

Escola Politécnica de Pernambuco
Programa de Pós-Graduação em Engenharia

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INSPEÇÃO,
MANUTENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS**

**PONTES E PASSARELAS METÁLICAS E
MISTAS**

**Fundamentos e tópicos de conservação,
recuperação e reforço estrutural
(2ª Edição revisada e atualizada)**

Disciplina: Reforço e Recuperação de Pontes e Viadutos

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitório

PONTES E PASSARELAS METÁLICAS E MISTAS

**Fundamentos e tópicos de conservação,
recuperação e reforço estrutural**

(2ª Edição revisada e atualizada)

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitória

Recife, setembro de 2022

APRESENTAÇÃO DA SEGUNDA EDIÇÃO

Quando a primeira edição deste texto foi publicada em 2015, ainda não existia no Brasil uma norma para projetos de pontes metálicas e mistas e tais estruturas eram dimensionadas com o uso das normas americanas ou das normas europeias. Finalmente, em 08/07/2020 foi editada a norma ABNT NBR 16694- **Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto**.

A edição de uma norma nacional preencheu uma grande lacuna que havia para os projetos das pontes novas, porém ainda continuou a existir uma carência de literatura técnica voltada para as pontes existentes, que começou a ser resolvida com a criação pela ABECE em maio de 2020 de um grupo de estudos de inspeção de pontes mistas, que continua ativo e deverá definir as diretrizes para a elaboração de uma norma para inspeção dessas obras.

Mesmo com esses avanços, e a grande produção do conhecimento em níveis nacional e internacional, ainda não foi possível conseguir consolidar no Brasil uma utilização em grande escala de pontes e viadutos metálicos. Também ainda não se conseguiu superar as dificuldades para a conservação, recuperação e reforço desses tipos de obras.

Nesse contexto, entendemos como oportuno fazer uma revisão do texto de 2015, com a inclusão de alguns tópicos que não fizeram parte daquela edição, como é o caso das patologias e conservação de passarelas metálicas. Também foram feitos ajustes em outros itens do texto original adotando uma abordagem mais atualizada, e com a inclusão de outros casos de recuperação e reforço estrutural.

Esta atualização, como a primeira edição, não aborda projeto nem construção de pontes metálicas novas, que já dispõem de vasta literatura. O objetivo principal é de caráter didático e foi elaborado a partir das notas de aula da disciplina Reforço e Recuperação de Pontes e Viadutos, que o autor leciona no Curso de Especialização em Inspeção, Manutenção e Recuperação de Estruturas na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco.

Continua sendo, portanto, um trabalho didático voltado para o aprendizado dos aspectos relacionados à conservação, recuperação e reforço de pontes e passarelas metálicas e mistas. Mesmo assim, poderá ser útil para ampliar os conhecimentos dos engenheiros em geral, em especial daqueles que queiram adquirir as informações básicas sobre o tema.

O autor.

Recife, 2022

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	3
1. FUNDAMENTOS.....	4
1.1. Breve histórico das pontes metálicas	4
1.2. Sistemas estruturais mais utilizados nas pontes metálicas	6
1.2.1. Pontes em vigas de perfis de alma cheia	7
1.2.2. Pontes em vigas caixão	7
1.2.3. Pontes em treliças.....	8
1.2.4. Pontes em vigas mistas	9
1.2.5. Pontes em arco	10
1.2.6. Pontes em pórtico.....	11
1.2.7. Pontes estaiadas	11
1.2.8. Pontes pênses	12
1.3. Propriedades do aço estrutural	13
2. TÓPICOS RELACIONADOS À CONSERVAÇÃO E SEGURANÇA.....	16
2.1. Principais danos estruturais nas pontes metálicas	17
2.1.1. Corrosão	17
2.1.1.1. Procedimentos usuais para a prevenção e o combate à corrosão	19
2.1.2. Fadiga	23
2.1.2.1. Algumas técnicas para identificar a existência de fratura por fadiga	25
2.1.3. Fambagem da alma de vigas sob a ação de flexão, cortante e cargas concentradas	26
2.1.4. Flambagem lateral causada por momento fletor negativo	27
2.2. Ilustrações de danos frequentes nos tabuleiros de pontes metálicas	28
3. RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL	30
3.1. Métodos mais usuais de reforço de tabuleiros metálicos	31
3.1.1. Reforço por colagem de chapas e perfis na estrutura existente	31
3.1.2. Reforço de ligação rebitada.....	32
3.1.3. Reforço com a aplicação de protensão	33

3.1.4.	Reforço e alargamento de tabuleiros de concreto com estruturas metálicas	38
3.2.	Casos de recuperação e reforço das estruturas metálicas de duas pontes.....	39
3.2.1.	Ponte Seis de Março.....	39
3.2.2.	Ponte Arquiteto Wilson Campos Júnior.....	43
4.	COLAPSOS ESTRUTURAIS DE PONTES METÁLICAS.....	49
5.	DANOS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PASSARELAS METÁLICAS	57
5.1.	Modelos estruturais mais utilizados em passarelas metálicas	59
5.2.	Danos estruturais e colapsos causados por choques de veículos	61
5.3.	Danos e manifestações patológicas mais frequentes nas passarelas metálicas	63
5.3.1.	Exemplos de danos nas ligações.....	65
5.3.2.	Exemplos de corrosão nos componentes dos chumbadores de pilares metálicos	66
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

INTRODUÇÃO

Esta publicação, mesmo tendo um caráter didático, também tem a finalidade de transmitir aos profissionais da engenharia os conceitos básicos sobre conservação, recuperação e reforço de pontes metálicas e mistas. Foi editada pela primeira vez em 2015 e está sendo revisada e atualizada nesta segunda edição para atender às mudanças que aconteceram na área relacionada às pontes metálicas no Brasil, principalmente pela edição de uma norma nacional para o projeto de pontes metálicas e mistas. Este texto também reservou um capítulo com tópicos sobre passarelas metálicas que não fizeram parte da edição anterior.

Como na primeira edição, foi adotada uma abordagem prática, de modo a permitir que os conceitos sejam assimilados tanto pelos alunos, como pelos engenheiros, mesmo que não sejam especialistas, mas pretendam adquirir algum conhecimento sobre o tema, que no Brasil ainda é carente de literatura técnica especializada.

Nesse sentido, o texto foi organizado em seis capítulos.

No primeiro capítulo são apresentados os conceitos de ordem geral, incluindo um breve histórico sobre o uso de pontes metálicas. Também são descritos os principais sistemas estruturais desses tipos de obras e as propriedades dos aços estruturais.

O segundo capítulo mostra alguns tópicos de conservação, conceituando os danos estruturais mais frequentes, as formas mais adequadas de detalhamento de projetos para evitar patologias, e alguns métodos de proteção e recuperação estrutural.

No terceiro capítulo é abordado o reforço estrutural das pontes metálicas, com a descrição dos métodos mais utilizados e a apresentação de dois casos reais. O quarto capítulo relaciona alguns exemplos de colapsos estruturais ocorridos com esses tipos de pontes; o quinto apresenta alguns tópicos sobre passarelas metálicas, destacando alguns conceitos que devem ser considerados nos projetos e os principais danos e manifestações patológicas nessas estruturas.

No sexto e último capítulo são feitas as considerações finais.

Ao final do texto é apresentada uma relação das referências bibliográficas utilizadas que podem ser consultadas por quem tiver interesse em aprofundar o conhecimento sobre o tema.

1. FUNDAMENTOS

1.1. Breve histórico das pontes metálicas

As pontes metálicas surgiram no final do século XVIII, com as estruturas de ferro fundido. Com o início das ferrovias, tornaram-se necessárias grandes obras para suportar elevadas cargas. Tais pontes passaram a ser erguidas com os novos materiais de construção que eram então as novidades daquela época: o ferro forjado e o aço. Começara então o período das grandes pontes tipo pênséis e em treliças metálicas, como a ponte ferroviária sobre o Firth of Forth (1890) na Escócia, com vãos livres de 512m, ilustrada na figura 1.1.



Figura 1.1 – Ponte Firth of Forth, na Escócia, construída em 1890, foi recorde mundial de vão livre: 512m. (Fonte: Internet)

Com a revolução industrial e a competitividade dos produtos siderúrgicos, as pontes de aço estrutural passaram a ser largamente utilizadas a partir do final do século XIX, com destaque para as pontes pênséis. Após a segunda Guerra Mundial começaram a ser construídas as pontes estaiadas. No Brasil, a ponte Hercílio Luz (1926), localizada em Florianópolis – SC, destaca-se na literatura técnica das pontes suspensas.

No Recife, a ponte Seis de Março, também conhecida como Ponte Velha (1921), e a ponte da Boa Vista (1876) são exemplos de obras metálicas que estão incorporadas à paisagem urbana da capital de Pernambuco, conforme mostram as figuras 1.2 e 1.3.



Foto: Paulo Amâncio

Foto 1.2 – Ponte Seis de Março, no Recife. (Fonte: VITÓRIO, 2002)



Foto: Paulo Amâncio

Figura 1.3 – Ponte da Boa Vista, no Recife. (Fonte: VITÓRIO, 2002)

A evolução dos procedimentos de cálculo e os avanços da indústria metalúrgica e dos processos construtivos, permitiram a elaboração de projetos de pontes metálicas cada vez mais arrojadas, como é o caso da Ponte Rio-Niterói, uma notável obra da engenharia nacional com vigas metálicas laterais de 200m e vão central de 300m, que se constituiu em recorde mundial à época da construção, conforme mostra a figura 1.4.



Figura 1.4 – Vãos metálicos da Ponte Rio-Niterói. (Fonte: PFEIL, 2009)

Mesmo assim, o Brasil ainda não consolidou uma tradição na utilização das estruturas metálicas em grande escala. O concreto continua sendo o material estrutural mais utilizado nas construções de pontes e de viadutos. Uma das justificativas citadas é o alto custo das estruturas metálicas, associado à vulnerabilidade quanto à corrosão ambiental.

Com o advento dos aços com altas resistências mecânicas e à corrosão atmosférica, o desenvolvimento da solda e o emprego de chapas de grandes dimensões, chegaram-se a

soluções possíveis de serem adotadas em certas situações em que não haveria a necessidade de tirar total partido da elevada resistência do aço, a partir da utilização racional de elementos de concreto associados a elementos metálicos. Tais soluções de projetos foram denominadas estruturas mistas.

Conceitualmente, uma ponte mista é definida como a junção de vigas metálicas com um tabuleiro de concreto. Para que isso seja estruturalmente possível é necessário garantir a solidarização entre os dois materiais por meio de elementos de ligação conhecidos como conectores de cisalhamento.

1.2. Sistemas estruturais mais utilizados nas pontes metálicas

As pontes metálicas, assim como as pontes em geral, são compostas pelos seguintes elementos, conforme ilustrado na figura 1.5.

Superestrutura

Vence o vão necessário a ser transposto pela ponte e recebe diretamente as cargas provenientes do tráfego dos veículos, transmitindo-as à mesoestrutura. É normalmente denominada de tabuleiro.

Mesoestrutura

Tem a função de receber as cargas da superestrutura e transmiti-las para as fundações. É constituída pelos pilares, travessas e encontros.

Infraestrutura

A infraestrutura, ou fundação, tem a finalidade de receber as cargas da estrutura, transmitindo-as para o solo. Pode ser direta (sapatas) ou profunda (estacas ou tubulões).

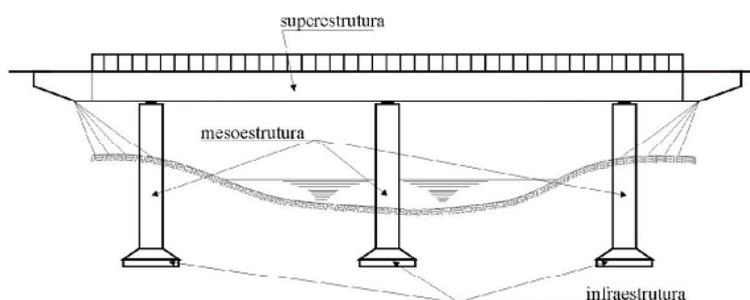


Figura 1.5 – Elementos componentes de uma ponte. (Fonte: VITÓRIO, 2002)

Nas pontes metálicas e mistas os pilares e encontros são geralmente de concreto armado, a exemplo dos demais tipos de pontes. Também não existem diferenças nas soluções adotadas para as fundações, de modo que o uso dos componentes metálicos fica restrito na maioria das vezes à superestrutura.

Dentre os sistemas estruturais que podem ser utilizados nos tabuleiros das pontes metálicas podem ser destacados os seguintes:

- ✓ Viga de perfis de alma cheia;
- ✓ Vigas caixão;
- ✓ Treliças;
- ✓ Vigas mistas;
- ✓ Arcos;
- ✓ Pórticos;
- ✓ Estaiadas;
- ✓ Pênseis.

1.2.1. Pontes em vigas de perfis de alma cheia

Os perfis de alma cheia (laminados ou soldados) são utilizados como longarinas e transversinas nas pontes com tabuleiros mais simples.

Os perfis laminados são produzidos comercialmente no Brasil com altura máxima de 610mm, o que restringe a utilização a pontes com pequenos vãos.

O uso de chapas de reforço pode ajudar a aumentar o vão, principalmente quando empregadas como vigas mistas.

Os perfis soldados são compostos por várias chapas e não têm limites de altura para a fabricação. Por isso podem ser usados em tabuleiros com vãos maiores. A figura 1.6 mostra seções transversais típicas utilizadas para vigas de alma cheia.

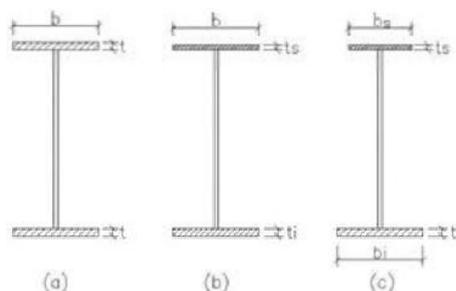


Figura 1.6 – Seções transversais típicas de vigas de alma cheia. (Fonte: PINTO e BELLEI, 2007)

1.2.2. Pontes em vigas caixão

As vigas caixão são constituídas por dois ou mais perfis com uma única mesa inferior, podendo formar diversas configurações como as ilustradas na figura 1.7.

As seções transversais dos tabuleiros em caixão têm um bom desempenho nas pontes curvas pela grande resistência à torção.

Nesses tipos de tabuleiros são utilizados elementos que funcionam como diafragmas transversais (transversinas) e a mesa superior funciona como laje do tabuleiro. É possível obter uma relação altura/vão variando de 1/20 a 1/30, o que significa pontes com tabuleiros bem esbeltos.

A figura 1.8 mostra a ilustração de um corte transversal esquemático de uma ponte com tabuleiro constituído por viga caixão e laje de concreto.

