presença de fissuras ou sinais de esmagamento do concreto; verificar elementos de proteção ausentes, ou se apresentam deformações, deslocamentos ou danos compatíveis com esforços horizontais provocados por balseiros.

7.6 PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO

A inspeção dos cursos d'água é um processo comparativo focado em identificar mudanças ao longo do tempo. O objetivo principal é confrontar os dados de campo com os registros de projeto ou inspeções anteriores para antecipar riscos. Esse processo deve incluir os seguintes procedimentos gerais, agrupados por escala de observação:

A. Análise macroscópica

Em um nível macroscópico, avalia-se o comportamento do rio como um sistema e de seu entorno, antes de seguir para a ponte:

- **Registro do regime do rio:** verificar níveis máximos e mínimos, períodos em que ocorrem e velocidades da correnteza.
- **Verificação de depósitos de sedimentos:** observar grandes bancos de areia (assoreamento) rio acima (a montante) e rio abaixo (a jusante) da ponte, que indicam dinâmica do material.
- **Registro de atividades humanas:** Comunicar atividades recentes nas margens e no leito do rio, como tomadas d'água, retirada de areia e dragagens, pois essas podem alterar o equilíbrio do curso d'água.

B. Análise da estrutura

Essa análise foca na ponte e em sua interação imediata com a água:

- **Registro da direção do fluxo:** verificar se a correnteza está alinhada com os pilares ou se ataca os encontros.
- **Exame da estabilidade das margens do rio:** inspecionar as margens próximas da ponte e a integridade das obras de proteção existentes (enrocamentos, gabiões etc.).
- **Exame da seção de vazão:** verificar se a área sob a ponte está livre ou obstruída (conforme seção 7.3.3).
- **Inspeção visual de elementos estruturais:** examinar os pilares e encontros para verificação de evidências de erosão ou degradação de materiais.
- **Indicação de ações imediatas:** registrar a urgência na retirada de assoreamentos sob a ponte e de materiais flutuantes (detritos, troncos) retidos nos pilares.

C. Investigação detalhada

É um mapeamento do leito e das fundações em que se utiliza ferramentas para medir os riscos de socavamento e solapamento:

- **Mapeamento (batimetria):** investigar a configuração do leito do rio nas proximidades dos pilares e encontros. Idealmente, deve-se fazer um mapeamento detalhado e com cotas amarradas (RN) para comparação com mapeamentos anteriores e futuros.
- **Verificação de solapamento:** utilizar uma haste de inspeção em forma de "L" para verificar fisicamente se há um "vazio" (solapamento) sob fundações expostas dos encontros e dos pilares (conforme seção 7.4).
- **Verificação de assoreamento:** utilizar hastes retas (de alumínio ou de aço) para detectar possíveis sedimentos "fofos" depositados ao longo dos encontros e junto às sapatas. Isso é crucial para evitar o "falso negativo" (seção 7.4), medindo-se a profundidade real da fundação.

7.6.1 Aspectos complementares na inspeção de cursos d'água

Para detalhar e aprofundar os procedimentos apresentados no início dessa seção, os tópicos a seguir orientam o inspetor sobre o que procurar e quais ferramentas podem ser empregadas. Essas informações complementares se baseiam em orientações internacionais e em procedimentos de monitoramento de instabilidade de canais, erosão e riscos hidráulicos.

A. Detalhamento da avaliação hidráulica e do leito

- **Classificação da abertura hidráulica (vão):** avaliar a suficiência da abertura sob a ponte, verificando se a área não está reduzida por detritos, vegetação, blocos de gelo (em regiões aplicáveis) ou assoreamento (seção 7.3.3).
- **Avaliação da velocidade do fluxo:** identificar a intensidade da correnteza e sua direção. Um fluxo que ataca diretamente pilares ou encontros tem alto potencial de erosão.
- **Registro das características do leito:** descrever o tipo de solo (areia, cascalho, rocha etc.) que compõe o fundo do canal, essencial para estimar o risco de socavamento.
- **Presença de obstruções:** identificar se há acúmulo de sedimentos, bancos de areia, vegetação ou entulhos que possam causar desvio de fluxo, risco de incêndio ou acentuar o socavamento.
- **Inspeção de estruturas a montante e jusante:** Verificar se há indícios de alagamentos, erosões ou má distribuição do fluxo causados pela própria ponte ou seus acessos; avaliar também a posição e o ângulo dos apoios; e observar o comportamento do rio antes e depois da estrutura.

B. Detalhamento da avaliação estrutural e das margens

- **Verificação de dispositivos de proteção da mesoestrutura:** quando os pilares estiverem dentro do curso d'água, registrar o tipo e a localização de dispositivos de proteção. Se ausentes ou danificados, isso deve ser indicado no relatório.
- **Verificação de sinais de socavamento local ou de contração:** investigar em detalhes áreas adjacentes aos pilares e encontros, identificando indícios de escavações profundas e monitorando possíveis recomposições de sedimentos que ocultem cavidades (o "falso negativo" descrito na seção 7.4).
- **Análise de margens:** observar a estabilidade das margens próximas aos acessos, identificando indícios de deslizamentos, subcortes (escavação na base), fissuras ou sinais de migração lateral do canal.

C. Histórico e casos especiais

- **Histórico de cheias:** coletar o histórico de galgamento (água passando sobre a ponte), incluindo a frequência, altura atingida e possíveis danos associados.
- **Registros de marcas de cheias:** registrar a altura das marcas d'água (nível máximo) em pilares, encontros ou vegetação próxima e, sempre que possível, comparar essa altura com cota fixa da estrutura (ex.: "x" metros abaixo da viga) para acompanhamento histórico.
- **Pontes em cursos navegáveis:** verificar a sinalização (luzes de navegação) e, quando aplicável, elaborar/atualizar o diagrama do gabarito livre (altura e largura) da área navegável.

D. Ferramentas e métodos de documentação

- **Documentação fotográfica e croquis:** complementar a inspeção com registros fotográficos detalhados e croquis com indicação de pontos críticos.
- **Seções transversais do canal:** levantar e manter croquis atualizados da geometria do leito (seções transversais) e do perfil longitudinal, incluindo fundações visíveis, cotas de estacas e características do material de apoio. Sempre que possível, comparar com seções anteriores para avaliar instabilidades, como assoreamento, degradação e migração lateral.
- **Equipamentos de sondagem:** empregar hastes graduadas para medição de profundidade e/ou bastões de sondagem para "tatear" o fundo. Conforme a necessidade (águas turvas, profundas ou perigosas), utilizar ecossondas (sonar/batimetria), câmeras subaquáticas, drones (para visão aérea do fluxo e margens) ou embarcações.
- **Monitoramento especializado:** Em locais com velocidade elevada do fluxo ou instabilidade do canal, pode ser necessária a realização de sondagens adicionais nas proximidades dos pilares (em geral, até 30 metros de raio).

7.7 SITUAÇÕES INDICATIVAS DE INSPEÇÃO ESPECIALIZADA

Além dos procedimentos de inspeção rotineira descritos neste capítulo, existem situações em que os indícios observados pelo inspetor ultrapassam o escopo de uma avaliação apenas visual e passam a exigir apoio de métodos e equipes especializadas.

O Quadro 7.1 destaca essas situações, indicando, de forma resumida, em que cenários a inspeção convencional deve ser complementada por investigações ou estudos mais aprofundados.

Quadro 7.1 Condições indicativas de inspeção especializada

Seção	Situação a observar	Prescrição resumida
6.1 / 6.3.4 / 6.4	Processos de erosão junto elementos de apoio/encontros da ponte, sobretudo em rios profundos.	Registrar sinais de aprofundamento do leito e cavidades. Indicar necessidade de monitorar a evolução do leito. Quando necessário: recomendar sondagens específicas e batimetria detalhada; propor inspeção subaquática (sonar, mergulhadores ou câmeras) em rios profundos ou casos críticos.
6.5.3 / 6.5.5 / 6.5.6	Danos relevantes por impactos de embarcações ou esforços de balseiros (fissuras, lascamento/esmagamento de concreto, deslocamento de apoios ou defensas).	Registrar localização, extensão e tipo de dano (fissuras, lascamento, exposição de armaduras, deformação de defensas/*dolphins*); verificar indícios de deslocamento de aparelhos de apoio ou de alteração no prumo/alinhamento de pilares. Quando necessário: recomendar análise estrutural específica; ensaios complementares e inspeção detalhada da estrutura.
6.6.1	Escoamento veloz ou canal claramente instável nas proximidades da ponte.	Registrar trechos com alta velocidade e instabilidade do canal; recomendar uso de ecossonda, câmeras subaquáticas, drones e embarcações; sugerir sondagens adicionais em torno dos pilares para monitoramento especializado.
6.7.1	Evolução rápida do leito, "terras caídas" e exposição de fundações (situações análogas ao caso Rio Autaz-Mirim).	Registrar desbarrancamentos, queda de margens e exposição de blocos/estacas; recomendar monitoramentos topobatimétricos periódicos e inspeções subaquáticas; sugerir inspeção extraordinária em caso de risco de colapso.
6.7.2	Migração intensa de meandros e margens instáveis ameaçando a ponte (situações análogas ao caso Rio Tarauacá).	Registrar mudança do eixo do canal e instabilidade prolongada de margens; recomendar estudos especializados (hidrológicos, granulometria, batimetria, topografia e modelagem hidráulica); propor programa de monitoramento contínuo.

7.8 CASOS PRÁTICOS

Em outubro de 2022, ocorreu o colapso da Ponte sobre o Rio Autaz Mirim, situada no quilômetro 25 da BR-319/AM (Figura 7.7). A ponte havia passado por uma inspeção extraordinária poucos dias antes, e, em decorrência dela, estava interditada no momento do desabamento. Graças a essa medida preventiva, não houve vítimas, e o incidente resultou exclusivamente em danos materiais e na interrupção total do fluxo de veículos.

Figura 7.7 Localização da ponte sobre o Rio Autaz Mirim

O relatório da inspeção extraordinária, anterior ao desastre, havia indicado a ocorrência de ruptura parcial do talude na cabeceira sul e evidências de um processo de desbarrancamento progressivo ao longo da margem do rio, que poderia levar a estrutura ao colapso. A Figura 7.8 ilustra(a) os degraus de abatimento do talude na margem direita e a Figura 7.8(b) a exposição do bloco e estacas de fundação do apoio 5.

(a) (b)

Figura 7.8 (a) Ruptura do talude da margem direita e (b) situação do apoio 5 antes do colapso.

Ao lado da Ponte sobre o Rio Autaz Mirim, existia parte de uma ponte antiga que, apenas alguns meses antes, havia colapsado durante um evento de cheia. Estudos posteriores demonstraram que os escombros da ponte antiga formaram uma barreira que alterou localmente a hidrodinâmica do rio, desviando o fluxo natural da água e intensificando os processos erosivos (Figura 7.9).

Figura 7.9 Desvio do fluxo da água no entorno do escombro

A erosão alterou a geometria do talude da margem direita e, a partir dessa alteração, agravou-se o fenômeno de "terras caídas", com sucessivas rupturas do talude, além de perda e carreamento do material rompido. Como resultado, houve exposição do bloco do apoio e suas estacas, comprometendo a estabilidade da estrutura. Esse mecanismo de colapso se desenvolveu ao longo de poucos meses, em um intervalo de tempo bastante inferior ao de uma inspeção rotineira. Isso impossibilitou que o problema fosse detectado a tempo de evitar o desastre.

Esse caso reforça dois pontos críticos:

- a importância das inspeções extraordinárias para respaldar a tomada de decisões operacionais frente a ocorrências inesperadas;
- a importância de considerar fenômenos locais, como "terras caídas", nas análises de risco, tanto em projetos quanto em inspeções.

Outro caso digno de menção é o da Ponte sobre o Rio Tarauacá, localizada na BR-364/AC, que evidencia a importância da incorporação dos estudos de geomorfologia fluvial nas etapas de planejamento e projeto de travessias. O Rio Tarauacá apresenta elevada mobilidade lateral, característica comum a rios meandrantes ativos desenvolvidos em planícies aluviais de baixa resistência geotécnica, estando sujeito a processos de migração de meandros, erosão de margens e, potencialmente, avulsões de canal (Figura 7.10).

Figura 7.10 Vestígios de antigos meandros e impacto na margem próxima à ponte sobre o Rio Tarauacá

Ao longo dos anos, a evolução morfológica do rio promoveu o recuo progressivo de uma das margens e o avanço da erosão da cabeceira da ponte na margem oposta (Figura 7.11), exigindo sucessivas intervenções corretivas e, posteriormente, o prolongamento da estrutura para restabelecer condições adequadas de segurança e operação.

Figura 7.11 Cabeceira da Ponte sobre o Rio Tarauacá

Fonte: Adaptado de https://folhadoacre.com.br/2024/04/em-obras-ha-10-anos-ponte-sobre-rio-tarauaca-e-ameacada-por-deslizamentos-de-terra-apos-chuvas

As principais lições aprendidas desse caso são:

- Sempre que possível, alocar a ponte em trechos com maior estabilidade morfológica, o que pode exigir adaptações no traçado rodoviário;
- Em situações em que as condicionantes ambientais, operacionais, de traçado, de desapropriação e/ou de outra natureza imponham a manutenção da travessia em trechos sujeitos à dinâmica fluvial intensa, é recomendável adotar, desde a concepção do empreendimento, medidas de treinamento e estabilização do canal, tais como proteções de margem, espigões, guias-correntes e obras de contenção, de modo a controlar processos erosivos e reduzir os riscos associados à migração do canal ao longo do tempo.

8 TÉCNICAS AVANÇADAS DE INSPEÇÃO

A inspeção de pontes é uma atividade essencial para garantir a segurança da infraestrutura viária. Entretanto, as inspeções rotineiras, baseadas predominantemente em avaliações visuais, apresentam limitações, como a subjetividade do observador, a dificuldade de acesso a determinados pontos da estrutura e a ausência de quantificação objetiva dos danos. Essas limitações reduzem a confiabilidade dos diagnósticos, sobretudo em danos incipientes (em fase inicial) ou ocultos.

As técnicas avançadas de inspeção complementam a inspeção visual rotineira e outras técnicas mais simples, podendo ser aplicadas às seguintes situações (FHWA, 2022):

- avaliar defeitos detectados durante a inspeção visual;
- inspecionar componentes e elementos de difícil acesso;
- inspecionar componentes que apresentaram problemas no passado ou em projetos similares;
- executar uma avaliação detalhada de elementos sujeitos à ruptura frágil (falha súbita, sem aviso prévio);
- realizar inspeções que exijam diagnósticos mais rápidos ou conclusivos;
- monitorar o comportamento de uma estrutura em serviço.

Novas tecnologias de instrumentação e análise de dados permitem hoje a detecção precoce de problemas, antes que evoluam para estados críticos. Entre essas tecnologias destaca-se o Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE ou SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*), que utiliza sensores instalados na estrutura para medir continuamente o seu comportamento. Técnicas baseadas em resposta dinâmica e aprendizado de máquina geram indicadores mais sensíveis às mudanças de rigidez global, complementando os ensaios em materiais (Zhang *et al.*, 2024).

A automação dos levantamentos em campo, com o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) equipadas com câmeras multiespectrais e sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*), representa um avanço nas inspeções de pontes. Esses sistemas reduzem riscos ocupacionais, agilizam a inspeção e produzem nuvens de pontos (modelos 3D digitais de alta precisão) que permitem análises geométricas detalhadas e termográficas para a identificação de anomalias (Panigati *et al.*, 2025).

Além dessas tecnologias, podem ser empregadas ferramentas de apoio à inspeção e ao diagnóstico, tais como:

- **BIM (*Building Information Modeling*):** a Modelagem da Informação da Construção permite que o inspetor sobreponha informações de projeto à estrutura real. Isso facilita a visualização do histórico de manutenção e o registro de novos defeitos de forma rastreável e agiliza a tomada de decisão (Martins *et al*., 2024).
- **Ensaios não destrutivos:** métodos para avaliar materiais sem causar danos ao elemento estrutural. Alguns exemplos são o ultrassom e a pacometria (Rehman *et al.*, 2016).
- **Ensaios semidestrutivos:** métodos que removem pequenas porções de material ou geram danos localizados, facilmente reparáveis, sem alterar de forma relevante a capacidade resistente do elemento. Exemplos típicos são os ensaios para verificação da profundidade de carbonatação e do potencial de corrosão.
- **Métodos destrutivos:** métodos que afetam ou comprometem a integridade estrutural do elemento testado. Devido à natureza invasiva, esses métodos só podem ser utilizados com autorização formal e, idealmente, com a anuência do projetista responsável.

É importante mencionar que o uso de técnicas avançadas de inspeção exige a utilização de equipamentos adequados e calibrados, além da atuação de profissionais qualificados para a execução dos ensaios e interpretação dos resultados. Além disso, novas técnicas e equipamentos estão em constante desenvolvimento, ampliando as possibilidades das técnicas avançadas de inspeção.

Na ausência de normas técnicas nacionais para um procedimento específico, devem ser adotadas especificações internacionais consolidadas, como as da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), que apresentem maior compatibilidade com as características do problema. Como referência de boas práticas, recomenda-se consultar manuais como o *Bridge Inspector's Reference Manual*, publicado pela *Federal Highway Administration* (FHWA, 2022).

Este capítulo reúne as principais técnicas avançadas de inspeção empregadas na avaliação de pontes. Os métodos são apresentados de acordo com o material inspecionado (concreto e aço) e classificados em ensaios não destrutivos, semidestrutivos e destrutivos. Também são descritas tecnologias complementares de inspeção e monitoramento que auxiliam no diagnóstico e na tomada de decisão durante a gestão da manutenção das pontes.

Em conjunto, essas técnicas permitem avaliar a condição da estrutura em diferentes escalas, desde a caracterização das propriedades mecânicas e químicas dos materiais até o monitoramento do comportamento global da ponte, contribuindo para diagnósticos mais confiáveis, rastreáveis e economicamente eficientes (Mehrabi; Khedmatgozar Dolati, 2024).

8.1 CONCRETO

A seguir, são descritos os ensaios não destrutivos, semidestrutivos e destrutivos mais usuais para o concreto, conforme a literatura técnica.

8.1.1 Ensaios não destrutivos

8.1.1.1 Ensaio de ultrassom (velocidade de pulso ultrassônico - VPU)

Definição e equipamento

Trata-se de um ensaio não destrutivo que consiste na medição do tempo de propagação de um pulso de ondas ultrassônicas ao atravessar uma seção de concreto. O equipamento é composto por uma unidade de controle e dois transdutores, sendo um emissor e um receptor. O transdutor emissor gera o pulso ultrassônico, que se propaga pelo material e é posteriormente captado pelo transdutor receptor. A Figura 8.1 apresenta uma ilustração da aplicação do equipamento.

Figura 8.1 Medição de velocidade de ondas ultrassônicas

Fonte: Negri *et al.* (2024)

Quando utilizar

O equipamento mede o tempo de propagação da onda em microssegundos (*μ*s). Conhecendo-se a distância entre os transdutores, calcula-se a Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU). Este resultado é usado para:

- avaliar a homogeneidade e compacidade do concreto (VPU mais alta indica, geralmente, um concreto de melhor qualidade);
- detectar anomalias internas como fissuras, vazios (porosidade) ou falhas de concretagem ("bicheiras");
- estimar a rigidez, ou Módulo de Deformabilidade (a capacidade do concreto de resistir à deformação);
- monitorar a evolução de danos (ex.: por fogo ou reações químicas).

Normas aplicáveis

ABNT NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

8.1.1.2 Ensaio de resistividade elétrica do concreto

Definição e equipamento

Este ensaio mede a resistividade elétrica (oposição do concreto à passagem da corrente elétrica). Esse parâmetro é um indicador direto de qualidade e durabilidade: um concreto com alta resistividade é denso, tem baixa permeabilidade e oferece maior proteção contra a corrosão, pois dificulta o fluxo dos íons. O equipamento é um medidor de resistividade (ou condutividade), geralmente acoplado a uma sonda de superfície com quatro pontos (método de Wenner), conforme ilustrado na Figura 8.2

Figura 8.2 Medidor de resistividade, método de Wenner

Fonte: *Laboratory Equipment Supplies* (2025)

Quando utilizar

O ensaio é recomendado para:

- avaliar a qualidade e a homogeneidade da concretagem;
- estimar a permeabilidade do concreto e o risco de penetração de cloretos;
- correlacionar com a taxa (velocidade) provável da corrosão (quanto menor a resistividade, mais rapidamente a corrosão pode progredir).

Normas aplicáveis

AASHTO T 358: *Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

8.1.1.3 Radar de penetração no solo (GPR/georadar)

Definição e equipamento

O radar de penetração no solo (GPR, do inglês *Ground Penetrating Radar*, também conhecido como georradar) é um método de ensaio não destrutivo que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência para investigar o interior do concreto e das camadas de pavimento (Figura 8.3).

Figura 8.3 Detecção de falhas no concreto por meio do uso do GPR

Fonte: Siga Geofísica (2025)

O equipamento típico para aplicação em tabuleiros de pontes compreende: (i) unidade de controle e aquisição; (ii) uma ou mais antenas emissoras/receptoras, geralmente na faixa de centenas de MHz a alguns GHz, posicionadas sobre a superfície da estrutura; e (iii) sistema de registro de posição (odômetro ou GNSS) e software de processamento para geração de perfis (radargramas) e mapas em planta.

Quando utilizar

O GPR permite varreduras rápidas em grandes áreas e pode ser utilizado para:

- **Detecção de falhas internas:** possibilita identificar descontinuidades, como vazios, delaminações (separação de camadas), zonas de segregação e falhas de concretagem, por meio de mudanças no padrão de reflexão das ondas eletromagnéticas. Em tabuleiros de pontes, é amplamente empregado em levantamentos de deterioração de lajes de concreto armado.
- **Inspeção sob revestimento:** é possível avaliar lajes de tabuleiro recobertas por revestimento asfáltico, sem necessidade de remoção do revestimento, estimando a espessura das camadas e identificando possíveis zonas de deterioração ou perda de aderência entre o concreto e o revestimento.
- **Investigação da armadura e outros elementos:** auxilia na localização de barras de armadura e de dutos embutidos, bem como na estimativa de cobrimentos e espessuras de capas de concreto.

Normas aplicáveis

Até o momento não há uma ABNT NBR específica voltada à aplicação do GPR em estruturas de concreto de pontes. No Brasil, o método é tratado de forma geral na ABNT NBR 15935, que apresenta diretrizes para o uso de radar de penetração no solo em investigações geofísicas.

Para tabuleiros de pontes recobertos com revestimento asfáltico, destaca-se a ASTM D6087-22, que estabelece procedimentos de aquisição e interpretação de dados de GPR em lajes de pontes com ou sem recobrimento.

8.1.1.4 Ensaio de eco impacto

Definição e equipamento

É um método baseado no uso de ondas de tensão (principalmente ondas sonoras de baixa frequência) geradas por um impacto mecânico curto na superfície. As ondas se propagam no concreto e se refletem por interfaces internas (como delaminações, vazios) ou no fundo da peça, retornando à superfície. O equipamento (Figura 8.4) consiste em um conjunto de impactadores calibrados (pequenas esferas de aço ou martelos instrumentados), um transdutor (receptor) posicionado próximo ao ponto de impacto e um sistema de aquisição de dados que analisa a frequência da onda refletida.

Figura 8.4 Equipamento para realização do ensaio de eco-impacto

Fonte: FHWA (2022)

Quando utilizar

Diferente do ultrassom, que mede tempo de percurso, o eco-impacto analisa a frequência de ressonância. Ele é ideal para estruturas em forma de placa (como tabuleiros de pontes e paredes) e pode ser usado para:

- detectar separações horizontais (delaminações) e descolamentos rasos com boa sensibilidade, antes de manifestações superficiais;
- localizar falhas de concretagem e vazios em bainhas de protensão (com limitações relacionadas à geometria, atenuação e múltiplas reflexões);
- estimar a espessura de uma laje ou parede quando se tem acesso a apenas um dos lados (útil em obras antigas sem projeto).

Normas aplicáveis

ASTM C1383: *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*;

ACI 228.2R: *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*.

8.1.1.5 Ensaio de perturbação de campo magnético

Definição e equipamento

Este ensaio não destrutivo consiste em magnetizar as armaduras ferromagnéticas (barras, cordoalhas/fios de protensão em bainhas) através do concreto. O equipamento induz um campo magnético na armadura através do concreto. Quando há descontinuidades no aço (como uma ruptura ou redução de seção por corrosão severa), o campo magnético é "perturbado" ou "vaza" para fora do aço. Sensores sensíveis (geralmente de Efeito *Hall*) detectam e mapeiam essas anomalias.

Quando utilizar

Esse é um método avançado para inspecionar armaduras de aço ferromagnético. A aplicação desse ensaio é prioritária em estruturas protendidas (pontes/viadutos), sendo recomendado para:

- Detectar rupturas por fadiga. É um dos poucos métodos capazes de identificar se fios ou cordoalhas de protensão estão rompidos dentro da bainha (o que geralmente ocorre por fadiga ou corrosão sob tensão), mesmo sem sinais visíveis externos.
- Identificar e mapear áreas com redução significativa da área transversal do aço devido à corrosão avançada. Por exemplo, é possível utilizar o sistema para varrer a parte inferior e lateral de vigas, gerando um gráfico que indica a localização da falha no cabo.

Normas aplicáveis

Não existe uma norma específica para a execução do ensaio de perturbação de campo magnético. Entretanto pode-se adotar diretrizes gerais do ACI 228.2R e documentação técnica de fabricantes/protocolos de MFL.

ACI 228.2R: *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.*

8.1.1.6 Ensaio de pacometria

Definição e equipamento

O pacômetro é um dispositivo portátil que detecta barras de aço carbono no concreto por indução eletromagnética. O sensor gera um campo magnético e mede sua perturbação, permitindo estimar posição, cobrimento (distância da superfície ao topo da barra) e direção.

Modelos avançados estimam o diâmetro e realizam varredura e registro dos dados. A execução desse ensaio é apresentada na Figura 8.5.

(a) (b)

Figura 8.5 Execução do ensaio de pacometria: (a) posicionamento do sensor; (b) leitura do cobrimento das armaduras em elemento de concreto

Quando utilizar

Embora não detecte falhas no concreto (como ninhos ou fissuras), o pacômetro é fundamental para:

- medir a espessura do cobrimento de concreto. Áreas com cobrimento insuficiente (menor que o especificado em projeto ou norma) são mais suscetíveis a desenvolver corrosão nas armaduras;
- estimar a posição, o espaçamento e, em alguns modelos mais avançados, o diâmetro das barras, permitindo reconstituir o arranjo (a*s-built*);
- evitar interceptar armaduras antes de extração de testemunhos ou cortes.

Normas aplicáveis

BS 1881-204: *Testing concrete – Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*.

8.1.1.7 Ensaio de esclerometria

Definição e equipamento

É um ensaio não destrutivo e relativamente rápido que avalia a dureza superficial do concreto. O equipamento utilizado é o Esclerômetro de Reflexão (Martelo de Schmidt). Ele funciona através de uma massa acionada por mola que golpeia a superfície do concreto.

O aparelho mede o quanto essa massa "ricocheteia" (seu índice de reflexão). A resposta representa principalmente as condições da camada mais externa (cerca de 2 a 3 cm). A execução desse ensaio é apresentada na Figura 8.6

Figura 8.6 Ensaio de esclerometria

Quando utilizar

O ensaio fornece o Índice Esclerométrico (IE). Trata-se de indicador superficial, sensível a carbonatação, umidade e textura. Seus principais usos são:

- verificar a uniformidade do concreto: permite mapear rapidamente grandes áreas (como tabuleiros e vigas) para identificar regiões de concreto de baixa qualidade em comparação ao restante da estrutura. É a aplicação mais confiável;
- estimar a resistência do concreto à compressão (f_{ck}) por meio do índice esclerométrico e de curvas de correlação. Para estimativa confiável, recomenda-se calibração local com extração de testemunhos (ver ABNT NBR 7680);
- monitorar o endurecimento do concreto nas primeiras idades (ex.: para autorizar a retirada de formas).

Normas aplicáveis

ABNT NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio.

8.1.1.8 Radiografia e gamagrafia (inspeção por Raios X e Gama)

Definição e equipamento

São técnicas que utilizam radiação penetrante para gerar imagens do interior da estrutura, funcionando de forma análoga a uma radiografia médica. Na radiografia utiliza-se tubos elétricos de Raios-X (alta intensidade), indicados para elementos mais delgados ou quando se requer maior controle do feixe e menor tempo de exposição. Na gamagrafia utiliza-se isótopos radioativos (como Irídio-192 ou Cobalto-60) encapsulados. Em regra, exige acesso às duas faces do elemento: a fonte de radiação é posicionada de um lado e o filme (ou detector digital) do lado oposto.

Quando utilizar

Devido ao risco radiológico e à complexidade, esse ensaio é usado pontualmente para investigações detalhadas, tais como na necessidade de:

- visualizar uma imagem interna de alta resolução (imagem 2D com contraste de densidade/espessura, distinguindo com nitidez aço, vazios e concreto);
- detectar ninhos de concretagem, segregação e fissuras internas;
- verificar preenchimento de bainhas de protensão (identificar vazios/descontinuidades de nata/graute que exponham a armadura).

Normas aplicáveis

ACI 228.2R: *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*;

ASTM E1742/E1742M: *Standard Practice for Radiographic Examination*;

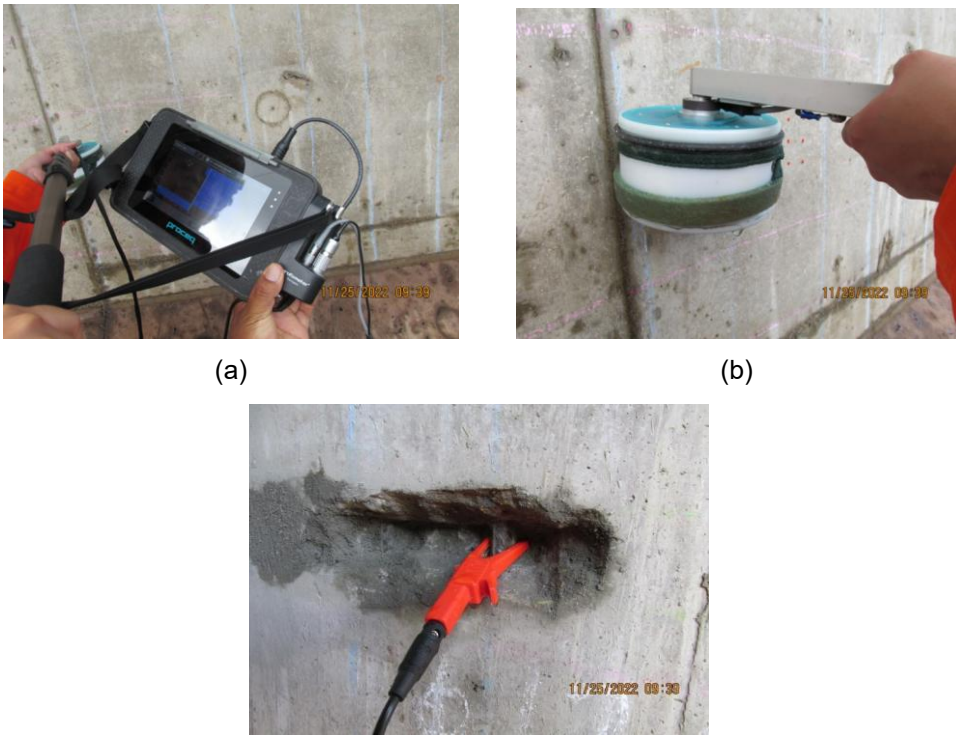
Normas CNEN: A execução deve seguir as diretrizes de proteção radiológica da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

8.1.2 Ensaios semidestrutivos

8.1.2.1 Ensaio de potencial de corrosão

Definição e equipamento

Este ensaio é utilizado para mapear a probabilidade de ocorrência de corrosão ativa nas armaduras, permitindo a identificação de áreas com maior propensão à atividade corrosiva. Na literatura técnica, o método é classificado como ensaio não destrutivo; entretanto, durante sua execução, é frequentemente necessária a abertura localizada do cobrimento de concreto para possibilitar a conexão elétrica da armadura ao polo positivo do equipamento, conforme ilustrado na Figura 8.7



(a) (b)

(c)

Figura 8.7 Ensaio de potencial de corrosão: (a) aparelho de medição; (b) eletrodo negativo na superfície do concreto; (c) eletrodo positivo do equipamento fixado em uma barra da armadura

Fonte: Acervo do LABINFRA – USP (2022)

Essa etapa caracteriza o procedimento como semidestrutivo. O sistema de medição é composto, essencialmente, por um voltímetro de alta impedância (medidor de potencial) e por uma meia-célula de referência, sendo a mais comumente utilizada o eletrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO4, “CSE”).

Quando utilizar

O ensaio é recomendado quando se deseja fazer um mapeamento de corrosão. O operador move o eletrodo sobre a superfície úmida do concreto, registrando a diferença de potencial (tensão) em milivolts (mV) em vários pontos, criando um "mapa de potenciais". Os resultados indicam a probabilidade de corrosão:

- valores mais positivos (ex.: > -200 mV) indicam baixa probabilidade (armadura "passivada" ou protegida);
- valores mais negativos (ex.: < -350 mV) indicam alta probabilidade de corrosão ativa.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento (Recomenda o ensaio para diagnóstico);

ASTM C876-22b: *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (Norma internacional de referência para o ensaio).

8.1.2.2 Profundidade de carbonatação

A carbonatação é uma reação química entre produtos alcalinos da pasta de cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, e o dióxido de carbono, na presença de umidade, que reduz o pH do concreto. Esse processo diminui a proteção das armaduras contra a corrosão. O ensaio pode ser considerado semidestrutivo, pois exige a exposição de uma superfície fresca de concreto na qual aplica-se um indicador ácido-base (comumente a fenolftaleína). Se a superfície apresentar uma coloração magenta (rósea), o pH está alto (concreto protegido/passivado). Caso permaneça incolor, o concreto está carbonatado (pH baixo), indicando risco de corrosão.