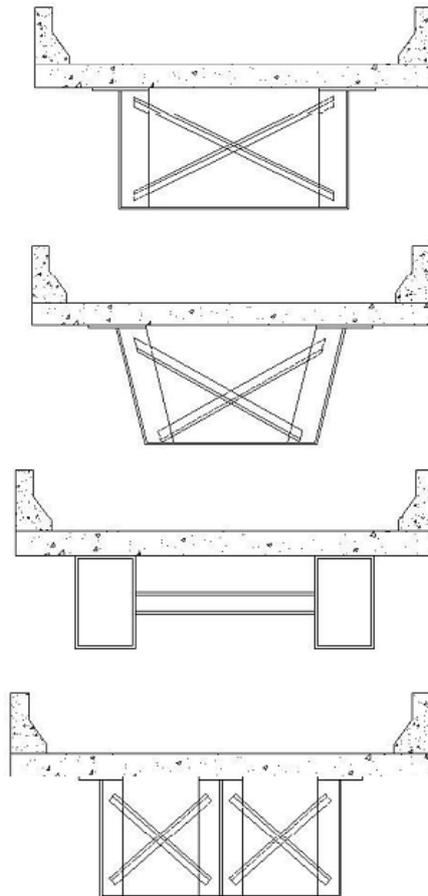


Figura 1.7 – Seções transversais de pontes em viga caixão. (Fonte: PINHO e BELLEI, 2007)



Figura 1.8 – Corte esquemático de um tabuleiro com vigas caixão e laje de concreto. (Fonte: MARQUES, 2011)

1.2.3. Pontes em treliças

Nas estruturas em treliças as barras são solicitadas por forças de tração ou compressão e possibilitam maiores alturas com pequeno peso e limitação da flecha.

A utilização desse tipo de estrutura deve ser condicionada a uma análise de custos, considerando as etapas de fabricação, proteção e manutenção ao longo do tempo.

A laje do tabuleiro pode ser posicionada na face superior ou inferior das treliças conforme as diretrizes do projeto da ponte.

De modo geral esse sistema é considerado econômico para alturas entre 1/8 a 1/15 de vão.

Na figura 1.9 são mostrados os tipos de treliças mais usualmente utilizadas nas superestruturas das pontes.

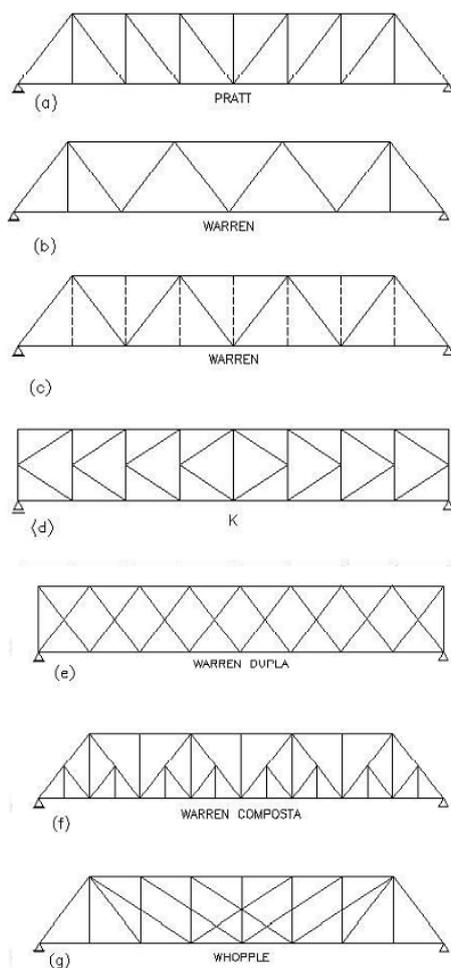


Figura 1.9 – Tipos mais utilizados de treliças.
(Fonte: PINHO e BELLEI, 2007)

1.2.4. Pontes em vigas mistas

As pontes cujos tabuleiros utilizam esse sistema estrutural são denominadas pontes mistas, que caracterizam-se pela junção de vigas metálicas com uma laje de concreto na aba superior por meio de conectores metálicos de cisalhamento.

Existem diversos tipos de conectores, porém os mais utilizados são os pinos tipo Stud e os perfis laminados tipo “U”.

Essas tipologias de pontes são utilizadas economicamente para vãos entre 20m e 50m. A figura 1.10 mostra a seção transversal de uma ponte mista típica com tabuleiro em grelha com quatro

vigas de perfis “I” de alma cheia solidarizados a uma laje de concreto. Na figura 1.11 estão indicados os tipos de conectores mais utilizados (Stud Bolts) para a junção entre os perfis e a laje do tabuleiro.

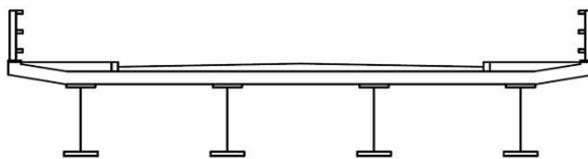


Figura 1.10 – Seção transversal típica de uma ponte mista. (Fonte: FERRAZ, 2009)



Figura 1.11 – Detalhes dos conectores Stud Bolts. (Fonte: DE NARDIN et al. 2005)

1.2.5. Pontes em arco

Esse sistema estrutural foi um dos mais utilizados no passado como a única alternativa para vencer grandes vãos e diante da dificuldade para execução de apoios intermediários nos cursos d'água ou em vales profundos.

As primeiras pontes metálicas em arco, com o uso de ferro fundido, foram construídas na Inglaterra na segunda metade do século dezoito, com destaque para a ponte de Coalbrookdale, sobre o rio Severn com um vão de 30m, construída em 1779, conforme ilustração da figura 1.12.

Uma ponte metálica notável em arco com vão da ordem de 200m é a ponte Luis I, sobre o rio Douro, ligando as cidades do Porto e Vila Nova de Gaia em Portugal. Essa bela obra foi concluída em 1887 e até hoje funciona muito bem, com um tabuleiro superior apoiado sobre o arco e um tabuleiro inferior atirantado, conforme mostra a figura 1.13.

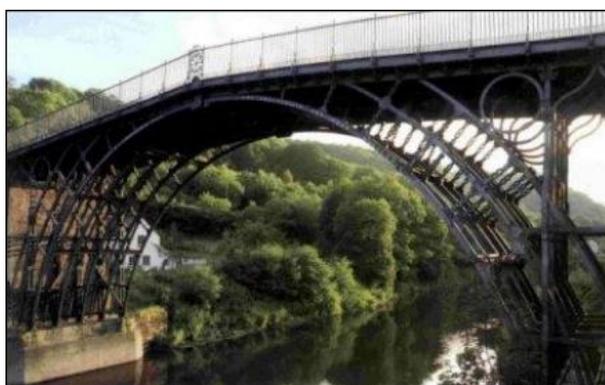


Figura 1.12 – Ponte de Coalbrookdale, sobre o rio Severn na Inglaterra. (Fonte: PFEL, 2009)



Figura 1.13 – Ponte Luis I, sobre o Rio Douro, no Porto em Portugal.

1.2.6. Pontes em pórtico

As pontes em pórtico se caracterizam pelas ligações das vigas com os pilares e com os encontros, de modo a garantir a continuidade entre esses elementos em substituição das articulações.

Como as vigas são todas engastadas, os momentos negativos dos engastamentos reduzem os momentos positivos, possibilitando reduções de alturas dos vãos dos tabuleiros.

Os pórticos mais usuais são os biengastados e os biarticulados, conforme a figura 1.14.

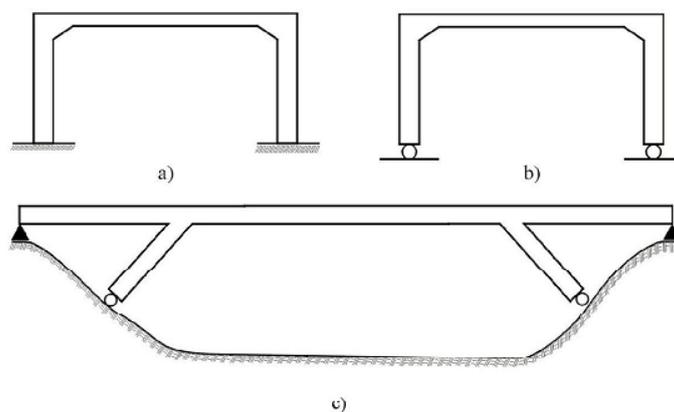


Figura 1.14 – Esquemas de pontes em pórticos: a) biengastados; b) biarticulados; c) biarticulados com montantes inclinados. (Fonte: VITÓRIO, 2002)

1.2.7. Pontes estaiadas

Nas pontes estaiadas o tabuleiro pode ser metálico ou de concreto protendido e é suspenso por cabos inclinados dispostos em leque fixados em torres.

Tais pontes devem ter grande rigidez à torção para reduzir os movimentos vibratórios causados pela ação transversal do vento.

Quando o tabuleiro é de concreto protendido é possível vencer vãos de até 600m. Quando é utilizado tabuleiro metálico o vão pode alcançar 900m. Na figura 1.15 está ilustrada esquematicamente uma ponte estaiada. A figura 1.16 mostra a ponte Severin, em Colônia na Alemanha, construída com tabuleiro metálico em 1960 e considerada um símbolo entre as pontes estaiadas.

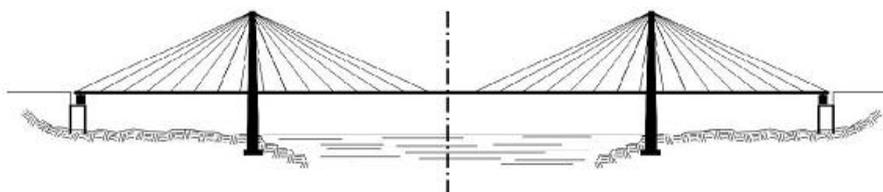


Figura 1.15 – Esquema de ponte estaiada com cabos dispostos em leque.

(Fonte: VITÓRIO, 2002)



Figura 1.16 – Ponte Severin, em Colônia, na Alemanha.

1.2.8. Pontes pênséis

As pontes pênséis são constituídas por cabos dispostos parabolicamente e pendurais verticais, conforme a figura 1.17. São executadas geralmente em vigamentos metálicos suspensos em cabos portantes de aço. Os vigamentos, que podem ser em treliças ou vigas de alma cheia, devem ter grande rigidez à flexão e principalmente à torção, de modo a minimizar os efeitos dos movimentos vibratórios transversais que podem causar desconforto aos usuários ou mesmo risco à estrutura.

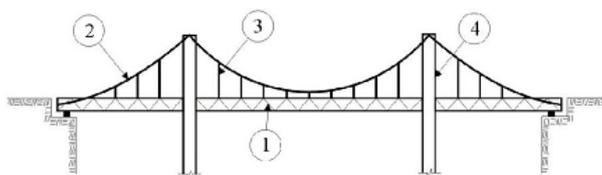


Figura 1.17 – Esquema de uma ponte Pênsil: 1 viga metálica; 2 cabo portante; 3 pendurais de suspensão de vigamento no cabo portante; 4 torres de apoio do cabo portante.

(Fonte: VITÓRIO, 2002).

As pontes pênséis são geralmente utilizadas quando se faz necessário vencer vãos ainda maiores que as das estaiadas. Entre essa tipologia, destaca-se a Golden Gate, concluída em 1937, em São Francisco, nos Estados Unidos, cujo vão livre com 1.280m, significou uma das maiores realizações da engenharia estrutural em todos os tempos.

Atualmente, a ponte Çanakkale 1915, na Turquia, tem o maior vão livre do mundo em estrutura pênsl, com comprimento de 2023m no vão principal.



Figura 1.18 – Ponte Golden Gate em São Francisco, USA.

1.3. Propriedades do aço estrutural

Os aços atualmente utilizados nas estruturas são geralmente divididos entre aços- carbono e os aços de baixa liga, porém o primeiro material siderúrgico empregado em construções foi o ferro fundido, adotado em inúmeras pontes em arco ou treliçadas entre 1780 e 1820, conforme PFEIL (2009).

Durante anos e até meados do século passado, as estruturas eram construídas com aço-carbono.

A partir das décadas de 1960 e 1970, iniciou-se o emprego de arcos de baixa liga.

O Brasil dispõe atualmente de um parque siderúrgico com capacidade de produzir aço de qualidade para estruturas de grande porte.

Os aços estruturais utilizados no país são fabricados de acordo com as normas estrangeiras, em especial a ASTM (American Society for Testing and Materials) e a DIN (Deutsche Industrie Normen). Os aços também podem ser fornecidos de acordo com denominações próprias dos fabricantes e da ABNT.

Nas aplicações relacionadas às estruturas metálicas é de fundamental importância o conhecimento das seguintes características físicas, que podem ser adotadas para todos os tipos de aço estrutural nas condições normais de temperatura atmosférica:

- ✓ Módulo de elasticidade $E = 200.000MPa$
- ✓ Coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$

✓ Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6}$ por $^{\circ}C$

✓ Massa específica $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos e forjados que foram utilizados em estruturas de pontes antigas (várias delas ainda em funcionamento) estão indicadas na tabela 1.1. Os aços estruturais padrão ABNT constam da tabela 1.2. A tabela 1.3 mostra propriedades dos aços para usos em pontes de aço e mistas de aço e concreto, conforme a norma ABNT NBR 16694 (2020)

Tabela 1.1 – Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundido (cast iron) e Forjado (wrought iron).

(Fonte: PFEIL, 2009)

Propriedade	Material			
	Ferro Fundido Cinzento A48 N.º 20	Ferro Fundido Maleável A47. Gr 32510	Ferro de Lingote Recozido 0,02% C	Ferro Forjado 0,10% C (wrought iron)
• Tensão de escoamento à compressão $f_{cy,0.2}$ (MPa)	560	230	150	210
• Tensão de escoamento à tração $f_{y,0.2}$ (MPa)	—	230	170	210
• Tensão de ruptura à tração f_u (MPa)	140 (min)	350	290	350
• Módulo de elasticidade E (GPa)	77 (min)	170	210	190
• Módulo de cisalhamento G (GPa)	28	70	84	70
• Elongação (% em base 2")	1	10	45	30
• Dureza Brinell	130	120	70	100
• Resistência à fadiga (2 milhões de ciclos) — flexão reversível (MPa)	80	180	180	170

Tabela 1.2 – Propriedades mecânicas dos aços estruturais padrão ABNT. (Fonte: NBR 8800, 2008)

ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410	CF-26	260/260	400/410
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	---/300	---/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450	CGR 500 e CGR 500A	370	490
G-42	415	520	Q-40	380	480			
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920/ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261					
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular		
				f_y MPa	f_u MPa	f_y MPa	f_u MPa	
CFR 400	---/250	---/380	B	290	400	317	400	
CFR 500	310/370	450/490	C	317	427	345	427	

^a Para limitações de espessura, ver norma correspondente.

Tabela 1.3 – Propriedades dos aços para uso em pontes metálicas e mistas. (Fonte: NBR 16694, 2020)

Especificação	Produto *	Grupo de perfil ^{a b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f _y MPa	f _u MPa	
MR 250 (ABNT NBR 7007)	–	–	–	250	400-560	
AR 350 (ABNT NBR 7007)	–	–	–	345	450	
AR 350 COR (ABNT NBR 7007)	–	–	–	345	485	
ASTM A36	Perfis laminados	1, 2 e 3	–	250	400 a 550	
	Barras e chapas ^c	$t \leq 200$ mm				
ASTM A572	Perfis laminados	1, 2 e 3	42	290	415	
			50	345	450	
		55	380	485		
		1 e 2	60	415	520	
	Barras e chapas ^c	$t \leq 150$ mm	65	450	550	
			$t \leq 150$ mm	42	290	415
			$t \leq 100$ mm	50	345	450
			$t \leq 50$ mm	55	380	485
	$t \leq 31,5$ mm	60	415	520		
		65	450	550		
ASTM A588	Perfis laminados	1 e 2	–	345	485	
	Barras e chapas ^c	$t \leq 100$ mm	–	345	480	
		$100 \text{ mm} < t \leq 125$ mm	–	315	460	
		$125 \text{ mm} < t \leq 200$ mm	–	290	435	
ASTM A709/A709M, para peças não estruturais e de aparelhos de apoio	–	–	–	250	400	
ASTM A 709/A709M G50	–	–	–	345	450	

^a Grupos de perfis laminados para efeito de propriedades mecânicas:
 — Grupo 1: perfil com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm;
 — Grupo 2: perfil com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm;
 — Grupo 3: perfil com espessura de mesa superior a 50 mm;
 — Grupo 3: perfis tubulares.

^b t corresponde à menor dimensão ou ao diâmetro da seção transversal da barra.

^c Barras redondas, quadradas e chatas.

2. TÓPICOS RELACIONADOS À CONSERVAÇÃO E SEGURANÇA

Conceitualmente, a conservação de uma estrutura, inclusive de uma ponte, é definida como o conjunto das ações necessárias para que ela se mantenha com as características resistentes, funcionais e estéticas para as quais foi projetada e construída.

É fato notório que a cultura dominante nos órgãos responsáveis pelas obras públicas de infraestrutura, nos âmbitos federal, estaduais e municipais prioriza apenas as ações voltadas para a execução de obras novas, relegando a um segundo plano as questões relacionadas à conservação das obras antigas. Um exemplo concreto desse fato é o atual estado de degradação das pontes e viadutos da malha viária brasileira, que não recebem manutenções, às vezes sequer as corretivas, que na maioria das vezes só são realizadas quando uma obra já está quase atingindo o estado de ruína.

Outro fato que contribui para dificultar uma análise mais realista do estado de conservação das pontes brasileiras, principalmente as metálicas e mistas, é a deficiência de dados cadastrais. Dados obtidos do Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais (SGO) do DNIT mostram que das 6833 pontes cadastradas nas rodovias federais apenas 4% são constituídas por tabuleiro com estruturas metálicas ou mistas e todas as demais pontes são de concreto. Não existem informações cadastrais sobre a quantidade dessas tipologias de OAEs nas rodovias estaduais e municipais.

Evidentemente, as limitações dos estudos relacionados à conservação e aos procedimentos para a identificação dos danos, recuperação e reforço de pontes metálicas envolvem diversas peculiaridades quando comparados com os voltados para as estruturas das pontes de concreto e são evidenciadas pela pouca utilização de estruturas metálicas em Obras de Arte Especiais no Brasil.

A pequena quantidade dessas obras na malha rodoviária brasileira mostra que sempre foi priorizada a construção de pontes e viadutos de concreto, ao contrário dos Estados Unidos e da grande maioria dos países europeus que consolidaram ao longo de décadas a tradição de pontes metálicas de pequeno, médio e grande porte. Muitas dessas obras já ultrapassam a idade de 100 anos e continuam em uso com desempenhos satisfatórios.

A entrada em vigor em 2020 de uma norma da ABNT para a elaboração de projetos de pontes rodoviárias metálicas e mistas representou, sem dúvidas um passo importante para uma maior atenção quanto às vantagens que esse sistema construtivo possa oferecer quando comparado às pontes de concreto, evidentemente com base nas análises para cada caso específico.

Permanece ainda a lacuna causada pela ausência de literatura nacional, inclusive normativa, voltada para a conservação em geral, incluindo inspeções, recuperação e reforço, que deverá ser pelo menos parcialmente suprida pelos resultados dos estudos atualmente desenvolvidos pelo

grupo de pontes mistas da ABECE. É importante destacar que a norma ABNT NBR 16694 (2020) introduziu no Anexo B- “Durabilidade de componentes de aço frente à corrosão” as diretrizes a seguir relacionadas que serão importantes para os projetos, para a construção e para a manutenção das pontes metálicas e mistas, enquanto não for editada uma norma específica para inspeções e manutenção.

B.1- Uso de aços estruturais resistentes à corrosão- aços patináveis;

B.2- Proteção com pintura;

B.3- Galvanização por imersão a quente de componentes estruturais;

B.4- Parafusos, porcas e aduelas.

A ABNT NBR 16694 (2020) também introduziu entre as recomendações construtivas e de utilização das pontes metálicas e mistas, a elaboração de um manual de utilização, inspeção e manutenção.

O manual, elaborado por profissional habilitado, deve especificar de forma clara e sucinta os requisitos básicos para a utilização e a manutenção preventiva, necessários para garantir a vida útil projetada para a estrutura.

2.1. Principais danos estruturais nas pontes metálicas

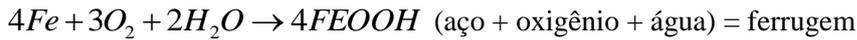
Os danos estruturais que ocorrem nas pontes metálicas dependem de diversos fatores e variam conforme o sistema estrutural utilizado, o tipo de aço, a qualidade das ligações, etc. Porém, excetuando os acidentes estruturais imprevisíveis, os fatores que mais influenciam as manifestações patológicas nessas estruturas são a agressividade ambiental e a falta de conservação.

A seguir são mostrados de forma sucinta, os principais fenômenos relacionados aos danos que geralmente são identificados nas estruturas de pontes e viadutos metálicos. O caso das passarelas metálicas será abordado isoladamente no capítulo 5 tendo em vista as peculiaridades de tais estruturas.

2.1.1. Corrosão

A corrosão atmosférica do aço é um fenômeno que ocorre na presença simultânea de água e oxigênio, sendo responsável por grandes prejuízos causados pelos custos envolvidos nos reparos de estruturas metálicas deterioradas, em especial as das pontes que se caracterizam por estruturas externas e expostas diretamente à atmosfera, sofrendo a influência dos fatores climáticos como chuva, insolação, poluentes, etc.

A corrosão atmosférica de um aço carbono pode ser representada simplificada pela equação:



Observa-se, portanto que a corrosão atmosférica depende da interação entre o metal e a atmosfera onde está inserida. A corrosão atinge valores mais significativos para umidade relativa do ar superior a 80% e temperaturas acima de 0°C. As principais formas de corrosão nas estruturas metálicas estão relacionadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Principais formas de corrosão nas estruturas metálicas (Fonte: CARNEIRO et.al, 2005)

Anomalia	Definição	Simbologia
Alveolar	A corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.	ALV
Puntiforme ou por Pite	A corrosão se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que seu diâmetro.	PIT
Frestas	Esta forma de corrosão apresenta grandes analogias com a corrosão por pites. O ataque acontece em regiões confinadas de pequeno volume e onde o meio apresenta estagnação, tais como os interstícios existentes entre duas chapas parafusadas, regiões sob juntas, etc..	FRE
Esfoliação	A corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. O produto de corrosão, volumoso, ocasiona a separação das camadas contidas entre as regiões que sofrem a ação corrosiva e, como consequência, ocorre a desintegração do material em forma de placas paralelas a superfície.	ESF

A norma brasileira NBR 8800/2008 – *Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios*, classifica os ambientes em seis categorias de corrosividade:

- a) C1: muito baixa;
- b) C2: baixa;
- c) C3: média;
- d) C4: alta;
- e) C5-I: muito alta (industrial);
- f) C5-M: muito alta (marinha).

Na tabela 2.2 estão definidas as categorias de corrosividade em termos da perda de massa ou de espessura para espécimes-padrão de monitoramento feitos em aço de baixo carbono ou zinco após o primeiro ano de exposição.

Tabela 2.2 – Categorias de corrosividade atmosférica e exemplos de ambiente. (Fonte: NBR 8800/2008)

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura (após um ano de exposição)				Exemplos de ambientes típicos	
	Aço baixo-carbono		Zinco		Exterior	Interior
	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura μm	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura μm		
C1 Muito baixa	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis)
C2 Baixa	> 10 a 200	> 1,3 a 25	> 0,7 a 5	> 0,1 a 0,7	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos
C3 Média	> 200 a 400	> 25 a 50	> 5 a 15	> 0,7 a 2,1	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, cervejarias e laticínios
C4 Alta	> 400 a 650	> 50 a 80	>15 a 30	> 2,1 a 4,2	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas
C5-I Muito alta (industrial)	> 650 a 1500	> 80 a 200	>30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição
C5-M Muito alta (marinha)	> 650 a 1500	> 80 a 200	>30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição

2.1.1.1. Procedimentos usuais para a prevenção e o combate à corrosão

Considerando que as pontes estão, de modo geral, submetidas a ambientes externos de grande agressividade ambiental, como é o caso das áreas urbanas, industriais e costeiras, torna-se de fundamental importância a adoção de medidas para proteger e prevenir as suas estruturas metálicas da corrosão atmosférica.

Tendo em vista a grande diversidade dos procedimentos que podem ser adotados, dependendo do meio ambiente onde a obra está implantada e das exigências de durabilidade e vida útil requeridas para a estrutura, podem ser relacionadas às providências a seguir relacionadas:

a) Um adequado detalhamento na fase do projeto

Um bom projeto deve contemplar um detalhamento que permita facilitar a manutenção da estrutura, incluindo os aspectos referentes à prevenção à corrosão. Isso significa a definição ainda na fase de projeto, do tipo de proteção anticorrosiva e o cuidado para que os agentes agressivos, em especial a água, tenham o menor tempo de contato possível com a estrutura. Ou seja, não deve haver acúmulo de água em locais específicos como frestas, pontas de solda, juntas, ou geometria inadequada entre outros fatores.

Uma adequada configuração geométrica que evite o acúmulo de água e de outros materiais estranhos tem uma considerável influência na prevenção da corrosão.

A NBR 8800/2008 propõe que nos projetos de estruturas metálicas sejam adotadas as precauções a seguir que estão ilustradas na figura 2.1. Tais precauções também são válidas para as pontes metálicas.

- ✓ Projetar superfícies inclinadas ou chanfradas;
- ✓ Eliminar seções abertas no topo ou sem arranjo em posição inclinada;
- ✓ Eliminar bolsas e recessos, onde a água e a sujeira possam ficar retidas;
- ✓ Permitir a drenagem da água e de líquidos corrosivos para fora da estrutura.

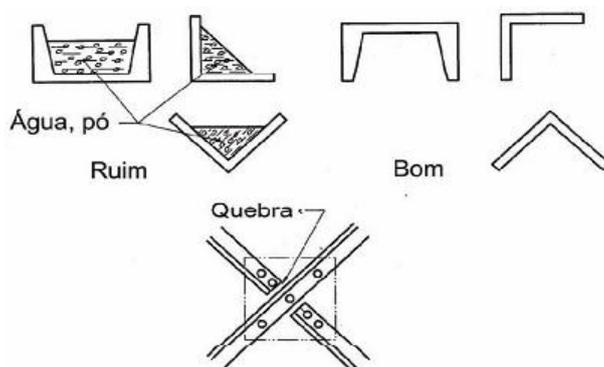


Figura 2.1 – Detalhes geométricos para evitar acúmulo de água e sujeira. (Fonte: NBR 8800/2008)

A corrosão por frestas acontece em regiões caracterizadas pelas junções em chapas rebitadas, parafusadas ou soldadas, que além de se tornarem vulneráveis às infiltrações pelas arestas vivas, quinas e frestas, também às vezes são constituídas por diferentes tipos de aço.

Como tais regiões funcionam quase sempre como as ligações das estruturas metálicas, deve haver um cuidado especial com o detalhamento e com a proteção para que não se formem pontos críticos que possam comprometer a segurança da obra.

A figura 2.2 mostra esquematicamente as ligações dos tipos parafuso, rebite e solda, com as respectivas frestas que podem iniciar o processo de corrosão.

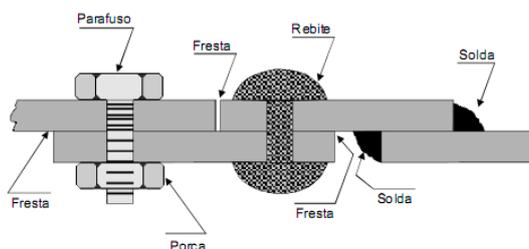


Figura 2.2 – Regiões de ligações com parafusos, rebites e soldas, caracterizadas pela sensibilidade à corrosão. (Fonte: GNECO, et. al., 2006)

b) Um bom procedimento de soldagem

A adoção de um adequado procedimento de soldagem também contribui para a prevenção e controle da corrosão.

Para isso, devem ser evitados cordões de solda intermitentes ou contínuos que podem reter água e outros materiais. A solda deverá ser executada sempre com bom controle de qualidade e permitir a acessibilidade.

Devem ser evitados nos cordões de solda qualquer tipo de imperfeição que dificulte a aplicação do sistema de proteção em pintura. Também deve ser dada atenção à escória liberada pelo eletrodo que deve ser sempre retirada, pois sendo higroscópica facilitará a migração da água pela fita através do fenômeno da osmose. Na figura 2.3 estão ilustrados exemplos de como a solda deverá ser executada para evitar a corrosão.

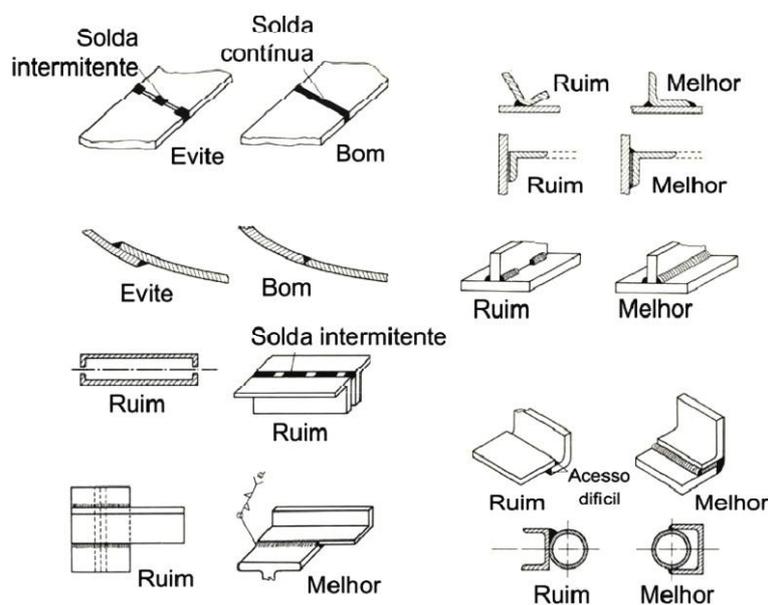


Figura 2.3 – Exemplos de soldagens adequadas para a prevenção da corrosão. (Fonte: PANNONI, 2009)

A superfície da solda deve receber tratamento adequado com ferramentas apropriadas com discos abrasivos ou esmeril para facilitar a aplicação e garantir a eficiência da pintura protetora, diminuindo assim os riscos de corrosão, conforme mostra a figura 2.4.

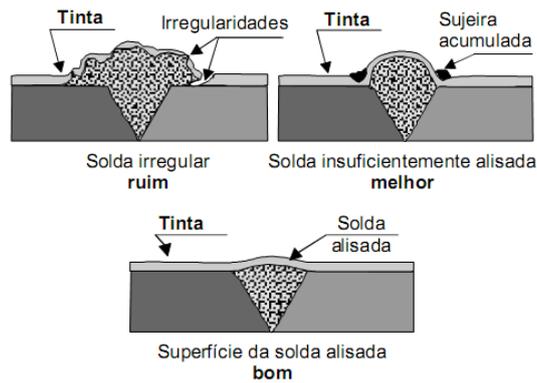


Figura 2.4- Adequado acabamento na superfície da solda para diminuir a ocorrência da corrosão (Fonte: GNECO, et al,2006)

c) Proteção por pintura

A pintura é a forma mais empregada para proteger as estruturas metálicas contra a corrosão atmosférica.