A profundidade de carbonatação é medida a partir da superfície exposta até o limite entre a região colorida e a região incolor, podendo ser obtidas diversas leituras ao longo do cobrimento para construir um perfil de carbonatação. A execução desse ensaio é ilustrada na Figura 8.8.

Figura 8.8 Ensaio de carbonatação

Fonte: Medeiros (2012)

Normas aplicáveis

BS EN 14630: *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method*.

8.1.3 Ensaios destrutivos

Extração de testemunhos

A extração de testemunhos (amostras cilíndricas) do concreto é um método de inspeção que altera a integridade do elemento estrutural e, por isso, deve ser planejada com cautela. Essa extração deve ser feita preferencialmente em áreas com concreto íntegro, recomendando-se uma pacometria prévia para localizar a armadura e garantir que a perfuração ocorra nos espaços entre as barras, evitando-se cortar o aço estrutural.

Os testemunhos, normalmente, devem ter diâmetro equivalente a três vezes a dimensão do maior agregado presente na mistura e para a extração desses comumente utiliza-se extratoras de concreto com brocas diamantadas (Figura 8.9). Após esse procedimento, os vazios deixados devem ser preenchidos com graute (microconcreto fluido de alta resistência) ou argamassa de reparo estrutural, sem retração.

(a) (b)

Figura 8.9 Extração de testemunhos de concreto: (a) operação da extratora; (b) vista frontal após a extração dos testemunhos

Fonte: Acervo do LABINFRA - USP (2022)

Quando utilizar

A extração é indicada quando há dúvidas sobre a qualidade do concreto e/ou do aço, ausência de registros da construção ou sinais visíveis de degradação. A partir do testemunho extraído, é possível realizar diversas análises laboratoriais e visuais.

8.1.3.1 Propriedades mecânicas do concreto

A extração de testemunhos permite executar ensaios normatizados para caracterizar as propriedades mecânicas do concreto em serviço, refletindo a condição em loco (*in situ*). Dentre os ensaios mais usuais estão:

- resistência à compressão axial;
- tração por compressão diametral;
- módulo de elasticidade estático e dinâmico;
- absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

ABNT NBR 7680-1: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto. Parte 1: Resistência à compressão.

ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão.

ABNT NBR 8522-2: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração.

ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

8.1.3.2 Teor de umidade

A umidade interna favorece reações e mecanismos deletérios (ex.: corrosão da armadura, reação álcali-agregado e expansão por sulfatos) e influencia resultados de ensaios não destrutivos (ex.: esclerometria e resistividade). A medição mais precisa é o método gravimétrico:

- retira-se uma amostra (testemunhos ou fragmentos representativos) e pesa-se;
- coloca-se em estufa até obter massa constante;
- pesa-se novamente para determinação da massa de água eliminada no processo.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

8.1.3.3 Ensaio de tração nas armaduras

As propriedades do aço das armaduras podem ser determinadas por meio da extração de amostras (testemunhos de aço, isto é, segmentos de barras ou fios retirados da armadura existente) e posterior realização de ensaios de resistência à tração. A extração do testemunho é feita por corte localizado da barra de armadura (por exemplo, com serra, disco de corte ou lanças térmicas, conforme as condições de acesso), seguida do preparo de um corpo de prova adequado ao ensaio de tração.

O ensaio de tração propriamente dito é realizado em laboratório, em Máquina Universal de Ensaios, conforme os requisitos das normas de tração de materiais metálicos. A partir da curva tensão-deformação obtêm-se propriedades como resistência ao escoamento, resistência à tração na ruptura e módulo de elasticidade do aço.

Normas aplicáveis

ABNT NBR ISO 6892-1 – Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente.

ABNT NBR 8548 – Barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda – Determinação da resistência à tração – Método de ensaio.

8.2 AÇO

A seguir, são apresentados ensaios não destrutivos, semidestrutivos e destrutivos aplicáveis ao aço.

8.2.1 Ensaios não destrutivos

8.2.1.1 Emissões acústicas

Definição e equipamento

A emissão acústica é um método não destrutivo de monitoramento em tempo real utilizado para identificar a propagação de falhas em materiais. O princípio é simples: quando uma trinca cresce, ou quando ocorre deformação plástica, há uma rápida liberação de energia na forma de ondas de tensão (*elastic waves*), muitas vezes na frequência do ultrassom. O equipamento utiliza sensores, instalados na superfície do aço (ver a Figura 8.10), que captam essas ondas. O sistema filtra os ruídos e registra a localização e a intensidade dos eventos acústicos.

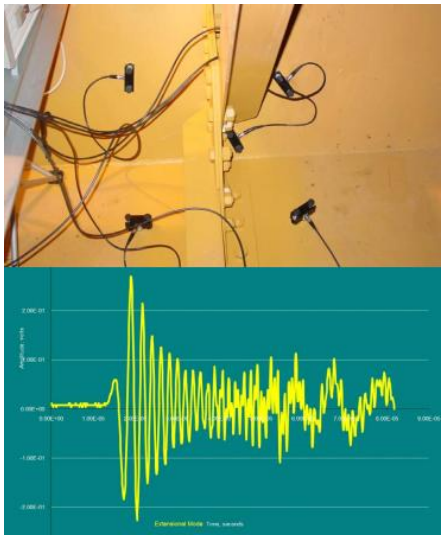


Figura 8.10 Detecção de falhas no aço por emissões acústicas

Fonte: FHWA (2022)

Para a realização desse ensaio, a ponte deve estar carregada, de forma a gerar tensões e possibilitar a ativação de fissuração nos elementos. A maioria dos sons produzidos por materiais sob tensão é inaudível. No entanto, dependendo da magnitude, tipo de deformação ou intermitência, o som pode ser audível.

Quando utilizar

Esse ensaio é crucial para avaliar a integridade de estruturas metálicas sujeitas à fadiga ou à falha iminente. Ressalta-se que o ensaio não mede o tamanho da trinca, mas sim sua atividade. Ele identifica trincas em evolução (ativas) e pode determinar sua localização, permitindo que a equipe de manutenção atue pontualmente na região crítica.

Normas aplicáveis

ASTM E750-15: *Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation.*

ASTM E1781/E1781M-20: *Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors*.

ISO 12716: *Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Vocabulary*.

UNE EN 13554: *Non-destructive testing – Acoustic emission testing – General principles*.

8.2.1.2 Tomografia computadorizada

Definição e equipamento

A Tomografia Computadorizada (TC) utiliza Raios-X ou Raios Gama para gerar imagens volumétricas (3D) do interior dos materiais. O sistema funciona fazendo com que a fonte de radiação e os detectores girem 360 graus em torno do objeto, capturando centenas de projeções 2D. Um software sofisticado de reconstrução utiliza esses dados para criar cortes transversais (*slices*) e uma representação completa em 3D.

Quando utilizar

A TC é utilizada em investigações que exigem alto nível de detalhamento devido à sua capacidade de localização e resolução, tanto em aço quanto em concreto:

- **Aço (soldas e peças críticas):** localizar e medir descontinuidades internas (poros, inclusões, trincas) e, quando a energia e a espessura permitem bom contraste, quantificar perdas de seção por corrosão interna.

Normas aplicáveis

ASTM E1441: *Standard Guide for Computed Tomography*.

ASTM E1570: *Standard Practice for Fan Beam Computed Tomographic (CT) Examination.*

ASTM E1695: *Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance*.

ISO 15708-2: *Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography. Part 2: Principles, equipment and samples.*

8.2.1.3 Líquido penetrante

Definição e equipamento

Este é um ensaio simples, rápido e de baixo custo, usado para detectar descontinuidades (falhas, trincas ou poros) que estão abertas na superfície de elementos de aço. Geralmente, utiliza-se quatro produtos para a sua execução: limpador, líquido penetrante (geralmente vermelho ou fluorescente), removedor e revelador.

Quando utilizar

O método é amplamente utilizado na inspeção de soldas e peças metálicas sujeitas à fadiga em pontes e viadutos, para revelar aberturas superficiais finas.

- **Procedimento:** após limpar a superfície, o líquido penetrante é aplicado e entra nas trincas por capilaridade. O excesso é removido e o revelador é aplicado, que "puxa" o líquido retido na trinca para a superfície. O defeito se manifesta como traços/manchas coloridas ou fluorescentes, como ilustrado na Figura 8.11.
- **Resultado:** define a extensão e a grandeza do defeito na superfície.
- **Limitação:** o método não revela a profundidade da trinca e não detecta defeitos internos (subsuperficiais). A superfície deve estar em metal “nu” (sem tinta ou revestimento).

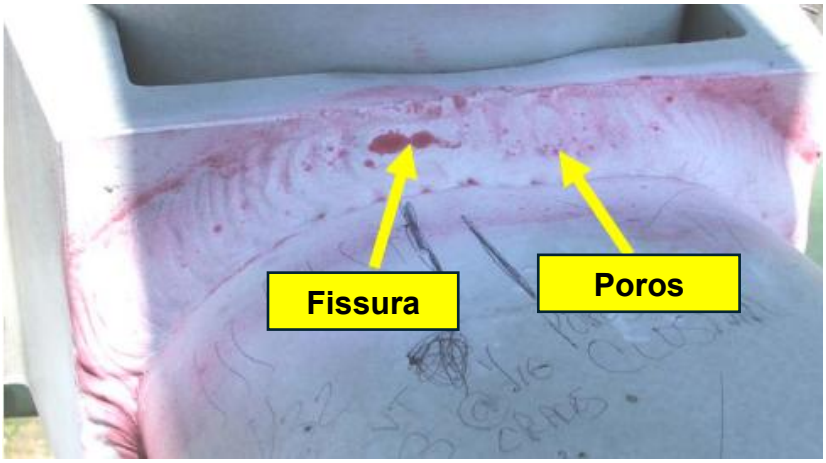


Figura 8.11 Detecção de falhas no aço por meio de líquido penetrante

Fonte: FHWA (2022)

Normas aplicáveis

ABNT NBR 16450: Ensaios não destrutivos – Líquido penetrante – Qualificação de procedimento.

ABNT NBR NM 334: Ensaios não destrutivos – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades.

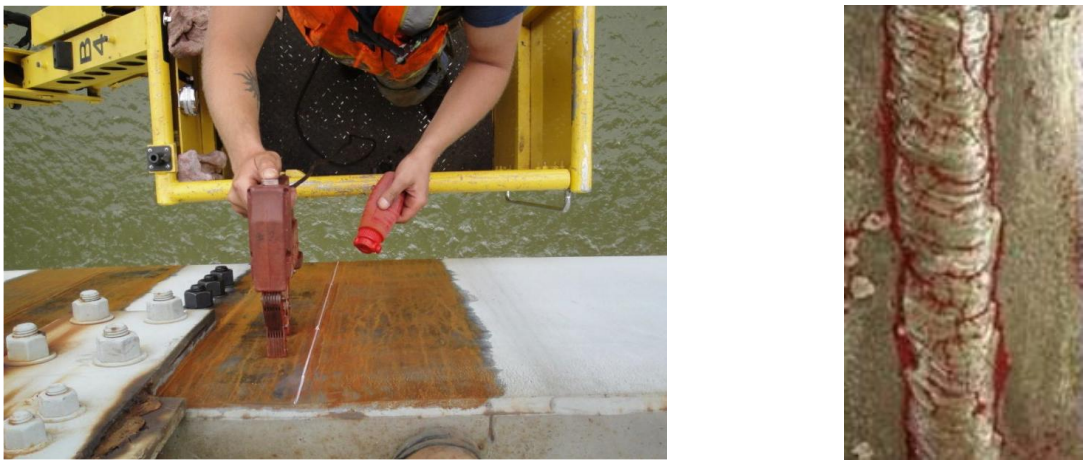
ASTM E1417/E1417M: *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing*.

8.2.1.4 Partículas magnéticas

Definição e equipamento

Ensaio para detectar descontinuidades (como fissuras, trincas, furos etc.) superficiais e subsuperficiais rasas em materiais ferromagnéticos (ex.: aços estruturais). O processo envolve duas etapas:

- **Magnetização:** o elemento é transformado temporariamente em um ímã (por meio de um eletroímã ou *yoke* eletromagnético).
- **Aplicação das partículas:** aplicam-se partículas de ferro muito finas (em pó ou suspensão líquida), que podem ser coloridas ou fluorescentes. Essas são atraídas e se acumulam no vazamento magnético (o "distúrbio") causado pelo defeito, como ilustrado na Figura 8.12.



(a) (b)

Figura 8.12 Detecção de falhas no aço através de partículas magnéticas: (a) aplicação do ensaio na superfície metálica; (b) indicação de descontinuidade revelada pelas partículas magnéticas

Fonte: FHWA (2022)

Quando utilizar

O ensaio de partículas magnéticas é um método ideal para localizar trincas de fadiga e falta de fusão na superfície da solda, sendo recomendado para inspeção de soldas e áreas de alta tensão sujeitas à fadiga nas pontes. Em relação ao líquido penetrante, é mais rápido na detecção de falhas e, para defeitos muito finos, mais sensível.

É importante mencionar que o método não funciona em materiais não ferromagnéticos (ex.: aço inoxidável austenítico, alumínio), não detecta falhas profundas (internas) e exige que a superfície esteja limpa.

Normas aplicáveis

ABNT NBR NM 342: Ensaios não destrutivos – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidades.

ASTM E709: *Standard Guide for Magnetic Particle Testing.*

ISO 9934-1: *Non-destructive testing – Magnetic particle testing. Part 1: General principles*.

8.2.1.5 Radiografia

Definição e equipamento

A radiografia é um método de inspeção que utiliza radiação ionizante (raios X ou raios gama) para detectar descontinuidades internas ou superficiais. A radiação é absorvida de maneira diferente pelo material (o aço absorve mais que um vazio ou uma inclusão), e as diferenças de absorção formam uma imagem (ou "sombra") em um filme radiográfico ou detector digital. Para a execução, o inspetor deve ter acesso aos dois lados do elemento: a fonte de radiação é posicionada de um lado e o filme/detector do lado oposto, como ilustrado na Figura 8.13.

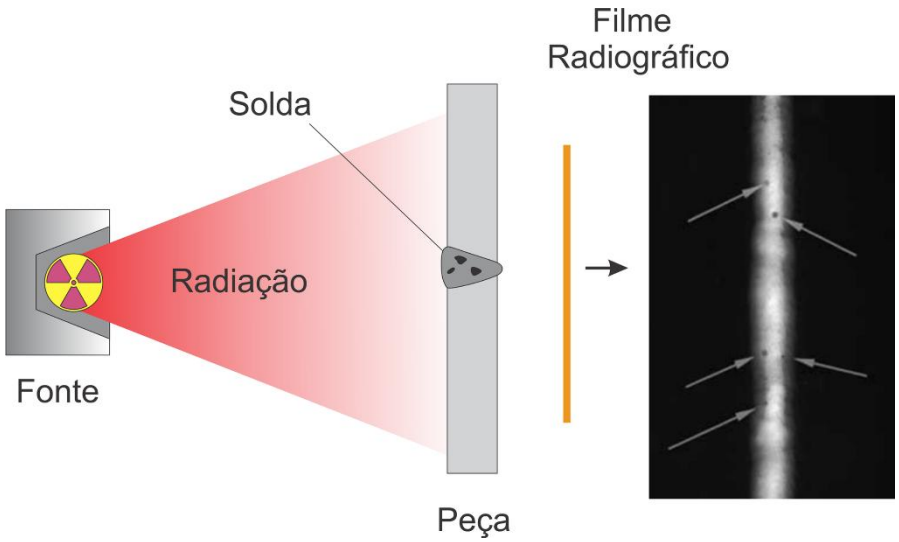


Figura 8.13 Detecção de falhas no aço por meio de radiografia

Fonte: Nunes (2020)

Quando utilizar

Esse ensaio é referência quando se deseja alta resolução para validação de integridade estrutural em elementos críticos de aço:

- **Inspeção de soldas:** é um método eficaz para verificar a qualidade interna de soldas, localizando falhas como trincas, porosidade, falta de fusão e inclusões (ex.: escória) que não são visíveis na superfície.
- **Medição de espessura:** permite estimar perda de espessura por corrosão e medir a espessura remanescente em pontos de difícil acesso, embora o ultrassom seja mais recomendado nesse caso.

É importante mencionar que o método possui limitações: requer duas faces acessíveis; a detectabilidade de trincas depende da orientação e peças muito espessas/densas exigem altas energias (perda de contraste/detalhe).

Normas aplicáveis

ABNT NBR 16528: Ensaio não destrutivo – Radiografia industrial – Inspeção de soldas por radiografia computadorizada.

ABNT NBR NM 314: Ensaios não destrutivos – Radiografia industrial – Terminologia.

ASTM E94: *Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film*.

ASTM E1032: *Standard Practice for Radiographic Examination of Weldments Using Industrial X-Ray Film.*

ASTM E1742/E1742M: *Standard Practice for Radiographic Examination.*

ISO 17636-1: *Non-destructive testing of welds – Radiographic testing. Part 1: X-and gamma-ray techniques with film*.

8.2.1.6 Ultrassom

Definição e equipamento

O ultrassom é um método que utiliza ondas sonoras de alta frequência (ultrassônicas) para inspecionar materiais. O equipamento (detector de falhas) usa um transdutor piezelétrico que emite a onda e mede o tempo que ela leva para retornar após ser refletida por uma interface (como o fundo da peça) ou uma descontinuidade (defeito interno). Um exemplo de execução desse ensaio em estrutura metálica é apresentado na Figura 8.14.

Figura 8.14 Detecção de falhas no aço por meio de ultrassom

Fonte: FHWA (2022)

Quando utilizar

Esse ensaio é amplamente aplicado na inspeção de elementos de aço em pontes pelo fato de o equipamento ser, em geral, sensível e portátil, podendo ser usado para:

- **Inspeção volumétrica de soldas:** é um método indicado para a inspeção volumétrica (interna) de soldas, detectando falhas como porosidades, inclusões (poros/escória), falta de penetração e trincas internas. Apresenta excelente desempenho para descontinuidades planas mesmo em chapas espessas.
- **Medição de espessura:** muito preciso para medir a espessura de elementos estruturais, eficaz para monitorar a perda de seção transversal (adelgaçamento) causada pela corrosão, inclusive em um único lado do elemento.
- **Pinagem e peças finas:** aplicável para detectar defeitos em pinos e chapas finas (ajustando frequência, feixe e acoplamento).

O equipamento exibe um gráfico (A-*scan*, B-*scan* ou C-*scan*) que permite ao inspetor calcular a localização e o tamanho da descontinuidade.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 15824: Ensaios não destrutivos – Ultrassom – Procedimento para medição de espessura.

ABNT NBR NM 335: Ensaios não destrutivos – Ultrassom – Terminologia.

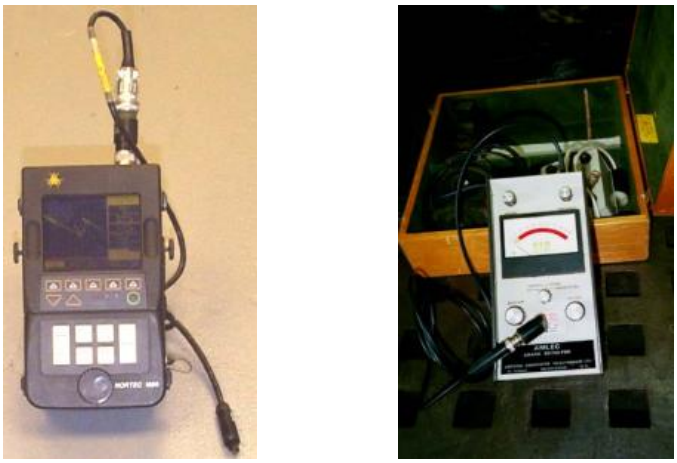
ABNT NBR NM 336: Ensaios não destrutivos – Ultrassom em solda – Procedimento.

ISO 16810: *Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General principles*.

8.2.1.7 Correntes de Foucault (Eddy Current Testing – ECT)

Definição e equipamento

As Correntes de Foucault (ou parasitas) são um método não destrutivo que utiliza indução eletromagnética para detectar descontinuidades em materiais eletricamente condutores. Uma bobina energizada (a sonda) gera um campo magnético alternado que induz correntes elétricas circulares no material (ver a Figura 8.15). A presença de uma falha (como uma trinca) perturba o fluxo dessas correntes e essa alteração é detectada e medida pela sonda.



(a) (b)

Figura 8.15 Equipamentos para detecção de falhas em elementos de aço por correntes parasitas: (a) equipamento portátil; (b) instrumento analógico

Fonte: FHWA (2022)

Quando utilizar

Esse método é amplamente utilizado em estruturas metálicas e componentes de máquinas devido à sua alta velocidade de inspeção. Em pontes, pode ser empregado para:

- **Detecção de trincas:** muito sensível a trincas superficiais e subsuperficiais (próximas à superfície), como as causadas por fadiga ou tensões de soldagem.
- **Medição de revestimento:** permite medir a espessura de revestimentos não condutores (como tinta sobre o aço).

É importante mencionar que a profundidade de penetração depende da frequência utilizada, da condutividade e da permeabilidade. Além disso, o ensaio é ineficaz em materiais não condutores (como concreto) ou em falhas muito profundas.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 16979: Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Detecção e dimensionamento de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais metálicos.

ABNT NBR 17046: Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Ensaio de correntes parasitas pulsadas em componentes metálicos ferromagnéticos.

ABNT NBR 17195: Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Terminologia.

8.2.1.8 Vazamento de fluxo magnético

Definição e equipamento

Este método é usado para detectar perda de seção transversal (adelgaçamento) causada por corrosão e falhas pontuais (rupturas/entalhes) em materiais ferromagnéticos. O equipamento utiliza um magnetizador potente (eletroímã ou ímã permanente) para quase saturar magneticamente o elemento. Onde há perda de metal, o campo magnético vaza para fora do aço. Sensores de precisão (como sensores *Hall*) posicionados no exterior do elemento detectam e quantificam esse vazamento.

Quando utilizar

Esse método é útil na inspeção de componentes críticos onde a corrosão não é visível, como:

- **Cabos e cordoalhas:** para inspecionar cabos estaiados e cabos de protensão dentro de bainhas (com ressalvas), pois detecta rupturas de fio e corrosão interna sem a necessidade de abrir o elemento.
- **Tubos e placas:** mapeamento rápido de perda de espessura em grandes áreas (ex.: chapas de piso/longarinas ou tubulações/elementos ocos ferromagnéticos) por meio de varredura sistemática.

O resultado fornece um gráfico que, após calibração, permite quantificar a porcentagem de perda de seção metálica em um determinado ponto, indicando a severidade da corrosão.

Normas aplicáveis

ASTM E1571: *Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope*.

8.2.1.9 Ensaio de aderência de pintura

Definição e equipamento

O ensaio de aderência de pintura avalia a capacidade do sistema de revestimento (tintas ou esquemas de pintura) de permanecer firmemente aderido ao substrato metálico, quando submetido a esforços de corte ou arrancamento. No contexto de pontes, há dois métodos que merecem destaque:

- **Corte em grade (*cross-cut*):** realização de cortes paralelos e ortogonais na película de tinta, até o substrato, formando uma malha (grade). Em seguida, avalia-se visualmente o destacamento da pintura ao longo dos cortes.
- **Arrancamento (*pull-off*):** colagem de um pino metálico (*dolly*) sobre a superfície pintada, seguido de aplicação de carga de tração perpendicular até ocorrer a ruptura (na tinta, na interface tinta/substrato ou no próprio substrato). A força necessária para o destacamento define a resistência de aderência.

Quanto aos equipamentos e materiais, geralmente são usados: cortadores e gabaritos para corte em grade; equipamento de *pull-off* (aparelho de arrancamento com manômetro ou célula de carga e pinos metálicos/*dollies*); acessórios para limpeza local e preparação da superfície (quando necessário).

Quando utilizar

O ensaio de aderência de pintura deve ser considerado em inspeções e diagnósticos de pontes quando houver necessidade de avaliar:

- **Desempenho do sistema de pintura existente**, especialmente em estruturas com sinais de descascamento, bolhas, corrosão sob película ou repinturas sucessivas.
- **Aderência de novos sistemas de pintura**, após serviços de recuperação e repintura, como parte do controle de qualidade da execução.
- **Compatibilidade entre camadas antigas e novas**, em casos de repintura parcial ou total sobre esquemas antigos.

A escolha entre corte em grade e *pull-off* depende, em geral, da espessura e do tipo de filme (camadas finas ou sistemas multicamadas), dos critérios de aceitação estabelecidos em projeto ou contrato (por exemplo, valores mínimos de aderência em MPa) e da facilidade de reparar a área ensaiada, de modo a restabelecer a proteção anticorrosiva após o ensaio.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 11003 – Pintura industrial – Determinação da aderência pelos métodos de corte na pintura.

ABNT NBR 15877 – Pintura industrial - Determinação da resistência à tração em sistemas de pintura e outros revestimentos anticorrosivos.

ISO 2409: *Paints and varnishes – Cross-cut test*.

ISO 4624: *Paints and varnishes – Pull-off test for adhesion.*

8.2.1.10 Medição da espessura de película seca (EPS)

Definição e equipamento

A espessura de película seca é a espessura total do sistema de pintura (demãos de tinta e revestimentos relacionados) após completa secagem e cura. A sua medição é fundamental para verificar se o sistema de pintura foi aplicado dentro da faixa especificada em projeto ou em norma, garantindo o desempenho anticorrosivo e a durabilidade esperada da estrutura metálica.

Em pontes, é normalmente medida por meio de equipamentos eletrônicos portáteis que funcionam, em geral, por:

- princípio magnético, para revestimentos não condutores sobre substratos de aço carbono/ferrosos;
- princípio de correntes parasitas (*eddy current*), para revestimentos não condutores sobre substratos metálicos não ferrosos.

Os medidores podem ter sondas integradas ou externas e devem ser calibrados e ajustados conforme as instruções do fabricante e os procedimentos normativos, incluindo ajustes específicos para superfícies rugosas (por exemplo, aço jateado). A leitura é rápida, repetitiva e não danifica o revestimento, exceto por eventuais marcas superficiais desprezíveis, o que caracteriza o ensaio como não destrutivo.

Quando utilizar

A medição da espessura de película seca pode ser considerada para:

- **Verificar a conformidade da pintura recém-aplicada**, com as especificações de projeto, de norma ou de contrato (faixas de espessura mínima, média e máxima).

- **Controlar a qualidade de serviços de repintura ou reforço de proteção anticorrosiva**, principalmente após jateamento e reaplicação de sistemas completos ou parciais.
- **Avaliar o desempenho de sistemas de pintura em serviço**, em estruturas com sinais de corrosão precoce, falhas de cobertura, escorrimentos ou diferenças de tonalidade que possam indicar variações de espessura.
- **Planejar intervenções de manutenção**, identificando áreas com espessura insuficiente (maior suscetibilidade à corrosão) ou excessiva (risco de fissuração, trincas na película ou desprendimento por tensões internas).

Normas aplicáveis

ABNT NBR 10443 – Pintura industrial - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies metálicas ferrosas e não ferrosas.

ISO 2808: *Paints and varnishes – Determination of film thickness.*

8.2.2 Ensaios semidestrutivos

8.2.2.1 Ensaio de dureza Brinell

Definição e equipamento

O ensaio Brinell mede a resistência à penetração do metal. O equipamento (durômetro Brinell) aplica uma carga controlada e sustentada por meio de uma esfera padronizada (penetrador) de aço endurecido ou carbeto de tungstênio contra a amostra. O ensaio é considerado minimamente destrutivo (semidestrutivo), pois deixa uma impressão permanente.

Quando utilizar

Após remover a carga, mede-se o diâmetro médio da impressão deixada na amostra (média de duas leituras ortogonais). Esse procedimento é útil para:

- **Cálculo da dureza:** com base na carga aplicada e no diâmetro da endentação, é calculado o Número de Dureza Brinell.
- **Estimativa de resistência:** para aços estruturais que não sofreram endurecimento por resfriamento (sem têmpera), o valor de dureza está diretamente relacionado à

resistência à tração na ruptura. Assim, é possível estimá-la de forma rápida e com pouca remoção de material.

- **Verificação de homogeneidade:** usado para verificar a uniformidade da dureza em diferentes lotes ou partes do elemento.

Normas aplicáveis

ABNT NBR ISO 6506-1: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 1: Método de Ensaio.

ABNT NBR ISO 6506-2: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio.

ABNT NBR ISO 6506-3: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 3: Calibração de blocos de referência.

ABNT NBR ISO 6506-4: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 4: Tabela de valores de dureza.

8.2.2.2 Análise de composição química

Definição e equipamento

Este ensaio determina a composição elementar do aço. O método mais preciso exige a retirada de uma amostra (pequeno cupom, cavacos ou raspas) do elemento e análise em laboratório via Espectrometria de Emissão Atômica (OES). Embora existam equipamentos portáteis, a análise laboratorial fornece o resultado mais confiável.

Quando utilizar

A principal aplicação é verificar a soldabilidade do aço e sua conformidade com a especificação do projeto. Mais especificamente, é útil para avaliar:

- **Risco de fissuras a frio (retardadas):** permite calcular o Carbono Equivalente (CE). Um valor elevado de CE indica que o aço é mais suscetível à fissuração após o resfriamento da solda. Assim, o CE é usado para determinar a necessidade e a temperatura correta de pré-aquecimento da peça, prevenindo falhas.
- **Risco de fissuras a quente:** a composição (principalmente o teor de enxofre e fósforo) é usada para prever fissuras que ocorrem durante a solidificação da poça de fusão da solda.

Normas aplicáveis

ISO 14284: *Steel and iron – Sampling and preparation of samples for the determination of chemical composition*.

ASTM E415: *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*.

8.2.2.3 Metalografia

Definição e equipamento

Este ensaio visa investigar a microestrutura do material, permitindo identificar fases, tamanho de grão, inclusões não metálicas, presença de regiões revenidas, zonas afetadas pelo calor de solda, entre outros aspectos relevantes para o desempenho mecânico e a durabilidade do aço. Em pontes, usualmente é realizada a partir de pequenos corpos de prova (cupins) retirados da estrutura ou por preparação localizada de uma superfície acessível, seguida de lixamento e polimento para observação em microscópio.

Os principais equipamentos e materiais usados na execução deste ensaio são:

- dispositivos de corte (serras, discos abrasivos) para retirada de cupins ou preparação de janelas de observação;
- equipamentos de embutimento (quando a amostra é embutida em resina para facilitar o manuseio);
- lixadeiras e politrizes (para preparação da superfície por lixamento e polimento progressivo);
- reagentes de ataque químico, como soluções à base de nital ou outros, que revelam a microestrutura;
- microscópio óptico metalográfico (e, em casos específicos, microscópio eletrônico), para observação e registro de imagens.

O preparo adequado da superfície (sequência de lixamento, polimento e ataque químico) é fundamental para que a microestrutura observada represente fielmente o estado do material.

Quando utilizar

A metalografia deve ser considerada, em inspeções e diagnósticos de pontes, quando houver necessidade de entender causas ou mecanismos de deterioração ligados à microestrutura do aço, em especial nas seguintes situações:

- investigação de falhas ou fissuras em elementos metálicos, especialmente quando se suspeita de fratura frágil e trincas em soldas;
- avaliação de zonas termicamente afetadas, para verificar se as microestruturas são compatíveis com a norma e com o desempenho esperado;
- verificação de tratamentos térmicos ou termoquímicos; análise de inclusões não metálicas e outras descontinuidades internas que possam afetar a tenacidade ou a resistência à fadiga.

Recomenda-se que a retirada de amostras e o preparo de janelas metalográficas sejam planejados por profissional habilitado, escolhendo regiões representativas e, sempre que possível, fora de zonas de máxima solicitação. Quando há retirada de cupins ou remoção perceptível de espessura, a área deve ser avaliada quanto à necessidade de tratamento de bordas, reparo por solda e proteção anticorrosiva após o ensaio.

Normas aplicáveis

ABNT NBR 15454 – Metalografia das ligas de ferro-carbono – Terminologia.

ASTM E3: *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.

ASTM E407: *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.

8.2.3 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos podem ser necessários para determinar a resistência ou outras propriedades do aço. Esta seção apresenta alguns métodos destrutivos usuais para o aço.

8.2.3.1 Ensaio de impacto Charpy

Definição e equipamento

Este ensaio mede a tenacidade do material (a quantidade de energia que o aço pode absorver até fraturar). A amostra utilizada é padronizada e possui um entalhe (geralmente em forma de "V") que concentra a tensão.

O equipamento principal é um martelo pendular, conforme ilustrado na Figura 8.16) que atinge a amostra ao cair de uma altura conhecida. O resultado do ensaio é a energia absorvida na fratura, calculada subtraindo-se a altura que o martelo atinge após a fratura da amostra da altura inicial de queda.

Figura 8.16 Equipamento para realização do ensaio de impacto Charpy

Fonte: FHWA (2022)

Quando utilizar

Esse ensaio é usado para avaliar:

- **Risco de ruptura frágil:** é essencial para determinar a Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTF) do aço. Essa temperatura define o ponto no qual o aço passa de um comportamento tenaz (que absorve energia antes de falhar) para um comportamento frágil (que falha subitamente).
- **Segurança:** o ensaio é fortemente recomendado em aços estruturais de pontes para verificar se a tenacidade mínima é atendida nas temperaturas de serviço.

Normas aplicáveis

ABNT NBR ISO 148-1: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 1: Método de ensaio.

ABNT NBR ISO 148-2: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 2: Verificação de máquinas de ensaios.

ABNT NBR ISO 148-3: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 3: Preparação e caracterização de corpos de prova Charpy com entalhe em V usados na verificação indireta de máquinas de ensaios de impacto por pêndulo.

8.2.3.2 Ensaio de resistência à tração

Definição e equipamento

Este é o ensaio destrutivo padrão utilizado para caracterizar as propriedades mecânicas do aço. Consiste em submeter um corpo de prova padronizado (que pode ser retirado do elemento estrutural) a uma força de tração uniaxial crescente, até a ruptura. O equipamento principal é a Máquina Universal de Ensaios (ou Máquina de Tração), que registra a força aplicada e o deslocamento, convertido em deformação com base no comprimento inicial. Um exemplo de amostra utilizada nesse ensaio é apresentado na Figura 8.17.

Figura 8.17 Amostra usada no ensaio de tração

Quando utilizar

A análise da curva tensão-deformação é fundamental para a verificação estrutural e a certificação do material. As principais propriedades obtidas são:

- **Resistência ao escoamento:** valor de tensão a partir do qual o aço começa a se deformar permanentemente (plasticamente). É o valor de referência no projeto.
- **Resistência à tração na ruptura:** tensão máxima que o material suporta antes de romper.
- **Módulo de elasticidade:** rigidez do material, calculada pela inclinação da reta no regime elástico (para materiais de comportamento elástico-linear).

Normas aplicáveis

ABNT NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente.

ASTM E8/E8M: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

8.3 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL (SHM)

Os métodos para a avaliação global das estruturas visam o Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE ou SHM do inglês *Structural Health Monitoring*) em tempo real. Esses combinam técnicas convencionais, como a instrumentação por sensores, com técnicas remotas e não invasivas, como os drones e LiDAR (*Light Detection And Ranging*).

Esses métodos são utilizados para classificar as estruturas, utilizando sistemas e protocolos de gerenciamento, e auxiliar no planejamento e tomada de decisões (intervenções, priorização de reparos). Além disso, fornecem informações estruturais relevantes, como deformações, movimentações e o crescimento e propagação de fissuras nos elementos.

A arquitetura de um sistema de MIE geralmente é dividida em quatro componentes principais, que resultam em informações úteis para o gestor da ponte:

- a rede de sensores (para capturar os dados);
- o sistema de aquisição de dados (para registrar);
- o sistema de comunicação (para transmitir);
- e o módulo para o processamento e análise dos dados.

Atualmente, são utilizados diversos sensores no monitoramento de pontes. Os dados capturados são fundamentais para direcionar ações de manutenção ou intervenção, otimizando o plano de gerenciamento da ponte. Os equipamentos avançados utilizados para inspecionar pontes exigem: *hardware* e *software* adequados; equipe técnica especializada para a instalação, calibração e manutenção; e profissional com experiência na interpretação dos resultados.

Uma revisão sistemática de sensores para o MIE é apresentada em Hassani e Dackermann (2023). A seguir, são citados alguns sensores usuais:

- **Sensores de deformação:** *strain gages*, corda vibrante, piezoelétricos.
- **Transdutor de deslocamentos:** LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*).
- **Inclinômetros:** sensores de rotação/inclinação de elementos estruturais.
- **Células de carga** (medição de forças).
- **Termopares** (medição de temperatura).
- **Acelerômetros:** piezoelétricos, MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*).
- **Sensores de fibras óticas:** redes de Bragg (*Fiber Bragg Grating*) e interferômetros SOFO (*Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques*).

8.4 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO REMOTA

Os métodos de medição sem contato utilizam tecnologias que não exigem a instalação física de sensores diretamente na estrutura, tornando a coleta de dados mais rápida e não invasiva. A visão computacional envolve metodologias, técnicas e algoritmos para a extração de informações úteis a partir do processamento de imagens e vídeos.

No âmbito do monitoramento de pontes, destacam-se as técnicas:

- **Amplificação de movimentos:** ao processar vídeos, permite realçar e "visualizar" movimentos estruturais muito pequenos, originalmente imperceptíveis a olho nu (Toome, 2023).
- **Interferometria por radar (Figura 8.18):** permitem a medição precisa de deslocamentos, aceleração e velocidade. O sistema funciona ao comparar a diferença de fase entre os sinais eletromagnéticos emitidos e os refletidos pela estrutura, identificando as variações mínimas na sua posição.

Esses sistemas têm sido adotados para a medição de deslocamentos e aferição das frequências naturais das estruturas, parâmetros essenciais que indicam a rigidez e a saúde estrutural (Hune, 2024).

Figura 8.18 Radar interferométrico

Fonte: Owerko *et al.* (2012)

8.4.1 Vibrômetro a laser

Este método não destrutivo e sem contato é usado para medir a velocidade e o deslocamento de pequenas vibrações em superfícies. Conforme Richter (2021), o equipamento baseia-se no Efeito Doppler: um feixe de laser atinge o ponto de interesse e mede a variação de frequência da luz refletida, que é diretamente proporcional à velocidade de vibração da superfície. O sistema permite fazer medições precisas a longa distância, em elementos de difícil acesso ou em locais onde a fixação de sensores de contato (acelerômetros) é inviável.

Esse método é uma ferramenta útil para a análise dinâmica de pontes e viadutos, essencial para o diagnóstico da integridade estrutural:

- **Análise modal/identificação operacional (OMA):** permite medir as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Alterações nessas frequências indicam perda de rigidez ou presença de danos internos (fissuras, descolamentos).
- **Resposta dinâmica:** possibilita medir a resposta da estrutura a cargas de tráfego, vento ou atividades sísmicas, auxiliando no cálculo da vida útil remanescente.

8.4.2 LiDAR (*Light Detection and Ranging*)

Sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) consistem em uma tecnologia de emissão e recaptação de pulsos de laser. A partir da velocidade de propagação da luz no ar e conhecendo-se o tempo de viagem do pulso emitido até o alvo e de volta ao sensor, é possível determinar a distância entre o objeto e o sensor (Guo *et al*., 2023). Desta forma, são geradas nuvens de pontos (conjuntos de coordenadas tridimensionais X, Y, Z) que permitem a reconstrução da geometria de pontes.

Os sistemas LiDAR podem ser instalados em plataformas:

- **Estacionárias:** instalação em tripés na superfície terrestre (escaneamento a laser terrestre).
- **Móveis:** embarcados em veículos, mochilas (escaneamento dinâmico) ou em ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas – escaneamento aerotransportado).

8.4.3 Fotogrametria

A fotogrametria é uma técnica utilizada para obter informações dimensionais de objetos tridimensionais a partir de fotografias. Pode ser utilizada para a medição de coordenadas, quantificação de distâncias, alturas, áreas e volumes, preparação de mapas de topografia, geração de modelos digitais de elevação e ortofotos (imagens corrigidas e georreferenciadas).

A aerofotogrametria (quando feita a partir de aeronaves, como ARPs) baseia-se no conceito de visão estereoscópica (percepção de profundidade a partir de duas vistas de um mesmo objeto). Ao determinar-se o deslocamento relativo de um objeto entre duas imagens (paralaxe estereoscópica), a sua altura pode ser visualmente ou matematicamente estimada. Dessa forma, a posição de um ponto em um objeto real pode ser reconstruída a partir de duas imagens que retratam o mesmo objeto, traçando-se raios que partem dos pontos homólogos no par de imagens e atravessam o ponto focal no momento da captura. A interseção dos dois raios marca a posição do objeto no mundo real, conforme representado na Figura 8.19 (Aber *et al*., 2010).

Para o caso aplicado às pontes, voos planejados permitem a obtenção de fotografias parcialmente sobrepostas com espaçamentos regulares. Essas fotografias são processadas em *softwares* especializados que as corrigem, alinham e geram mapas de profundidade contendo a informação da distância entre a câmera e os objetos. Esse processo depende do conhecimento de parâmetros da câmera – sobretudo de sua distância focal – e de seu posicionamento.

A geração de modelos a partir de levantamento fotogramétrico requer a obtenção de coordenadas precisas para o alinhamento das imagens. Assim, na operação em campo, é necessário utilizar o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para o aumento da precisão de posicionamento do drone.

O inspetor deve estar atento ao nível de detalhe desejado. Parâmetros como a distância focal e a distância da estrutura no momento de captura alteram a distância de amostragem do solo (GSD - *Ground Sample Distance*), que indica a resolução espacial do menor detalhe visível na fotografia.

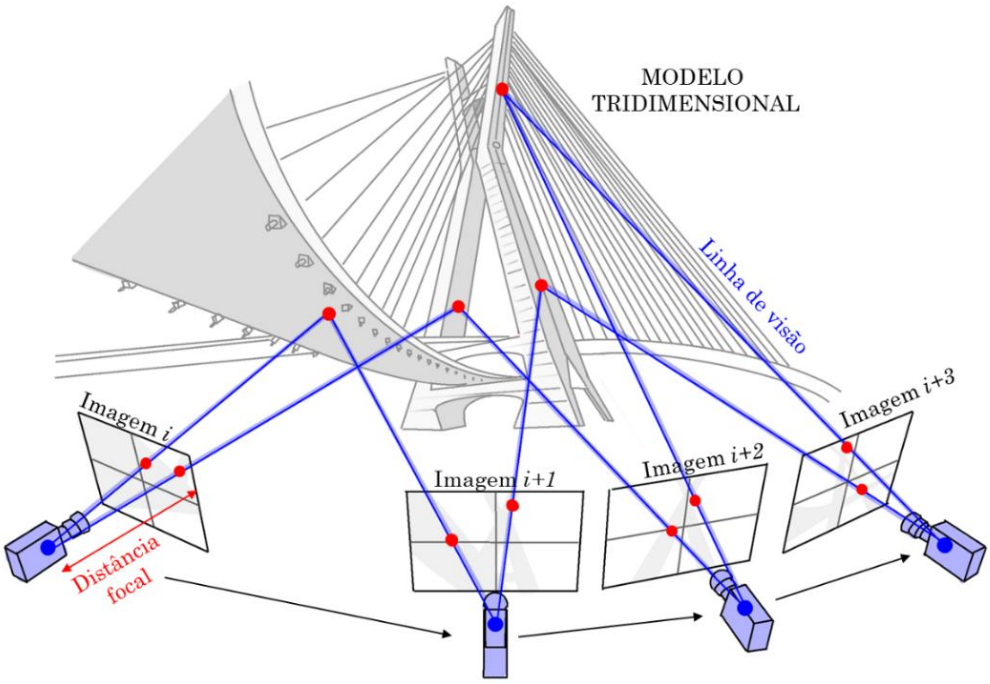


Figura 8.19 Representação esquemática do processo de fotogrametria

Fonte: Hune *et al.* (2025)

8.4.4 Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARPs

A utilização de drones (Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARPs) equipados com câmeras de alta resolução possibilita a inspeção detalhada e o registro da condição estrutural, mostrando-se vantajosa em áreas de difícil acesso e alturas elevadas (Figura 8.20). Na inspeção de pontes, destacam-se:

- **Segurança do inspetor:** reduz a exposição do profissional aos riscos ocupacionais inerentes ao trabalho em altura ou em locais perigosos.
- **Inspeção em espaços confinados:** ARPs de pequeno porte permitem a inspeção remota do interior de caixões (elementos estruturais vazados) de pontes.

O uso de ARPs para a inspeção de pontes permite a coleta de imagens em regiões de interesse, como anomalias previamente conhecidas ou elementos cujo registro fotográfico convencional apresenta limitações de acesso, como aparelhos de apoio. Para além da aplicação mais imediata, as ARPs podem ser utilizadas para levantamentos aerofotogramétricos e gerar produtos de grande utilidade prática, como modelos computacionais tridimensionais da estrutura no estado em que se encontra (modelo “as is”) com fidelidade fotográfica e geolocalização.

Figura 8.20 Levantamento fotográfico com drone

Fonte: Acervo LABIM – UFV (2025)

Esses modelos permitem a avaliação das anomalias superficiais, da conformidade geométrica e do desempenho estrutural por meio de ferramentas de elementos finitos. O processamento dos dados coletados pode gerar plantas e fachadas georreferenciadas (ortomosaicos) e modelos digitais de elevação. Além de câmeras RGB (cores visíveis) especializadas, as ARPs podem ser equipadas com outros instrumentos (Quadro 8.1).

Quadro 8.1 Instrumentos adicionais e aplicações técnicas para ARPs

Instrumento	Aplicação Técnica
Câmeras Térmicas	Utilização de técnicas de termografia para detecção de variações de anomalias (como infiltração e desplacamentos) por meio de variações de temperatura.
LiDAR	Levantamentos de nuvens de pontos (medição precisa de geometria e distância).
Sensores de Ultrassom	Realização de ensaios físicos, como a medição de espessura de elementos estruturais.

Por fim, a operação de ARPs no Espaço Aéreo Brasileiro é condicionada à regularização da aeronave e de seu operador perante o Governo Brasileiro. Os operadores devem se informar sobre as homologações, os registros e seguros necessários, bem como as exigências e normativas atualizadas – em especial aquelas emitidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) – para garantir a legalidade e segurança das operações.

⚠ ATENÇÃO!

É importante mencionar que quando o uso de ARPs extrapolar a documentação fotográfica qualitativa e passar a subsidiar medições ou avaliações quantitativas, como estimativa de abertura de fissuras, cabe ao inspetor assegurar a confiabilidade dessas leituras. É essencial verificar se os sensores e lentes empregados possuem resolução compatível com a ordem das grandezas a serem medidas e se a geometria de voo e o processamento das imagens são adequados. Caso contrário, aumenta-se o risco de gerar alarmes indevidos, como fissuras aparentemente acima de limites normativos que, em verificação direta em campo, não se confirmam.

8.4.5 Inspeção robótica

A inspeção robótica utiliza plataformas automatizadas ou remotamente operadas (como braços articulados, veículos sobre cabos/creepers, ROVs submersos e drones/UAVs) para acessar áreas críticas com segurança. O objetivo é transportar a carga útil (*payload*) – câmeras de alta resolução, laser scanners/LiDAR, sensores de ensaios não destrutivos – a locais perigosos ou de difícil acesso. Exemplos de equipamentos são apresentados na Figura 8.21.

(a) (b)

Figura 8.21 Detecção de falhas no aço por meio inspeções robóticas: (a) veículo de superfície não tripulado; (b) veículo subaquático autônomo

Fonte: Murphy *et al.* (2009)

Esse método é recomendado para elementos em grande altura (pórticos, cabos), regiões submersas (pilares, estacas) e espaços confinados (interior de vigas-caixão). O objetivo é reduzir exposição ao risco e aumentar a cobertura da inspeção.

Não há uma norma específica para a metodologia de inspeção robótica em si, pois o robô é uma ferramenta de acesso. As normas aplicáveis são as dos instrumentos acoplados ao robô e as normas de segurança e acesso do inspetor que o opera, como a NR-33 (espaços confinados) e a NR-35 (trabalho em altura).

8.5 PROVAS DE CARGA

O ensaio prova de carga em pontes é um procedimento empregado para avaliar o desempenho estrutural por meio da aplicação controlada de cargas e do monitoramento das respostas obtidas. Pode ser utilizado tanto em estruturas novas, como parte da aceitação final, quanto em pontes existentes, visando verificar a conformidade com requisitos normativos e garantir a segurança operacional.

No caso de estruturas de concreto, a execução desses ensaios deve observar as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9607.

Conforme Lantsoght (2019), esse ensaio pode ser dividido em duas modalidades principais:

- **Ensaio de carga diagnóstica:** voltado à obtenção de dados reais, calibração de modelos numéricos e verificação de comportamento estrutural.
- **Ensaio de prova de carga:** aplicação de carregamentos equivalentes à combinação de cargas majorada prevista em norma, com o objetivo de verificar, experimentalmente, se a estrutura atende às exigências técnicas.

Essa última modalidade é especialmente indicada em situações de incerteza sobre a capacidade estrutural da ponte, decorrentes de degradação de materiais, ausência de documentação técnica ou comportamento estrutural desconhecido sob cargas elevadas. Por envolver carregamentos de maior magnitude, demanda preparação mais extensa e controle rigoroso de segurança, resultando em maiores custos.

A execução requer instrumentação previamente calibrada, combinando sensores, sistemas de aquisição de dados em campo e análise da resposta estrutural. Nesses ensaios, um veículo com carga conhecida (Figura 8.22), frequentemente equipado com sistema GPS para identificação precisa de seu posicionamento, é conduzido sobre a ponte. Simultaneamente, sensores registram os deslocamentos e deformações dos elementos estruturais (FHWA, 2022).

Durante o ensaio, é fundamental o monitoramento em tempo real e o estabelecimento prévio de critérios de parada, definidos em função do tipo estrutural, material e modo de falha esperado. Caso esses limites sejam atingidos, o teste deve ser interrompido,

permitindo determinar restrições de carga apropriadas. Quando o carregamento de prova é aplicado sem que os critérios de parada sejam excedidos, comprova-se a conformidade normativa e a aptidão estrutural para o uso previsto. Os resultados também podem ser empregados em análises probabilísticas de confiabilidade, permitindo reduzir incertezas na estimativa da capacidade e da probabilidade de falha (Lantsoght, 2019).

Figura 8.22 Veículo empregado em ensaio de prova de carga dinâmica

Fonte: FHWA (2022)

Em pontes de pequeno vão, a coleta de dados geralmente é concluída em um dia ou menos. Isso facilita na determinação de fatores de distribuição de carga mais precisos e na construção de modelos estruturais simplificados para estimar a capacidade real. Esse método fornece informações valiosas para a gestão da infraestrutura, sendo capaz de identificar tanto estruturas que exigem restrição ou fechamento do tráfego, quanto aquelas que podem ter sua utilização liberada com segurança (FHWA, 2022).

8.6 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADOS EM DADOS

O monitoramento estrutural de pontes com o uso de dados dinâmicos (como vibrações e acelerações) tem se tornado uma ferramenta essencial para a detecção precoce de danos. Essa prática proporciona maior segurança operacional e otimiza a manutenção preventiva. Nesse contexto, destacam-se:

- **Métodos baseados na análise de séries temporais (*time-series analysis*):** exploram diretamente a evolução dos sinais registrados nos sensores instalados na estrutura e permitem identificar mudanças estatísticas ou de padrão associadas à ocorrência de danos ou degradação.
- **Metodologias *drive-by*:** possibilitam a avaliação indireta das condições estruturais por meio das respostas dinâmicas da interação veículo-estrutura que percorre a ponte.

8.6.1 Modelos de séries temporais

Modelos de séries temporais são uma metodologia empregada na análise de sinais dinâmicos e na extração de características em sistemas de monitoramento estrutural. Dados obtidos em condições de referência da estrutura (estado considerado não danificado) são utilizados para ajustar modelos. Esse ajuste consiste na calibração dos coeficientes do modelo com base nos registros de séries temporais (como aceleração, deslocamento e deformação), visando a reprodução e previsão do comportamento estrutural.

Após a calibração inicial, o modelo pode ser reaplicado a novos conjuntos de dados coletados ao longo do tempo. A comparação entre os parâmetros recalibrados e os obtidos na condição de referência permite identificar alterações nas propriedades estruturais associadas a processos de degradação ou danos. Adicionalmente, as diferenças entre as respostas previstas pelo modelo e as medições registradas, caracterizadas por alterações nas distribuições estatísticas dos resíduos do modelo (a diferença entre o valor medido e o valor previsto), também indicam possíveis alterações no estado da estrutura.

Conforme Ribeiro *et al*. (2024), os dados de séries temporais utilizados na modelagem podem ser classificados segundo sua estacionariedade, linearidade, dimensionalidade e distribuição estatística. Essas propriedades influenciam diretamente na escolha do modelo de análise e em sua sensibilidade à detecção de danos, sendo descritas a seguir:

- **Estacionariedade:** refere-se à variabilidade dos momentos estatísticos (como média, variância, assimetria e fator de crista) dentro de uma base de dados. Uma série é considerada estacionária quando essas estatísticas permanecem aproximadamente constantes ao longo do tempo. Caso contrário, ela é dita não estacionária.
- **Linearidade:** indica se o comportamento da série pode ser adequadamente representado por relações lineares. Se for o caso, modelos lineares são suficientes, senão, modelos não lineares são necessários.
- **Dimensionalidade:** diferencia os dados em que apenas uma variável é monitorada (univariados), daqueles em que diversas variáveis são monitoradas simultaneamente (multivariados). Em aplicações práticas, as séries temporais apresentam uma configuração multivariada, pois os dados são usualmente coletados por múltiplos sensores. Além disso, os modelos podem tratá-los isoladamente ou em conjunto.
- **Distribuição estatística:** os dados podem ser classificados como gaussianos ou não gaussianos, conforme apresentem ou não distribuição normal.

Tradicionalmente, modelos lineares são focados em modelos paramétricos, como os modelos autorregressivos (AR) (Ribeiro *et al.*, 2024). Esses modelos possuem uma forte base estatística e têm sido utilizados para previsão e identificação de anomalias em pontes (Datteo *et al.*, 2017; Meixedo *et al.*, 2022). No entanto, sua eficácia pode ser limitada em cenários mais complexos, em que os dados apresentam comportamento não linear. Nesse contexto, técnicas de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) têm possibilitado uma abordagem baseada exclusivamente nos dados, evitando a necessidade de uma modelagem manual por parte do usuário (Ahmed *et al.*, 2010).

Os modelos de séries temporais são comumente utilizados para extrair características sensíveis a dano (*Damage-Sensitive Features*, DSFs). Esses atributos podem ser obtidos a partir de momentos estatísticos, dos coeficientes e resíduos de modelos autorregressivos, ou ainda dos pesos e saídas residuais de redes neurais. O objetivo é detectar variações estruturais, mesmo que sutis, que possam indicar o início de um processo de degradação (Ribeiro *et al.*, 2024).

A combinação de técnicas é recomendada em cenários nos quais as séries temporais apresentam comportamento complexo ou com uma quantidade significativa de ruídos (variações indesejadas no sinal). Além disso, o uso de redes neurais se destaca pela capacidade de lidar com grandes volumes de dados, o que é útil em sistemas de monitoramento contínuo e em tempo real.

Uma proposta para a identificação de danos é apresentada na Figura 8.23. Nessa proposta, os danos são avaliados por meio de coeficientes autorregressivos obtidos utilizando dados de deformação contínuos de uma ponte ferroviária.

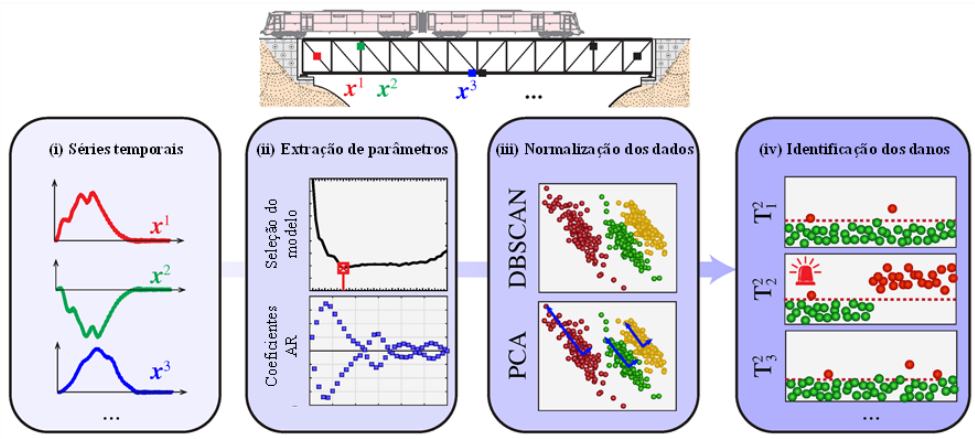


Figura 8.23 Fluxograma de abordagem para identificação de danos a partir da extração contínua de coeficientes autorregressivos a partir de séries temporais de deformação

Fonte: Adaptado de Anastasia *et al.* (2023)

8.6.2 Metodologia de monitoramento indireto *drive-by*

A Metodologia *drive-by* (monitoramento em movimento) utiliza a interação dinâmica (vibração e movimento mútuo) entre um veículo e a via para coletar informações relevantes sobre a integridade estrutural da infraestrutura. Essas metodologias utilizam veículos instrumentados com câmeras e/ou sensores que se deslocam sobre a estrutura para coletar *dados.* Dessa forma, é possível avaliar a condição estrutural da ponte sem a necessidade de instalar um sistema de monitoramento dedicado diretamente sobre a estrutura (Souza *et al*., 2023). Isso resulta na redução de custos, da complexidade e das interrupções nas operações em pontes.Um exemplo de metodologia *drive-by* para a detecção de danos em pontes ferroviárias é mostrado na Figura 8.24

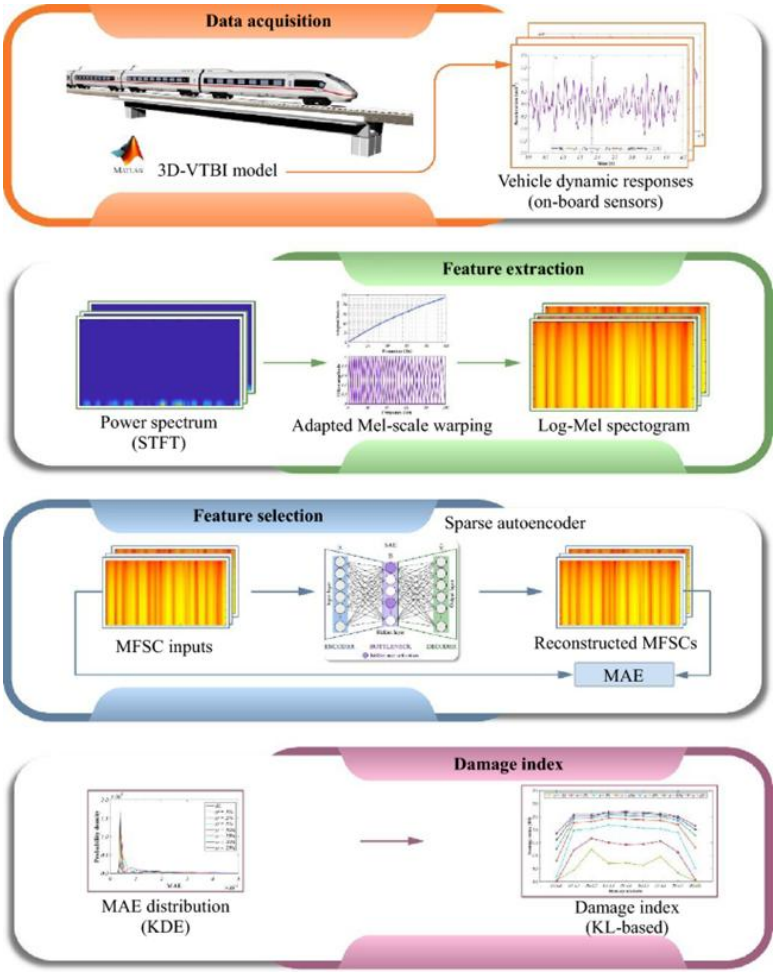


Figura 8.24 Fluxograma de metodologia de detecção de danos por drive-by para pontes ferroviárias

Fonte: Souza *et al.* (2024)

Conforme Souza *et al*. (2023), os métodos *drive-by* podem ser classificados em dois grandes grupos: métodos baseados em parâmetros modais e métodos baseados em parâmetros não modais.

Métodos baseados em parâmetros modais

Neste caso, o objetivo é estimar propriedades dinâmicas da ponte, o que inclui:

- **Frequências naturais:** a taxa natural com que a ponte vibra – consultar Erduran *et al.* (2023) para mais detalhes.
- **Modos de vibração:** as formas específicas de vibração – consultar González, Obrien, Mcgetrick (2012) para mais detalhes.
- **Coeficientes de amortecimento:** o quão rápido a vibração se dissipa – consultar Tan *et al*. (2019) para mais detalhes.

Essas propriedades modais, obtidas através da análise espectral da resposta do veículo, podem ser posteriormente utilizadas na avaliação de danos, mas não permitem identificar com precisão a localização do dano. Além disso, a eficácia da maioria das técnicas baseadas em parâmetros modais foi comprovada apenas em simulações numéricas. Contudo, os resultados são suscetíveis a fatores externos, como variações de temperatura, ação do vento, razão entre as massas do veículo e da ponte, além da presença de outros veículos sobre a estrutura.

Métodos baseados em parâmetros não modais

Estes métodos não buscam explicitamente a identificação de parâmetros modais da ponte. Em vez disso, concentram-se em características como a deflexão da estrutura sob cargas móveis ou na resposta dinâmica global do veículo durante a travessia da ponte (Souza *et al.*, 2023). Portanto, essas abordagens são muitas vezes mais robustas em ambientes com alto nível de ruído ou com veículos de características variadas.

Apesar de suas vantagens operacionais, as metodologias *drive-by* apresentam algumas limitações técnicas importantes. A precisão das respostas é sensível não apenas à condição da ponte, mas também a fatores não relacionados diretamente a danos, como (Bernardini; Carnevale; Collina, 2021):

- o nível de irregularidades da via (condição do pavimento);
- a resposta dinâmica do veículo a diferentes cargas de passageiros ou características (ex.: tipo de suspensão); e
- incertezas relacionadas à variação de velocidade e ao seu posicionamento preciso em relação à ponte.

Diferentes estratégias vêm sendo desenvolvidas para reduzir essas limitações, como técnicas de aprendizado de máquina aplicadas para extração automática de padrões de danos a partir de grandes volumes de dados. Dessa forma, o método *drive-by* é promissor como ferramenta complementar às inspeções visuais e aos sistemas convencionais de monitoramento em pontes brasileiras.

9 INSPEÇÕES SUBMERSAS

As inspeções submersas devem ser previstas nos casos em que os apoios e infraestrutura das pontes mantenham-se total ou parcialmente submersos, de forma permanente ou recorrente, impossibilitando sua avaliação por meio de inspeções rotineiras (convencionais). Essas inspeções integram, em geral, o escopo de uma inspeção global, envolvendo a avaliação conjunta de aspectos estruturais, hidráulicos, geológicos e geotécnicos.

Trata-se de um tipo de inspeção de elevada complexidade técnica e operacional, associado a custos significativamente superior aos das inspeções usuais, em razão da necessidade de equipes especializadas, equipamentos específicos (mergulho técnico, veículos subaquáticos não tripulados, sonar, entre outros) e da adoção rigorosa de procedimentos de segurança. Em função dessas características, a realização de inspeções submersas deve ser criteriosamente planejada, sendo usual a seleção prévia das obras que efetivamente demandam esse tipo de inspeção.

Este capítulo do Manual foi elaborado com base nas diretrizes e boas práticas internacionalmente consolidadas, em especial aquelas estabelecidas pelo *Federal Highway Administration (FHWA)*, adaptadas à realidade técnica, operacional e normativa do sistema rodoviário brasileiro e às diretrizes do DNIT.

Em consonância com essas diretrizes, a realização de inspeções submersas deve ser considerada sempre que eventos externos, condições ambientais adversas ou indícios observados em inspeções convencionais indiquem potencial comprometimento da infraestrutura da ponte. Entre as principais situações que podem justificar a realização de inspeções submersas de caráter extraordinário, especial, aprofundado ou voltado ao monitoramento de erosão (*scour*), destacam-se:

- ocorrência de enchentes atípicas ou eventos hidrológicos extremos;
- impacto de embarcações contra pilares, encontros ou demais elementos da subestrutura;
- presença de fluxos anormais de gelo, capazes de provocar danos diretos ou induzir processos erosivos;
- turbulência causada por hélices de embarcações (*prop wash*), com potencial de gerar correntes erosivas e deslocamento de materiais do leito;

- condições ambientais agressivas, como águas salobras, poluídas ou com elevadas concentrações de agentes químicos;
- acúmulo significativo de detritos flutuantes junto a pilares ou encontros;
- evidências de deterioração, deslocamentos ou danos estruturais observados acima da linha d'água, que possam indicar comprometimento dos elementos submersos.

Nessas situações, a inspeção submersa deve ser realizada na extensão necessária para assegurar a integridade da infraestrutura, avaliar a condição dos elementos submersos e subsidiar decisões quanto à segurança da obra e às intervenções de engenharia eventualmente requeridas.

9.1 CRITÉRIO DE SELEÇÃO DE PONTES

A seleção das pontes a serem submetidas a inspeções submersas, bem como a definição da frequência e do nível de aprofundamento dessas inspeções, deve considerar um conjunto de fatores relacionados ao estado da estrutura, ao ambiente em que está inserida e aos riscos associados à estabilidade da infraestrutura.

A seguir são apresentados alguns dos fatores a serem considerados:

- **Idade da obra:** especialmente em pontes antigas, projetadas segundo critérios hoje superados.
- **Tipo de material empregado:** na infraestrutura e fundações (concreto simples, concreto armado, alvenaria, madeira, aço etc.).
- **Sistema estrutural:** sistema global da ponte e configuração da infraestrutura (tipologia de pilares, encontros e fundações).
- **Interferências antrópicas próximas:** construções tais como barragens, represas, diques, portos, marinas ou dragagens, que podem alterar o regime hidráulico do curso d'água.
- **Probabilidade de erosões e socavamentos:** no leito do rio, em função das características hidrológicas e geotécnicas locais.
- **Ambiente agressivo:** tais como águas marinhas, estuarinas ou poluídas, que acelerem processos de deterioração.
- **Risco de impactos mecânicos:** decorrentes de embarcações, troncos, detritos flutuantes (balseiros) ou outros materiais transportados pela correnteza.

Pontes que apresentem um ou mais dos fatores de risco citados devem ser priorizadas e agrupadas em um inventário específico de obras sujeitas a inspeções submersas, de modo a permitir o adequado planejamento, a racionalização de custos e a gestão do risco estrutural.

Inventário de pontes com necessidade de inspeção submersa

O inventário especial deve conter, no mínimo, as seguintes informações:

- identificação da obra: tipo, denominação e localização da ponte;
- tipologia das inspeções submersas previstas e frequência recomendada;
- locação dos elementos a serem inspecionados, com identificação de pilares, encontros e fundações submersas;
- procedimentos e metodologias de inspeção a serem adotados;
- histórico das inspeções anteriores, incluindo datas, resultados e registros relevantes;
- providências recomendadas e medidas adotadas após a última inspeção;
- equipamentos e recursos especiais necessários, tais como mergulho técnico, ROVs, sonar, instrumentação ou outros;
- dados geométricos, hidráulicos e geotécnicos da infraestrutura.

Esse inventário constitui ferramenta fundamental para o planejamento das inspeções submersas, a priorização das obras críticas e a gestão preventiva da segurança estrutural, contribuindo para a redução de riscos associados a socavamentos, perda de capacidade de suporte e colapsos estruturais.