A utilização desse tipo de proteção, bem como o tipo de pintura mais apropriada, depende de alguns fatores como o meio ambiente à qual a estrutura está exposta, às condições de aplicação e de secagem e endurecimento da tinta, em especial a temperatura e a umidade. Também deve ser considerado qual o tipo de tratamento prévio e as condições do substrato antes da aplicação da pintura.

Uma questão que não pode deixar de ser analisada diz respeito aos custos de aplicação e de manutenção da pintura ao longo do tempo.

Esse tipo de proteção contempla o pré-tratamento e a aplicação e essas duas etapas devem ser compatíveis, lembrando que as tintas mais sofisticadas e de boa qualidade necessitam de um bom pré-tratamento para garantirem resultados satisfatórios. Na tabela 2.3 estão indicados a qualidade de pré-tratamento mínima, conforme o tipo de tinta, as temperaturas de aplicação e a categoria de corrosividade de acordo com a definição da Norma ISO 12944-5.

Tabela 2.3 – Tipos de tinta, pré-tratamento requeridos, temperaturas de aplicação tempos limites para demãos subsequentes e categoria de corrosividade. (Fonte: ISSO 12944-5/1998)

Tipo de tinta	Pré-tratamento ¹	Temperatura de aplicação	Pode ser repintada após, mínimo/máximo	Categoria de corrosividade
Alquídica	St 2-3, Sa 2 ½		8 h / ∞	C1-C4
Vinílica	Sa 2 ½		2 h / ∞	C4-C5
Borracha Clorada	Sa 2 - Sa 2 ½	Mínimo 10-15°C	4 h / ∞	C4-C5
Epóxi	Sa 2 ½ - Sa 3	Mínimo 10°C	18 h / 3 dias	C4-C5
Epóxi Alcatrão de Hulha	St 2, Sa 2 ½		16 h / 3 dias	C4-C5
Epóxi Mastique	St 3, Sa 2 ½ - Sa 3			C4-C5
Poliuretano	Sa 2 ½ - Sa 3			C4-C5
Poliéster	Sa 2 ½			C5
Silicato de Zinco	Sa 3		24 h	C4
1 ISO 8501-1 ²⁸ : St = limpeza mecânica, Sa = jateamento abrasivo				

2.1.2.Fadiga

A análise do fenômeno da fadiga é de fundamental importância nos projetos das pontes novas e na avaliação das pontes existentes, pelo fato de estar associado a ações repetitivas que podem significar um processo de modificações progressivas e permanentes em estruturas submetidas à oscilação de tensões decorrentes de tais ações.

Nas pontes metálicas os elementos e ligações submetidas a repetidas variações ou reversões de tensões devem ser projetados de tal forma que a tensão máxima não exceda às tensões admissíveis conforme os tipos de aço e solicitações atuantes. Devem ser ainda considerados os tipos de perfis e das ligações.

O risco da ruptura por fadiga depende do aumento do volume de tráfego sobre a ponte, da idade da estrutura e da magnitude das tensões causadas pelas ações variáveis. O risco da fadiga é maior nas estruturas com ligações soldadas do que nas ligações com parafusos, por causa das tensões residuais introduzidas pelo processo de soldagem.

Resultados de estudos realizados sobre pontes metálicas treliçadas que sofreram colapso na Europa antes da Segunda Guerra Mundial, mostraram que na maioria dessas pontes a ruptura se iniciou nas juntas soldadas. Na década de 1960 a ponte Kings em Melbourne na Austrália (1962) a ponte Paint Pleasant nos Estados Unidos (em 1967, com 46 mortes) e a ponte Silver Bridge (1968) também nos Estados Unidos, colapsaram por fratura frágil.

Existem muitas pesquisas sobre o fenômeno da fadiga nas pontes, e diversas normas de projetos que definem como deve ser tratada a fadiga e a fratura de elementos soldados nas pontes metálicas.

A figura 2.5 mostra as fraturas por fadiga ocorridas no ano 2000 em duas das três longarinas da Hoan nos EUA, com tabuleiro em vigas mistas que entrou em operação em 1974, e quase entrou em colapso.



Figura 2.5 – Vista lateral de uma das vias longitudinais fraturadas por fadiga na ponte Hoan.

(Fonte: PRAVIA, 2003)

Na figura 2.6 estão indicados de forma simplificada os tipos de verificações à fadiga que devem ser feitas em perfis utilizados em longarinas de tabuleiro de pontes metálicas e mistas de acordo com a norma AASHTO. Tais peças estão submetidas ao momento fletor e devem ser verificadas nos locais mais solicitados conforme as seguintes situações:

- a) Na solda de composição dos perfis soldados das longarinas na seção mais desfavorável, conforme a figura 2.6a;
- b) Na emenda dos perfis das longarinas (figura 2.6b);
- c) No pé da solda de enrijecedores transversais e conectores, de acordo com as ilustrações das figuras 2.6c e 2.6d.

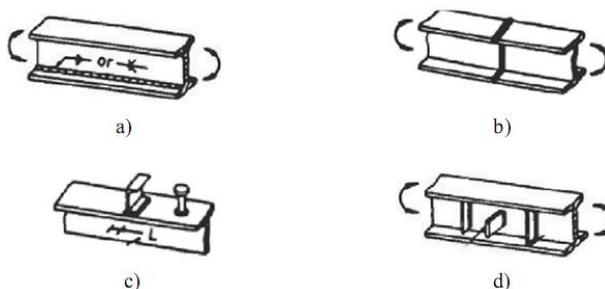


Figura 2.6 – Tipos de verificações à fadiga em vigas de pontes metálicas e mistas pela norma AASHTO

2.1.2.1. Algumas técnicas para identificar a existência de fratura por fadiga

A identificação da ocorrência do fenômeno da fadiga em uma ponte metálica deve começar pela verificação da existência de fraturas, de modo a permitir avaliar num primeiro momento se a ruptura do elemento fraturado irá influenciar no colapso de toda a ponte, em uma situação típica do colapso progressivo, ou se a ruptura devido às frestas será absorvida pelos demais componentes da estrutura, caracterizando uma situação de redundância estrutural.

A primeira avaliação de uma estrutura é sempre iniciada por uma inspeção visual, o que exige muito conhecimento e experiência do engenheiro responsável pela inspeção.

A identificação de fissuras e fraturas não é uma tarefa fácil e deve contemplar principalmente os locais de concentração de tensões e o nível de detalhamento geral da estrutura. Evidentemente, para que possa haver precisão e confiabilidade aceitáveis, recomenda-se a aplicação de métodos não destrutivos, como o líquido penetrante, raios X, ultra som e partículas magnéticas.

A utilização de líquido penetrante na identificação de fraturas representa um método simples, usado frequentemente nas inspeções de estruturas metálicas de pontes.

Para isso, deve-se limpar a superfície examinada e aplicar um spray com líquido vermelho, removendo-se o excesso para em seguida aplicar outro spray com líquido branco para realçar as fraturas, conforme mostra a figura 2.7.

No método do raio X, é posicionado um filme sobre a superfície examinada e em seguida aplica-se uma radiação sobre ela. Após a revelação do filme é obtida uma imagem que permite identificar possíveis fissuras na superfície.

A utilização de ultra som é feita com base na emissão e propagação de ondas no metal de modo que as falhas são identificadas pela mudança na propagação das ondas refletidas na superfície examinada.

Finalmente, o método das partículas magnéticas consiste em magnetizar o componente metálico amarelado e espalhar uma fina camada de partículas de ferro sobre a superfície, de tal modo que a concentração de partículas mostra a existência de fraturas.



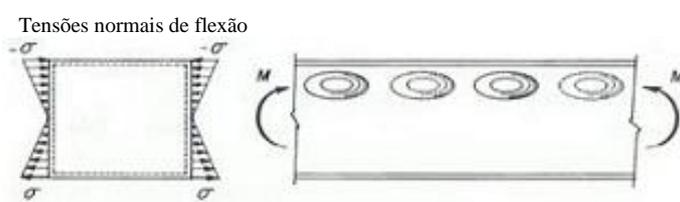
Figura 2.7 – Método do líquido penetrante. (Fonte: PERNETA, 2010)

2.1.3. Flambagem da alma de vigas sob a ação de flexão, cortante e cargas concentradas

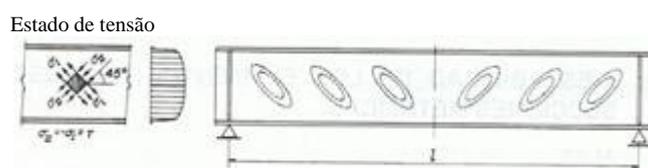
Nas vigas de perfis metálicos submetidos a esforços de flexão e a cargas concentradas no trecho onde não há enrijecedores, pode ocorrer ruptura local da alma conforme a figura 2.8a. Os esforços cortantes também provocam flambagem local da alma de acordo com a figura 2.8b.

A ruptura pelo efeito de cargas concentradas caracteriza-se pelo enrugamento da alma com flambagem localizada e pela flambagem com ou sem deslocamento lateral da mesa comprimida, como mostra a figura 2.8c.

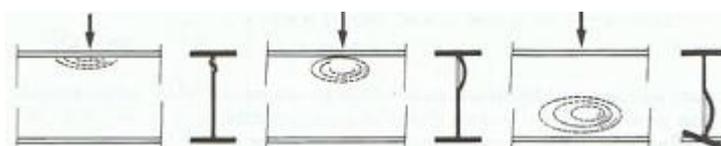
Para evitar a ocorrência desses problemas estruturais devem ser colocados enrijecedores transversais como indicado na figura 2.9.



a) Flambagem local da alma sujeita a esforços de flexão.



b) Flambagem local da alma por esforços de corte (tensões tangenciais).



c) Flambagem da alma sujeita a cargas concentradas.

Figura 2.8 – Flambagem da alma de vigas metálicas. (Fonte: FERRAZ, 2009)

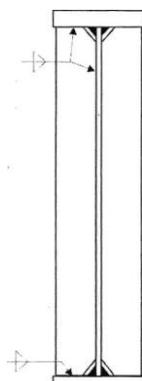


Figura 2.9 – Viga de alma cheia com enrijecedores transversais (Fonte: PFEIL, 2009)

2.1.4. Flambagem lateral causada por momento fletor negativo

As pontes cujos tabuleiros são em vigas mistas, requerem uma especial atenção ao comportamento dessas vigas sob a ação de momentos fletores negativos, caracterizado pela tração e consequente fissuração da laje de concreto.

Outra característica de tal situação é que a mesa comprimida inferior do perfil metálico “I” está livre e fica sujeita à flambagem lateral por distorção, caracterizada pelo deslocamento lateral da mesa inferior comprimida, com a alma da viga sofrendo deformação por flexão, conforme ilustrado na figura 2.10.

Esse fenômeno pode ser prevenido com a colocação de chapas metálicas (diafragmas) nos trechos dos apoios, ou com a execução de uma laje de concreto no banzo inferior da viga mista.

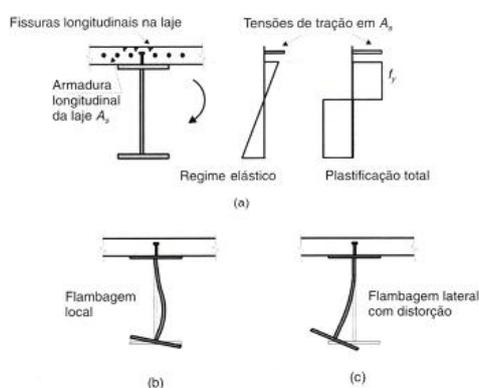


Figura 2.10 – Viga mista com laje de concreto tracionada e mesa inferior comprimida: (a) viga mista e diagramas das tensões na seção; (b) flambagem local da mesa inferior; (c) flambagem lateral com distorção. (Fonte: PFEIL, 2009)

A Flambagem lateral com distorção ocorre nos trechos em balanço e nas imediações dos apoios de vigas mistas contínuas. Para evitar ou pelo menos minimizar esse fenômeno, recomenda-se, além da introdução de diafragmas, a limitação dos comprimentos dos balanços a no máximo 15% dos vãos adjacentes. Para eliminar os momentos negativos nos apoios das vigas contínuas, tem sido adotado nas pontes em vigas mistas o uso de tramos isostáticos com a introdução de lajes de continuidade. A figura 2.11 mostra a flambagem lateral com distorção em uma viga mista contínua.

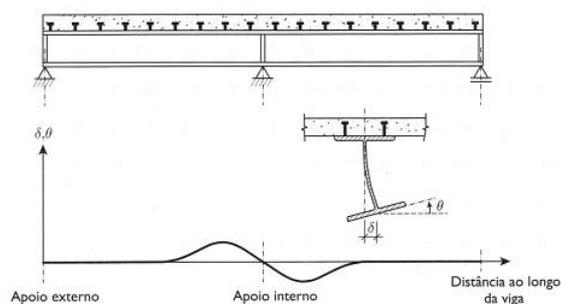


Figura 2.11 – Deformação típica por flambagem lateral com distorção do banzo inferior de uma viga mista contínua. (Fonte: CALADO e SANTOS, 2010)

2.2. Ilustrações de danos frequentes nos tabuleiros de pontes metálicas

Nas figuras seguintes são mostrados por meio de ilustrações fotográficas os danos estruturais mais frequentes nos tabuleiros das pontes metálicas. Essas patologias estão diretamente relacionadas aos tópicos analisados neste capítulo.



Figura 2.12 – (a) Corrosão acentuada no tabuleiro metálico em zonas de condensação e (b) em locais de retenção de água e detritos. (Fonte: PERNETA, 2010)



Figura 2.13 – Avançado estado de corrosão em vigas de pontes, com acentuada perda de seção transversal. (Fonte: FERNANDES, 2015)



Figura 2.14 – (a) Antiga ponte ferroviária com tabuleiro em treliças metálicas completamente atingida pela corrosão. (b) Detalhe do nível de corrosão, barras e treliças, tornando impraticável a recuperação da estrutura. (Fonte: VITÓRIO, 2014)

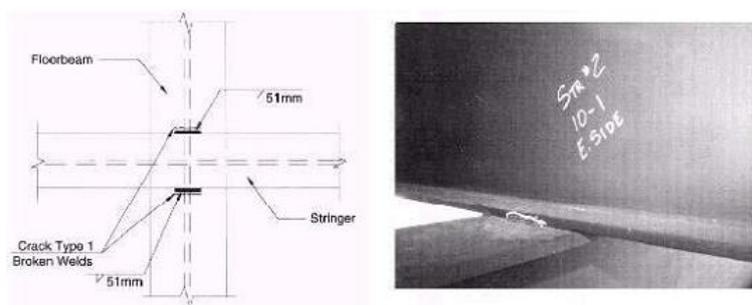


Figura 2.15 – Fratura por fadiga na conexão entre transversinas e longarinas em ponte metálica sobre o rio Arkansas. (Fonte: PRAVIA, 2003)

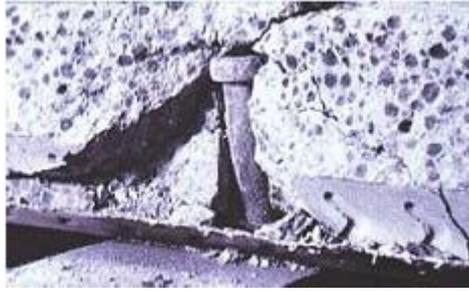


Figura 2.16 – Ruptura da conexão entre a laje do tabuleiro com conectores de cisalhamento Stud Bolts.
(Fonte: FERRAZ, 2009)

3. RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL

A recuperação e o reforço estrutural de uma ponte significam ações de natureza complexas, independentemente do tipo de uso da obra (rodoviária ou ferroviária) e do sistema construtivo (concreto, metálica, mista).

De modo geral, faz-se necessário o reforço e/ou recuperação estrutural nas seguintes situações:

- ✓ Alargamento do tabuleiro;
- ✓ Atualização das cargas móveis;
- ✓ Danos causados por carregamentos acima dos limites para as quais a ponte foi projetada;
- ✓ Acidentes causados por choques de veículos e de embarcações;
- ✓ Perdas de protensão acima das estipuladas;
- ✓ Corrosão das armaduras ativas e passivas (pontes de concreto);
- ✓ Corrosão dos elementos que constituem os tabuleiros das pontes metálicas e mistas;
- ✓ Danos por fadiga;
- ✓ Solapamento das fundações.

Um fator que dificulta bastante a avaliação da segurança de uma ponte existente e a decisão sobre a necessidade ou não de reforçá-la, é a carência de literatura técnica e de procedimentos normativos sobre esse tema no Brasil.

Mesmo para as pontes de concreto que, representam a imensa maioria desses tipos de obras, ainda não existe no país a produção de um conhecimento que indique com clareza como avaliar as condições de segurança e quais as intervenções necessárias. Isso obriga os projetistas a adotarem como referência as normas utilizadas para os projetos de pontes novas, o que evidentemente conduz a soluções que nem sempre são as mais apropriadas para cada situação. Nos casos de reforço de pontes metálicas e mistas a situação é ainda mais complexa,

Outra questão importante de lembrar é o fato de também não existirem procedimentos normativos para a realização de inspeções em pontes metálicas, que representam a primeira etapa do processo de conservação. As normas de inspeções utilizada existente no Brasil, a ABNT NBR 9452 e a DNIT 010/2004-PRO referem-se apenas às pontes, viadutos e passarelas de concreto.

O Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (2004) recomenda alguns procedimentos de inspeção para as pontes metálicas. A seguir estão os relacionados às pontes mistas:

- a) Examinar se há anomalias, tais como corrosão, trincas e perdas de seção, junto aos apoios, onde é maior a atuação das forças cortantes;
- b) Verificar, ao longo de todo o comprimento dos perfis, principalmente no centro do vão e proximidades, onde maior é a atuação dos momentos fletores, a existência de anomalias tais como corrosão, trincas, perdas de seção e avarias nos flanges e nas ligações com a laje;
- c) Verificar a existência, nos elementos secundários, das anomalias já citadas, ao longo da peça e, principalmente, nas ligações com os elementos principais;
- d) Verificar o funcionamento da drenagem, o estado da pintura e se há acúmulo de detritos, principalmente no flange inferior;
- e) Verificar a existência de fissuras na pintura; se estas fissuras já tiverem sido contaminadas pela ferrugem, a verificação de sua propagação no próprio perfil é obrigatória e urgente.

3.1. Métodos mais usuais de reforço de tabuleiros metálicos

Os métodos de reforço dos componentes dos tabuleiros metálicos de pontes tem características peculiares que os diferenciam dos que são utilizados nas pontes de concreto, mesmo que as causas de tais intervenções estruturais sejam bem parecidas conforme relação na introdução deste capítulo. A seguir são apresentadas algumas técnicas usuais de reforço.

3.1.1. Reforço por colagem de chapas e perfis na estrutura existente

Em determinadas situações, especialmente nos tabuleiros em vigas de alma cheia, é possível realizar o reforço de perfis das longarinas e transversinas por meio da adição de chapas ou perfis, de modo a permitir o aumento da seção transversal, e da inércia, desses componentes estruturais.

Esse tipo de reforço pode ser feito utilizando-se parafusos ou solda para garantir a “colagem” das chapas ou perfis à estrutura existente, como mostra a figura 3.1.

Na figura 3.1a. o reforço é feito com a introdução de chapas das abas superiores e inferiores de perfis “T”, aumentando a inércia, porém mantendo a configuração geométrica original da peça.

No caso mostrado na figura 3.1b. são adicionados perfis “L” e chapas, de modo a aumentar a seção resistente com a modificação da geometria original.

A figura 3.1c. ilustra uma situação em que o perfil original é transformado em uma seção do tipo caixão pela introdução de duas chapas paralelas à alma do perfil.

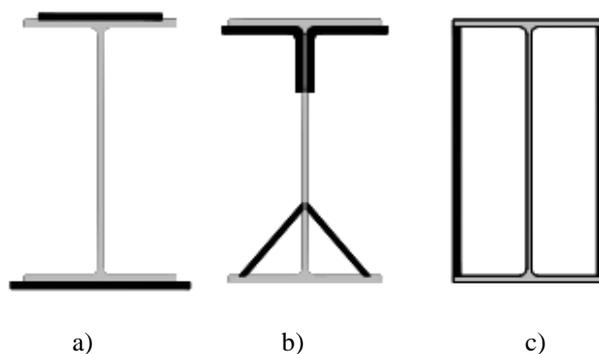


Figura 3.1 – Reforço pela adição de chapas e perfis às seções originais. (Fonte: CAMPOS, 2006)

Para a adoção desses tipos de reforço, especial atenção deve ser dada ao dimensionamento da nova seção transversal, principalmente quanto à compatibilidade da resistência mecânica dos materiais usados.

A execução do reforço necessita ser realizada com todo o cuidado, especialmente no que se refere ao desempenho da ligação entre as peças de reforço e a estrutura existente, para garantir a homogeneidade da nova seção, independentemente da utilização de parafusos ou soldas.

3.1.2. Reforço de ligação rebitada

As ligações por rebites foram amplamente utilizadas durante muitos anos nas estruturas metálicas em geral, incluindo as pontes.

A grande maioria das antigas pontes ferroviárias metálicas ainda existentes no Brasil foram construídas utilizando esse tipo de ligação que deixou de ser adotada nas obras mais recentes, tudo indica pela grande dificuldade de execução e foi substituída pelo parafuso, o que facilitou bastante o processo construtivo das ligações entre as peças metálicas das estruturas.

As ligações rebitadas, por se tratarem da união de perfis superpostos ou justapostos, formavam naturalmente frestas causadoras do processo de corrosão, reduzindo a eficiência da ligação pelo fenômeno do afrouxamento, que dependendo do sistema estrutural do tabuleiro poderiam deslizar e causar uma redistribuição de cargas com acréscimos nos valores das tensões em alguns pontos.

Este e outros motivos, como erros de execução, esmagamento do rebite e cisalhamento do fuste, entre outros, podem gerar a necessidade de reforço de ligações rebitadas.

Como a substituição de rebites é uma atividade que envolve grandes dificuldades, o reforço desse tipo de ligação geralmente é feito com a utilização de parafusos ou soldas com resistências compatíveis aos esforços desenvolvidos no local.

A figura 3.2 ilustra o reforço de uma ligação rebitada, na qual os rebites foram substituídos por parafusos de alta resistência.



Figura 3.2 – Reforço de ligação rebitada, substituindo os rebites por parafusos de alta resistência na ponte da Barra – Ouro Preto – MG. (Fonte: CARDOSO, 2007)

3.1.3. Reforço com a aplicação de protensão

Conceitualmente a protensão consiste em um sistema cujas armaduras são submetidas a um esforço prévio, responsável pela criação de um estado de tensões capaz de melhorar a resistência e o comportamento da estrutura sob diversas condições de carregamento.

De modo geral, a protensão é sempre associada às estruturas de concreto e é um dos sistemas mais utilizados nas superestruturas das pontes e viadutos, inclusive para a realização de reforço estrutural, como é o caso da protensão externa para reforço de vigas de pontes que necessitam ter a resistência ampliada conforme situação ilustrada esquematicamente na figura 3.3.

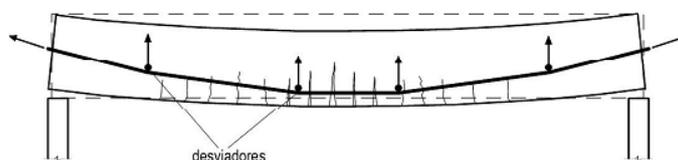


Figura 3.3 – Protensão externa sem aderência para reforço de vigas de pontes de concreto.

(Fonte: VERÍSSIMO, 1988)

A protensão também é aplicada em estruturas metálicas, especialmente em vigas de aço, por meio de cabos externos de alta resistência. É um método bastante apropriado para o reforço de determinados tipos de pontes, como é o caso dos sistemas em vigas mistas e treliçadas, que podem ter o reforço para corrigir danos estruturais e para o aumento da capacidade de carga com a aplicação de protensão externa.

Esse método de reforço em peças metálicas traz vantagens semelhantes às que já são conhecidas nas estruturas de concreto, como a facilidade de inspeção e de manutenção pelo fato de os cabos ficarem posicionados fora da seção transversal dos perfis ou então na parte vazia das seções em caixão. Isso também facilita alguma substituição que se faça necessária pelo fato de possibilitarem traçados simples dos cabos fixados através de desviadores de fácil execução.

Uma configuração apropriada para a configuração geométrica do traçado dos cabos externos pode melhorar significativamente o efeito da protensão, inclusive minimizando os efeitos de

segunda ordem. Também pode facilitar os procedimentos de inspeção e manutenção. Uma boa solução do traçado ainda otimizará a ampliação da resistência da estrutura e, dependendo de cada caso, permitir a realização do reforço sem a interrupção do tráfego na ponte. A figura 3.4 mostra um exemplo de viga metálica de ponte com o uso de protensão externa e a figura 3.5 ilustra algumas configurações de cabos que podem ser utilizadas para a aplicação da protensão externa para reforço de vigas metálicas.



Figura 3.4- Exemplo de um tabuleiro de vigas metálicas com protensão externa (Fonte: NELSEN e SOUZA, 2012)

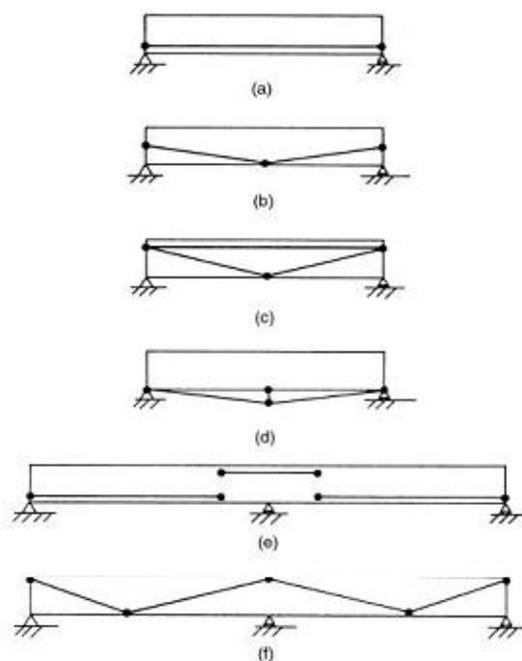


Figura 3.5 – Algumas configurações de cabos para reforço de vigas com protensão externa.

(Fonte: DELTACON, 2011).

A protensão externa também tem uma boa aplicação nas vigas mistas, tanto nos projetos novos que exigem maior esbeltez associada a grandes resistências, como no reforço de pontes mistas cujas cargas necessitam ser ampliadas por motivos diversos, ou ainda em casos de reforço de danos estruturais que implicaram no comprometimento da segurança da obra.

Sabe-se que as vigas mistas são constituídas por componentes metálicos (sendo mais usuais os perfis “I”), associadas a uma laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento. As tensões de cisalhamento que se desenvolvem entre a viga e a laje são conhecidas como efeito “Shear Lag”.

Além da tipologia mais usual, usando o perfil “I”, existem outras configurações de seção transversal que também caracterizam uma viga mista e influenciam no traçado dos cabos de protensão externa, conforme mostram as figuras seguintes: na figura 3.6 está detalhada em seção transversal e em elevação o caso mais comum de uma viga mista com reforço em protensão externa; a figura 3.7 mostra quatro diferentes situações de vigas mistas com perfis “I” e vigas caixão, com diferentes posicionamentos dos cabos externos.

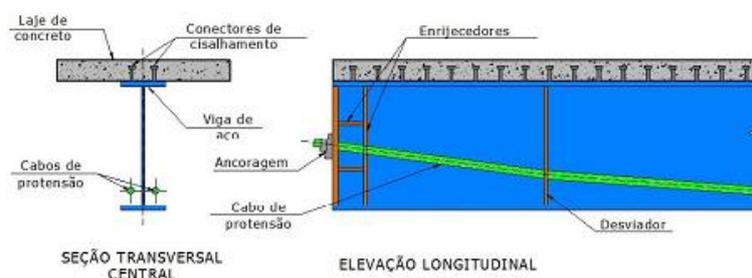


Figura 3.6 – Detalhes da protensão externa em viga mista com perfil “I”.

(Fonte: NELSEN e SOUZA, 2012)

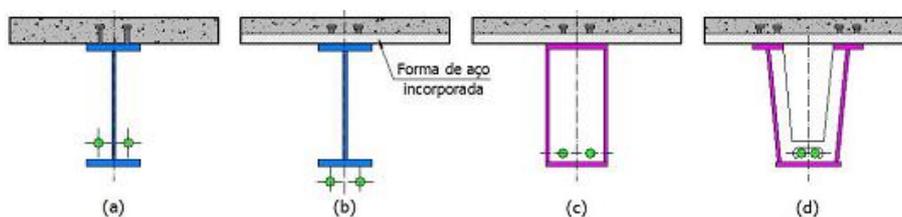


Figura 3.7 – Diferentes arranjos de protensão externa em vigas mistas com seção em “I” e seção caixão.

(Fonte: NELSEN e SOUZA, 2012)

A protensão externa também pode ser utilizada quando se pretende reduzir os momentos positivos em tabuleiros de pontes com vários vãos em longarinas metálicas simplesmente apoiadas, transformando esses vãos em estruturas contínuas, o que aumenta a capacidade de carga pela alteração do estado de tensões. Mesmo sendo possível aplicar esse método em tabuleiros de concreto, ele torna-se mais apropriado para vãos metálicos de médio e grande porte.

O reforço externo pela introdução de continuidade, é constituído por uma espécie de treliça com um tendão superior tracionado e duas barras (tipo perfil ou tubular) comprimidas e inclinadas partindo do tendão e fixadas em dispositivos metálicos rente à junta existente entre as duas vigas isostáticas. Após a aplicação da protensão é executada uma laje de concreto no tabuleiro, até uma certa distância para cada lado da junta, de modo a garantir a continuidade e a criação de

um hiperestático que diminui o momento positivo. Esse sistema de reforço está ilustrado nas figuras 3.8 e 3.9.