9.2 MÉTODOS DE INSPEÇÃO SUBMERSA

A escolha do método de inspeção submersa deve considerar um conjunto de fatores técnicos, operacionais e de segurança, dentre os quais se destacam:

- profundidade a ser alcançada;
- altura do nível d’água no período da inspeção;
- visibilidade proporcionada pela água;
- velocidade da correnteza;

- condições do leito do rio;
- presença de materiais flutuantes;
- configuração da infraestrutura e das fundações.

De modo particular, as condições do leito do rio exercem influência significativa sobre o método a ser adotado, podendo apresentar-se com sedimentos finos e instáveis, material muito mole, rochas irregulares ou escorregadias, o que impacta diretamente a segurança dos inspetores e a qualidade do levantamento.

A seguir são apresentados os principais métodos aplicáveis às inspeções submersas, cuja seleção deve observar as condições locais, o nível de detalhamento requerido e os requisitos de segurança.

9.2.1 Inspeções em águas rasas

As inspeções em águas rasas são aplicáveis quando os elementos submersos se encontram em baixa profundidade, permitindo o acesso direto sem a necessidade de equipes ou equipamentos especializados de mergulho.

Essas inspeções podem ser realizadas pela mesma equipe responsável pela inspeção da ponte, utilizando-se de recursos simples, tais como botas de borracha, bastão comprido, resistente e com referências métricas e, eventualmente, pequenos botes ou embarcações de apoio.

Esse método permite a avaliação visual da infraestrutura da ponte, do leito do rio e de possíveis processos erosivos ou socavamentos superficiais, sendo indicado para inspeções preliminares ou para obras em cursos d’água de pequeno porte e baixa profundidade. Ressalta-se que esse tipo de inspeção não deve ser registrado como uma inspeção submersa.

9.2.2 Mergulho autônomo (SCUBA)

Nas inspeções com equipamento de mergulho, os mergulhadores utilizam reservatórios de ar comprimido transportados juntos ao corpo, conhecido como SCUBA – *Self-Contained Underwater Breathing Apparatus* – o que lhes confere mobilidade e autonomia para a execução da inspeção submersa dos elementos da infraestrutura da ponte.

Esse método é usualmente empregado em inspeções realizadas em profundidades da ordem de até 30 m, limite associado a restrições operacionais, fisiológicas e de segurança do mergulho com ar comprimido, conforme práticas consagradas na literatura técnica e em normas de mergulho profissional. Em profundidades superiores, a execução da inspeção por mergulhadores tende a demandar técnicas especiais, aumento significativo de riscos e custos, sendo, nesses casos, recomendável a adoção de veículos subaquáticos não tripulados ou métodos equivalentes.

As inspeções com mergulho autônomo permitem a avaliação visual direta dos elementos submersos, a identificação de anomalias, processos de deterioração, socavamentos, deslocamentos e danos localizados, bem como a realização de registros fotográficos e vídeos, desde que as condições de visibilidade e correnteza sejam compatíveis.

A aplicação desse método deve observar rigorosamente os procedimentos de segurança, os limites operacionais do mergulho, a legislação vigente e as normas técnicas aplicáveis, incluindo o planejamento adequado das atividades, a qualificação da equipe, a disponibilidade de equipamentos de apoio e os planos de contingência para situações de emergência.

9.2.3 Mergulho dependente (suprimento de ar da superfície)

As inspeções com escafandro caracterizam-se pelo suprimento externo do ar a partir da superfície, realizado por meio de mangueiras, o que proporciona maior tempo de permanência submersa, melhor controle das condições de respiração e maior robustez operacional em ambientes desfavoráveis.

Esse método é recomendado em casos de condições adversas, tais como:

- águas poluídas ou contaminadas;
- baixa visibilidade;
- correntezas elevadas, podendo atingir velocidades da ordem de até 4 m/s;
- inspeções de maior duração ou que exijam maior estabilidade operacional do mergulhador.

De forma semelhante às inspeções com equipamento de mergulho, as inspeções com escafandro são usualmente limitadas a profundidades da ordem de até 60 m, em função de restrições operacionais, de segurança e de eficiência.

A execução das inspeções com escafandro deve observar rigorosamente os procedimentos de segurança, o planejamento das atividades, a qualificação da equipe e a legislação vigente, considerando-se as condições ambientais específicas e os riscos associados a cada intervenção.

9.2.4 Inspeção com veículos subaquáticos

O uso de veículos subaquáticos não tripulados em inspeções tem crescido ao longo dos últimos anos, como os ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) e AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*). Esses veículos possuem câmaras, sistemas de iluminação (LEDs), lasers e sensores variados, sendo capazes de operar em grandes profundidades e em ambientes de difícil acesso.

Os veículos subaquáticos podem ser utilizados para:

- inspeções visuais detalhadas;
- levantamentos batimétricos;
- identificação de defeitos e anomalias;
- coleta de amostras;
- apoio a operações de resgate ou monitoramento.

A utilização desses veículos tem como principais vantagens a redução da exposição humana a riscos, a possibilidade de inspeção em regiões inacessíveis ao mergulho, o aumento da frequência e da precisão dos levantamentos, além da redução de custos e do tempo de inspeção, quando comparados a métodos tradicionais de mergulho (Sonaglio, 2017).

9.3 NÍVEIS DE INTENSIDADE DAS INSPEÇÕES SUBMERSAS

Os níveis de intensidade das inspeções submersas adotadas neste Manual baseiam-se em classificações consagradas da Marinha dos Estados Unidos, do FHWA e da indústria offshore, amplamente utilizadas em inspeções de estruturas marítimas, portuárias e de plataformas de petróleo.

Esses níveis refletem graus crescentes de detalhamento, intervenção física e complexidade técnica, sendo definidos conforme o objetivo da inspeção, a criticidade da estrutura e os indícios de deterioração observados. São adotados três níveis de inspeção submersa:

A. **Nível I:** Inspeção visual e tátil.

B. **Nível II:** Inspeção detalhada, com limpeza parcial.

C. **Nível III:** Inspeção altamente detalhada, com ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos.

9.3.1 Inspeção de Nível I

A inspeção submersa de Nível I consiste em uma avaliação tátil e visual, abrangendo descontinuidades e sinais de deterioração significativos em toda a infraestrutura e no leito do rio nas proximidades.

Os elementos inspecionados devem estar, preferencialmente, ao alcance do braço e, eventualmente, pode ser necessário realizar uma limpeza reduzida e superficial. Em alguns casos pode ser necessário utilizar luzes de mão, ou mesmo realizar movimentos de varredura das mãos e braços para cobrir toda a estrutura submersa.

Os dados obtidos permitem:

- obter uma visão geral da infraestrutura;
- confirmar ou corrigir desenhos “*as built*”;
- identificar a necessidade de inspeções de nível superior.

9.3.2 Inspeção de Nível II

A inspeção submersa de Nível II é uma inspeção detalhada, executada por amostragem, com o objetivo de identificar anomalias que possam estar encobertas por incrustações, organismos aquáticos ou sedimentos. A amostragem usual situa-se em torno de 10 % dos elementos submersos.

Realiza-se uma limpeza cuidadosa e localizada das superfícies a serem examinadas. Como a limpeza submersa é uma atividade difícil e demorada, ela deve ser limitada estritamente aos objetivos da inspeção. Em geral, é suficiente limpar:

- regiões próximas ao nível mínimo das águas;
- áreas junto ao fundo;
- regiões intermediárias (meia-altura).

Para fins de referência, recomenda-se:

- Estacas retangulares: limpeza de, pelo menos, três faces.
- Estacas octogonais: limpeza de, no mínimo, seis faces.
- Estacas circulares: limpeza de aproximadamente ¾ do perímetro.
- Estacas tipo “H”: limpeza das faces externas dos flanges e um dos lados da alma.

Em grandes superfícies, como paredes, pilares e encontros, recomenda-se a limpeza de três áreas de 30 x 30 cm em cada face do elemento. Áreas com descontinuidades devem ser examinadas e medidas e a gravidade das anomalias deve ser documentada. É importante selecionar os locais a limpar para ajudar a minimizar qualquer dano potencial à estrutura e atingir locais mais críticos. A Figura 9.1 ilustra um tipo de limpeza de Nível II.

Figura 9.1 Limpeza Nível II

As inspeções em estruturas submersas são realizadas com o auxílio de equipamentos especiais de mergulho, que permitem o acesso do inspetor à estrutura a ser inspecionada (Figura 9.2).

Figura 9.2 Limpeza em estrutura com auxílio de mergulho

9.3.3 Inspeção de Nível III

A inspeção submersa de Nível III é uma inspeção minuciosa, recomendada para estruturas ou elementos em condição crítica, nos quais prevê a necessidade de recuperação significativa ou substituição.

Esse nível envolve:

- limpeza extensiva das superfícies;
- medições detalhadas;
- aplicação de ensaios não destrutivos (END);
- aplicação, quando necessário, de ensaios parcialmente destrutivos.

O uso dessas técnicas concentra-se nas principais áreas estruturais, nas regiões suspeitas ou nos pontos que representem adequadamente o comportamento da ponte como um todo.

9.4 TIPOS DE INSPEÇÃO

As condições que regulam o tipo de inspeção submersa variam de acordo com as características do curso d'água e com a configuração da infraestrutura das pontes. Para uma determinada obra, uma substancial combinação de fatores hidráulicos, ambientais e estruturais pode alterar significativamente os requisitos da inspeção. Consideram-se cinco tipos principais de inspeções submersas:

a) inicial;
b) rotineira
c) extraordinária;
d) especial;
e) intermediária.

Na prática, as inspeções submersas ocorrem com maior frequência nas modalidades rotineira e especial, podendo, entretanto, ser acionadas as demais situações conforme o contexto técnico.

9.4.1 Inspeção inicial

A inspeção inicial constitui a primeira inspeção submersa da ponte e deve ser repetida sempre que houver modificações geométricas ou estruturais relevantes na obra, tais como:

- alargamentos;
- extensões de vãos;
- introdução ou remoção de apoios;
- mudanças de sistema estrutural.

Trata-se de uma inspeção ampla e bem documentada, envolvendo:

- levantamento detalhado das características da infraestrutura;
- registro geométrico e construtivo;
- análise das condições hidráulicas e do potencial de erosão (*scour*).

Normalmente, a inspeção cadastral combina procedimentos de Nível I e Nível II, permitindo identificar anomalias existentes e regiões que possam apresentar problemas futuros.

9.4.2 Inspeção rotineira

A inspeção rotineira é programada e periódica, destinada a acompanhar a evolução das condições físicas e funcionais da infraestrutura submersa.

Seu objetivo principal é verificar:

- alterações em relação à inspeção cadastral ou rotineira anterior;
- surgimento de anomalias;
- manutenção de condições de segurança e funcionalidade.

A periodicidade deve seguir as normas técnicas vigentes. De modo especial, intervalos mais curtos podem ser necessários para infraestruturas com elementos parcialmente deteriorados, situadas em canais de instabilidade ou sujeitas a processos intensos de erosão.

O escopo mínimo recomendado para uma inspeção submersa rotineira é descrito a seguir:

- inicialmente, deve-se efetuar uma inspeção de Nível I (inspeção visual e tátil, com limpeza mínima) em toda a estrutura submersa;
- em seguida, deve-se efetuar uma inspeção de Nível II (inspeção detalhada com limpeza parcial localizada) em pelo menos 10 % dos elementos submersos, previamente selecionados na inspeção de Nível I;
- eventualmente, uma inspeção de Nível III pode ser necessária para a coleta de dados adicionais (Figura 9.3), que permitam uma avaliação estrutural segura.

Figura 9.3 Detalhes de inspeção rotineira de Nível III

9.4.3 Inspeção extraordinária (excepcional)

A inspeção extraordinária é não programada, realizada em resposta a eventos capazes de provocar danos à infraestrutura submersa.

A equipe da inspeção excepcional deve ser dimensionada para ter condições de avaliar a necessidade de adotar medidas de emergência, como a limitação ou mesmo a interrupção do tráfego, bem como indicar as providências mínimas para liberar o tráfego ou a obra.

Ocorrências que podem justificar a necessidade de uma inspeção submersa excepcional são apresentadas a seguir:

- **Enchentes:** elementos de pontes localizados em rios com forte correnteza devem ser inspecionados após as enchentes, para a verificação de possíveis erosões.
- **Choques de embarcações:** em rios navegáveis, imediatamente após o conhecimento do choque de alguma embarcação em elementos estruturais.
- **Acúmulo de matérias flutuantes (balseiros):** apoios intermediários e encontros podem ser afetados por acúmulo de materiais, tanto pelo acréscimo da força da correnteza, como por eventuais erosões provocadas por movimentação desordenada da correnteza.
- **Deterioração e/ou movimentação dos apoios:** algumas anomalias em elementos submersos somente são percebidas quando há reflexos nos trechos emersos, como manifestações de recalques ou movimentos laterais.

9.4.4 Inspeção detalhada

A inspeção especial é detalhada e diagnóstica, normalmente associada a ensaios e procedimentos avançados. Aplica-se quando houver:

- relatórios inconclusivos de uma inspeção rotineira anterior;
- pontes particularmente importantes, cuja perda ou interdição seria desastrosa;
- pontes com sistemas estruturais incomuns que necessitam de monitoramento;
- pontes que já apresentaram deficiências anteriormente;
- pontes que serão reabilitadas, alargadas ou submetidas a maiores cargas;
- condições ambientais particularmente adversas.

Basicamente, a inspeção especial consiste em uma inspeção de Nível II em uma extensa área e uma inspeção de Nível III em áreas específicas.

9.4.5 Inspeção intermediária

A inspeção intermediária é acionada sob demanda, com foco no acompanhamento de anomalias específicas, tais como:

- recalques localizados;
- indícios de erosão;
- deslocamentos anômalos;
- degradação pontual.

9.5 PLANEJAMENTO DE INSPEÇÕES SUBMERSAS

O planejamento adequado é etapa decisiva para garantir segurança, eficiência operacional e qualidade dos dados obtidos nas inspeções submersas.

Na inspeção inicial, normalmente existem incertezas que não se repetem nas inspeções subsequentes, tais como:

- desconhecimento das reais condições dos elementos submersos;
- indefinição do nível de detalhamento necessário na inspeção;
- incerteza quanto aos custos e à duração da operação submersa.

A partir das informações coletadas na inspeção inicial, o planejamento das inspeções seguintes torna-se mais objetivo, permitindo definir com maior precisão:

- o método de inspeção submersa a ser utilizado;
- o nível de intensidade da inspeção (Níveis I, II ou III);
- o tipo de inspeção (rotineira, extraordinária, especial ou intermediária);
- as qualificações e o dimensionamento da equipe de inspeção.

Os inspetores envolvidos em inspeções submersas devem possuir treinamento específico em mergulho profissional, experiência comprovada em inspeção de pontes e pleno conhecimento das normas de segurança aplicáveis. Adicionalmente, devem ser capazes de acessar, permanecer e operar com segurança no local, garantindo a qualidade técnica do levantamento.

Etapas do Planejamento

O planejamento de uma inspeção submersa deve contemplar, no mínimo, as seguintes etapas:

a) Planejamento preliminar

Definição dos objetivos da inspeção, do nível de detalhamento desejado e dos produtos esperados, estabelecendo claramente quais informações serão coletadas.

b) Coleta e análise de dados existentes

Levantamento de desenhos, relatórios, registros de intervenções, histórico de erosões, dados hidrológicos e geotécnicos, e demais documentos que permitam conhecer a tipologia estrutural e as fundações.

c) Análise de perigos

Avaliação prévia do local para identificar riscos potenciais, tais como correntezas elevadas, baixa visibilidade, materiais flutuantes, variações de nível d'água, presença de fauna, contaminação ou restrições de navegação.

d) Plano de operações da inspeção

Documento que deve conter, no mínimo:

- atribuições e responsabilidades da equipe;
- procedimentos operacionais detalhados;
- objetivos específicos da inspeção;
- lista de equipamentos e recursos necessários;
- protocolos de comunicação;
- procedimentos de emergência e resgate;
- revisão dos riscos potenciais.

e) Avaliação de riscos

Processo qualitativo (ou quantitativo, quando aplicável) para avaliar a relação entre as condições do local, as demandas da operação de mergulho e a capacidade da equipe, definindo medidas de mitigação e critérios de interrupção da inspeção.

9.6 ELEMENTOS E UNIDADES DAS INFRAESTRUTURAS

Os elementos de uma ponte completamente ou parcialmente submersos podem ser classificados em quatro grupos: apoios, pilares, encontros e sistemas de proteção. O correto enquadramento do elemento em um destes grupos é importante, pois os procedimentos, os níveis de inspeção e os equipamentos exigidos podem ser diferentes a depender dessa classificação.

9.6.1 Apoios

Apoios são as estruturas compostas de pilares, isolados ou aporticados transversalmente (*bents*), que suportam parcialmente uma ponte por meio de fundação direta ou de estacas. Na inspeção devem ser pesquisadas evidências de danos por colisão (ex.: de embarcações) e a existência de corrosões, perdas de seção (redução de espessura em aço, por corrosão/abrasão) e erosões.

9.6.2 Pilares

Na inspeção das partes submersas dos pilares, além das anomalias já citadas na inspeção dos apoios, deve ser verificada a verticalidade dos pilares. Este elemento tem a função de transportar as cargas da superestrutura para a infraestrutura, podendo ser construídas de aço, madeira, concreto ou outro material. Em todos os materiais, além de distorções e conexões soltas, devem ser observados danos típicos:

- **Em concreto:** fissuras/desplacamentos e armadura exposta.
- **Em aço:** corrosão e perda de seção.
- **Em madeira:** deterioração/ataques biológicos e perda de seção.

9.6.3 Encontros

Os encontros são estruturas normalmente robustas localizadas nas extremidades da ponte. Na inspeção desses, deve-se verificar a ocorrência de erosões, solapamentos, e se estão apoiados diretamente no solo. Atenção especial deve ser dada para a ocorrência de erosão local do leito na região do encontro. Se intensas, podem levar a inclinação/rotação do encontro, principalmente quando não há fundações profundas.

9.6.4 Sistemas de proteção

Em rios navegáveis, os pilares devem estar protegidos de choques de embarcações por meio de sistemas de proteção, como *dolfins* (blocos robustos isolados) e defensas (estruturas flexíveis ou flutuantes). Geralmente, os sistemas de proteção estão parcialmente submersos e devem ser inspecionados quando houver uma inspeção submersa na ponte. A avaliação pode seguir lógica semelhante à inspeção da subestrutura principal, verificando fissuras/desplacamentos em concreto, corrosão em aço e deterioração em madeira, além de danos estruturais por tráfego/maré e sinais de abrasão na linha d’água.

9.7 INVESTIGAÇÕES DE EROSÕES

A investigação de erosões não é tarefa simples e nem sempre a inspeção submersa consegue detectar erosões ocorridas. Isso ocorre porque, geralmente, as inspeções são realizadas em períodos de baixa velocidade das águas, quando já pode ter ocorrido recomposição do fundo (preenchimento do buraco de erosão por sedimentos finos após a cheia), mascarando a profundidade real do buraco de erosão.

Embora a erosão esteja "escondida", a estabilidade da ponte continua comprometida, pois esse material solto não oferece suporte estrutural adequado. Em casos mais graves, as erosões deixam sinais evidentes, como estacas e blocos descobertos, além de fundações diretas e encontros descalçados (sem apoio no solo).

Nas inspeções submersas, para detecção de erosões não muito evidentes:

- Devem ser medidas as profundidades junto às fundações e as alturas de suas partes aparentes a partir do fundo do rio, para comparação com as dimensões indicadas no projeto e inspeções anteriores.
- Devem ser investigadas depressões existentes no fundo do rio, podendo sua eventual recomposição ser detectada pela presença de solos frouxos e soltos. Uma prática útil é avaliar o leito com uma haste metálica: se o material superficial for muito fino e facilmente penetrável, isso pode indicar sedimento recente depositado no buraco de erosão. Quando necessário, amostras (testemunhos) também podem ajudar a diferenciar o material de recomposição do fundo original do buraco de erosão.

9.7.1 Equipamentos de medição

Os equipamentos de medição de erosões podem ser manuais (sondagens com trena e peso, vara/régua graduada e haste de sondagem) ou eletrônicos (métodos sônicos/sonar). Usualmente, esses equipamentos são utilizados em paralelo com as inspeções submersas.

Para registrar a evolução do leito, é recomendável medir perfis transversais do fundo sob a ponte (seção transversal do leito) gerando uma “linha de base” (baseline) para comparação em inspeções futuras. Quando aplicável, pode-se instalar pontos de referência permanentes (marcos) para amarrar as medições e facilitar comparações entre inspeções.

9.7.2 Atividades mínimas das inspeções submersas

As atividades das inspeções submersas devem incluir:

- medição de profundidades, incluindo sondagens de erosão junto aos pilares e ao longo de encontros, preferencialmente seguindo um padrão (grade retangular ou radial) repetível ao longo da vida da ponte;
- coleta e ensaio de amostras para investigação de recomposição do fundo, podendo incluir “prova” com haste metálica;
- detecção de solapamentos e depressões provocadas por erosões, avaliando sinais de perda de apoio do solo e exposição de fundações;
- detecção de buracos profundos e de pequeno diâmetro (erosão localizada) em torno de estacas;
- avaliação da integridade de sistemas de proteção: enrocamentos, *rip-rap*, gabiões, *dolfins* e defensas.

9.8 AVALIAÇÃO DE ANOMALIAS

9.8.1 Estruturas de concreto e alvenaria

O concreto é o material mais utilizado em infraestruturas submersas, seja o concreto simples, o concreto armado convencional ou o concreto armado protendido. Em ambientes aquáticos, a deterioração associada à corrosão de armaduras assume papel central, uma vez que pode comprometer diretamente a segurança estrutural.

As anomalias mais comuns em elementos submersos de concreto incluem:

- fissuração longitudinal, transversal ou inclinada;
- exposição e corrosão de armaduras;
- desagregação superficial (perda de agregados);
- vazios, nichos de concretagem ou segregações;
- manchas de ferrugem e eflorescências;
- erosão e abrasão por partículas transportadas pelo fluxo;
- ataque químico (sulfatos, águas poluídas ou industriais).

Parte dessas anomalias pode ter caráter predominantemente superficial. Entretanto, quando associadas a processos de corrosão das armaduras, podem produzir efeitos cumulativos relevantes, tais como:

- redução da seção resistente do aço;
- perda de aderência aço-concreto;
- delaminações e destacamentos;
- diminuição da capacidade de carga e da durabilidade.

De forma particular, fissuração generalizada, fragmentação do cobrimento e sinais de ataque químico exigem atenção prioritária, pois podem indicar processos de deterioração ativa e progressiva.

9.8.2 Estruturas de aço

Elementos submersos ou localizados na zona de variação de nível d'água apresentam elevada suscetibilidade à corrosão, sobretudo quando expostos a águas salobras, poluídas ou com elevado teor de sedimentos (Figura 9.4).

Durante a inspeção, devem ser avaliados, no mínimo:

- presença e extensão de corrosão uniforme ou localizada (pites);
- perda de espessura e redução de seção;
- integridade de revestimentos protetores;
- oxidação concentrada em ligações, apoios e interfaces;
- deformações, amassamentos ou impactos.

Figura 9.4 Deterioração de estruturas de aço

Sempre que houver suspeita de perda significativa de espessura, recomenda-se o uso de ensaios não destrutivos – em especial o ultrassom – para medir o remanescente de material.

As ligações (parafusadas, rebitadas ou soldadas) devem ser examinadas com atenção especial, verificando:

- corrosão entre chapas;
- falhas de solda;
- afrouxamento ou perda de elementos de fixação;
- formação de trincas por fadiga.

A deterioração não tratada pode evoluir rapidamente na presença de oxigênio, água e agentes agressivos, resultando em perda de capacidade resistente e aumento do risco estrutural.

9.8.3 Recuperações e reforços existentes

Durante a inspeção, deve-se verificar a existência de recuperações ou reforços previamente executados, tanto por meio da análise de projetos e registros históricos quanto pela observação direta em campo. A identificação dessas intervenções é essencial, pois elas podem:

- modificar o comportamento estrutural;
- alterar os mecanismos de deterioração;
- demandar acompanhamento específico.

Entre as soluções de recuperação e reforço mais comuns, destacam-se:

- placas de aço ou chapas de reforço;
- preenchimentos com concreto ou argamassa;
- encamisamentos em concreto ou aço;
- substituição parcial de elementos estruturais;
- recomposição de blocos de alvenaria;
- recuperação de sistemas de proteção e contenção (enrocamentos, *rip-rap*, gabiões);
- reparos e recomposições decorrentes de erosão e socavamento.

Sempre que identificadas intervenções, devem ser avaliados:

- o estado atual do reforço/recuperação;
- a aderência e o desempenho funcional;
- eventuais indícios de falhas, corrosão ou destacamentos;
- compatibilidade com as ações atuantes e condições ambientais.

9.8.4 Registro das inspeções submersas

Dada a complexidade, equipes especializadas envolvidas, alto custo e intervalo de tempo que decorre entre campanhas, as inspeções submersas devem ser documentadas de forma completa, clara e padronizada. Os registros devem ser feitos preferencialmente no próprio local da inspeção e devem incluir:

A. Esquemas e croquis: representação dos elementos inspecionados e localização das anomalias, garantindo rastreabilidade futura.

B. Registro de ocorrências (diário de campo)

Descrição das atividades desenvolvidas, condições ambientais, limitações encontradas e observações relevantes.

C. Registros gravados (áudio/vídeo do mergulhador)

Úteis para contextualizar achados importantes, sobretudo quando a visibilidade é limitada.

D. Fotografias e filmagens subaquáticas

Preferencialmente com referência de escala, orientação e identificação do elemento.

Todos os registros devem compor um relatório técnico, contendo:

- síntese das condições observadas;
- avaliação do estado estrutural;
- identificação de riscos relevantes;
- recomendações de manutenção, reforço ou monitoramento;
- indicação do intervalo máximo recomendado para a próxima inspeção.

9.9 EQUIPAMENTOS DE INSPEÇÃO SUBMERSA

Os equipamentos de inspeção submersa variam conforme o método de acesso e a profundidade e incluem:

- equipamentos de mergulho (autônomo ou dependente);
- comunicação com a superfície (sistema bidirecional de voz/dados);
- equipamentos de acesso (embarcações e dispositivos de posicionamento);
- ferramentas (manuais, mecanizadas e de limpeza);
- equipamentos de testes não destrutivos;
- equipamentos de extração de testemunhos;
- equipamentos de fotografia e vídeo;
- veículos subaquáticos e acessórios.

9.9.1 Equipamentos de mergulho

Nas inspeções com equipamento de mergulho autônomo (respiração com o gás contido em cilindro pressurizado carregado pelo mergulhador), o inspetor opera com maior portabilidade e manobrabilidade, sendo mais indicado para operações de curta duração e em condições ambientais favoráveis. Além do cilindro, o conjunto típico de equipamentos pessoais inclui:

- vestimenta especial (roupa úmida ou seca para proteção térmica);
- máscara facial ou capacete;
- dispositivo de flutuação/controle de flutuabilidade;
- instrumentos de profundidade e pressão;
- dispositivos de aspiração do ar e nadadeiras entre outros.

Nas inspeções de mergulho dependente, com suprimento de ar pela superfície (*surface-supplied diving*), um compressor fornece ar para um tanque de armazenamento, esse ar é filtrado, regulado e segue até o mergulhador por um umbilical (conjunto de mangueiras e cabos que fornecem ar, comunicação e monitoramento de profundidade). Normalmente, o mergulhador utiliza também um capacete de mergulho ou máscara *full-face* (máscara que cobre todo o rosto) para garantir maior tempo de fundo e comunicação contínua. Além disso, por segurança, recomenda-se um tanque de ar reserva para emergências.

Na Figura 9.5 são apresentados detalhes dos equipamentos típicos do mergulho dependente.

(a) (b) (c)

Figura 9.5 Equipamentos típicos para mergulho dependente: (a) painel de controle e monitoramento do mergulho; (b) capacete e sistema de fornecimento de ar para mergulho dependente; (c) conjunto de controle e distribuição de ar comprimido

Fonte: Neto *et al.* (2025)

Por fim, deve-se evitar posicionar a tomada de ar do compressor próxima ao escapamento de motores, para reduzir o risco de contaminação por monóxido de carbono.

9.9.2 Comunicação com a superfície

A comunicação vocal bidirecional é de grande relevância para as inspeções em águas profundas. Os equipamentos utilizados devem possibilitar:

- que o mergulhador faça uma descrição, em tempo real, da anomalia observada, permitindo registro simultâneo pela equipe de apoio na superfície;
- que o mergulhador solicite esclarecimentos à equipe de apoio;
- que a equipe de apoio, acompanhando desenhos e esquemas, verifique a validade das observações e o acerto na localização da anomalia;
- que a equipe de apoio solicite informações mais detalhadas.

9.9.3 Equipamentos de acesso

Nas inspeções submersas de pontes de pequenos comprimentos, o acesso pelas margens normalmente é suficiente. No caso de pontes maiores, o acesso pode ser feito através da própria ponte ou utilizando-se embarcações. Essas devem ter porte adequado para transportar com segurança a equipe e os equipamentos de mergulho, além de serem compatíveis com as condições do corpo d'água.

9.9.4 Ferramentas

As ferramentas devem ser escolhidas conforme a finalidade da inspeção e as condições do local (correnteza, visibilidade e risco de enroscamento). A seguir são apresentados alguns exemplos:

A. **Ferramentas manuais:** réguas graduadas, paquímetros, raspadeiras, lanternas, martelos, escovas de aço, chaves de fenda e pés-de-cabra;

B. **Ferramentas mecanizadas:** perfuratrizes, marteletes, desbastadoras e esmerilhadoras; além disso, podem ser usadas ferramentas pneumáticas e hidráulicas. As primeiras podem gerar bolhas que prejudicam a visibilidade do mergulhador e, em geral, ficam limitadas a profundidades práticas da ordem de 30 a 45 m. As ferramentas hidráulicas tendem a ser preferidas em trabalhos pesados e extensos por não gerarem bolhas.

C. **Ferramentas de limpeza:** as limpezas de pequeno vulto podem ser efetuadas com escovas de aço e desbastadoras, enquanto as de maior vulto devem ser efetuadas com equipamentos como polidoras e esmerilhadoras. Um dos processos mais eficientes de limpeza utiliza jatos d'água, lançados sob alta pressão. Durante a aplicação, deve-se ter cuidado para não enfraquecer a estrutura com uma retirada excessiva de material.

9.9.5 Equipamentos de testes não-destrutivos

Dispositivos de medição que utilizam o ultrassom podem ser usados para medir a espessura de elementos de aço. Existem modelos totalmente submersíveis e modelos em que apenas o transdutor (sensor) e o cabo são levados pelo mergulhador, permanecendo a eletrônica e o visor na superfície.

Para concreto, podem ser utilizados equipamentos ultrassônicos do tipo V-meter (medidor de velocidade de pulso ultrassônico), com dois transdutores, para estimar resistência e identificar descontinuidades. Além disso, um esclerômetro submersível (também conhecido como martelo de Schmidt à prova d'água) pode ser usado em inspeções submersas para avaliar a resistência do concreto à compressão a partir da dureza superficial, por impacto controlado.

9.9.6 Equipamentos de extração de testemunhos

A extração de testemunhos de concreto é um método de avaliação parcialmente destrutivo, cuja utilização deve ficar limitada a áreas críticas e que exige equipamentos pneumáticos ou hidráulicos. Geralmente, os testemunhos têm 5 cm de diâmetro, embora existam brocas para outros diâmetros. Os testemunhos de concreto permitem a avaliação de sua integridade no interior do elemento e podem ser usados na determinação da resistência à compressão. A Figura 9.6 apresenta um equipamento para extração dos testemunhos e detalhes desses após a retirada.

(a) (b)

Figura 9.6 Extração de testemunho em estrutura de concreto submersa: (a) operação de extração realizada por mergulhador; (b) testemunhos de concreto obtidos após a perfuração

Fonte: FHWA (2022)

9.9.7 Equipamentos de fotografia e vídeo

Existe uma grande variedade de câmeras para fotografias submersas, com diferentes tipos de lente e de flash. Geralmente, utilizam-se as lentes grandes angulares, para visualizar e registrar uma área maior. No caso de águas turvas, quando a visibilidade é baixa, usam-se caixas transparentes preenchidas por água limpa, que são encostadas no trecho do elemento a fotografar para deslocar a água turva e permitir que a câmera foque no componente.

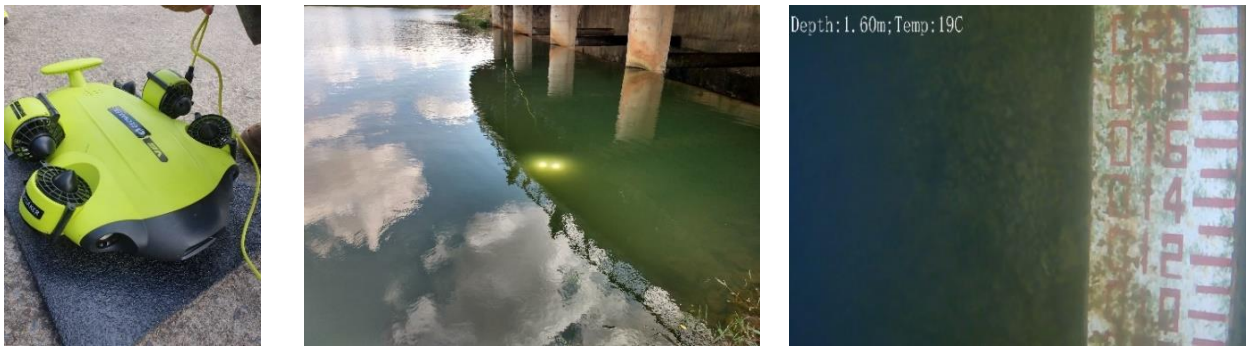
Os equipamentos de vídeo estão disponíveis em unidades completas, que trabalham submersas, ou em unidades interligadas por um cabo de conexão. Nessas unidades o operador da superfície controla o foco, a iluminação e pode comunicar-se com o mergulhador, que apenas conduz a câmera, para melhorar o enquadramento.