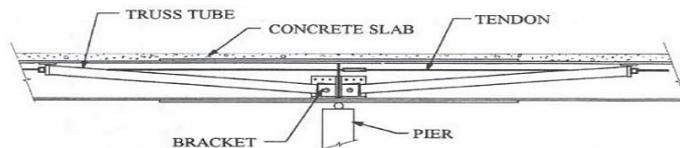


Figura 3.8 – Sistema de reforço com protensão externa para introduzir continuidade em tabuleiros isostáticos e aumentar a resistência da viga. (Fonte: DELTACON, 2011)



Figura 3.9 – Reforço de ponte com tabuleiro em longarinas metálicas isostáticas, introduzindo a continuidade entre os vãos com protensão externa em forma de treliça. (Fonte: DELTACON, 2011)

Na maioria dos casos a protensão externa para reforço de longarinas de pontes é feita com cordoalhas flexíveis, usadas nas obras convencionais de concreto protendido. Ultimamente vem sendo utilizado um tipo de reforço com barras rígidas, conhecidas como barras Dywidag, que dependendo do vão da ponte, da intensidade dos esforços e das facilidades locais pode ser uma boa alternativa, especialmente para as pontes em vigas metálicas.

Esse sistema utiliza desviadores e ancoragens bem simples e o procedimento para aplicação da força de protensão também é mais simplificado. A figura 3.10 mostra uma ilustração do reforço de vigas de uma ponte com o uso de barras rígidas.

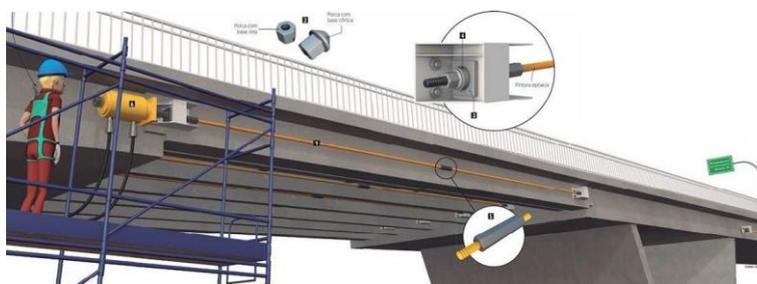


Figura 3.10 – Reforço das vigas de uma ponte com barras Dywidag. (Fonte: Revista Infraestrutura Urbana, nº 42, 2014)

de deterioração do concreto, cuja resistência encontra-se abaixo da requerida para a aplicação da força de protensão.

Uma solução de reforço poderia ser com a utilização de armaduras passivas e encamisamento da seção transversal, o que também às vezes não é viável pela grande dificuldade de concretagem sob a superfície inferior do tabuleiro, mesmo com o emprego de graute ou de concreto projetado.

Em casos dessa natureza, uma solução bem apropriada é o reforço da viga com a adição de perfis metálicos, geralmente do tipo “I”, laminados ou soldados, posicionados lateralmente ou sob a face inferior da viga, conforme a figura 3.15.

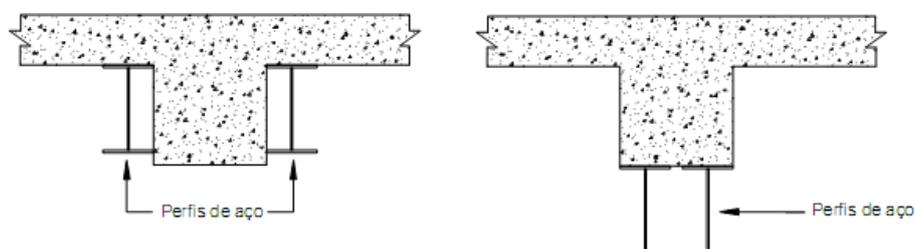


Figura 3.15 – Reforço de vigas de concreto com perfis metálicos. (Fonte: CAMPOS, 2005)

3.2. Casos de recuperação e reforço das estruturas metálicas de duas pontes

A seguir são apresentados dois casos de pontes que tiveram suas estruturas metálicas recuperadas e reforçadas, uma localizada no Recife e outra no Cabo de Santo Agostinho em Pernambuco. Tratam-se de duas pontes bem distintas, uma muito antiga, construída no início do século XX e a outra bem moderna, concluída em 2009.

3.2.1. Ponte Seis de Março

O caso mostrado resumidamente a seguir refere-se à ponte Seis de Março, também conhecida como Ponte Velha, construída em 1921, na cidade do Recife.

A obra tem tabuleiro e pilares metálicos e no ano de 2006 passou por uma intervenção de reforço e recuperação estrutural, objetivando corrigir a grande quantidade de danos que, caso não fossem corrigidos, poderiam por em risco a estabilidade estrutural.

As obras de recuperação e reforço, realizadas pela Prefeitura do Recife, foram bastante abrangentes e incluíram o tabuleiro metálico, os pilares, as fundações e os acabamentos.

Esse caso foi objeto de pesquisa de Monografia da Escola Politécnica da UPE (LACERDA, 2015), orientada pelo autor.

A situação da ponte antes das obras de recuperação e reforço pode ser visualizada nas figuras 3.16 e 3.17, que mostram o avançado estado de degradação causado pela corrosão da estrutura

metálica, como pode ser exemplificado pelos pilares e aparelhos de apoio (figura 3.16) e as peças de contraventamento (figura 3.17).



Figura 3.16 – Avançado estado de corrosão dos pilares antes da recuperação.
(Fonte: EMLURB, apud LACERDA, 2015)

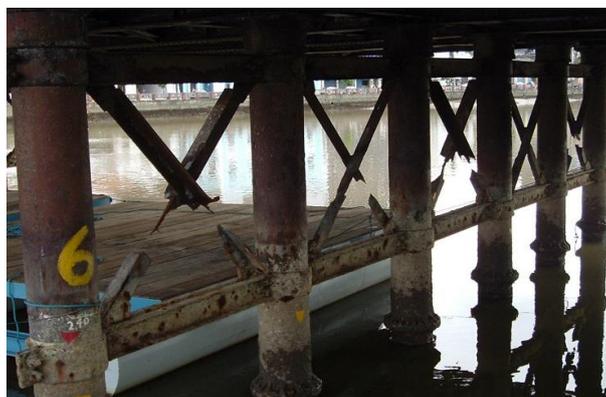


Figura 3.17 – Destruição dos elementos metálicos da mesoestrutura.
(Fonte: EMLURB, apud LACERDA, 2015)

A pesquisa desenvolvida por LACERDA (2015), foi baseada na inspeção visual dos elementos recuperados e reforçados, de modo a permitir uma análise sobre as condições atuais de conservação, nove anos após a realização dos serviços.

As conclusões da pesquisa mostraram que as intervenções de 2006 foram feitas adequadamente e conseguiram restabelecer as condições apropriadas de funcionalidade e estabilidade exigidas para o bom funcionamento de uma ponte construída há um século utilizando ferro fundido, numa época em que ainda nem existiam normas técnicas no Brasil, nem o conhecimento sobre os conceitos de durabilidade, e sobre os agentes responsáveis pela agressividade ambiental nas estruturas.

Observou-se que, passados nove anos da obra de recuperação e reforço já começam a surgir alguns sinais indicativos da necessidade de uma intervenção, mesmo que mais discreta, para que o processo de desgaste da estrutura ainda em estado inicial não evolua para um estado mais

avanzado, caso não sejam adotadas as providencias cabíveis. É importante ressaltar que a cidade do Recife tem um grau de agressividade ambiental bastante elevado, caracterizado pela atmosfera marinha e pela alta umidade relativa do ar.

Nas figuras seguintes são ilustradas fases da obra de recuperação e reforço, do aspecto logo após a finalização dos serviços e dos sintomas iniciais de corrosão que já podem ser observados em alguns componentes estruturais.



Figura 3.18 – Andamento das obras de recuperação e reforço.
(Fonte: EMLURB, apud LACERDA, 2015)



Figura 3.19 – Fase de reforço dos pilares e fundações. (Fonte: EMLURB, apud LACERDA, 2015)



Figura 3.20 – Aspecto dos pilares, superestrutura e blocos de fundação logo após a recuperação e reforço. (Fonte: LACERDA, 2015)



Figura 3.21 – Aspecto atual, mostrando o início de corrosão em algumas peças metálicas e os blocos de fundação totalmente incrustados de moluscos. (Fonte: LACERDA, 2015)



Figura 3.22 – Vista inferior das condições atuais do tabuleiro e pilares, indicando o início de corrosão. Observa-se as tubulações fixadas no tabuleiro que se constituem em fontes de patologias. (Fonte: LACERDA, 2015)



Figura 3.23 – Vista atual da Ponte Seis de Março. (Fonte: LACERDA, 2015)

3.2.2. Ponte Arquiteto Wilson Campos Júnior

A ponte Arquiteto Wilson Campos Júnior, também conhecida como Ponte do Paiva, tem 290 m de extensão, foi construída em 2009 e está situada na Rodovia PE-024 no Cabo de Santo Agostinho- PE. O tabuleiro foi executado em concreto protendido pelo método dos balanços sucessivos e sobre os apoios intermediários existem duas estruturas metálicas estaiadas, denominadas praças, que são mirantes em forma de semicírculos fixadas na estrutura da ponte, destinadas aos pedestres para contemplação da bela paisagem do local. A superestrutura de cada praça (ou mirante) é composta por um mastro com 14 estais, sendo 13 distribuídos ao longo do semicírculo, equilibrados por um estai de retaguarda. A figura 3.24 mostra uma vista geral da ponte com os dois mirantes metálicos estaiados.



Figura 3.24- Vista geral da ponte destacando os dois mirantes metálicos estaiados. (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)

Em 2019, dez anos após a conclusão da obra, as estruturas metálicas dos dois mirantes, apresentavam manifestações patológicas relacionadas à corrosão em quase todos os seus componentes. Tais problemas foram causados principalmente pela agressividade ambiental de região onde a ponte está localizada, classificada pela norma ABNT NBR 8800:2008 como C5-M, que corresponde à categoria de corrosividade muito alta (marinha).

Diante dessa situação, foi elaborado por SANTOS e VITÓRIO (2019) um projeto de recuperação dessas estruturas, considerando a existência de grande corrosão das chapas e dos parafusos de fixação da base e do topo do mastro dos estais, além de algumas ondulações/deformações nos tubos de PEAD que envolvem as cordoalhas que compõem os estais. Foram ainda observados grandes danos nas luvas de transições dos estais com os tubos antivandalismo. Outra questão considerada foi as condições dos dispositivos das ancoragens superiores dos estais, que apresentavam corrosão na fixação com a extremidade superior do mastro.

A figura 3.25 mostra o sistema estrutural dos dois mirantes com as forças nos tirantes. Na figura 3.26 são mostrados os parafusos e arruelas de fixação de um dos mastros dos estais em processo de corrosão. Na figura 3.27 pode ser vista a corrosão nos dispositivos de ancoragens no topo do mastro apresentando sinais de corrosão entre moderada e média.

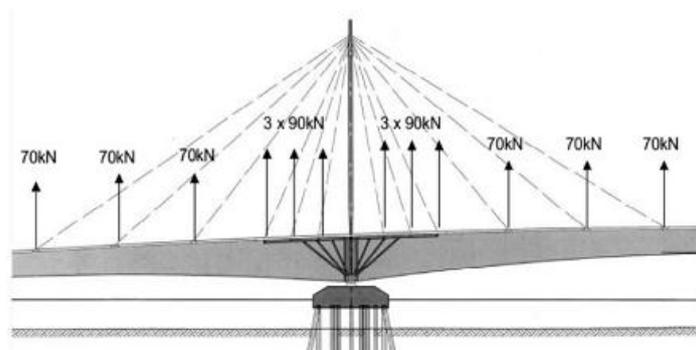


Figura 3.25- Esquema estrutural e forças nos estais dos dois mirantes metálicos (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.26- Corrosão nos parafusos e arruelas da fixação do mastro dos estais (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.27- Corrosão nas ancoragens dos estais no topo do mastro (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)

Outros problemas identificados nas estruturas estaiadas foram a situação precária da grande maioria dos elementos de transição entre os estais e os tubos antivandalismo que estavam bastante danificados, além de corrosão em estágio moderado. Essa situação pode ser vista na figura 3.28 que mostra um caso típico do estado em que se encontravam tais peças de transição.

Mereceu atenção especial, as condições observadas nas caixas metálicas das ancoragens inferiores dos estais, cujas tampas de proteção estavam com os parafusos corroídos e alguns deles semi-destruídos, como pode ser visto na figura 3.29. Isso chamou a atenção para a possibilidade de ter ocorrido infiltração de água para o interior das ancoragens, que poderia causar a corrosão das próprias cordoalhas nas extremidades inferiores dos cabos junto às ancoragens, que poderia caracterizar uma condição de risco para o sistema de estais. As estruturas localizadas no nível de piso das praças, constituídas de vigas transversais, mãos francesas, chapas e anéis, também foram avaliadas, constatando-se que apresentavam corrosão entre moderada e média, conforme a figura 3.30.



Figura 3.28- Danos e corrosão nos tubos antivandalismo (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.29- Caixas das ancoragens inferiores dos estais com parafusos corroídos (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.30- Estrutura no nível de piso dos mirantes em processo de corrosão (fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)

O Projeto de Recuperação adotou como metodologia uma sequência de execução que não interferisse no funcionamento da ponte e priorizasse as etapas das intervenções com base na dificuldade para a realização do reparo, na interferência no tráfego, na necessidade da utilização de equipamentos especiais e na disponibilidade orçamentária da Concessionária responsável pela administração da ponte.

Para a realização de cada etapa foi elaborado o mapeamento da localização de todas as patologias na estrutura metálica, com as avaliações dos respectivos níveis de gravidade, de modo a definir a sequência de prioridades dos serviços de recuperação que está relacionada a seguir:

Prioridade 1- Recuperação e/ou substituição imediata dos guarda-corpos e corrimões metálicos pelo fato de diversas barras apresentarem corrosão severa. Substituição imediata dos dispositivos de transição dos estais com os tubos antivandalismo e dos parafusos das caixas de ancoragens, pelo avançado estado de deterioração e a impossibilidade de serem recuperados.

Prioridade 2- Recuperação do mastro dos estais por causa dos pontos de corrosão média a severa dos parafusos e arruelas das bases e dos anéis metálicos de sustentação das luminárias no topo do mastro.

Prioridade 3- Recuperação das estruturas metálicas no nível do piso, constando das vigas transversais, mãos-francesas, chapas, anéis e parafusos, com corrosão variando de moderada a média, mas sem apresentarem sinais de riscos à estabilidade estrutural.

A partir dessas definições o projeto foi elaborado, sendo os serviços de recuperação devidamente detalhados e apresentados na forma de desenhos e memoriais descritivos em nível executivo. Também foram elaboradas especificações técnicas e planilhas de quantitativos dos procedimentos necessários para a boa execução dos serviços de recuperação das estruturas metálicas.

A obra de recuperação estrutural dos dois mirantes metálicos foi realizada pela Concessionária com base nos procedimentos definidos no projeto executivo, que foi elaborado a partir da experiência profissional dos autores, que utilizaram os conceitos e diretrizes da literatura disponível sobre o tema em nível nacional e internacional e também a prática de projetos de recuperação e reforço realizados anteriormente.

As figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35 a seguir mostram os resultados da recuperação de alguns dos componentes e uma visão geral das estruturas metálicas dos mirantes após a conclusão das obras.



Figura 3.31- Substituição das transições e recuperação dos tubos antivandalismo (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.32- Procedimento de análise das ancoragens inferiores e das cordoalhas dos estais. (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.33- Ancoragens inferiores dos estais após completamente recuperadas (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.34- Mastro dos estais totalmente recuperado, incluindo os parafusos da base. Observar ao fundo os guarda-corpos metálicos da ponte também totalmente recuperados (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)



Figura 3.35- Vista da etapa final da obra de recuperação das estruturas metálicas dos mirantes da ponte (Fonte: SANTOS e VITÓRIO, 2019)

4. COLAPSOS ESTRUTURAIS DE PONTES METÁLICAS

A evolução das técnicas construtivas, associada à grande melhoria das propriedades mecânicas do aço estrutural, tem conseguido viabilizar a construção de estruturas metálicas cada vez mais esbeltas e ousadas, e também mais competitivas com as estruturas de concreto.

Porém, uma das questões mais relevantes e que está diretamente relacionada à estabilidade das estruturas metálicas em geral, incluindo as pontes, é a diferença entre as formas de ligações dos componentes estruturais desses dois tipos de processos construtivos, pois as estruturas de concreto tem quase sempre ligações que permitem um funcionamento monolítico, enquanto nas estruturas metálicas há necessidade de um certo grau de rigidez nas ligações para que também tenham um comportamento o mais homogêneo possível.

São as ligações que permitem ou restringem os movimentos (rotações e deslocamentos) previstos na análise de uma estrutura. Nas estruturas metálicas mais modernas as ligações são compostas por chapas, parafusos e soldas. Nas mais antigas eram geralmente feitas por meio de rebites.

As ligações exercem, portanto, uma grande influência na estabilidade das estruturas metálicas em geral, especialmente nas pontes, e necessitam de uma resistência mecânica adequada e compatível com o aço utilizado na estrutura para resistir aos esforços nesses pontos de concentração de tensões. Essa importância é ainda maior em situações de altas temperaturas causadas por incêndios, por causa da deformação do aço que a partir de temperaturas superiores a 550°C começa a perder resistência e inicia um processo de flambagem localizada que pode causar o colapso estrutural.

Os sistemas reticulados, largamente utilizados nos tabuleiros de pontes metálicas, mesmo tendo a capacidade de redistribuir os esforços internos causados por algum dano em um dos seus componentes, podem sofrer uma reação em cadeia em seus elementos que pode resultar no colapso de toda a estrutura, ou de grande parte dela. Esse fenômeno é denominado colapso progressivo e é mais propenso a acontecer nos sistemas com pouca redundância estrutural, exemplificados pelos sistemas isostáticos.

A figura 4.1 mostra esquematicamente uma ponte com tabuleiro metálico em treliças isostáticas, com indicação das barras com altos esforços de compressão (vermelho) e altos esforços de tração (amarelo). Essas regiões constituem as zonas vulneráveis para esse tipo de estrutura e são extremamente sensíveis às falhas provocadas pela corrosão, pela fadiga e por deficiências nas ligações, que poderão levar a estrutura ao colapso progressivo pela ruptura de um desses nós das ligações. A figura ainda mostra as zonas vulneráveis nos aparelhos de apoio (azul) e nas fundações (verde).

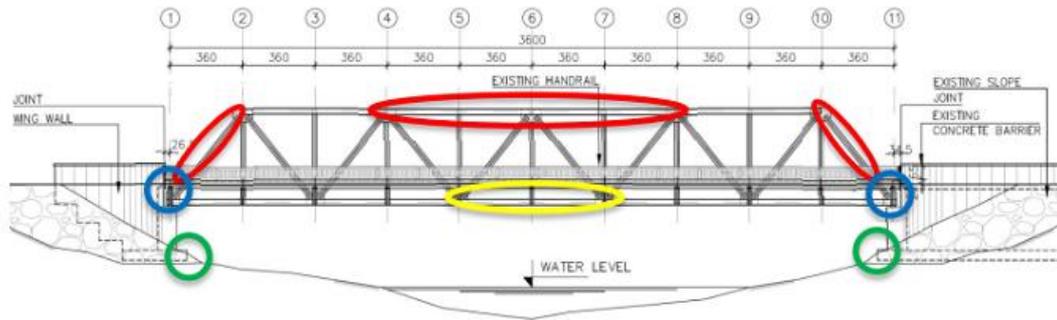


Figura 4.1- Zonas vulneráveis em uma ponte com tabuleiro em treliças isostáticas (Fonte: KEDAR, 2019)

Uma considerável quantidade de acidentes estruturais ocorridos com pontes metálicas em todo o mundo foi causada pelo colapso progressivo, iniciado por falhas nos elementos das ligações das treliças do tabuleiro. Excetuando as causas de erros de projeto ou de construção, os danos localizados responsáveis pela maioria dos colapsos progressivos foram originados por deficiências de conservação das chapas, parafusos, soldas ou rebites das ligações.

Um dos casos que mais se destacaram na literatura recente sobre colapso de pontes foi o da I-35W Highway Bridge em Minneapolis, Minnesota, EUA. Essa ponte, inaugurada em 1967, entrou em colapso em agosto de 2007, atingindo 111 veículos, causando a morte de 13 pessoas e ferimentos graves em outras 34.

A figura 4.2 mostra uma foto da ponte em 2003 e a figura 4.3 indica esquematicamente o sistema estrutural, que era constituído por um trecho central em treliçado com 324,00m e dois trechos laterais em vigas metálicas de alma cheia, totalizando 581m de extensão. A mesoestrutura era composta por pilares de concreto armado e aparelhos de apoio fixos e deslizantes.



Figura 4.2 – Vista do tabuleiro treliçado quatro anos antes do colapso.

(Fonte: BRANCO, 2013)

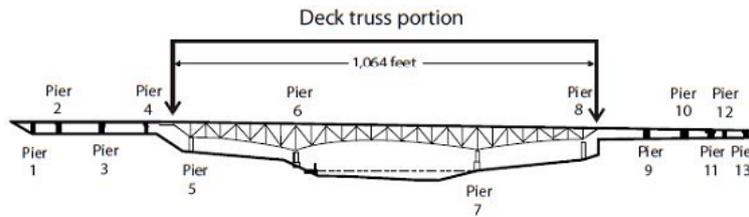


Figura 4.3 – Esquema do sistema estrutural do trecho central em treliça e dos trechos laterais em vigas de alma cheia. (Fonte: BRANCO, 2013)

Estudos realizados por peritos após o desabamento chegaram à conclusão que a estrutura treliçada sofreu colapso progressivo no lado sul, por onde a ponte começou a desabar para o lado norte. As análises revelaram que as chapas de reforço dos nós U10 deformaram e fraturaram fazendo com que a treliça perdesse o equilíbrio, de modo que quando ocorreu o colapso os esforços nos nós U10 já eram superiores ao quais teriam condições de resistir.

Isso desencadeou um aumento da força de compressão, transmitindo aos nós subsequentes esforços maiores do que os possíveis de serem suportados, gerando uma reação em cadeia que levou ao colapso progressivo.

Os estudos indicaram que as chapas de reforço das ligações nos nós onde foi iniciado o colapso tinham aparentemente a metade da espessura que deveriam ter. O detalhe das chapas é mostrado na figura 4.4. As figuras 4.5 e 4.6 mostram os lados Norte e Sul da ponte após o colapso.

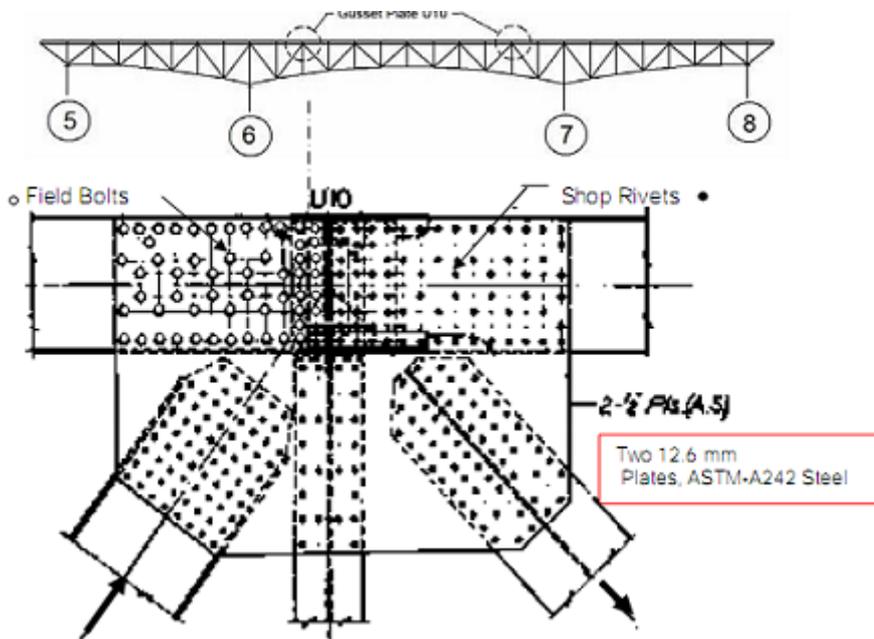


Figura 4.4- Detalhe das chapas de reforço do nó U10, que fraturou e iniciou o colapso da ponte (Fonte: ASTANEH-ASL,2008)



Figura 4.5 – Lado Norte da ponte após o colapso. (Fonte: BRANCO, 2013)



Figura 4.6 – Lado Sul da ponte após o colapso. (Fonte: BRANCO, 2013)

Outro caso de colapso progressivo em ponte com tabuleiro em vigas treliçadas metálicas aconteceu na cidade de Goiana em Pernambuco, em 2008 com uma obra antiga, inaugurada há mais de 50 anos.

Tratava-se de uma ponte com vigas treliçadas e laje de concreto na parte superior, caracterizando um tabuleiro misto, que entrou em colapso durante a passagem de um caminhão, cuja carga estava acima do limite da estrutura, mas não havia qualquer placa indicativa sobre a carga máxima possível de trafegar sobre a obra.

Mesmo sem que tenha havido maiores estudos sobre as causas do acidente, é possível concluir que o avançado estado de corrosão da estrutura metálica, em especial nas ligações dos nós das vigas treliçadas foram determinantes para a ocorrência do colapso progressivo que se iniciou

nas proximidades de um determinado apoio no exato instante da passagem do caminhão, e transmitiu-se aos nós adjacentes que não suportaram o acréscimo dos esforços e romperam com o veículo ainda em cima da ponte.

A figura 4.7 mostra o colapso dos tramos metálicos do tabuleiro durante a passagem do veículo e a figura 4.8 ilustra a forma como ocorreu a ruptura das vigas treliçadas. Na figura 4.9 é possível observar o avançado estado de corrosão das chapas e dos rebites nas ligações dos nós das treliças. Também pode ser observado que a parte interna do tabuleiro também funcionava como estrutura de transposição de uma adutora de água que abastecia a cidade de Goiana. Os vazamentos dessa tubulação ao longo de anos certamente também contribuíram para acelerar o processo da corrosão das peças metálicas e conseqüentemente, diminuir a resistência, facilitando o colapso.



Figura 4.7 – Desabamento por colapso progressivo da ponte de Goiana durante a passagem de um caminhão. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 4.8 – Detalhe da ruptura das longarinas metálicas do tabuleiro. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 4.9 – Detalhe das ligações rebitadas e da tubulação de água no interior do tabuleiro, causando infiltrações e deterioração da estrutura. (Fonte: Acervo do autor)

O próximo caso de colapso de uma ponte metálica refere-se a uma obra com 40m de comprimento sobre o rio Pirapama na Zona Rural da cidade de Palmares em Pernambuco.

Nesse caso também se tratava de uma ponte antiga em tabuleiro treliçado isostático que entrou em colapso pela ruptura das ligações de alguns nós logo após a passagem de um veículo, que ao redistribuírem as cargas elevaram bastante as tensões nos nós adjacentes, que não suportaram.

O péssimo estado de conservação demonstrado pela acentuada corrosão de alguns elementos estruturais, em especial nas ligações, também se constituiu em um fator determinante para a ocorrência do colapso, conforme mostram as figuras 4.10 e 4.11



Figura 4.10 – Colapso do tabuleiro treliçado isostático. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 4.11 – Detalhe dos destroços após o desabamento da ponte. (Fonte: Acervo do autor)

O caso seguinte mostra a ruptura dos perfis de alma cheia de um tabuleiro com cinco vigas mistas de pequeno viaduto sobre a linha férrea na cidade de Gameleira em Pernambuco.

É possível observar nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14 que essa obra era totalmente carente de manutenção, de modo que o processo corrosivo dos perfis metálicos avançou a tal ponto que destruiu a alma de um deles no trecho de maior solicitação de flexão. As demais vigas também tinham danos localizados e generalizados que caracterizaram a ruptura estrutural, inclusive quanto ao esforço cortante.

Um fator que contribuiu para acelerar a corrosão das vigas metálicas foi a grande infiltração de água pelo concreto poroso da laje do tabuleiro, porém a principal causa da aceleração dos danos no tabuleiro metálico foi, sem dúvida, a total falta de manutenção da ponte ao longo do tempo.



Figura 4.11 – Ruptura da alma de viga mista pelo avançado estado de corrosão. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 4.12 – Grande infiltração e umidade pela laje do tabuleiro, acelerando o processo de corrosão dos perfis metálicos. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 4.13 – Ruptura por corrosão da alma e aba inferior da viga mista na região de apoio. Observar ainda o avançado estado de degradação da obra como um todo. (Fonte: Acervo do autor)

5. DANOS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PASSARELAS METÁLICAS

A norma ABNT NBR 7188 (2013) define passarela como “estrutura longilínea destinada a transpor obstáculos naturais e /ou artificiais exclusivamente para pedestres e ciclistas.”.

A carga móvel atuante definida pela norma é de 5,0 kN /m² aplicada sobre o pavimento, sem considerar impacto vertical. A norma ainda prevê como medida mitigadora de eventuais impactos uma carga horizontal pontual de 100 kN aplicada no ponto mais desfavorável da estrutura da passarela. Todas as ligações da superestrutura e respectivos pilares da passarela devem ser verificados para essa ação excepcional. Mesmo com essa recomendação, a norma não descarta a hipótese de colapso parcial ou total da estrutura da passarela em função da magnitude da colisão.

A norma ABNT NBR 7188 (2013) também define as passarelas especiais, que são as passarelas esbeltas, leves, sensíveis ao vento e à ação dinâmica dos pedestres, principalmente em estruturas de aço, mistas, pênseis ou estaiadas. Para essas passarelas será necessário a comprovação da sua estabilidade global e verificação dos diversos elementos estruturais através de modelos dinâmicos e verificação de fadiga.

Fica claro pela definição acima, que as passarelas metálicas e mistas além de atender à carga móvel de pedestres e à carga excepcional de impacto de veículos, também devem ser projetadas para atender aos requisitos estabelecidos para as passarelas especiais quanto às verificações estruturais considerando a leveza, a esbeltez e a grande sensibilidade ao vento e à ação dinâmica de pedestres.

Essas questões já evidenciam o grau de complexidade dos procedimentos de análise estrutural e de recuperação e reforço das passarelas metálicas existentes, considerando que tais obras foram geralmente projetadas e executadas há muitos anos, com o uso de normas, procedimentos e materiais utilizados à época que não previam os procedimentos atualmente exigidos. A adequação para atender aos requisitos de segurança e funcionalidade agora exigidos torna-se uma questão muito difícil de viabilizar, tanto pelos custos envolvidos como pelas incertezas quanto ao adequado desempenho da passarela após as intervenções de recuperação e reforço, considerando as diferenças entre as características dos materiais e entre os procedimentos de projetos e de construções de épocas diferentes.