Os veículos subaquáticos também possibilitam a captura de fotos e vídeos durante as inspeções submersas.

9.9.8 Veículos subaquáticos e acessórios

Além das câmeras, sensores, LEDs e lasers, os veículos subaquáticos remotamente operados (ROVs), à exemplo do ilustrado na Figura 9.7, podem ser utilizados com diversos acessórios que facilitam a navegação e a coleta de dados, como:

- **Sonares:** fornecem imagens acústicas em águas com reduzida turbidez.
- **DVLs (Doppler *Velocity Logger*):** Sensor que mede a velocidade do veículo em relação ao fundo, auxiliando na navegação e estabilidade.
- **Dispositivos de localização:** sistemas acústicos e integração com GNSS na superfície.
- **Garras mecânicas:** manipuladores para pequenas interações/coletas.



(a) (b) (c)

Figura 9.7 Inspeção de ponte utilizando ROV: (a) veículo subaquático utilizado na inspeção; (b) ROV em operação; (c) imagem capturada pelo ROV mostrando elemento estrutural submerso

Fonte: Neto *et al.* (2025)

⚠ ATENÇÃO!

A efetividade do ROV pode diminuir substancialmente em velocidades de corrente acima de 0,77 m/s (≈ 1,5 nós), e pode ser limitada por água turva, pois isso dificulta determinar a orientação exata da câmera e tende a gerar problemas de controle do veículo devido à correnteza ou ao umbilical (cabo) enroscado.

Vale ressaltar também que o ROV não realiza limpeza antes do registro por imagem, o que pode demandar a descida de um mergulhador. Apesar disso, agiliza o serviço de inspeção ao possibilitar a redução dos pontos de descida do inspetor (quando necessário), normalmente determinados após a visualização das imagens.

9.9.9 Extensão das anomalias

Toda anomalia detectada deve ser localizada, medida e descrita de forma rastreável. Para as inspeções de Nível II ou Nível III, as atividades mínimas incluem:

- localização vertical e horizontal da anomalia em relação a um ponto fixo, de referência;
- delimitação das extremidades e pontos intermediários das fissuras e trincas;
- medição da abertura máxima e, quando possível, da profundidade das fissuras;
- medição do comprimento, da largura e da profundidade das desagregações e dos vazios;
- verificação da espessura dos flanges das estacas metálicas “H”, em trechos duvidosos;
- identificação de empenamentos, saliências ou furos em elementos de aço;
- medição de todas as dimensões necessárias ao reforço de fundações descalçadas;
- avaliação de desaprumos e deslocamentos de elementos estruturais;
- verificação da integridade e continuidade das ligações entre elementos estruturais.

Essas informações subsidiam a classificação da severidade dos danos e o planejamento de intervenções adequadas.

9.10 CONSIDERAÇÕES ESPECIAIS SOBRE INSPEÇÕES SUBMERSAS

Os resultados das inspeções submersas são afetados pelas limitações do ambiente subaquático a que o mergulhador ou veículo subaquático estão sujeitos, como a velocidade da correnteza, a turbidez da água (partículas em suspensão que reduzem a visibilidade) e a mobilidade reduzida.

9.10.1 Correntezas

As inspeções submersas devem ser realizadas, sempre que possível, em períodos de baixa velocidade da correnteza. Velocidades de até 0,5 m/s tendem a permitir o trabalho do mergulhador com pouca interferência. Acima disso, as condições podem se tornar inseguras e demandar cuidados especiais, como o uso de guias (cabos de vida), ou até mesmo inviabilizar uma inspeção adequada.

⚠ ATENÇÃO!

A corrente pode variar em direção e intensidade nas proximidades de obstáculos submersos (ex.: pilares, blocos, estruturas temporárias de contenção/drenagem), devendo ser considerada no planejamento e na execução.

No caso dos veículos subaquáticos, deve-se consultar as velocidades máximas suportadas nos manuais dos equipamentos e as limitações de estabilidade e posicionamento, principalmente em escoamentos turbulentos.

9.10.2 Matérias flutuantes e detritos

Em alguns casos, os balseiros e outros detritos acumulados na infraestrutura e no leito podem atingir espessuras consideráveis, dificultando ou impedindo as inspeções submersas. Quando houver acúmulo significativo, devem ser avaliados:

- a necessidade de remoção para viabilizar uma inspeção que exija o contato mais direto do mergulhador com o elemento estrutural;
- o histórico de recorrência no local;
- os riscos à segurança (enroscamento, aprisionamento e deslocamentos súbitos do material).

É imprescindível o correto planejamento da inspeção para evitar enroscamentos dos veículos subaquáticos e não aumentar os riscos que o mergulhador está sujeito.

9.10.3 Limpeza

Nas pontes situadas em travessias afastadas do ambiente marinho, as infraestruturas geralmente estão livres de incrustação de organismos vivos (como ostras e cracas) e a limpeza pode ser efetuada com simples raspagem, quando necessário.

Em obras situadas em ambiente marinho, a incrustação biológica pode ser tão intensa que chega a atingir centímetros de espessura, dificultando ou impedindo a visualização direta do elemento estrutural. Como a limpeza completa dessas estruturas muito incrustadas pode ser lenta e cara, recomenda-se que ela fique limitada a pequenas áreas, as estruturalmente críticas, as potencialmente críticas e as escolhidas por amostragem.

APÊNDICE A: EVOLUÇÃO DAS PONTES DA MALHA FEDERAL

Historicamente, a implantação das malhas rodoviárias e ferroviárias remonta ao século XIX, ocorrendo inicialmente de maneira localizada e desorganizada. A partir do século XX, houve uma ampliação e integração da malha viária, principalmente para o escoamento de mercadorias e passageiros.

A primeira rodovia no Brasil foi criada em 1861 com a construção da Estrada União Indústria, ligando o interior dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A malha rodoviária federal brasileira foi implementada de fato a partir da década de 1940, simultaneamente ao desenvolvimento das primeiras normas técnicas nacionais de cálculo e execução de estruturas de concreto armado.

A história das estradas de ferro no Brasil começa em 1854, com a construção da Estrada de Ferro Mauá no estado do Rio de Janeiro. A malha ferroviária alcançou seu pico de extensão por volta de 1962, após a criação da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) em 1957, com o objetivo de integrar, sob a mesma administração, os trechos ferroviários pertencentes à União.

Nesse contexto, a infraestrutura viária brasileira passou a incorporar obras de diferentes geometrias, concebidas para distintos regimes de carregamento, dimensionadas e detalhadas conforme variados critérios normativos nacionais e internacionais — muitos dos quais se encontram atualmente obsoletos.

Ao longo desse período, algumas estruturas não receberam intervenções de manutenção, enquanto outras, além de serviços rotineiros, foram restauradas, reforçadas ou mesmo alargadas. Existem ainda pontes que foram substituídas integralmente, bem como estruturas que se tornaram inutilizadas em decorrência de alterações no traçado viário.

Tanto os projetos originais de construção quanto os projetos de manutenção, restauração ou de reforço e alargamento foram desenvolvidos e executados no Brasil por diferentes órgãos administrativos. Convênios entre as esferas federal, estadual e municipal foram frequentemente celebrados nas etapas de projeto e de construção. Além disso, a gestão desses bens sofreu – e ainda sofre – alterações, com transições entre o setor público e empresas privadas em regimes de concessão.

Em função da pluralidade de agentes envolvidos, do tempo decorrido e dos diversos métodos de arquivamento utilizados, nem sempre é possível acessar os documentos de engenharia necessários para o completo conhecimento e caracterização das estruturas,

bem como para o registro do histórico de intervenções. Contudo, essas informações são essenciais e cada vez mais valorizadas para subsidiar ações de gestão e tomada de decisão.

Apesar da dificuldade de consulta aos projetos originais, a partir das características originais das pontes, é possível identificar as normas brasileiras utilizadas no projeto, a época da construção e inferir as possíveis cargas móveis que nortearam o cálculo estrutural. Assim, diversas obras que não tiveram suas características originais alteradas, ou mesmo aquelas que sofreram pequenas modificações, podem ter diversas propriedades identificadas, ajudando na tomada de decisão dos gestores e no desenvolvimento dos projetos de engenharia necessários.

Com essa finalidade, e para registrar a evolução das pontes no país, são apresentados a seguir dois subitens que contêm os históricos das pontes rodoviárias e ferroviárias, documentando as normas desenvolvidas ao longo do tempo, assim como as características da frota e da geometria utilizada.

1 HISTÓRICO DAS PONTES RODOVIÁRIAS

Para as pontes rodoviárias, o registro histórico começa com o surgimento das primeiras normas técnicas brasileiras, ABNT NB-1:1946 e ABNT NB-2:1946. Esse período, que se estende da década de 1950 até os dias atuais, é dividido em várias faixas, conforme as atualizações normativas.

1.1 PONTES PROJETADAS ATÉ 1950

1.1.1 Características gerais

No Quadro AP 1, são apresentadas as características gerais das pontes projetadas até 1950, incluindo a seção transversal, as normas brasileiras vigentes até 1950, os carregamentos e os coeficientes para a consideração da carga móvel adotada em projeto.

Quadro AP 1 Características gerais das pontes projetadas até 1950

Seção transversal	Largura total de 8,30 m, largura de pista de 7,20 m, dois guarda-rodas de 0,55 m, com dois guarda-corpos de 0,15/0,60 m sobre os guarda-rodas.
Normas brasileiras	ABNT NB-1:1946 e ABNT NB-2:1946; Pontes classe 24
Norma rodoviária	ABNT NB-6:1946
Cargas móveis da classe I	Compressor de 24 tf (≈240 kN), tantos caminhões de 9 tf (≈90 kN) quantas forem as faixas de tráfego menos uma, e multidão variável com o vão teórico, basicamente de 450 kgf/m² (≈4,5 kN/m²).
Coeficiente de impacto	φ = 1,3

1.1.2 Seção transversal

A seção transversal típica das pontes projetadas até 1950, bem como um detalhe dessa seção, estão apresentados na Figura AP 1 e Figura AP 2.

Algumas características físicas e geométricas são definidas como:

- pista com largura de duas faixas de tráfego;
- guarda-corpos baixos;
- guarda-rodas ineficazes;
- ausência de pingadeiras;
- drenos igualmente espaçados, inclusive sobre as saias de aterro;
- transversinas ligadas à laje;
- sobrelaje ou pavimentação de grande espessura.

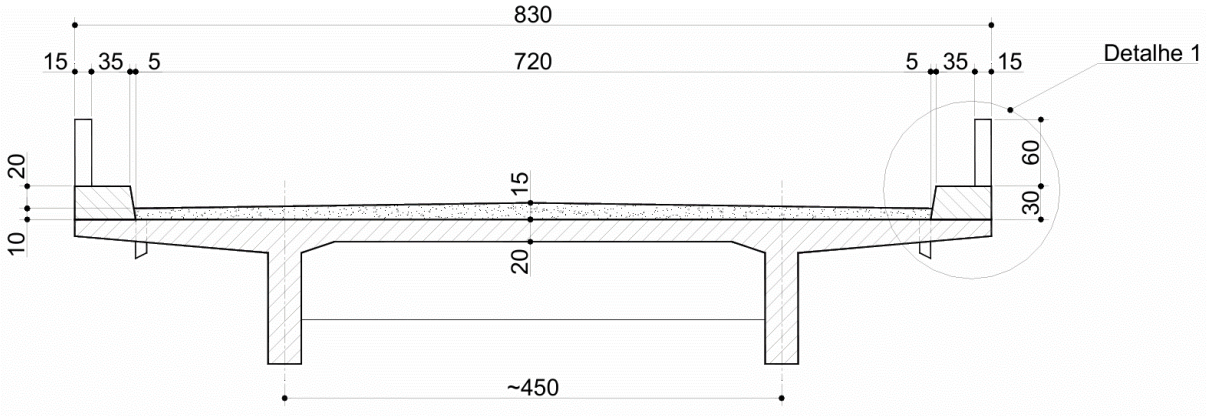


Figura AP 1 **Seção transversal das pontes projetadas até 1950 (medidas em centímetros)**

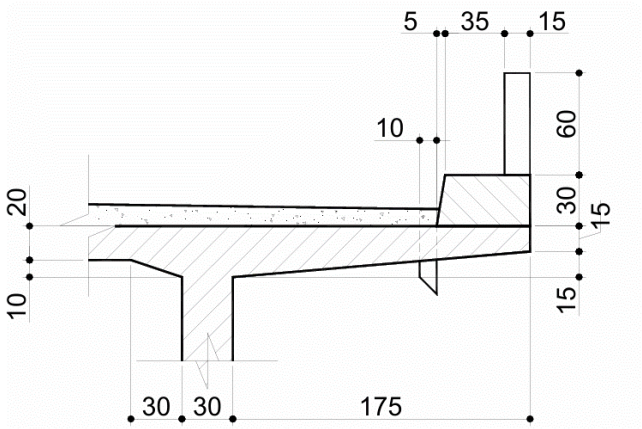


Figura AP 2 **Detalhe 1 da seção transversal para pontes projetadas até 1950 (medidas em centímetros)**

1.1.3 Cargas móveis

A seguir, são apresentadas as características gerais das cargas móveis das pontes classe I, localizadas em estradas-tronco federais e estaduais, ou nas estradas de ligação principal entre esses troncos, conforme ilustrado na Figura AP 3.

Compressor de 24 tf (≈240 kN):

- peso total do compressor: 24 tf;
- peso da roda dianteira: 10 tf;
- peso de uma roda traseira: 7 tf;
- largura da roda dianteira: 100 cm;
- largura de cada roda traseira: 50 cm;
- distância entre os eixos dianteiro e traseiro: 300 cm;
- distância entre os meios das rodas traseiras: 160 cm.

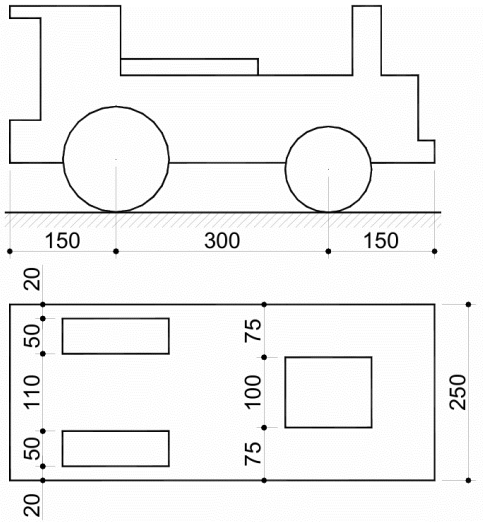


Figura AP 3 **Esquema com as dimensões do trem-tipo até 1950 (medidas em centímetros)**

O esquema para a formação do trem-tipo de cálculo para pontes projetadas até 1950 é ilustrado na Figura AP 4.

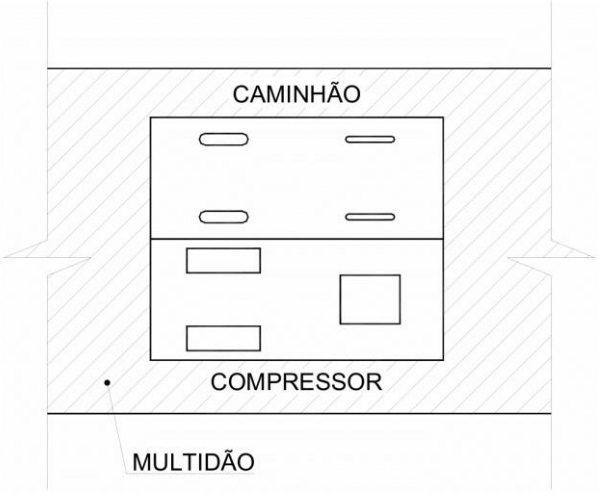


Figura AP 4 **Esquema para a formação do trem-tipo até 1950**

1.2 PONTES PROJETADAS DE 1950 ATÉ 1960

1.2.1 Características gerais

No Quadro AP 2, são apresentadas as características gerais das pontes projetadas de 1950 até 1960, incluindo a seção transversal, as normas brasileiras vigentes no período, os carregamentos e os coeficientes para a consideração da carga móvel adotada em projeto.

Quadro AP 2 Características gerais das pontes projetadas de 1950 a 1960

Seção transversal	Largura total de 8,30 m, largura de pista de 7,20 m, dois guarda-rodas de 0,55 m, com dois guarda-corpos de 0,15/0,60 m sobre os guarda-rodas.
Normas brasileiras	ABNT NB-1:1946 e ABNT NB-2:1946; Pontes classe 24
Norma rodoviária	NPER/1949, normas para projeto de estradas de rodagem
Cargas móveis da classe I	Compressor de 24 tf (≈240 kN), tantos caminhões de 12 tf (≈120 kN) quantas forem as faixas de tráfego menos uma e multidão variável com o vão teórico, basicamente de 500 kgf/m² (≈5,0 kN).
Coeficiente de impacto	φ = 1,3

A seção transversal típica das pontes projetadas no período, bem como um detalhe dessa seção, está apresentada na Figura AP 5 e Figura AP 6.

Algumas características físicas e geométricas são definidas como:

- pista com largura de duas faixas de tráfego;
- guarda-corpos baixos;
- guarda-rodas ineficazes;
- ausência de pingadeiras;
- drenos igualmente espaçados, inclusive sobre as saias de aterro;
- transversinas ligadas à laje;
- sobrelaje ou pavimentação de grande espessura.

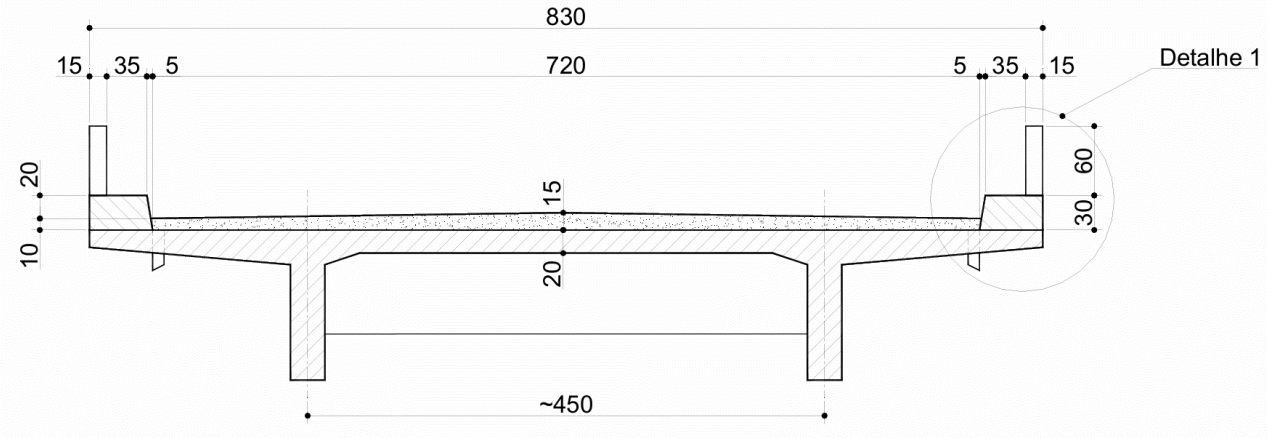


Figura AP 5 Seção transversal das pontes projetadas de 1950 a 1960 (medidas em centímetros)

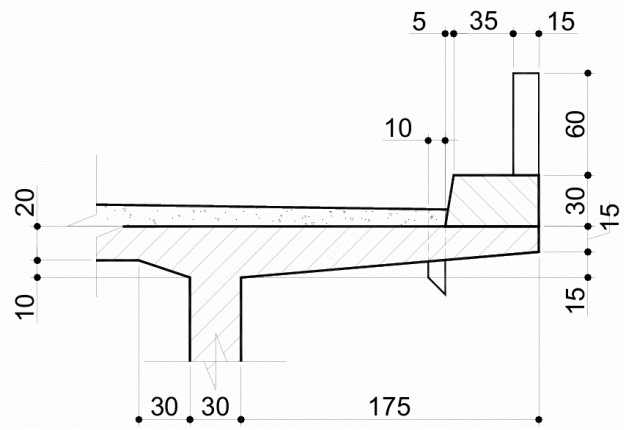


Figura AP 6 Detalhe 1 da seção transversal para pontes projetadas de 1950 a 1960 (medidas em centímetros)

1.2.2 Cargas móveis

Nesta seção, são apresentadas as características gerais das cargas móveis das pontes das classes especial e I, localizadas em estradas-tronco federais e estaduais, ou nas estradas de ligação principal entre esses troncos. Os tópicos a seguir detalham as principais características dos trens-tipo com compressor de 24 tf (Figura AP 7) e de 12 tf (Figura AP 8).

Compressor de 24 tf (≈240 kN):

- peso total do compressor: 24 tf;
- peso da roda dianteira: 10 tf;
- peso de uma roda traseira: 7 tf;
- largura da roda dianteira: 100 cm;
- largura de cada roda traseira: 50 cm;
- distância entre os eixos dianteiro e traseiro: 300 cm;
- distância entre os meios das rodas traseiras: 160 cm.

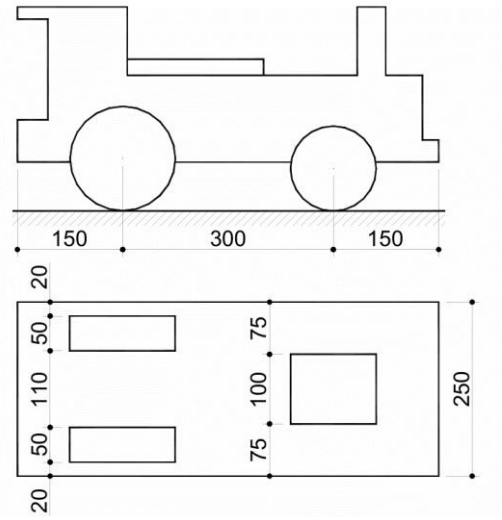


Figura AP 7 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1950 a 1960 para compressor de 24 tf

Compressor de 12 tf (≈120 kN):

- peso total do compressor: 12 tf;
- peso da roda dianteira: 2 tf;
- peso de uma roda traseira: 4 tf;
- largura da roda dianteira: 12 cm;
- largura de cada roda traseira: 24 cm;
- distância entre os eixos dianteiro e traseiro: 300 cm;
- distância entre os meios das rodas traseiras: 160 cm.

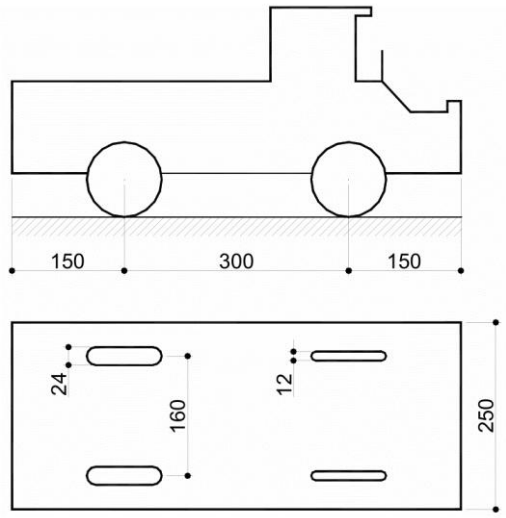


Figura AP 8 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1950 a 1960 para compressor de 12 tf

O esquema para a formação do trem-tipo de cálculo para as pontes projetadas de 1950 a 1960 é apresentado na Figura AP 9.

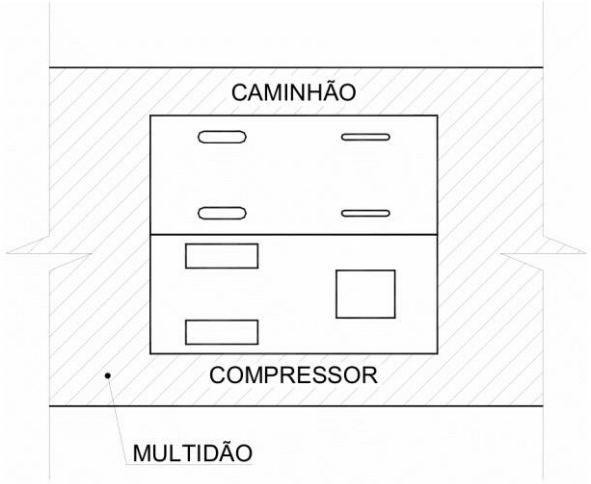


Figura AP 9 Esquema para a formação do trem-tipo de pontes projetadas de 1950 a 1960

1.3 PONTES PROJETADAS DE 1960 A 1975

As pontes projetadas após 1960 seguem as atualizações das normas brasileiras a partir de 1960, conforme indicado no Quadro AP 3.

1.3.1 Características gerais

No Quadro AP 3 são apresentadas as características gerais das pontes projetadas de 1960 a 1975, incluindo a seção transversal, as normas brasileiras, normas rodoviárias e as cargas móveis adotadas em projeto.

Quadro AP 3 Características gerais das pontes projetadas de 1960 a 1975

Seção transversal	Largura total de 10,00 m, largura de pista de 8,20 m, dois guarda-rodas de 0,90 m, com dois guarda-corpos de 0,15/0,90 m sobre os guarda-rodas.
Normas brasileiras	ABNT NB-1:1960, ABNT NB-2:1960 e ABNT NB-6:1960; Pontes classe 36
Cargas móveis	Veículo de 36 tf (≈360 kN), multidão de 0,5 tf/m² (≈5,0 kN/m²) e de 0,3 tf/m² (≈3,0 kN/m²)
Coeficiente de impacto	$\varphi = 1,4 - 0,007\ L$

A seção transversal típica das pontes projetadas entre 1960 e 1975, bem como um detalhe dessa seção, estão apresentados na Figura AP 10 e Figura AP 11.

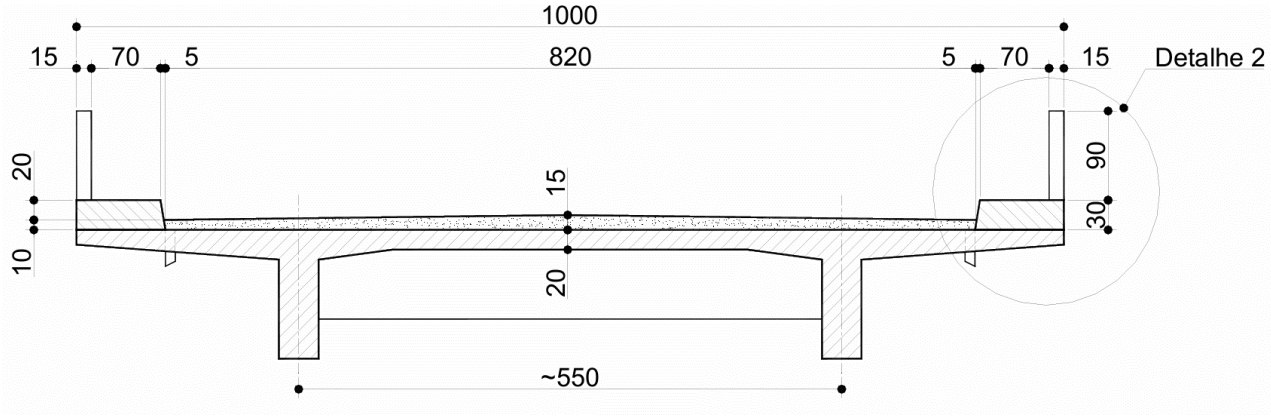


Figura AP 10 **Seção transversal das pontes projetadas de 1960 a 1975 (dimensões em centímetros)**

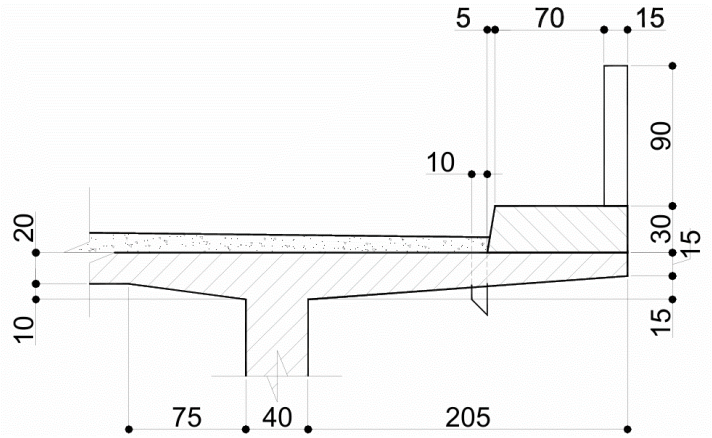


Figura AP 11 **Detalhe 2 da seção transversal para pontes projetadas de 1960 a 1975 (dimensões em centímetros)**

1.3.2 Cargas móveis

Nesta seção, são apresentadas as características gerais das cargas móveis da classe 36, obrigatórias para as rodovias da classe I.

O trem-tipo é composto por: um veículo de 36 tf; multidão de 500 kgf/m² à frente e atrás do veículo; e multidão de 300 kgf/m² no restante da pista e nos passeios, conforme ilustrado na Figura AP 12 e Figura AP 13.

Veículo de 36 tf (≈360 kN):

- quantidade de Eixos: 3;
- peso total do veículo: 36 tf;
- peso da roda dianteira: 6 tf;
- peso de uma roda traseira: 6 tf;
- peso de uma roda intermediária: 6 tf;
- largura de contato de cada roda: 0,45 m;
- comprimento de contato de cada roda: 0,20 m;
- distância entre os eixos: 1,50 m;
- distância entre os centros de rodas de cada eixo: 2,00 m.

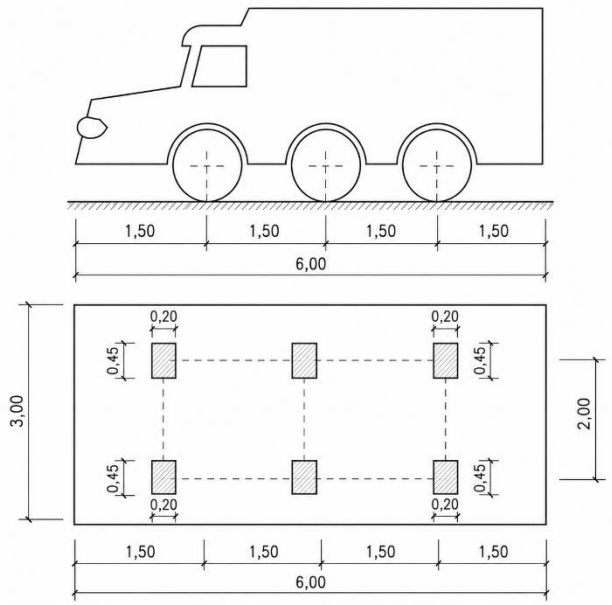


Figura AP 12 Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1960 a 1975 para o compressor de 36 tf

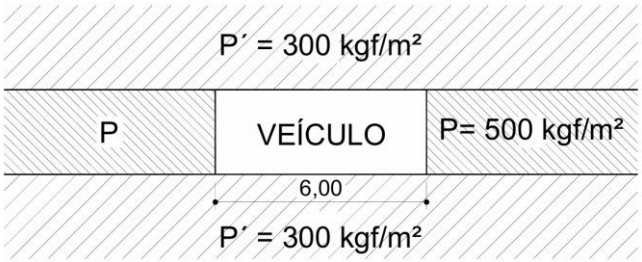


Figura AP 13 Esquema para formação de trem-tipo de 1960 a 1975

1.4 PONTES PROJETADAS DE 1975 A 1985

As pontes projetadas entre 1975 e 1985 apresentam diferenças na seção transversal em função da mudança na tipologia das barreiras, que passam a ser do tipo New Jersey, com largura de 0,40 m (Quadro AP 4).

1.4.1 Características gerais

As pontes deste período possuem tipologias específicas devido à atualização da ABNT NB-1:1978. As demais características permaneceram conforme apresentadas no Quadro AP 4.

Quadro AP 4 Características gerais das pontes projetadas de 1975 a 1985

Seção transversal	Largura total ≥ 10,80 m e largura de pista ≥ 10,00 m e duas barreiras do tipo New Jersey, de 0,40 m.
Normas brasileiras	ABNT NB-1:1978, ABNT NB-2:1960 e ABNT NB-6:1960; Pontes classe 36
Cargas móveis	Veículo de 36 tf (≈360 kN) e multidão de 0,5 tf/m² (≈5,0 kN/m²) e de 0,3 tf/m² (≈3,0 kN/m²)
Coeficiente de impacto	φ = 1,4 – 0,007 L

A seção transversal típica das pontes projetadas entre 1975 e 1985, bem como um detalhe dessa seção, estão apresentados na Figura AP 14 e Figura AP 15.

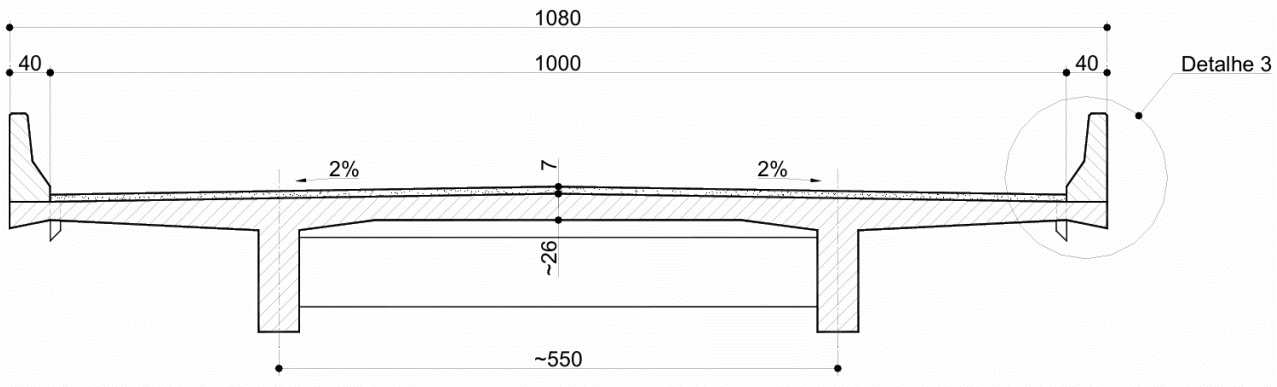


Figura AP 14 Seção transversal das pontes projetadas de 1975 a 1985 (dimensões em centímetros)

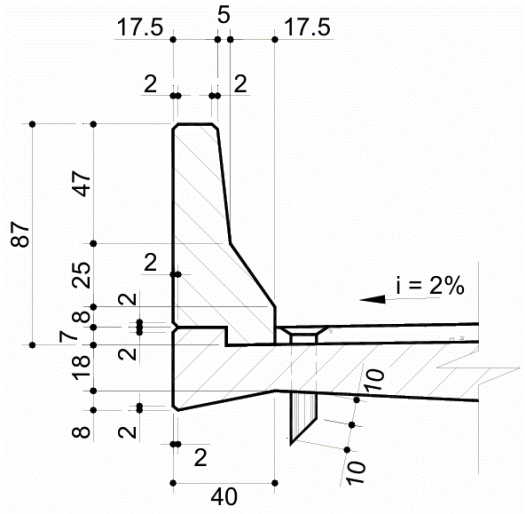


Figura AP 15 **Detalhe 3 da seção transversal para pontes projetadas de 1975 a 1985 (dimensões em centímetros)**

1.4.2 Cargas móveis

O trem-tipo é composto por um veículo de 36 tf (≈360 kN); multidão de 500 kgf/m² (≈5,0 kN/m²) na pista; e multidão de 300 kgf/m² (≈3,0 kN/m²) nos passeios, conforme ilustrado na Figura AP 16.

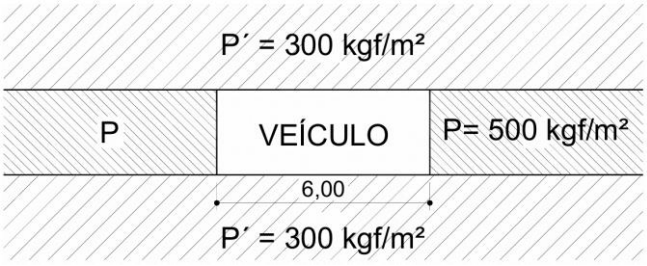


Figura AP 16 **Esquema para formação de trem-tipo de 1975 a 1985**

1.5 PONTES PROJETADAS DE 1985 A 2013

As pontes projetadas entre 1985 e 2013 apresentam uma largura total de 12,80 m, diferente das obras projetadas antes de 1985. Outra atualização importante é a consideração do trem-tipo de 45 tf (≈450 kN), conforme mostrado no Quadro AP 5.

1.5.1 Características gerais

De acordo com o IPR 698 – Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais (DNIT, 1996), as características gerais das pontes projetadas de 1985 a 2013 são as apresentadas no Quadro AP 5. É importante ressaltar que a largura total da ponte pode variar de acordo com o tipo de via em que está inserida.

Quadro AP 5 Características gerais das pontes projetadas de 1985 a 2013

Seção transversal	Largura total de 12,80 m, largura de pista de 12,00 m e duas barreiras tipo New Jersey de 0,40 m.
Normas brasileiras	ABNT NB-1:1978, ABNT NB-2:1987, ABNT NB-6:1982 e ABNT NBR 7188:1984
Cargas móveis	Veículo de 45 tf (≈450 kN) e multidão de 0,5 tf/m² (≈5,0 kN/m²) e de 0,3 tf/m² (≈3,0 kN/m²)
Coeficiente de impacto	$\varphi = 1,4 - 0,007\ L$

1.5.2 Seção transversal

A seção transversal das pontes projetadas entre 1985 e 2013 apresenta uma largura total mínima de 12,80 m, e a pista de rolamento inclui os acostamentos, conforme ilustrado na Figura AP 17.

A seguir, estão algumas características das pontes projetadas entre 1985 e 2013, junto com a ilustração do Detalhe 3 da seção transversal (Figura AP 18), cuja representação é apresentada na Figura AP 17:

- largura da pista com incorporação integral de acostamentos;
- barreiras do tipo New Jersey, com pingadeiras;
- laje com declividades e sobrelaje de pequena espessura;
- drenos evitando saias de aterro;
- transversinas desligadas da laje.

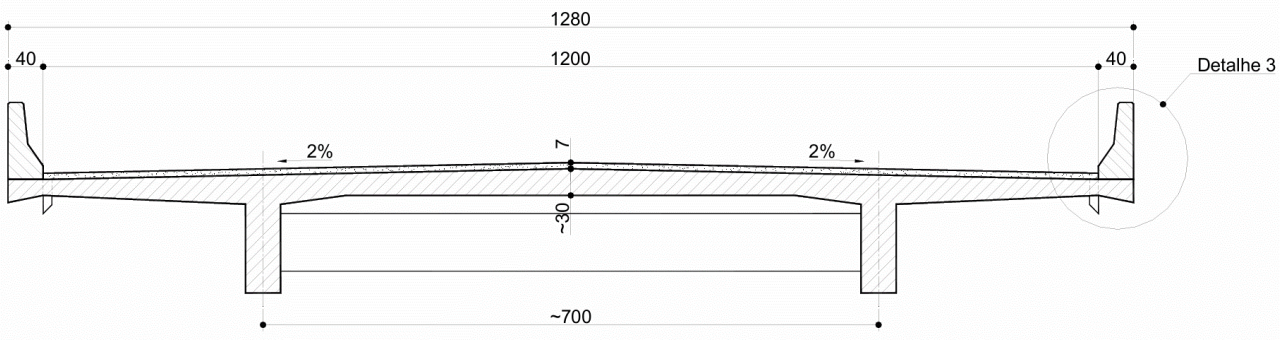


Figura AP 17 **Seção transversal das pontes projetadas de 1985 a 2013 (medidas em centímetros)**

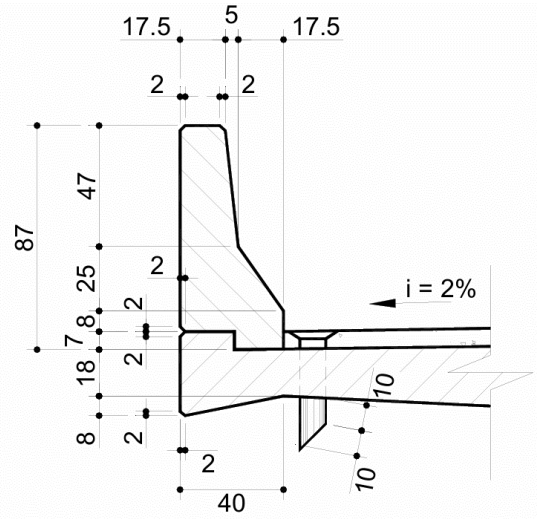


Figura AP 18 **Detalhe 3 da seção transversal para pontes projetadas de 1985 a 2013 (medidas em centímetros)**

1.5.3 Cargas móveis

Nesta seção, são apresentadas as características gerais das cargas móveis da classe 45, obrigatórias para as rodovias da lasse I.

O trem-tipo é composto por: um veículo de 45 tf; multidão de 500 kgf/m² à frente e atrás do veículo; e multidão de 300 kgf/m² no restante da pista e nos passeios, conforme ilustrado na Figura AP 19.

Veículo de 45 tf (≈450 kN):

- quantidade de Eixos: 3;
- peso total do veículo: 45 tf;

- peso da roda dianteira: 6 tf;
- peso de uma roda traseira: 6 tf;
- peso de uma roda intermediária: 6 tf;
- largura de contato de cada roda: 0,5 m;
- comprimento de contato de cada roda: 0,20 m;
- distância entre os eixos: 1,50 m;
- distância entre os centros de rodas de cada eixo: 2,00 m.

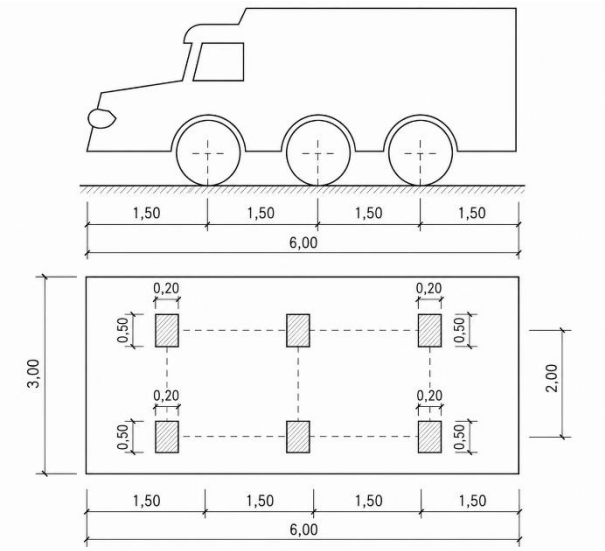


Figura AP 19Representação das cargas móveis das pontes projetadas de 1985 a 2013 para o compressor de 45 tf

1.6 PONTES PROJETADAS DE 2013 ATÉ O PRESENTE

As pontes projetadas a partir de 2013 passaram a seguir as disposições da ABNT NBR 7188:2013, mantendo as principais características geométricas e de carregamento adotadas anteriormente, como largura total de 12,80 m e trem-tipo de 45 tf (≈450 kN).

A principal alteração introduzida nessa revisão normativa refere-se ao tratamento dos efeitos dinâmicos das cargas móveis. O antigo coeficiente de impacto, calculado pela expressão φ = 1,4 – 0,007 L, deixou de ser utilizado, sendo substituído por um coeficiente de ponderação de ações móveis, obtido pelo produto do coeficiente de impacto vertical (CIV), do número de faixas (CNF) e de impacto adicional (CIA), conforme mostrado no Quadro AP 6.

Quadro AP 6 Características gerais das pontes projetadas de 2013 até o presente

Seção transversal	Largura total de 12,80 m, largura de pista de 12,00 m e duas barreiras tipo New Jersey de 0,40 m.
Normas brasileiras	ABNT NBR 7188:2013, ABNT NBR 7188:2024
Cargas móveis	Veículo de 45 tf (≈450 kN) e multidão de 0,5 tf/m² (≈5,0 kN/m²) e de 0,3 tf/m² (≈3,0 kN/m²)
Coeficiente de ponderação	CIV x CNF x CIA

1.7 RESUMO

O Quadro AP 7 apresenta um resumo das informações deste capítulo, na qual pode-se observar a evolução das características das pontes projetadas ao longo dos anos no Brasil, considerando as dimensões mínimas para pista simples no caso das larguras.

Quadro AP 7 Resumo das características gerais das pontes rodoviárias projetadas em diferentes períodos

Características gerais		**Ano de projeto das pontes**					
		Até 1950	1950 a 1960	1960 a 1975	1975 a 1985	1985 a 2013	2013 até hoje
Largura total (m)		8,30	8,30	10,00	≥ 10,80	12,80	12,80
Largura de pista (m)		7,20	7,20	8,20	≥ 10,00	12,00	12,00
Barreira de proteção	Guarda-rodas (m)	0,55	0,55	0,90	-	-	-
	Guarda-corpos sobre os guarda-rodas (m)	0,15/ 0,60	0,15/0,60	0,15/0,90	-	-	-
	New Jersey (m)	-	-	-	0,40	0,40	0,40
Carga móvel do trem-tipo	Compressor (tf)	24	24	-	-	-	-
	Caminhões (tf)	9	12	-	-	-	-
	Veículo (tf)	-	-	36	36	45	45
	Multidão (tf/m²) Pista e passeio	Variável com o vão teórico	Variável com o vão teórico	0,5 e 0,3	0,5 e 0,3	0,5 e 0,3	0,5 e 0,3
Coeficiente de impacto (φ)		1,3	1,3	1,4 – 0,007L	1,4 – 0,007L	1,4 – 0,007L	CIV x CNF x CIA*

* CIV - Coeficiente de impacto vertical; CNF - Coeficiente de número de faixas; CIA - Coeficiente de impacto adicional.

Características gerais	Ano de projeto das pontes					
	Até 1950	1950 a 1960	1960 a 1975	1975 a 1985	1985 a 2013	2013 até hoje

Nota Geral: As dimensões de seção transversal apresentadas neste quadro correspondem às tipologias estruturais de referência e podem divergir em casos específicos, como pontes com sentido único de tráfego e múltiplas faixas de rolamento. Cabe ao inspetor avaliar criticamente a configuração geométrica da estrutura para subsidiar a inferência da idade presumida da obra.

2 HISTÓRICO DAS CARGAS MÓVEIS PARA PONTES FERROVIÁRIAS

No Brasil, o histórico das cargas móveis para pontes ferroviárias começa com a norma técnica ABNT NB7:1943. Em seguida, as estruturas passaram a ser dimensionadas com base nas normas: ABNT NBR 7189:1985, válida até 2015 e sem substituição; EN 1991-2 (*European Standard: Eurocode* 1); e AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*), que apresenta o modelo de carga Cooper E80.

Outro trem-tipo especial foi o utilizado na Ferrovia do Aço pela ENGEFER, subsidiária da Rede Ferroviária Federal, responsável por administrar a construção dessa ferrovia.

2.1 CARGAS MÓVEIS CONFORME A ABNT NB7:1943

A ABNT NB7:1943 foi válida até a criação da ABNT NBR 7189:1985. A ABNT NB7:1943 definia quatro trens-tipo para a aplicação da carga móvel em obras ferroviárias: TB-32, TB-27, TB-20 e TB-16, conforme mostrado no Quadro AP 8.

Quadro AP 8 Trens-tipo conforme a ABNT NB7:1943

Trem-tipo	Carga por eixo (tf)			Carga distribuída (tf/m)
	P_1	P_2	P_3	P_1
TB-32	32	16	21	10
TB-27	27	14	18	9
TB-20	20	10	15	6
TB-16	16	8	11	5

Em obras novas, a escolha do trem-tipo era feita conforme o tipo da linha:

Linhas tronco e ligações principais

O trem-tipo TB-32 deveria ser utilizado nas linhas de bitola larga (1,60 m) e o TB-20 nas linhas de bitola métrica. O uso do TB-27 poderia ser utilizado nas linhas de bitola larga, para vigas apoiadas de até 15 m e de fácil substituição. Nas linhas de bitola métrica com tráfego muito pesado, como o de trens de minério, as cargas deviam ser aumentadas em pelo menos 25 %.

Linhas subsidiárias principais

O trem-tipo TB-27 deveria ser utilizado nas linhas de bitola larga, e o TB16 nas linhas de bitola métrica.

Linhas subsidiárias secundárias

As obras novas poderiam ser calculadas considerando o trem-tipo correspondente à locomotiva mais pesada em operação.

Para o reforço de obras existentes, deveria ser adotado o trem tipo correspondente ao caso de obras novas, sendo permitida uma redução das cargas de até 20 %, no máximo. A distribuição de cargas conforme disposto na ABNT NB7:1943 é ilustrada na Figura AP 20.

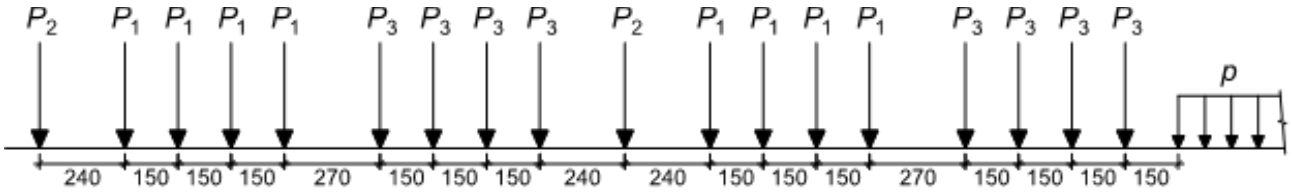


Figura AP 20 Cargas dos trens-tipo e características geométricas conforme a ABNT

2.2 CARGAS MÓVEIS CONFORME A ABNT NBR 7189:1985

2.2.1 Versão de 1985

A ABNT NBR 7189:1985, válida até 2015, estabelecia quatro trens-tipo para a aplicação da carga móvel em obras ferroviárias: TB-360, TB 270, TB-240 e TB-170, conforme descrito a seguir:

- TB-360: para ferrovias que transportam minério de ferro ou outros carregamentos semelhantes;
- TB-270: para ferrovias que transportam carga geral;
- TB-240: usado somente na verificação de estabilidade e no projeto de reforço de obras existentes;
- TB-170: para vias que transportam exclusivamente passageiros, em regiões metropolitanas ou suburbanas.

No Quadro AP 9 e na Figura AP 21 são apresentadas as características geométricas, as cargas dos trens-tipo por eixo, Q, e as cargas distribuídas na via, q e q', que representam os vagões carregados e descarregados, respectivamente.

Quadro AP 9 Trens-tipo conforme a ABNT NBR 7189:1985

Trem-tipo	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
360	360	120	20	1,0	2,0	2,0
270	270	90	15	1,0	2,0	2,0
240	240	80	15	1,0	2,0	2,0
170	170	25	15	11,0	2,5	5,0

A distribuição de cargas conforme o modelo do trem-tipo da ABNT NBR 7189:1985 é ilustrada na Figura AP 21.

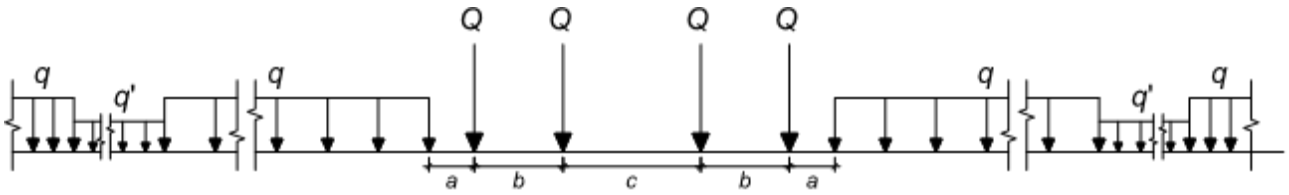


Figura AP 21 Cargas dos trens-tipo e características geométricas conforme a ABNT NBR 7189:1985

De acordo com a ABNT NBR 7187:2003, o efeito dinâmico para cargas móveis ferroviárias é obtido pela multiplicação do fator de impacto (ϕ) pelas cargas quase-estáticas, através da Equação 1.

$$\phi = 0{,}001\left(1600 - 60\sqrt{L} + 2{,}25L\right) \geq 1{,}2 \qquad (1)$$

Onde L é o comprimento, expresso em metros (m).

2.2.2 VERSÃO ATUALIZADA

A nova versão da ABNT NBR 7189 apresenta as ações causadas pelo tráfego ferroviário em pontes, viadutos e outras estruturas, além de considerações sobre estruturas existentes.

Para verificar o estado limite último em novas obras, são definidos quatro trens-tipo (ABNT, 2025):

- TB-416: para ferrovias de bitola larga, usadas no transporte de minério e carga geral, com peso máximo operacional de 360 kN por eixo.
- TB-376: para ferrovias de bitola larga, usadas no transporte de minério e carga geral, com peso máximo operacional de 325 kN por eixo.
- TB-312 a 376: para ferrovias de bitola métrica, usadas no transporte de minério e carga geral, com peso máximo operacional variando de 270 kN a 325 kN por eixo.
- TB-175: para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros em áreas metropolitanas ou suburbanas.

A configuração geométrica desses trens-tipos é semelhante à apresentada na Figura AP 19 com as magnitudes das cargas e as distâncias indicadas no Quadro AP 10.

Quadro AP 10 Trens-tipo conforme a atualização da ABNT NBR 7189

Trem-tipo	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
TB-416	416	168	28	2,2	2,0	2,0
TB-376	376	152	28	2,2	2,0	2,0
TB-312 a 376[a]	376.α	152.α	19	2,2	2,0	2,0

Nos TB-312 a 376, a carga por eixo (Q) e as cargas distribuídas na via, simulando vagões carregados (q), são calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$Q = \frac{Peso\ máximo\ operacional\ por\ eixo\ [kN]}{325}$$

O coeficiente de impacto vertical para novas estruturas (CIV) é calculado com base no vão teórico (L), em metros:

- Para elementos com vão até 3,0 m:

$$CIV = 1{,}67 \quad (2)$$

- Para elementos com vão entre 3,0 m e 9,0 m:

$$CIV = 1{,}7804 - 0{,}0378L \quad (3)$$

- Para vãos entre 9,0 m e 120,0 m:

$$CIV = 0{,}001 * (1600 - 60\sqrt{L} + 2{,}25L) \quad (4)$$

De acordo com o projeto de revisão da ABNT NBR 7189, no caso de duas vias, as cargas móveis devem ser aumentadas pelo coeficiente de impacto vertical e pelo efeito de balanço da composição ferroviária nas duas vias. Para três ou mais vias, essa majoração é feita apenas em duas vias; nas demais, adota-se a carga móvel sem o acréscimo dos coeficientes de ponderação das cargas verticais.

No caso da avaliação de estruturas existentes, “a entidade responsável pela via pode optar pela utilização de seu trem-tipo padrão operacional” para obter as solicitações na estrutura (ABNT NBR 7189). No caso de reforço estrutural, deve-se considerar, no mínimo, um dos trens-tipos para estruturas novas. Além disso, o projeto de revisão da ABNT NBR 7189 também apresenta um procedimento para determinar o coeficiente de impacto vertical para as estruturas existentes, que depende da velocidade máxima permitida no trecho, da primeira frequência natural de flexão da estrutura e do comprimento do vão.

2.3 CARGAS MÓVEIS CONFORME A EN 1991-2

A norma europeia EN 1991-2 regula os principais aspectos usados no dimensionamento de pontes e viadutos ferroviários.

Na análise estática, quatro modelos de carga são utilizados: os modelos LM71 e SW/0 (pontes contínuas), que representam o tráfego ferroviário normal; o modelo SW/2, para o tráfego ferroviário pesado; e o modelo de trem descarregado, *Unloaded Train*.

O modelo LM71 representa o efeito estático do carregamento e é utilizado na verificação estrutural em termos de resistência, equilíbrio estático e fadiga, além da verificação da estabilidade da via e do conforto dos passageiros (Melo, 2016), como ilustrado na Figura AP 22, em que $P = 250$ kN e $p = 80$ kN/m.

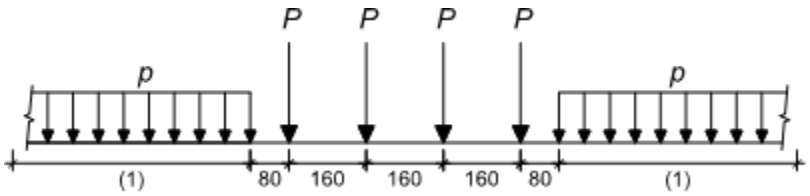


Figura AP 22 Modelo de carga LM71

Fonte: EN1991-2:2003

Os modelos SW/0 e SW/2 são alternativas ao modelo LM71 em situações específicas, conforme as características e o esquema de carga apresentados no Quadro AP 11 e na Figura AP 23.

Quadro AP 11 Características dos modelos de carga SW/0 e SW/2

Modelo de carga	q_{vk} (kN/m)	a (m)	c (m)
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Fonte: EN 1991- 2:2003

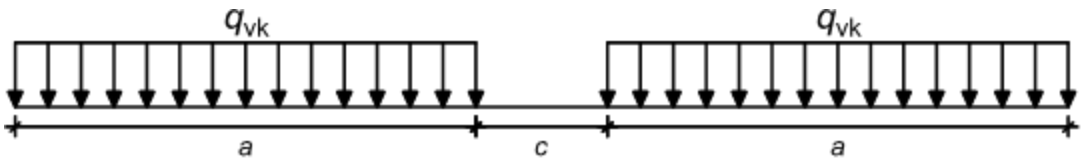


Figura AP 23 Modelos de carga SW/0 e SW/2

Fonte: EN 1991-2:2003

O modelo de trem descarregado (*unloaded train*) é composto por uma carga vertical distribuída de maneira uniforme, com valor característico de 10 kN/m (EN 19912, 2003).

2.4 CARGAS MÓVEIS CONFORME A NORMA AREMA

O modelo Cooper E80, definido pela norma AREMA, é amplamente utilizado em projetos ferroviários no Brasil, como no dimensionamento das pontes ferroviárias administradas pela companhia VALE (Melo, 2016). As características geométricas e as cargas por eixo do modelo Cooper E80 são ilustradas na Figura AP 24. Ao converter as cargas e as distâncias do sistema imperial — utilizado pela AREMA — para o internacional, os valores aproximados encontrados são: as cargas $P1$ = 180 kN, $P2$ = 360 kN, $P3$ = 235 kN e p = 120 kN/m, e as distâncias entre eixos a = 244 cm, b = 152 cm, c = 274 cm e d = 183 cm.

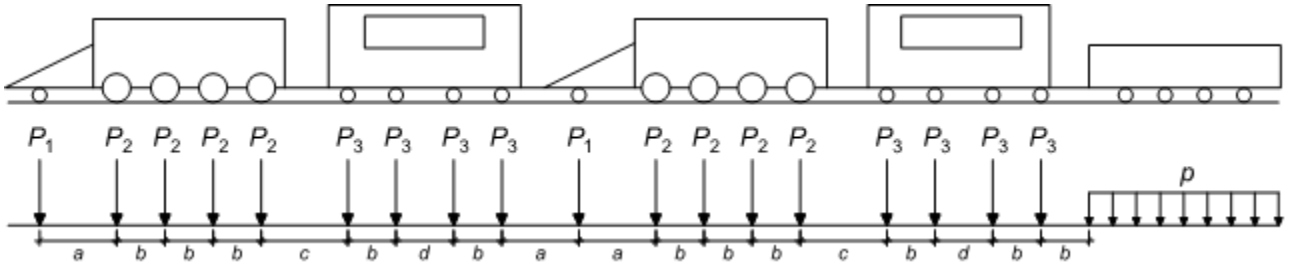


Figura AP 24 Modelo de carga Cooper E80

Fonte: Adaptada de Melo (2016) e da AREMA (2015)

As cargas são aplicadas conforme o número de vias:

- duas vias: a carga móvel deve ser aplicada em ambas;
- três vias: a carga móvel completa deve ser aplicada em duas vias, e metade na terceira;
- quatro vias: a carga móvel completa deve ser aplicada em duas vias, metade na terceira e um quarto na última;
- mais de quatro vias: a aplicação é feita com base no critério e experiência do engenheiro, que precisa buscar as combinações que resultem nas solicitações máximas na estrutura.

A AREMA (2015) apresenta coeficientes de impacto baseados no comprimento do vão. Para vagões de carga e de passageiros e locomotivas que não sejam a vapor, as expressões para o coeficiente de impacto são:

- Para vãos menores que 24,40 m (80 pés):

$$\phi = 1 + 0{,}01\left[40 - \frac{3L^2}{3600}\right] \quad (5)$$

- Para vãos iguais ou maiores a 24,40 m (80 pés):

$$\phi = 1 + 0{,}01\left[16 + \frac{600}{L - 300}\right] \quad (6)$$

Onde L é o comprimento do vão teórico da ponte, expresso em pés (ft).

2.5 CARGAS MÓVEIS CONFORME A ENGEFER

A ENGEFER – Engenharia Ferroviária S. A. – foi uma empresa criada a partir da RFFSA com o objetivo de estudar, projetar, construir e fiscalizar os projetos ferroviários definidos pelo Ministério dos Transportes.

Um exemplo de empreendimento foi a Ferrovia do Aço, cuja construção começou em 1975 e a inauguração ocorreu em 1989. A distribuição de cargas do trem-tipo utilizado pela ENGEFER é mostrada na Figura AP 25, em que $P = 36$ tf (≈ 360 kN) e $p = 14$ tf/m (≈140 Kn/M).

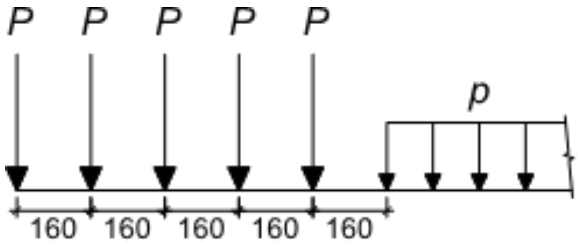
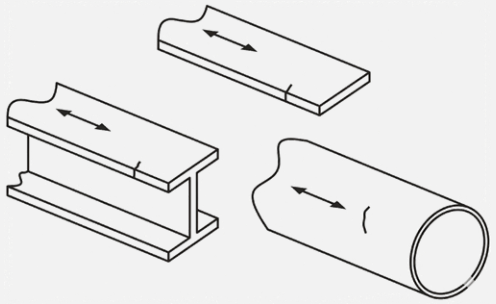
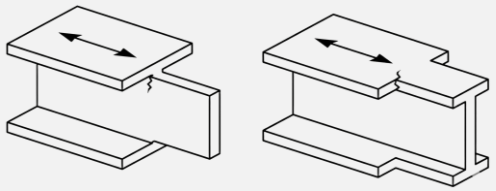
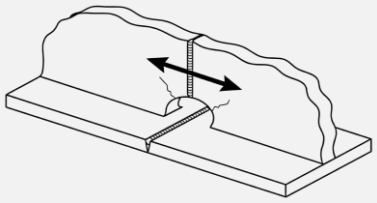
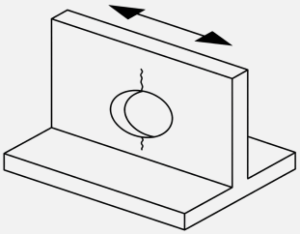
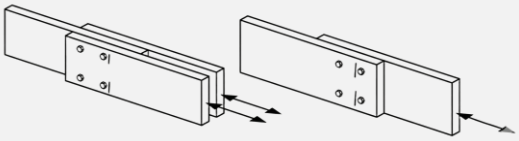


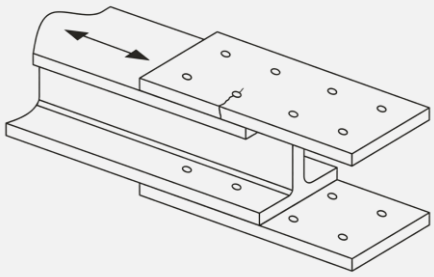
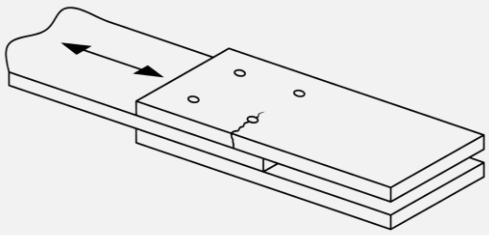
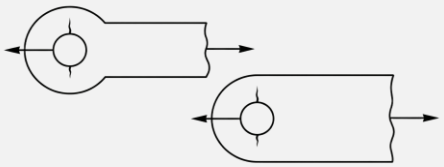
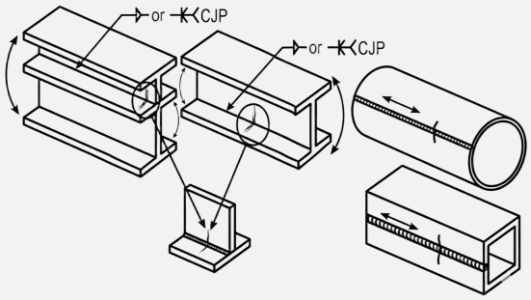
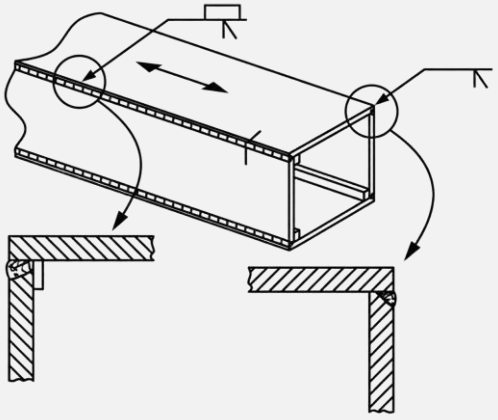
Figura AP 25 Distribuição de cargas utilizada pela ENGEFER

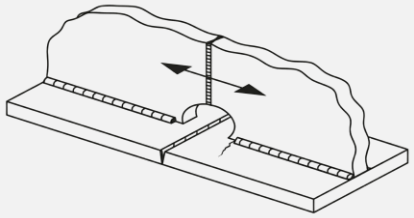
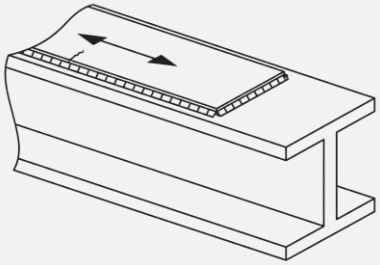
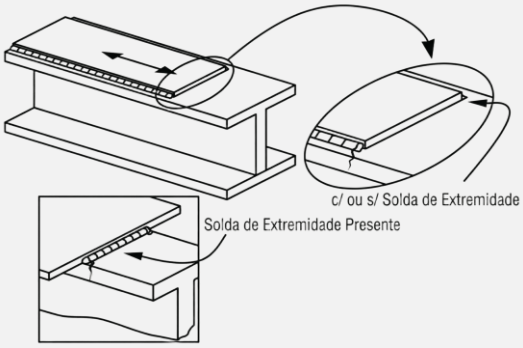
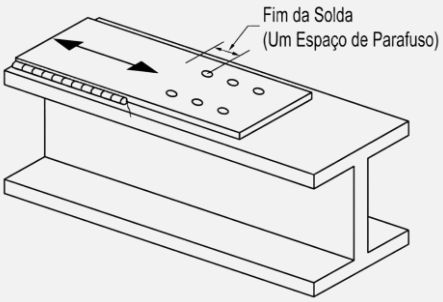
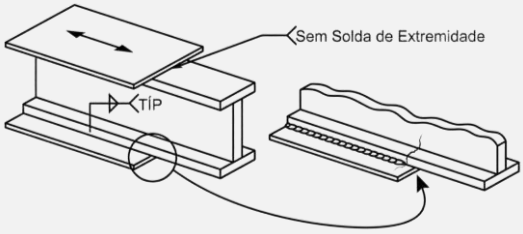
Fonte: Pfeil (1979)

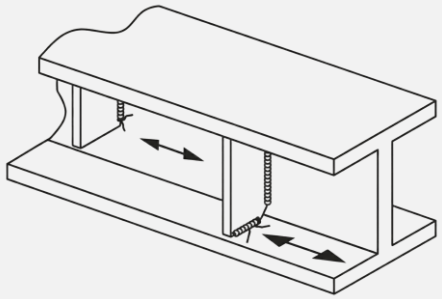
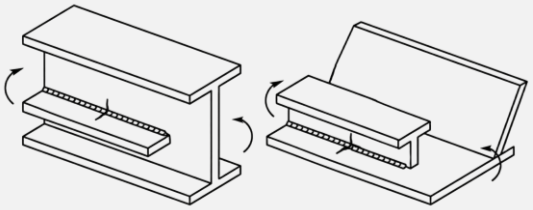
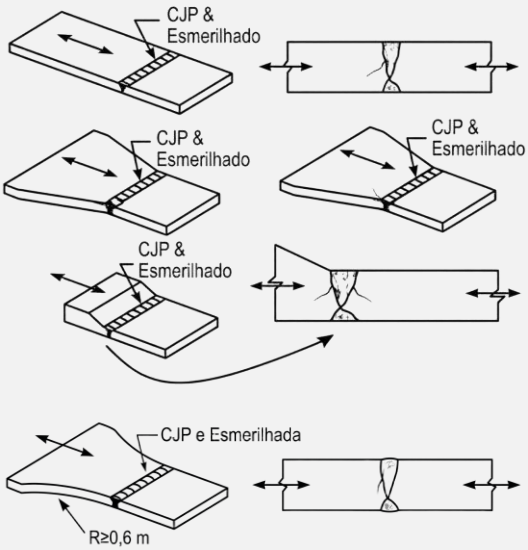
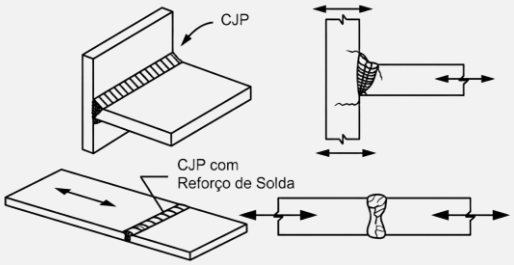
ANEXO A: DETALHES CRÍTICOS DE FADIGA EM ELEMENTOS DE AÇO

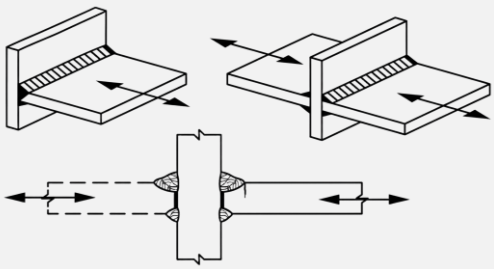
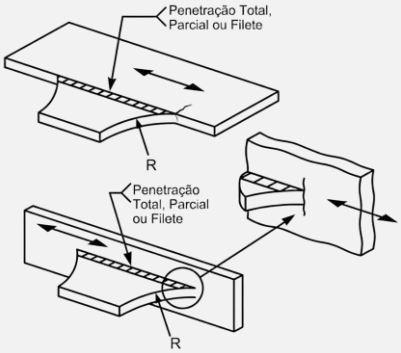
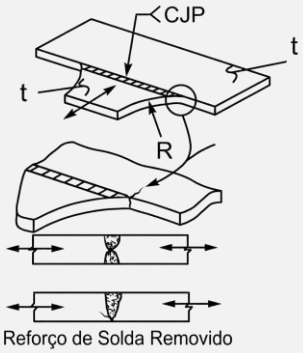
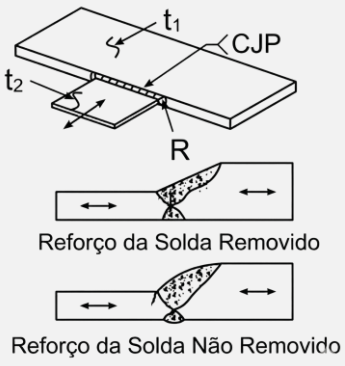
Quadro AN 1 Detalhes críticos de fadiga em elementos de aço

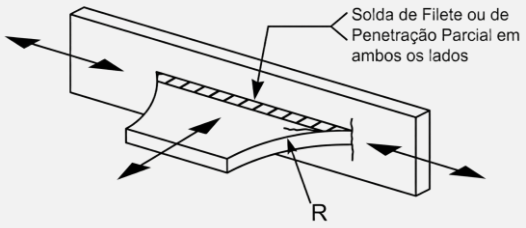
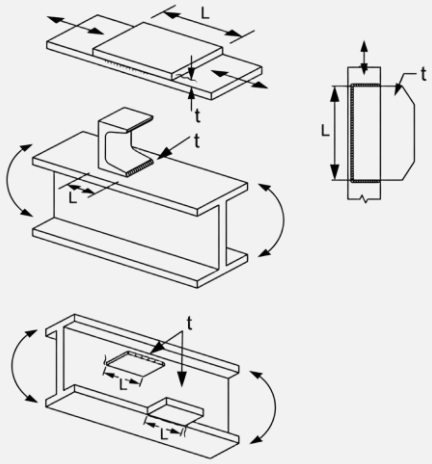
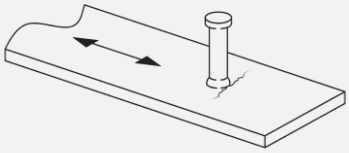
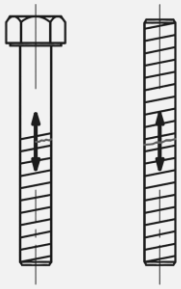
Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base, com superfícies laminadas ou limpas, incluindo aço patinável. Arestas cortadas a chama, sem cantos reentrantes (quinas “para dentro”). **Onde inspecionar:** afastado de todas as soldas e das ligações estruturais (ex.: regiões “livres” do elemento, fora de emendas, chapas de ligação, enrijecedores e outros pontos de conexão).	
Elemento com cantos reentrantes (quinas “para dentro”) em recortes de alívio ou em outras descontinuidades geométricas (mudanças bruscas de forma). **Onde inspecionar**: em qualquer borda externa, com foco nos cantos reentrantes, onde a fissura tende a iniciar e se propagar.	
Perfis laminados com furo de acesso à solda (abertura que permite executar/inspecionar a solda em regiões confinadas). **Onde inspecionar**: no metal de base, na borda do furo de acesso.	
Furos abertos para fixadores (parafusos/pinos) em elementos estruturais. **Onde inspecionar:** na seção líquida (região que passa pelo furo), iniciando na lateral do furo.	
Metal base na seção bruta (seção que não passa pelos furos) de ligações com parafusos de alta resistência, projetadas como ligações por atrito (ex.: emendas parafusadas de mesa e alma e enrijecedores parafusados). **Onde inspecionar:** na seção bruta, na região próxima ao furo.	

Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base na seção líquida (seção que passa pelos furos) de ligações com parafusos de alta resistência, projetadas como ligações por apoio, porém fabricadas e montadas atendendo aos requisitos de ligações por atrito. **Onde inspecionar:** na seção líquida, com início na lateral do furo (borda do furo).	
Metal base na seção líquida (seção que passa pelos furos) de outras ligações mecânicas (fixadas por parafusos, rebites ou parafusos de alta resistência não protendidos). **Onde inspecionar:** na seção líquida, com início na lateral do furo (borda do furo).	
Metal base na seção líquida (seção que passa pelos furos) da cabeça de barra de olhal ou de chapa de pino. **Onde inspecionar:** na seção líquida, com início na lateral do furo (borda do furo).	
Elemento composto sem peças anexas, em que as partes são conectadas por soldas longitudinais ou paralelas à direção da tensão aplicada. **Onde inspecionar:** a partir de descontinuidades na solda, afastado das extremidades da solda (não focar apenas no término/início do cordão).	
Elemento composto sem peças anexas, em que as partes são conectadas por soldas longitudinais ou paralelas à direção da tensão aplicada. **Onde inspecionar:** na própria solda, a partir de descontinuidades superficiais ou internas (porosidade, falta de fusão, inclusões), incluindo as soldas de fixação da barra de apoio (soldas que prendem a backing bar) — pontos críticos por concentração de tensões e por possíveis descontinuidades na raiz.	

Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base e metal de solda na terminação de soldas longitudinais, na região de furos de acesso à solda, em elementos compostos. **Onde inspecionar:** a partir do término do cordão de solda, na borda do furo de acesso, em direção à alma ou para a mesa.	
Metal de base e metal de solda em chapas de reforço ligadas ao elemento por soldas de filete contínuas paralelas à direção da tensão aplicada. **Onde inspecionar:** na própria solda, a partir de descontinuidades superficiais ou internas, afastado das extremidades da solda.	
Metal base na região de terminação de chapas de reforço soldadas com comprimento parcial, nas seguintes situações: • Chapas com extremidades retas ou em bisel mais estreitas que a mesa, com ou sem solda de fechamento na extremidade; • chapas mais largas que a mesa, com solda de fechamento na extremidade. **Onde inspecionar:** • Na mesa, no “pé” da solda de fechamento. • Na mesa, na terminação da solda longitudinal. • Na borda da mesa, quando a chapa de reforço for mais larga que a mesa.	
Metal base na terminação de chapas de reforço soldadas com comprimento parcial, quando as ligações parafusadas de extremidade da chapa são do tipo por atrito e foram dimensionadas para transferir a resistência total da chapa de reforço. **Onde inspecionar:** na mesa, na terminação da solda longitudinal.	
Metal base na terminação de chapas de reforço soldadas com comprimento parcial, mais largas que a mesa e sem solda de fechamento nas extremidades. **Onde inspecionar:** na borda da mesa, no fim da chapa de reforço.	

Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base no “pé das soldas de filete que ligam enrijecedores transversais à mesa e à alma. Nota: inclui soldas semelhantes em enrijecedores de apoio e em chapas de ligação. **Onde inspecionar:** a partir da descontinuidade geométrica no pé da solda de filete, estendendo-se para o metal base.	
Metal base e metal de solda em enrijecedores longitudinais de alma ou em enrijecedores longitudinais de mesa de vigas-caixão, ligados por soldas filete contínuas paralelas à direção da tensão aplicada. **Onde inspecionar:** na própria solda, a partir de descontinuidades superficiais ou internas, afastado das extremidades da solda.	
Metal base e metal de solda em (ou adjacentes a) emendas de topo soldadas por chanfro com penetração total (CJP – Complete Joint Penetration), com integridade da solda comprovada por ensaios não destrutivos e com o cordão esmerilhado até ficar liso e nivelado, no sentido paralelo à direção da tensão. **Onde inspecionar:** a partir de descontinuidades internas do metal de adição, ou ao longo da linha de fusão, ou no início da transição.	
Metal base e metal de solda em (ou adjacente ao) “pé” da solda de juntas em T ou de canto soldadas por chanfro, ou em emendas de topo com CJP, com ou sem transições de espessura. Nota: trincas na mesa do 'T' podem ocorrer devido a tensões de flexão fora do plano induzidas pela alma. **Onde inspecionar:** a partir da descontinuidade superficial no “pé” da solda, com propagação para dentro do metal de base ao longo da linha de fusão.	

Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base e metal de solda em detalhes onde elementos de chapa descontínuos e solicitados são conectados por um par de soldas em lados opostos, sendo: duas soldas de filete; ou soldas de chanfro, executadas em lados opostos da chapa, em plano normal à direção da tensão principal. **Onde inspecionar:** a partir da descontinuidade geométrica no pé da solda e avançando para o metal de base, ou iniciando na raiz da solda sob tração, estendendo-se para cima e então para fora através da solda.	
Metal base de um componente sob esforço longitudinal junto a um detalhe sob esforço transversal (ex.: chapa de ligação lateral) ligado por solda paralela à direção da tensão principal e que incorpora um raio de transição R com o término da solda esmerilhado até ficar liso. **Onde inspecionar:** próximo ao ponto de tangência do raio R, na borda do componente solicitado longitudinalmente.	
Metal base em um detalhe sob esforço transversal (ex.: chapa de ligação lateral) fixado a um componente sob esforço longitudinal de mesma espessura por solda de chanfro paralela à direção da tensão principal, e que incorpora um raio de transição R (arredondamento) com o término da solda esmerilhado até ficar liso. **Onde inspecionar:** próximo aos pontos de tangência do raio, ou na solda, ou na linha de fusão do componente sob esforço longitudinal ou da parte anexa sob esforço transversal.	
Metal base em um detalhe sob esforço transversal (ex.: chapa de ligação lateral) ligado a um componente solicitado longitudinalmente com espessura diferente ($t_1 \neq t_2$) por solda de chanfro paralela à direção da tensão principal, incorporando um raio R de transição na solda. **Onde inspecionar:** • No “pé” da solda ao longo da borda da chapa mais fina; • No término da solda, principalmente em transições com raio pequeno; • No “pé” da solda ao longo da borda da chapa mais fina.	

Descrição	Exemplo ilustrativo
Metal base em um detalhe sob esforço transversal (ex.: chapa de ligação lateral) ligado a um componente solicitado longitudinalmente por solda de filete ou por solda de chanfro, com a solda paralela à direção da tensão principal e com raio de transição R no detalhe. **Onde inspecionar:** no "pé" da solda, na região da descontinuidade geométrica e na raiz da solda sob tração.	
Metal base em um componente solicitado longitudinalmente, na região de um detalhe com comprimento L medido na direção da tensão principal e com espessura t, ligado por solda de chanfro ou solda de filete, paralela ou transversal à direção da tensão principal, sem raio de transição. **Onde inspecionar:** no membro principal, no término da solda, no "pé" da solda.	
Metal base na região de conectores de cisalhamento tipo *stud*, fixados por solda de filete ou por soldagem automática de *studs*. **Onde inspecionar:** no metal base, no "pé" da solda ao redor do *stud*.	
Parafusos de alta resistência, parafusos comuns, barras/varões de ancoragem roscados e barras de suspensão, com roscas usinadas, esmerilhadas ou laminadas. **Onde inspecionar:** na raiz do filete da rosca, com propagação para dentro da área resistente à tração.	

Fonte: AREMA (2015)

GLOSSÁRIO

A

Abrasão	Desgaste de material por ação de água carreando areia, cascalho.
Acelerômetro	Sensor que mede aceleração (vibrações) e é usado no monitoramento de pontes para obter respostas dinâmicas e apoiar a avaliação de rigidez e integridade estrutural.
Achados críticos	Ocorrências/danos que, quando identificados em inspeções (inclusive extraordinárias), indicam potencial situação de emergência, exigindo comunicação imediata ao gestor e avaliação quanto à necessidade de intervenção emergencial.
Aço	Liga de ferro e carbono com elementos adicionais, como: silício, manganês, fósforo, enxofre etc. O teor de carbono pode variar de 0 % a 1,7 %.
Aço laminado	Aço/produto de aço obtido por laminação, ou seja, conformado pela passagem entre rolos em laminadores, processo que altera a geometria do material.
Aduela	Cada um dos elementos pré-moldados (fabricados fora do local e montados), ou moldados no local, que compõem uma superestrutura construída em avanços sucessivos.
Aerofotogrametria	Conjunto de operações destinadas à elaboração do levantamento topográfico de uma região, com o emprego de fotografias aéreas.
Agentes abióticos	Agentes não vivos que degradam materiais (especialmente madeira), como umidade, variações térmicas, radiação solar, abrasão e fogo, afetando desempenho e durabilidade.
Agentes bióticos	Agentes vivos que degradam materiais (especialmente madeira), como fungos e insetos xilófagos, provocando perda de seção e redução de resistência.
Alburno	Porção mais externa e jovem do lenho (geralmente mais clara), formada por madeira mais permeável e relacionada às funções de condução da seiva; em geral, é menos durável que o cerne e mais suscetível ao ataque de fungos e insetos, embora costume aceitar melhor tratamentos preservativos.
Ancoragem	Conjunto completo de elementos e peças destinado a fixar um elemento estrutural e transferir com segurança suas forças para outro elemento ou para a estrutura de suporte, mantendo-o na posição prevista em projeto.
Ancoragem (da armadura)	Conjunto de condições de detalhamento (comprimento, posição, ganchos quando aplicável e armadura transversal associada) que assegura a transferência das forças entre a armadura e o concreto por aderência, com segurança.

Aparelho de apoio	Dispositivo de suporte entre a superestrutura e a mesoestrutura que transmite reações e, ao mesmo tempo, permite certa mobilidade à superestrutura (rotações e deslocamentos).
Arco	Estrutura de eixo curvo, circular, parabólico ou elíptico, que trabalha predominantemente à compressão e que transmite reações com componentes horizontais e verticais aos apoios.
Armadura ativa	Armadura constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial.
Armadura passiva	Qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada, atuando principalmente na absorção de tração e no controle de fissuração.
Assoreamento	Depósito de sedimentos no leito do rio; pode reduzir a seção de vazão sob a ponte e elevar níveis d'água, aumentando riscos para a estrutura e acessos.
Ataque por cloretos	Deterioração associada à presença de íons cloreto que rompem localmente a camada passivadora do aço, favorecendo corrosão localizada (pites) e fissuração/desplacamentos do cobrimento.
Ataque por sulfatos	Deterioração química do concreto por reação de sulfatos com produtos do cimento, podendo gerar compostos expansivos, fissuração e desagregação.
Avulsão	Mudança abrupta no trajeto do curso d'água (por exemplo, "corte" de meandro em cheias extremas), que pode deslocar rapidamente o canal e aumentar riscos aos apoios.

B

Barra de olhal	Elemento metálico de ligação, com extremidades alargadas formando olhais (furos), dimensionados para permitir a passagem de pinos de conexão e a transferência de esforços com outros elementos.
Barreira	Dispositivo de contenção e segurança viária, geralmente rígido, de concreto armado, projetado para absorver um choque lateral do veículo e reconduzi-lo à pista.
Batimetria	Medição e/ou mapeamento da profundidade e da configuração do leito (seção transversal), para comparar com levantamentos anteriores e acompanhar evolução do assoreamento/socavação.
Bloco de fundação	Elemento de fundação de concreto simples, dimensionado de maneira que as tensões de tração nele produzidas possam ser resistidas pelo concreto, sem necessidade de armadura.

C

Cabo	Elemento tracionado ou a ser tracionado, composto por fios ou cordoalhas individuais, torcidos em torno de um fio ou cordoalha central.
Caimento (do pavimento)	Inclinação transversal/longitudinal prevista para conduzir a água e permitir o escoamento; sua ausência ou insuficiência contribui para falhas de drenagem e danos no pavimento do tabuleiro.
Câmera térmica	Câmera que permite aplicar termografia para detectar variações de temperatura, normalmente associadas a anomalias (ex.: infiltração e desplacamentos), incluindo em inspeções com drones.
Canal de desvio	Canal artificial construído para desviar total ou parcialmente as águas de um curso d'água do seu traçado natural (temporária ou permanentemente), podendo alterar o escoamento e o transporte de sedimentos nas proximidades, aumentando riscos aos apoios, encontros e acessos de pontes.
Canal principal	Trecho principal de escoamento do curso d'água; mudanças no seu eixo/traçado podem alterar solicitações na ponte e o risco de erosões/assoreamentos.
Carbonatação	Transformação dos compostos do cimento hidratado em carbonatos, por ação do gás carbônico, reduzindo a alcalinidade (pH) do concreto e podendo despassivar a armadura.
Carbonização	Transformação térmica (por fogo) que forma uma camada carbonizada, reduzindo seção resistente (especialmente na madeira); pode atuar como barreira térmica temporária ao avanço do aquecimento.
Cavitação	Formação e colapso rápido de cavidades preenchidas por vapor/gás na água devido a pressões localmente muito baixas; podem gerar altas pressões de impacto e causar erosão superficial, tipicamente em escoamentos de alta velocidade.
Célula de carga	Sensor (transdutor) utilizado para medir forças em elementos instrumentados (fornece um sinal de saída proporcional à força aplicada), compondo sistemas de monitoramento.
Cimento hidráulico	Cimento que permite ao concreto ter propriedades de pega e endurecimento na presença da água.
Cimento Portland	Material pulverulento, produzido a partir de uma mistura de calcário e argila ou outro material contendo sílica, alumina e óxido de ferro; a fusão desses materiais dá origem ao clínquer que, após a moagem, torna-se o cimento.
Cimento pozolânico	Cimento Portland composto por clínquer e material pozolânico, com adição de sulfato de cálcio (gesso), obtido por moagem conjunta ou separada e posterior mistura homogênea, podendo ainda conter material carbonático, conforme limites normativos.

Cobrimento	Espessura de concreto armado medida entre a superfície externa da peça e a face externa da armadura mais próxima, geralmente os estribos.
Coeficiente de Impacto	Em cargas móveis, é a majoração de suas solicitações em virtude dos efeitos dinâmicos e vibratórios.
Concreto	Mistura de agregados, água e um aglomerante, geralmente cimento Portland, podendo incluir aditivos e adições. Ao endurecer, o concreto adquire alta resistência à compressão e rigidez, formando uma “pedra artificial”.
Concreto armado	Material compósito obtido pela inserção de barras de aço não tensionadas no interior do concreto, de modo que os dois materiais resistam solidariamente aos esforços solicitantes graças à aderência aço-concreto.
Concreto de alto desempenho	Concreto com relação água-aglomerante de aproximadamente 0,40 e que, com superplastificantes, apresenta uma série de características melhoradas, como fluidez mais elevada, módulo de elasticidade mais alto, maior resistência à flexão, menor permeabilidade, maior resistência à abrasão e maior durabilidade.
Concreto pré-moldado	Elementos de concreto moldados e curados fora do local definitivo de utilização (em canteiros ou fábricas) e, posteriormente, transportados e montados na obra.
Concreto protendido	Concreto onde parte das armaduras é ativa e é previamente tensionada, antes ou depois da concretagem (pré-tração ou pós-tração), para introduzir compressões iniciais e melhorar o desempenho em serviço.
Concreto simples	Concreto que não possui qualquer tipo de armadura, ou que a possui em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado.
Construção por avanços/balanços sucessivos	Construção da superestrutura sem escoramento convencional e pela solidarização de aduelas pré-moldadas ou moldadas no local; as aduelas são posicionadas por pequenas treliças ou por treliças com o dobro do comprimento do vão e solidarizadas por protensão.
Contraventamento	Conjunto de elementos que estabiliza uma estrutura, normalmente contra forças horizontais, contribuindo para rigidez e controle de deslocamentos.
Corrosão	Deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos.
Corrosão de armaduras	Corrosão provocada por ações químicas ou eletroquímicas e que resulta da perda de proteção física e química proporcionada pelo cobrimento, permitindo a despassivação da armadura; as duas consequências mais importantes são o aumento de volume das armaduras, provocando fissuras e desagregações no concreto, e a diminuição da seção resistente das barras.
Corrosão do concreto	Deterioração do concreto por ações físicas, como reações internas expansivas; ou ações químicas, como reações provocadas por gases contidos na atmosfera; ou por águas, que podem ser puras, ácidas ou marinhas; ou ainda, por compostos fluidos ou sólidos de natureza orgânica, como óleos, gorduras e combustíveis.
Corte de meandro	Mudança rápida no traçado do rio, em que um meandro é “cortado” durante cheias extremas, podendo causar migração rápida do eixo do canal.

D

Defensa	Dispositivo de segurança lateral, usado na rodovia para impedir que o veículo desgovernado saia da rodovia e, eventualmente, para reconduzi-lo à pista. O termo também pode designar um sistema de proteção, normalmente flexível, acoplado a um pilar de ponte para absorver a energia do impacto de embarcações.
Deformação	Alteração de forma e/ou dimensões de um elemento estrutural, decorrente das tensões geradas pelas ações (carregamentos, variações térmicas, retração, fluência etc.).
Deformação elástica	Deformação não permanente: ao retirar o carregamento, o material retoma sua forma original.
Deformação plástica	Deformação permanente: após retirar o carregamento, o material não retorna às dimensões originais, pois ocorreu escoamento (ultrapassagem do limite elástico).
Degradação do leito	Rebaixamento de longo prazo do leito do curso d'água (erosão do fundo do canal) como alteração vertical do perfil do canal, podendo reduzir a cobertura e comprometer fundações.
Desagregação	Manifestação patológica caracteriza pela perda do poder aglomerante da pasta de cimento, fazendo com que os agregados, soltem-se do restante da peça. É frequentemente associada a ataque químico (ex.: lixiviação, ataque por sulfatos), mas não se limita a uma única causa.
Despassivação	Ruptura da camada protetora (passiva) na superfície do aço, tornando-o suscetível à corrosão; pode ocorrer por carbonatação (redução do pH) e/ou por ação de cloretos (ruptura local).
Deterioração	Perda gradual de qualidade, em virtude de ações físicas ou químicas do meio ambiente, ao longo do tempo.
Disgregação	Rupturas localizadas do concreto, geralmente em zonas salientes, causadas por tensões internas, frequentemente associadas à expansão provocada pela corrosão das armaduras, podendo gerar desplacamento do cobrimento.
Divisor de canal	Ilha que separa canais em rios trançados, podendo ficar submersa em cheias e alterar a percepção do traçado e das zonas de maior energia do escoamento.
Ductilidade	Propriedade que possibilita o material suportar deformação inelástica sem sofrer ruptura.

E

Eflorescência	Depósito de material de cor branca, resultante da cristalização de sais solúveis existentes nas estruturas de concreto e trazidos à superfície por infiltrações.
Elasticidade	Propriedade pela qual um material, ao ser deformado por cargas, retorna à forma original após a retirada das ações, desde que o limite elástico não seja ultrapassado.
Elastômero	Material polimérico natural ou sintético que apresenta elasticidade semelhante à da borracha, podendo sofrer grandes deformações e recuperar a forma, dentro do regime elástico.
Elemento redundante	Elemento que torna a estrutura estaticamente indeterminada e cuja retirada não provoca o colapso da estrutura.
Encontro	Obra, na extremidade de uma ponte, que serve de apoio para o seu estrado e para o aterro de acesso.
Enrijecedor	Elemento utilizado em estruturas metálicas, especialmente em ligações e em regiões de forças localizadas, para melhorar a distribuição dos esforços e ampliar a rigidez local.
Enrocamento	Proteção executada com camada de pedras/blocos para estabilizar margens e trechos do canal, dissipando energia do escoamento e reduzindo erosões; pode integrar soluções do tipo rip-rap.
Epóxi	Resina sintética cuja cura se dá por reação química de componentes misturados pouco antes do uso; é utilizada para colar materiais diversos e também em reparos, como injeção para preenchimento de fissuras.
Erosão	Carreamento do solo pela ação da água em movimento.
Erosão de contração	Rebaixamento do leito que ocorre no trecho sob a ponte (entre encontros), causado pela aceleração do fluxo devido ao estrangulamento/contração da seção.
Erosão generalizada	Rebaixamento do leito em longo trecho do rio (montante, jusante e sob a ponte), usualmente lento e de longo prazo.
Erosão localizada	Erosão concentrada junto a pilares e encontros, associada à formação de vórtices; é um mecanismo comum e de evolução rápida, relevante para segurança.
Escafandro (mergulho dependente)	Método em que o ar é suprido da superfície por mangueiras, proporcionando maior tempo submerso e robustez operacional; recomendado para condições adversas (baixa visibilidade, águas contaminadas e correntezas elevadas).

Escoramento	Estrutura temporária, de madeira, aço ou concreto, projetada para suportar o peso de uma estrutura durante sua construção, até que essa se torne autoportante.
Escorregamento (do pavimento)	Deslocamento do revestimento em relação à camada inferior, caracterizado por fendas em formato de meia-lua; ocorre comumente por frenagem/aceleração e pode estar ligado a falhas de dosagem e baixa aderência entre camadas.
Espigão (estrutura de guiamento)	Obra de estabilização do escoamento (projeção a partir da margem) usada para orientar o fluxo e proteger margens/apoios, reduzindo erosões e instabilidades locais.
Estabilização de margens	Conjunto de intervenções (obras e técnicas) destinadas a limitar a erosão das margens e controlar a migração lateral do canal; pode modificar significativamente a dinâmica do curso d'água.
Estaca	Elemento de fundação profunda, executado com o auxílio de ferramentas ou equipamentos. Sua execução pode ser feita por cravação à percussão, prensagem, vibração, escavação ou de forma mista, envolvendo mais de um desses processos.
Estaca raiz	Estaca de fundação profunda moldada *in loco*, armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, executada por perfuração rotativa ou rotopercussiva, com revestimento metálico recuperável que reveste integralmente a perfuração no trecho em solo.
Estado limite	Condição a partir da qual a estrutura deixa de atender às exigências para as quais foi projetada, seja de segurança ou de utilização.
Estado limite último	Estado limite relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural.
Estrado	Parte da ponte que suporta diretamente o tráfego de veículos e de pedestres.
Estrangulamento do fluxo	Estreitamento da área de passagem de água (pela geometria/projeto ou por assoreamento/obstruções), que acelera o escoamento, elevando a propensão a erosão/socavação.
Estribo	Armadura que acompanha o perímetro da peça, em geral retangular ou circular, e que tem por finalidade absorver solicitações de forças cortantes ou impedir a flambagem de barras de armaduras longitudinais.
Exsudação	Migração de água e finos à superfície (no concreto fresco) ou presença/saída de fluidos associados a certos processos de deterioração; na RAA, pode ocorrer exsudação de fluido viscoso associado ao gel expansivo.

F

Fadiga	Ruptura de um elemento sujeito a cargas cíclicas, com tensões inferiores às observadas sob a ação de cargas estáticas.
Fissura	Uma pequena fratura linear do concreto, geralmente localizada e sem completa separação das partes, podendo variar em comprimento, profundidade e abertura.
Fissuração	Formação e/ou ocorrência de fissuras em um elemento, resultante de solicitações, restrições a deformações ou efeitos de execução, podendo comprometer o desempenho em serviço e a durabilidade quando não controlada.
Fluência	Deformação lenta e progressiva, dependente do tempo, que se desenvolve em um material sob tensão aproximadamente constante, além da deformação imediata.
Fragilidade	Comportamento de ruptura com pouca ou nenhuma deformação plástica prévia; em estruturas metálicas, pode ser favorecida por entalhes/defeitos, tensões residuais e baixas temperaturas, devendo ser considerada na avaliação de segurança e das condições de serviço.

G

Gabarito	Distância ou altura livres de qualquer obstáculo, permitindo a livre passagem de veículos e embarcações.
Gabião	Gaiola de arame galvanizado, preenchida com pedras, utilizada como estrutura de arrimo ou de controle de erosão.

H

Histórico geomorfológico	Registro de alterações anteriores na localização, forma e elevação do canal; útil para identificar tendências e orientar o monitoramento.

I

Ilha fluvial	Porção elevada do leito que aparece em rios com múltiplos canais (ex.: trançados), separando trajetórias de escoamento; em cheias pode ficar submersa, mudando a distribuição de velocidades e forças no canal.
Inclinômetro	Sensor que mede inclinação/rotação de elementos estruturais em relação à vertical, usado em monitoramento para identificar movimentos e tendências.
Infraestrutura	É também denominada fundação da ponte, destinando-se a transferir para o solo as cargas da estrutura.

Insetos xilófagos	Insetos que se alimentam de madeira (incluindo cupins e outras espécies), abrindo galerias internas e reduzindo a seção resistente.
Inspeção cadastral	Inspeção programada (inicial ou após modificações relevantes) voltada a identificar, caracterizar e registrar a OAE como ativo de infraestrutura; abrange todos os elementos com foco cadastral/funcional e levantamento geométrico/documental.
Inspeção especial	Inspeção programada ou por demanda técnica para diagnosticar causas das anomalias e definir intervenções; envolve inspeção integral (todos os elementos) e pode incluir ensaios destrutivos/não destrutivos e instrumentação.
Inspeção extraordinária	Inspeção não programada, expedita e direcionada para avaliar efeitos de eventos excepcionais; não caracteriza emergência por si só (a emergência decorre de achados críticos).
Inspeção intermediária	Inspeção sob demanda para monitorar deficiências específicas entre ciclos de inspeções programadas; pode variar de pontual a semelhante à rotineira e subsidiar decisões de gestão/monitoramento/manutenção, preservando rastreabilidade.
Inspeção rotineira	Inspeção programada e periódica destinada a monitorar sistematicamente a condição da obra; em geral, baseada em avaliação visual dos elementos acessíveis e gera histórico evolutivo da condição.
Inspeção submersa	Inspeção prevista quando apoios/infraestrutura permanecem total ou parcialmente submersos (de forma permanente ou recorrente), impedindo avaliação adequada por inspeções convencionais; é de alta complexidade e exige planejamento, equipes e equipamentos especializados.
Inspeção tátil	Inspeção com contato direto do inspetor com a superfície do elemento, complementar à observação visual, visando aumentar a confiabilidade da avaliação em regiões acessíveis.
Inspeção visual	Observação visual dos elementos da ponte, sobretudo para avaliar seu estado de conservação.
Intemperismo	Degradação por exposição ao clima (sol, chuva, variação térmica), que pode provocar fissuras superficiais, perda de camada protetora e facilitar ataque biótico, especialmente em madeira.
Interferometria por radar	Técnica sem contato que mede deslocamentos (e pode derivar velocidade/aceleração) comparando diferença de fase entre sinais eletromagnéticos emitidos e refletidos, permitindo captar variações mínimas de posição.
Isotrópico	Material que, como o aço, tem propriedades idênticas em todas as direções.

J

Junta de dilatação	Dispositivo, ou apenas espaço, que interrompe a continuidade da estrutura para permitir movimentos relativos (dilatação/contração térmica, retração, fluência e rotações), mantendo a estanqueidade e a segurança do tráfego quando aplicável.
Jusante	Direção “rio abaixo”, no sentido do escoamento; usada para descrever localização de depósitos, erosões e intervenções em relação à ponte.

L

Laje de transição	Laje de concreto armado que suaviza a transição entre a via rodoviária ou ferroviária e a ponte.
Lixiviação	Dissolução e carreamento, pela água (pura/agressiva/ácida), de compostos da pasta de cimento endurecida, especialmente hidróxido de cálcio, causando perda de resistência e podendo gerar depósitos/crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície.
Longarina	Viga principal longitudinal da superestrutura, responsável por receber e conduzir cargas ao longo do vão, trabalhando tipicamente à flexão e ao cisalhamento (podendo atuar solidariamente com a laje).

M

Máscara de ar mandado	Equipamento de proteção respiratória com suprimento/ventilação forçada, usado quando não é possível garantir segurança respiratória por outros meios (ex.: espaços confinados ou ambientes com contaminantes).
Meandro	Curva acentuada do traçado do rio, típica de rios de planície; a margem externa tende a concentrar erosão e formar zonas mais profundas (poços).
Mesoestrutura	Parte da ponte constituída pelos pilares, aparelhos de apoio, travessas e encontros; tem a função de conduzir as cargas da superestrutura para as fundações (infraestrutura).
Microestaca	Estaca executada com tecnologia de tirantes injetados em múltiplos estágios, utilizando válvulas múltiplas denominadas “manchetes”. Em cada estágio, aplica-se pressão que garante a abertura das “manchetes” e a posterior injeção. Diferentemente das estacas-raiz, utilizam-se altas pressões de injeção.
Migração lateral do canal	Deslocamento progressivo do canal ao longo do tempo, associado à erosão de margens, podendo ameaçar encontros, pilares e acessos.
Montante	Direção “rio acima”, contrária ao sentido do escoamento; usada para descrever bancos de areia/assoreamento, fontes de sedimentos e intervenções a montante da ponte.
Morfodinâmica fluvial	Análise da mudança da forma do rio ao longo do tempo, aplicada ao acompanhamento de zonas críticas e à mitigação de erosões.

N

Nichos de concretagem	Vazios (“ninhos/nichos”) no concreto, decorrentes de falhas de lançamento, vibração e adensamento; podem expor armaduras, aumentar permeabilidade e favorecer corrosão.
Nuvem de pontos	Conjunto de coordenadas 3D (X,Y,Z) geradas por LiDAR/escaneamento, usadas para reconstrução geométrica da ponte.

O

Ortofoto	Imagem corrigida das distorções de geometria de imageamento e do relevo, passando a ter propriedades geométricas semelhantes às de um mapa, o que a torna adequada para medições e documentação, normalmente é georreferenciada.
Ortotrópico	Denominação de um material que tem diferentes propriedades físicas e mecânicas, como rigidez e resistência, em duas ou mais direções ortogonais.
Oxidação	Degradação química de um material, em virtude de sua reação com o oxigênio do ar.

P

Passarela	Tipo de ponte destinada exclusivamente à passagem de pedestres.
Perda de protensão	Diminuição da força de protensão ao longo do tempo, por perdas imediatas (atrito, acomodação/deslizamento em ancoragens e encurtamento elástico do concreto) e por perdas progressivas (retração e fluência do concreto e relaxação do aço), podendo também ocorrer por perda de aderência.
Permeabilidade	Propriedade do material que permite a passagem de fluidos pelo seu interior, através de poros e/ou fissuras interconectados, facilitando a penetração de água e agentes agressivos.
Pilar	Elemento estrutural linear, geralmente na vertical, submetido predominantemente a forças de compressão, podendo também resistir a flexão por imperfeições e ações laterais.
Plataforma apoiada	Estrutura/plataforma de acesso montada com apoio no terreno ou em elementos auxiliares para permitir aproximação segura do inspetor a regiões da ponte; deve garantir condições de segurança como piso contínuo, guarda-corpos, e pontos de ancoragem.
Plataforma suspensa	Plataforma de acesso suspensa (por cabos/lanças/sistemas equivalentes) usada quando o acesso por plataformas apoiadas é inviável; requer projeto/montagem/inspeção por pessoal qualificado e atendimento às exigências de segurança.

Ponte	Estrutura, inclusive apoios, construída sobre uma depressão ou uma obstrução, como água, rodovia ou ferrovia, que sustenta uma pista para passagem de veículos e outras cargas móveis, e que tem um vão livre, medido ao longo do eixo da via, superior a seis metros. Neste manual, o termo "ponte" engloba todas as definições, incluindo aquelas estruturas que fazem a transposição de obstáculos secos, como rodovias, ferrovias e vales, algumas vezes denominadas "viadutos".
Ponte estaiada	Ponte em que o tabuleiro (superestrutura) é diretamente sustentado por estais (cabos), ligados ao tabuleiro e ancorados ao topo das torres ou ao longo de sua altura.
Ponte pênsil	Ponte em que o tabuleiro (piso e sistema de travamento) é sustentado por cabos verticais atirantados (pendurais), conectados a cabos principais de suspensão, os quais são apoiados nas torres e ancorados nas extremidades.
Pontilhão	Estrutura, inclusive apoios, construída sobre uma depressão ou uma obstrução, como água, rodovia ou ferrovia, que sustenta uma pista para passagem de veículos e outras cargas móveis, e que tem um vão livre, medido ao longo do eixo da via, inferior a seis metros.
Porosidade	Quantidade e conectividade de poros/vazios no material (especialmente no concreto), influenciando absorção, permeabilidade e a velocidade de entrada de agentes agressivos.
Prop wash	Turbulência causada por hélices de embarcações, com potencial de gerar correntes erosivas e deslocar materiais do leito, justificando inspeção submersa em casos relevantes.
Protensão	Aplicação controlada de força ao elemento estrutural, por meio do tensionamento (pré-alongamento) da armadura ativa, para introduzir compressões iniciais e melhorar o desempenho em serviço (fissuração e deformações).

R

Radargrama	Imagem do perfil gerado no processamento do radar de penetração no solo, usada para interpretar reflexões e identificar anomalias internas.
Rampa	A inclinação, expressa em termos percentuais, da rodovia ou da ponte, em relação à horizontal calculada como a razão entre desnível e distância horizontal.
Reação álcali-agregado	Reação da sílica reativa de certos agregados com os álcalis do cimento, em presença da água, formando um gel expansivo em torno dos agregados.
Reação álcali-carbonato	Tipo deletério de reação álcali-agregado envolvendo certos calcários dolomíticos e soluções alcalinas nos poros do concreto, podendo gerar expansão e fissuração.

Redundância estrutural	Condição estrutural onde há mais elementos que os estritamente necessários para garantir a estabilidade da estrutura.
Regime do rio (hidrológico)	Padrão sazonal de variação do nível e da vazão do rio (incluindo níveis máximos e mínimos e os períodos em que ocorrem) e, quando aplicável, da velocidade da correnteza, devendo ser registrado para comparação ao longo do tempo.
Resiliência	Capacidade de absorver energia no regime elástico (sem deformação permanente); em estruturas metálicas, relaciona-se ao comportamento sob impactos/vibrações.
Retração	Redução volumétrica do concreto ao longo do tempo (por processos físico-químicos e perda de umidade), podendo induzir fissuras e contribuir para deformações e perdas de protensão.
Retração plástica	Retração que ocorre nas primeiras idades, quando o concreto ainda está plástico, geralmente associada à evaporação rápida da água superficial, podendo causar fissuras precoces.
Retração por secagem	Retração associada à perda gradual de água para o ambiente após o endurecimento, importante para fissuração e deformações diferidas.
Rip-rap	Proteção de taludes e margens contra erosão e solapamento por revestimento com camada de enrocamento (pedras/blocos) ou material equivalente, destinada a dissipar a energia do escoamento e estabilizar a margem. Pode incluir variantes como rip-rap parcialmente grauteado ou sacos de concreto.
Rótula	Dispositivo/ligação que permite a rotação relativa entre elementos, transmitindo forças e liberando (ou reduzindo significativamente) a transmissão de momento fletor.
Ruptura dúctil	Ocorre após significativa deformação plástica localizada, permitindo algum aviso prévio e maior capacidade de redistribuição de esforços.
Ruptura frágil	Caracteriza-se pela ausência de deformações plásticas perceptíveis antes do colapso, ocorrendo com tensões inferiores ao limite de escoamento do material.

S

Sapata	Elemento de fundação de concreto armado, com altura menor que a de um bloco, que utiliza armadura para resistir aos esforços de tração.
Seção de vazão	Área útil sob a ponte disponível para a passagem da água; deve ser verificada periodicamente quanto a assoreamento/obstruções e adequação a enchentes.
Situação de emergência	Condição em que há risco iminente à segurança dos usuários e/ou à estabilidade da estrutura, demandando comunicação imediata e possível intervenção emergencial (podendo incluir interdição, conforme avaliação técnica).

Socavamento	Remoção localizada e progressiva de material do leito e/ou das margens de cursos d'água, em torno de fundações (especialmente junto a pilares e encontros), causada pela ação erosiva da água corrente.
Solapamento	Escavação/erosão na base do solo ao redor de elementos (como encontros, pilares ou aterros de acesso), provocada por ação erosiva da água e/ou instabilidade do terreno, podendo causar perda de suporte.
Superelevação	A diferença de níveis entre os bordos externo e interno de um trecho da rodovia ou de uma ponte, situados em curva horizontal; a diferença de níveis é necessária para contrabalançar a força centrífuga.
Superestrutura	Conjunto de elementos destinados a receber as cargas permanentes e acidentais, e transferi-las à mesoestrutura ou diretamente à infraestrutura, a exemplo do tabuleiro, longarinas, transversinas etc.

T

Talabarte	Componente do sistema de proteção contra quedas, usado com cinto/arnês para conexão do trabalhador a ponto de ancoragem em atividades em altura.
Tenacidade	Capacidade de absorver energia até a ruptura, combinando resistência e ductilidade; parâmetro relevante para avaliar sensibilidade a trincas e fratura em aço.
Teor de umidade	Quantidade de água presente em um material; no contexto de madeiras, é a relação, em porcentagem, entre a massa de água contida na madeira e a massa da madeira seca, afetando massa, rigidez, resistência, estabilidade dimensional e suscetibilidade a fungos.
Termografia	Técnica não destrutiva por termografia infravermelha que mapeia a temperatura da superfície para identificar anomalias por contrastes térmicos (ex.: infiltração, delaminações e desplacamentos); a câmera pode ser embarcada em drones.
Transversina	Viga transversal ao eixo longitudinal da ponte que interliga as vigas longarinas e auxilia na estabilidade e na distribuição de cargas na superestrutura.
Treliça	Associação estável de elementos retos ligados por meio de nós (articulações), de modo que as barras sejam solicitadas predominantemente por esforços axiais (tração ou compressão).
Trinca	Descontinuidade linear ou separação localizada em um material, normalmente associada a aberturas maiores ou à propagação de fratura, empregada em determinados contextos técnicos, especialmente em estruturas metálicas, madeira e fenômenos de fadiga.
Tubulão	Elemento de fundação profunda, de forma cilíndrica, em que, pelo menos em sua fase final de execução, há a descida de operário.
Turbidez	Condição de água com alta carga de partículas em suspensão, que reduz a visibilidade e pode limitar a efetividade de inspeções por imagem.

U

Umbilical	Conjunto de mangueiras e cabos do mergulho dependente, que fornece ar, comunicação e monitoramento de profundidade entre a superfície e o mergulhador.

V

Variação higroscópica	Variação dimensional de materiais (especialmente madeira) por ganho/perda de umidade, podendo causar retração/expansão, empenamento e abertura de fissuras/juntas.
Viaduto	A estrutura é denominada viaduto quando o obstáculo transposto não envolve cursos d'água.
Viga mista	Viga composta por elemento metálico (viga/perfil de aço) rigidamente ligado a uma mesa/laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento, de modo a trabalharem em conjunto.
Viga-caixão	Superestrutura com seção em caixão, retangular ou trapezoidal. Em concreto, é formada por duas almas laterais (armado ou protendido) e lajes superior e inferior; em aço, por duas almas laterais, chapa inferior e elemento superior (laje de concreto, chapa metálica ou placa ortotrópica), compondo o caixão.
Viga-travessa	Viga larga (geralmente nos encontros), com recorte para abrigar a superestrutura e comprimento ligeiramente maior que a largura do tabuleiro.
Vórtice	Redemoinho gerado pelo escoamento, especialmente ao redor de pilares/encontros, induzido por obstruções ao fluxo, capaz de intensificar a ação erosiva da corrente e a remoção de material do leito, contribuindo para o socavamento (erosão localizada).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. B. Chapter 3 – Photogrammetry. In: ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. B. Small-Format Aerial Photography. Elsevier, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1.

AHMED, N. K. *et al*. An empirical comparison of machine learning models for time series forecasting. Econometric Reviews, v. 29, n. 5-6, p. 594-621, 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/07474938.2010.481556.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 358: Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.2R: Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. AREMA: Manual of Railway Engineering, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C876-22b: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

_____. ASTM C1383: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.

_____. ASTM D6087-22: Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar.

_____. ASTM E3: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens;

_____. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

_____. ASTM E94: Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film.

_____. ASTM E407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

_____. ASTM E415: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

_____. ASTM E709: Standard Guide for Magnetic Particle Testing.

_____. ASTM E750-15: Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation.

_____. ASTM E1032: Standard Practice for Radiographic Examination of Weldments Using Industrial X-Ray Film.

_____. ASTM E1417/E1417M: Standard Practice for Liquid Penetrant Testing.

_____. ASTM E1441: Standard Guide for Computed Tomography.

_____. ASTM E1570: Standard Practice for Fan Beam Computed Tomographic (CT) Examination.

_____. ASTM E1571: Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope.

_____. ASTM E1695: Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance.

_____. ASTM E1742/E1742M: Standard Practice for Radiographic Examination.

_____. ASTM E1781/E1781M-20: Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors.

ANASTASIA, S. *et al*. Damage identification of railway bridges through temporal autoregressive modeling. Sensors, v. 23, n. 21, 8830, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/s23218830.

ARTERIS, ES – 029. Especificação Particular – Selagem Térmica. CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Revisão 0, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NB-1: Cálculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978.

_____. ABNT NB-2: Cálculo e execução de pontes de concreto armado. Rio de Janeiro, 1961.

_____. ABNT NB-6: Carga móvel em pontes rodoviárias e passarelas. Rio de Janeiro, 1982.

_____. ABNT NB-7: Cálculo e execução de pontes de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1943. 38 p

_____. ABNT NBR ISO 6892-1 – Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente.

_____. ABNT NBR ISO 148-1: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 1: Método de ensaio.

_____. ABNT NBR ISO 148-2: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 2: Verificação de máquinas de ensaios.

_____. ABNT NBR ISO 148-3: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 3: Preparação e caracterização de corpos de prova Charpy com entalhe em V usados na verificação indireta de máquinas de ensaios de impacto por pêndulo.

_____. ABNT NBR ISO 6506-1 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 1: Método de Ensaio.

_____. ABNT NBR ISO 6506-2 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio.

_____. ABNT NBR ISO 6506-3 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 3: Calibração de blocos de referência.

_____. ABNT NBR ISO 6506-4 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell. Parte 4: Tabela de valores de dureza.

_____. ABNT NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente.

_____. ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

_____. ABNT NBR 6122 – Projeto e execução de fundações.

_____. ABNT NBR 7007 – Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos.

_____. ABNT NBR 7187 – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto.

_____. ABNT NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

_____. ABNT NBR 7480 – Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos.

_____. ABNT NBR 7584 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio.

_____. ABNT NBR 7640 – Defeitos de trilhos – Terminologia, tolerâncias e tratamentos.

_____. ABNT NBR 7680-1 – Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial.

_____. ABNT NBR 8522-1 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão.

_____. ABNT NBR 8522-2 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração.

_____. ABNT NBR 8548 – Barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda – Determinação da resistência à tração – Método de ensaio.

_____. ABNT NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

_____. ABNT NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

_____. ABNT NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.

_____. ABNT NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.

_____. ABNT NBR 9452 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento.

_____. ABNT NBR 9607 – Prova de carga estática em estruturas de concreto – Requisitos e procedimentos.

_____. ABNT NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

_____. ABNT NBR 10443 – Pintura industrial - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies metálicas ferrosas e não ferrosas.

_____. ABNT NBR 11003 – Pintura industrial – Determinação da aderência pelos métodos de corte na pintura.

_____. ABNT NBR 14931 – Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos.

_____. ABNT NBR 15454 – Metalografia das ligas de ferro-carbono – Terminologia.

_____. ABNT NBR 15824: Ensaios não destrutivos – Ultrassom – Procedimento para medição de espessura.

_____. ABNT NBR 15877 – Pintura industrial - Determinação da resistência à tração em sistemas de pintura e outros revestimentos anticorrosivos.

_____. ABNT NBR 15935 – Investigações ambientais – Aplicação de métodos geofísicos.

_____. ABNT NBR 16387 – Via férrea – Classificação de vias.

_____. ABNT NBR 16450 – Ensaios não destrutivos – Líquido penetrante – Qualificação de procedimento.

_____. ABNT NBR 16528 – Ensaio não destrutivo – Radiografia industrial – Inspeção de soldas por radiografia computadorizada.

_____. ABNT NBR 16836 – Via férrea – Contratrilho para obras de artes especiais – Requisitos mínimos.

_____. ABNT NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.

_____. ABNT NBR 16979 – Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Detecção e dimensionamento de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais metálicos.

_____. ABNT NBR 17046 – Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Ensaio de correntes parasitas pulsadas em componentes metálicos ferromagnéticos.

_____. ABNT NBR 17195 – Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Terminologia.

_____. ABNT NBR 19783 – Aparelhos de apoio de elastômero fretado – Especificação e métodos de ensaio.

_____. ABNT NBR NM 314 – Ensaios não destrutivos – Radiografia industrial – Terminologia.

_____. ABNT NBR NM 342 – Ensaios não destrutivos – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidades.

_____. ABNT NBR NM 334 – Ensaios não destrutivos – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades.

_____. ABNT NBR NM 335 – Ensaios não destrutivos – Ultrassom – Terminologia.

_____. ABNT NBR NM 336 – Ensaios não destrutivos – Ultrassom em solda – Procedimento.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHTWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. Standard Specification for Structural Steel for Bridges (ASTM Designation: A 709/A 709M-17). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A709: Standard specification for structural steel for bridges.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. UNE EN 13554: Non-destructive testing – Acoustic emission testing – General principles.

BERNARDINI, L.; CARNEVALE, M.; COLLINA, A. Damage identification in Warren truss bridges by two different time–frequency algorithms. Applied Sciences, v. 11, n. 22, 10605, 2021. MDPI AG. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/app112210605.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.

Bigelow, Jake J.; Clausen, Carol A.; Lebow, Stan T.; Greimann, Lowell. 2007. Field evaluation of timber preservation treatments for highway applications. Ames, Iowa: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2007: 1 volume (various pagings).

BRASHAW, B.; VATALARO, R.; WACKER, J.; ROSS, R.; WANG, X. (2012). Inspection Techniques to Assess Timber Bridges. University of Minnesota Duluth e United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. United States.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 33: Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.

_____. NR 35: Trabalho em altura. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2023.

BRITISH STANDARD. BS 1881-204: Testing concrete – Recommendations on the use of electromagnetic covermeters.

_____. BS EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.

BRITO, L. D. e CALIL JÚNIOR, C. Manifestações patológicas em função da ausência de manutenções preventivas na estrutura de madeira da "passarela pênsil" de Piracicaba, Brasil. 2013, Anais.. João Pessoa: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013. Acesso em: 28 nov. 2025.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. São Paulo: Manole, 2003. ISBN 85-204-1515-6.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; GÓES, J. L. N.; *et al*. Manual de projeto e construção de pontes de madeira. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006. Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

CALIL JUNIOR, C. Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação. 2014. 502 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Concrete Society Report, Non-structural Cracks in Concrete, Technical Report No. 22, 4th Edn, 62 pp. (London, Concrete Society, 2010).

CORDEIRO, J. G. P. Aparelhos de Apoio em Pontes Vida Útil e Procedimentos de Substituição. 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil Perfil de Estruturas, Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

CORDEIRO, A. O.; SOUZA, A. G.; OSÓRIO, H. G. Manutenção e recuperação das juntas de dilatação em pontes e viadutos. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET), Universidade Paulista (UNIP), São Paulo, 2019. DOI 10.29327/4161455.

DATTEO, A. *et al*. On the use of AR models for SHM: a global sensitivity and uncertainty analysis framework. Reliability Engineering & System Safety, v. 170, p. 99-115, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. NORMA DNIT 005 – TER – Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia.

_____. DNIT 010. Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento.

_____. DNIT 091. Tratamento de aparelhos de apoio: concreto, neoprene e metálicos – Especificação de serviço.

_____. DNIT 092. Juntas de dilatação – Especificação de serviço.

_____. Manual de inspeção de pontes rodoviárias. 2. ed.

_____. Sistema de Gerenciamento de Estruturas (SGE). Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/sgplan/prd/sge/. Acesso em: 20 maio 2026.

_____. Publicação IPR – 719. Manual de Pavimentação Rodoviária. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

_____. Publicação IPR 744 – Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos Rodoviários.

ECOPONTES. Ponte mista de aço e concreto Ecomix em Eunápolis – BA. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.ecopontes.com.br/obras-ver/ponte-mista-de-aco-e-concreto-ecomix-em-eunapolis-ba/52. Acesso em: 26 jan. 2026.

EL DEBS, Mounir Khalil; TAKEYA, Toshiaki. Introdução às pontes de concreto: texto provisório de apoio à disciplina SET-412. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2009.

ERDURAN, E. *et al*. Identification of vibration frequencies of railway bridges from train-mounted sensors using Wavelet transformation. Sensors, v. 23, n. 3, 1191, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/s23031191.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). Bulletin 21: Guide to good practice for the inspection of concrete structures. Lausanne: fib, 2002.

Federal Highway Administration (FHWA). Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2022.

FERREIRA, Carlos Manuel Sebastião. Tipologia, instalação, funcionamento e manutenção de diversos tipos de juntas de dilatação em Obras de Arte. Instituto superior de engenharia de Lisboa, 2013. 82-91 p.

FRODESIAK, Anna. Nandu River Iron Bridge corrosion. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Nandu_River_Iron_Bridge_corrosion_-_04.jpg. Acesso em: 26 jan. 2026.

G1. Concessionária vai investigar causas de descarrilamento de vagões em Catanduva. Disponível em: https://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/concessionaria-vai-investigar-causas-de-descarrilamento-de-vagoes-em-catanduva.ghtml. Acesso em: 25 nov. 2025.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 3. ed., rev. Rio de Janeiro: LTC, c1996. 345 p. ISBN 85-216-1055-6.

GIOVANNETTI, A. C. V. P. Avaliação do estado de conservação de pontes: estudo de caso. 2014. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GOMES, F.M.P; RUGGERI, E.R.F. Modelo termoviscoelástico com envelhecimento para concreto massa In: XXXIV CILAMCE, Pirenópolis, 2013.

GONZÁLEZ, A.; OBRIEN, E.J.; MCGETRICK, P.J. Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle. Journal of Sound and Vibration, v. 331, n. 18, p. 4115-4131, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.04.019.

GUO, Q.; SU, Y.; HU, T. Chapter 2 - Working Principles of LiDAR. In: GUO, Q.; SU, Y.; HU, T. LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology. Academic Press, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823894-3.00002-5.

HAACK, Mayane. Aplicação de técnicas de inspeção em pontes de madeira do município de Cunha Porã – SC. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

HASSANI, S.; DACKERMANN, U. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. Sensors, v. 23, 2204, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/s23042204.

HELENE, P.R.L. Corrosão das Armaduras para Concreto Armado. São Paulo. IPT, PINI, 1986.

HUNE, R. P. Monitoramento e inspeção de pontes ferroviárias quanto a danos estruturais com utilização de tecnologia de radares interferométricos. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

HUNE, R. P. *et al*. Abordagens inovadoras para inspeção e monitoramento de pontes baseadas em técnicas remotas e não invasivas. 2025. In: Anais do 66º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2025, Curitiba, 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2409: Paints and varnishes – Cross-cut test.

_____. ISO 2808: Paints and varnishes – Determination of film thickness.

_____. ISO 4624: Paints and varnishes – Pull-off test for adhesion.

_____. ISO 16810: Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General principles.

_____. ISO 9934-1: Non-destructive testing – Magnetic particle testing. Part 1: General principles.

_____. ISO 12716: Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Vocabulary.

_____. ISO 14284: Steel and iron – Sampling and preparation of samples for the determination of chemical composition.

_____. ISO 15708-2: Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography. Part 2: Principles, equipment and samples.

_____. ISO 17636-1: Non-destructive testing of welds – Radiographic testing. Part 1: X- and gamma-ray techniques with film.

IWAKUNI CITY TOURISM PROMOTION DIVISION. Kintaikyo Bridge. Iwakuni City Tourism Official Website. Publicado em 1º de novembro de 2020. Disponível em: https://kankou.iwakuni-city.net/itn/by-area/kintaikyo-bridge-area/kintaikyo-bridge/. Acesso em: 29 ago. 2025.

JUNQUEIRA, J. F. A. Proposta de procedimento para identificação estrutural de pontes e viadutos ferroviários. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

KNEIP NETO, J.; JUNQUEIRA, J.; FINGER, D.; OLIVEIRA, G. S. Inspeções subaquáticas de pontes ferroviárias utilizando veículos operados remotamente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES (CBPE), 2025. Anais. [S.l.]: ABPE, 2025. Disponível em: http://abpe.org.br/trabalhoscbpe2025/trabalhos/ID_050.pdf. Acesso em: 23 jan. 2026.

LABORATORY EQUIPMENT SUPPLIES (PTY) LTD. Resipod Fully Integrated Surface Resistivity Instrument. Disponível em: https://labequip.co.za/product/resipod-fully-integrated-surface-resistivity-instrument-lcn700/. Acesso em: 05 dez. 2025.

LANER, F. J. Manifestações Patológicas nos Viadutos, Pontes e Passarelas do Município de Porto Alegre. Porto Alegre, 2001.

LANTSOGHT, E. O. L. Load testing of bridges: current practice and diagnostic load testing. Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2019. Structures and Infrastructures Series, v. 12.

LEE KELLY, A., Atadero, R. A., & Mahmoud, H. N. (2019). Life Cycle Cost Analysis of Deteriorated Bridge Expansion Joints. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 24(1), 04018033. doi:10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000407.

MACHADO, A. M.; SARTORTI, A. L. Pontes: patologias dos aparelhos de apoio. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS – CINPAR, 10., 2010, Fortaleza.

MARTINS, A. C. P. *et al*. BIM based mixed reality application for bridge inspection. Automation in Construction, v. 168, 105775, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105775.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia. Vol. 4, número 4, p.3-12. Vitória – Espírito Santo, 2001.

MEDEIROS, M. H. F.; GIORDANO, D. E.; PEREIRA, E.; VIGNOLO, A.; GALEANO, R.; HELENE, P. Inspeção no palacio de la luz – Montevideo: uma visão de durabilidade. Revista Alconpat, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 89-103, 30 maio 2012. Revista ALCONPAT. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i2.30.

MEHRABI, A.; KHEDMATGOZAR DOLATI, S. S. Structural health monitoring and performance evaluation of bridges and structural elements. Infrastructures, v. 9, n. 10, 178, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures9100178.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIXEDO, A. *et al*. Online unsupervised detection of structural changes using train–induced dynamic responses. Mechanical Systems and Signal Processing, [S.L.], v. 165, 108268, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108268.

MOURA, E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17082010-094223/. Acesso em: 26 nov. 2025.

MRS LOGÍSTICA. Treinamento se preparação profissional de manutenção de via permanente. [S. l.]: MRS, 2004.

MURPHY, R. R. *et al*. Robot-assisted bridge inspection after Hurricane Ike. In: IEEE International Workshop on Safety, Security & Rescue Robotics, Denver, CO, USA, 2009. DOI: 10.1109/SSRR.2009.5424144.

NEGRI, R.; STEIL, T. L.; NEGRI, D. Ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência à compressão do concreto. Revista Matéria, v. 29, n. 2, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000200004.

NEVILLE, Adam M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOTÍCIA FERROVIÁRIA. Ferrovia Norte-Sul pega fogo sozinha no Tocantins. Disponível em: https://sinfer.wordpress.com/2014/09/06/ferrovia-norte-sul-pega-fogo-sozinha-no-tocantins/. Acesso em: 25 nov. 2025.

NUNES, R. Inspeção de Soldas e Ensaios Não Destrutivos. Welding Land, 2020. Disponível em: https://www.weldingland.com.br/post/inspe%C3%A7%C3%A3o-de-soldas-e-ensaios-n%C3%A3o-destrutivos. Acesso em: 05 dez. 2025.

OWERKO, T.; ORTYL, L.; KOCIERZ, R.; KURAS, P.; SALAMAK, M. Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry case study. In: BIONDINI, F.; FRANGOPOL, D. M. (Eds.). Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. London: Taylor & Francis Group, 2012. p. 181-188. ISBN 978-0-415-62124-3.

PANIGATI, T. *et al.* Drone based bridge inspections: current practices and future directions. Automation in Construction, v. 173, 106101, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106101.

PASSOS, R. Trânsito segue parcialmente interditado na MG-050, em Mateus Leme. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/19/interna_gerais,726444/transito-segue-parcialmente-interditado-na-mg-050-em-mateus-leme.shtml>. Acesso em: 03 de jul. de 2017.

PEREIRA, S. A. A. Inspeção de obras de arte metálicas e mistas – Caso de estudo: ponte de D. Luís s/ o Rio Tejo. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.83p. Lisboa. 2018.

PFEIL, W. Pontes em concreto armado: elementos de projeto, solicitações, dimensionamento. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

PFEIL, W.; PFEIL, Michèle. Estruturas de madeira. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PINTO, J. I. B. R. Caracterização superficial de pavimentos rodoviários. 2003. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2003.

PINTO, E. M.; CALIL JUNIOR, C. Resistência mecânica de estruturas de madeira em situação de incêndio: proposta para a inclusão em anexo da NBR 7190. Disponível em: http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/283. Acesso em: 08 dez. 2025.

REHMAN, S. K. U. et al. Nondestructive test methods for concrete bridges: a review. Construction and Building Materials, v. 107, p. 58-86, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011.

RIBEIRO, I. et al. Linear and nonlinear time-series methodologies for bridge condition assessment: a literature review. Advances In Structural Engineering, v. 27, n. 13, p. 2204-2227, 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/13694332241260133.

RICHTER, J. G. Manutenção preditiva com sistema de identificação de vibrações em vídeo usando ampliação de movimento. 2021. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

RITTER, M. A.; HEDGECOCK, E. E.; GRABNER, B.; JOHNSON, K.; STAUCH, J. TAYLOR, R. J.; BUNNELL, S. OLIVA, M. G. (1990). Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. Chapter 15: Bridge Maintenance, Rehabilitation, and Replacement - Case Histories. United States Department of Agriculture, USDA. Forest Service. United States.

SANTOS, J. A.; Patologias em Obras-de-Arte. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

SEMIL. Restaurada, ponte pênsil de São Vicente mantém o charme e a funcionalidade. SEMIL, 26 out. 2023. Disponível em: https://semil.sp.gov.br/2023/10/restaurada-ponte-pensil-de-sao-vicente-mantem-o-charme-e-a-funcionalidade/. Acesso em: 09 dez. 2025.

SHUPE, TODD; LEBOW, STAN; RING, DENNIS. 2008. Causes and control of wood decay, degradation & stain. Pub. (Louisiana Cooperative Extension Service) -2703. [Baton Rouge, La.]: Louisiana State University Agricultural Center, [2008]. 26 pages.

SIEDEL, H.; LEISEN, E. V. P.; LEISEN, H. Salt load and deterioration of sandstone at the temple of angkor wat, Cambodia. 11 International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland. Proceedings, v. 1, p.267-274, 2008.

SIGA GEOFÍSICA. Radar de penetração do solo: o que é e como funciona. Disponível em: https://sigageofisica.com.br/radar-de-penetracao-do-solo/. Acesso em: 04 dez. 2025.

SKIDMORE, OWINGS & MERRILL. The High Line Moynihan Connector: Timber Bridge Installation. News, 16 maio 2023. Disponível em: https://www.som.com/news/the-high-line-moynihan-connector-timber-bridge-installation/. Acesso em: 29 ago. 2025.

SLAB TRACK AUSTRIA. Slab track on the bridge over the River Arges. Disponível em: https://slabtrackaustria.com/projects/feste-fahrbahn-auf-der-bruecke-ueber-den-fluss-arges/. Acesso em: 25 nov. 2025.

SONAGLIO, R. Tecnologias e técnicas para inspeção de dutos e estruturas submarinas em águas rasas com AUV. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Joinville, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/190063. Acesso em: 23 jan. 2026.

SOUZA, E. F. *et al*. Drive-by damage detection methodology for high-speed railway bridges using sparse autoencoders. Railw. Eng. Sci. (2024). DOI: https://doi.org/10.1007/s40534-024-00347-3.

SOUZA, E. F. *et al*. Drive-by methodologies applied to railway infrastructure subsystems: a literature review: Part I. Applied Sciences, v. 13, n. 12, 6940, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/app13126940.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1998.

TAN, C. *et al*. Extraction of bridge modal parameters using passing vehicle response. Journal Of Bridge Engineering, v. 24, n. 9, 04019087, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001477.

TASCA, M. Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. 2012. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2012.

TEJEDOR, C. M. Patologias, Recuperação e Reforço com Protensão Externa em Estruturas de Pontes. 2013. 129p. Projeto de Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TOOME, F. K. Métodos remotos e não invasivos para o monitoramento de obras de arte especiais. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2023.

VIEIRA, M. I. C. Tipologia, instalação, funcionamento e manutenção dos diversos tipos de aparelhos de apoio em Obras de Arte. 2013. 226 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

VIRGINIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. VDOT: Preliminary Bat Inventory Guidelines for Bridges. Virgínia, 2010. 16 p.

XIMENES, A. A.; Análise das Juntas de Dilatação das Pontes e Viadutos da Região Metropolitana do Recife. Projeto de Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Pernambuco, para obtenção do Tipologia, instalação, funcionamento e manutenção de diversos tipos de juntas de dilatação em Obras de Arte. Título de Especialista em Inspeção, Manutenção e Recuperação de Estruturas. Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

ZHANG, B. *et al*. A review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges. Measurement, v. 245, 116575, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116575.

WESTERN WOOD STRUCTURES, Inc. Vehicular Timber Bridges. [S.l.]: Western Wood Structures, 2022. Documento técnico em PDF, 2 p. Disponível em: https://westernwoodstructures.com/wp-content/uploads/2022/03/Vehicular-Timber-Bridges.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.