É inegável que as passarelas metálicas permitem tirar partido de aços de alta resistência, inclusive à corrosão atmosférica, que por sua vez conseguem viabilizar estruturas bem mais leves e esbeltas. Porém, essas vantagens vem acompanhadas dos problemas relacionados à menor massa, rigidez e amortecimento, fazendo com esses tipos de passarelas sejam bem mais sensíveis a vibrações em baixa frequência, como os carregamentos produzidos pelos movimentos dos pedestres, que ocorrem sempre em baixa frequência, abaixo de 5Hz.

Como as frequências naturais das passarelas leves e flexíveis também são baixas, as frequências produzidas pelos passos dos pedestres podem se aproximar, ou até coincidir com as frequências da estrutura, causando problemas de vibrações excessivas, que além do desconforto podem danificar a estrutura.

O comportamento dinâmico das passarelas provocado pelo caminhar dos pedestres é objeto de critérios estabelecidos por diversas normas e procedimentos internacionais. Também é estudado por muitos pesquisadores com o objetivo de buscar o conforto e a segurança dos usuários.

Um caso de problemas causados por vibrações de grande intensidade e que teve repercussões mundiais foi o da passarela Millennium em Londres, mostrada na figura 5.1, que foi inaugurada em 10 de junho de 2000 e dois dias depois foi interditada por causa da ocorrência de fortes vibrações laterais com amplitude máxima dos deslocamentos da ordem de 70 mm, quando centenas de pessoas começaram a atravessar a estrutura.

Estudos realizados concluíram que as vibrações foram causadas por um efeito do carregamento lateral provocado pelos pedestres que não foi previsto no projeto e estava relacionado à sincronização de forças laterais causadas pelo caminhar da multidão sobre a passarela, um fenômeno conhecido na literatura como efeito de multidão, que na passarela Millennium atingiu uma magnitude que ainda não tinha sido observada antes.

A estrutura ficou dois anos em estudos até que o problema fosse solucionado pela introdução de um sistema de amortecimento.



Figura 5.1- Passarela Millennium, Londres. (Fonte : GOMES, 2006)

No Brasil, mesmo não existindo diretrizes para avaliação de vibrações em pisos de passarelas metálicas, pode ser utilizada como referência a norma ABNT NBR 8800 (2008) que no anexo L estabelece o uso de pisos com vãos grandes e amortecimento reduzido que pode resultar em desconforto durante as atividades humanas normais, de modo que em nenhum caso a frequência natural da estrutura do piso pode ser inferior a 3Hz.

A norma ABNT NBR 6118 (2014) define o Estado-limite de vibrações excessivas para assegurar o comportamento satisfatório de estruturas sujeitas a vibrações, devendo-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica ($f_{crit.}$), devendo ser satisfeita a condição $f > 1,2 f_{crit.}$ Na falta de valores determinados experimentalmente, podem ser adotados os valores da tabela 5.1 para $f_{crit.}$ Observar que a frequência crítica para passarelas é 4,5 Hz.

Tabela 5.1- Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos de estruturas submetidas a vibrações pala ação de pessoas (Fonte: ABNT NBR 6118, 2014)

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Diante do que foi exposto, percebe-se que as passarelas metálicas apresentam limites funcionais e estruturais, quando comparadas às passarelas de concreto, que necessitam ser considerados nos projetos atuais. Tais limites se tornam bem mais complexos e difíceis de atender nos casos de recuperação e reforço para a adequação de passarelas metálicas existentes que foram projetadas e construídas sem a consideração dos requisitos atualmente exigidos.

Outra questão a considerar é o impacto de veículos, que não era previsto nos projetos das passarelas antigas e que se constitui ainda hoje em uma das maiores causas de colapsos dessas estruturas, principalmente das passarelas metálicas, cujas levezas as tornam ainda mais vulneráveis a essas ações excepcionais.

5.1. Modelos estruturais mais utilizados em passarelas metálicas

As passarelas de pedestres e ciclistas são geralmente constituídas por uma estrutura implantada transversalmente sobre as pistas inferiores da rua ou rodovia que serão transpostas, respeitando num gabarito mínimo estabelecido entre as cotas do greide do pavimento da pista inferior e do fundo das vigas da passarela. O acesso dos pedestres e ciclistas é feito por rampas de acesso dos dois lados das vias marginais, tendo algumas passarelas além das rampas, também escadas de acesso. O gabarito vertical mínimo entre o fundo da passarela e a pista inferior é de 5,50m para a transposição de rodovias federais.

Na grande maioria das passarelas metálicas o modelo estrutural de transposição das pistas inferiores é formado por vãos em treliças isotáticas ou contínuas, apoiados sobre pilares metálicos ou de concreto localizados nos canteiros das vias. As rampas de acesso também podem ser constituídas por treliças, mas na maioria das vezes são formadas por tramos em vigas

de perfis de alma cheia, que se tornam mais econômicos para os comprimentos dos vãos das rampas que são sempre bem menores do que os da estrutura de transposição das vias.

Na figura 5.2 pode ser visto um sistema estrutural típico das passarelas metálicas utilizadas no Brasil com os vãos da transposição das vias inferiores em treliças, e as rampas de acesso também em treliças. A figura 5.3 mostra um modelo estrutural em vigas formadas por perfis de alma cheia para as rampas de uma passarela, cujo vão de transposição é em treliça. Na figura 5.4 é mostrado um exemplo de passarela com escada de acesso.



Figura 5.2- Passarela metálica com sistema em treliças nos vãos da transposição e nas rampas. (Fonte : CONSÓRCIO CGP-CEPROL-AFIRMA, 2013)



Figura 5.3- Passarela com rampas em vigas de perfis de alma cheia e transposição em treliças (Fonte: CONSÓRCIO CGP-CEPROL-AFIRMA, 2013)



Figura 5.4- Passarela com rampas e escada de acesso. (Fonte: CONSÓRCIO CGP-CEPROL- AFIRMA, 2013)

5.2. Danos estruturais e colapsos causados por choques de veículos

De modo geral, os danos estruturais usualmente identificados nas passarelas metálicas são similares aos observados nas pontes metálicas e já comentados no capítulo 2 deste texto. Porém, os danos mais significativos, e também os principais causadores de colapsos parciais e totais em muitas passarelas, são os choques de veículos, que mesmo tendo sido inuídos como uma ação excepcional a ser considerada na ultima revisão da NBR 7188 (2013) se trata de uma medida mitigadora, como a própria norma admite, e que muitas vezes não impede o colapso da estrutura, principalmente das passarelas metálicas que são bem mais leves do que as de concreto

Nas ilustrações fotográficas a seguir são mostrados casos em que passarelas sofreram choques de veículos, como o da figura 5.5 em que uma passarela com tabuleiro em treliças sofreu uma colisão que causou uma grande deformação em várias barras mas não entrou em colapso.



Figura 5.5 - Grandes deformações nas barras da treliça causadas por choque de veículo (Fonte: CONSÓRCIO CGP-CEPROL-AFIRMA, 2013)

O acidente cuja sequencia é ilustrada na figura 5.6 aconteceu na Rodovia dos Imigrantes-SP em 2008 quando um caminhão caçamba derrubou o vão central de uma passarela, esmagando um carro que trafegava sob a estrutura no exato momento do desabamento. A figura 5.7 mostra que em 2001 já havia ocorrido um acidente em condições parecidas na mesma passarela.

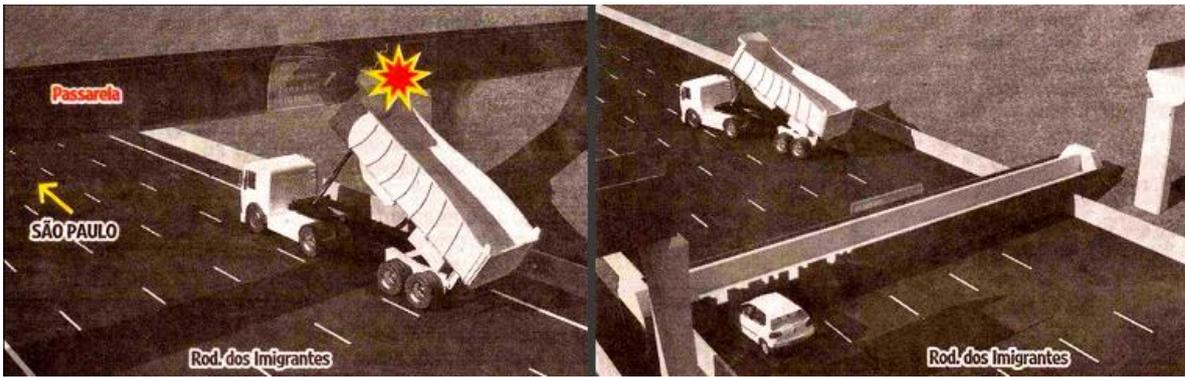


Figura 5.6 - Ilustração da sequência do desabamento do vão central de uma passarela na Rodovia dos Imigrantes em 2008. (Fonte: Folha de S.Paulo, 2008)

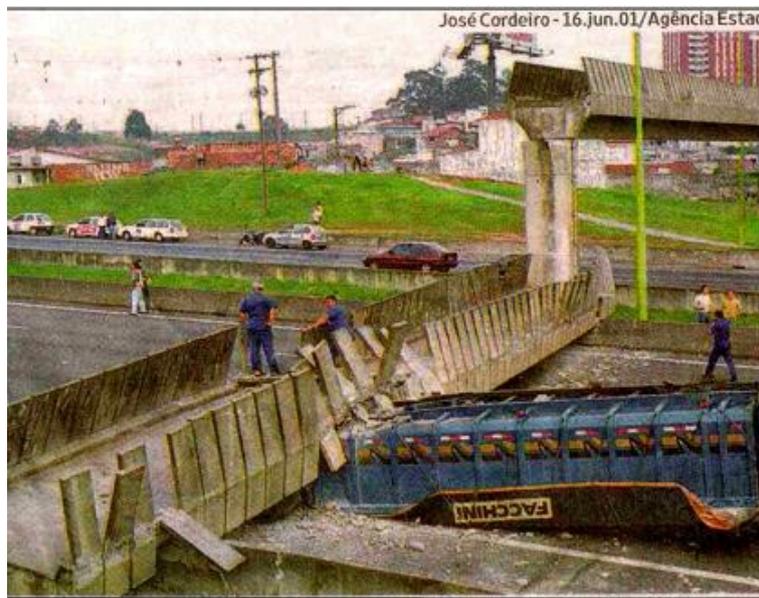


Figura 5.7 - Acidente ocorrido na mesma passarela em 2001. (Fonte: Folha de S. Paulo, 2001)

Um dos mais graves acidentes estruturais com passarelas de pedestres no Brasil, aconteceu em janeiro de 2014 na Linha Amarela no Rio de Janeiro, quando um caminhão transitando com a caçamba levantada colidiu com uma passarela cujo tabuleiro era em treliças metálicas. O impacto foi de tal magnitude que o vão reto da passarela desabou sobre as vias inferiores, atingindo e destruindo veículos, além de atingir pedestres que transitavam sobre a obra no instante do acidente. A figura 5.8 mostra uma vista geral da queda do trecho central do vão treliçado sobre as vias da Linha Amarela; A figura 5.9 mostra o esmagamento de um carro e as equipes de resgate.



Figura 5.8 - Vista superior do desabamento do vão reto da passarela sobre as pistas da Linha Amarela (Fonte: veja.com., 2014)



Figura 5.9 Veículo esmagado sob a passarela (Fonte: veja.com., 2014)

5.3. Danos e manifestações patológicas mais frequentes nas passarelas metálicas

As manifestações patológicas usualmente encontradas nas estruturas das passarelas metálicas são assemelhadas às identificadas nas pontes metálicas e mistas e já foram comentadas no capítulo 2 deste texto. As soluções para recuperação e reforço são também similares às adotadas para as pontes, levando em conta, evidentemente, as diferenças que existem entre os dois tipos de sistemas estruturais. Por se tratar de estruturas também ao ar livre como as pontes, e expostas aos agentes agressivos da atmosfera, a corrosão de seus componentes representa a patologia de maior incidência e, dependendo da classe de corrosividade do local em que a passarela foi executada, deve merecer uma atenção especial quanto às manutenções preventivas para garantir a durabilidade e a segurança da obra.

O caso mostrado a seguir refere-se a passarelas que ficaram quase duas décadas submetidas à forte agressividade ambiental, sem passar por quaisquer tipos de manutenções e que tiveram

que ser demolidas pelo fato de não ser mais viável as suas recuperações e representarem situações de riscos para o tráfego das pistas inferiores por causa do desprendimento de partes das estruturas.

Tratam-se de cinco passarelas situadas nos limites das cidades de Recife e Olinda, que foram executadas em uma área litorânea, a menos de 1km da praia, com o uso do aço ASTM A36, que tem baixa resistência à corrosão atmosférica. Foram construídas no início da década de 90 e demolidas precocemente em 2008 por não apresentarem mais condições de uso e pela inviabilidade dos custos de recuperação e reforço depois de quase 18 anos submetidas a uma severa agressividade e sem qualquer manutenção. As figuras seguintes mostram detalhes de uma dessas passarelas antes de serem demolidas.



Figura 5.10 - Vista lateral da passarela com corrosão generalizada nas barras e ligações das treliças.
(Fonte: acervo do autor)



Figura 5.11 - detalhe do avançado estado de corrosão generalizada nas barras e ligações das treliças metálicas. (Fonte: acervo do autor)



Figura 5.12 - Corrosão generalizada nos tirantes e barras transversais de enrijecimento.

(Fonte: acervo do autor)

5.3.1.Exemplos de danos nas ligações

As ligações nas estruturas metálicas necessitam de cuidados especiais, principalmente nos sistemas treliçados pois, como já detalhado neste texto, exercem um papel fundamental para a segurança desses sistemas, presentes em uma quantidade significativa dos tabuleiros das passarelas metálicas existentes no Brasil que podem sofrer colapso progressivo por falhas nas ligações. É de fundamental importância prevenir a corrosão nesses pontos de grandes concentrações de tensões, evitando o acúmulo de água e detritos nos nós das treliças, entre outras providências necessárias para garantir a integridade estrutural.

As figuras seguintes mostram alguns exemplos de grandes danos em ligações de barras de treliças em tabueiros de passarelas.



Figura 5.13 - Corrosão causada pela infiltração de água em uma ligação das barras da treliça de uma passarela (Fonte: CONSÓRCIO CGP- CEPROL- AFIRMA, 2013)



Figura 5.14 - Dano acentuado causado pela corrosão em um nó da treliça de uma passarela.

(Fonte; acervo do autor)



Figura 5.15 - Grande dano causado pela corrosão na ligação de uma barra vertical da treliça.

(Fonte; acervo do autor)

5.3.2.Exemplos de corrosão nos componentes dos chumbadores de pilares metálicos

Outras partes das estruturas das passarelas que têm se mostrado sensíveis aos efeitos da corrosão são os locais dos chumbadores dos pilares metálicos nos blocos de concreto das fundações, que por se situarem muitas vezes ao nível do solo são diretamente expostos à ação da água, da umidade e de detritos.

Esses componentes são de vital importância para a estabilidade das passarelas pelo fato de a ligação da base do pilar com o bloco de concreto ser responsável pela transmissão de todos os esforços verticais e horizontais às fundações. A falta de cuidados com a manutenção dessas áreas de ligação com a fundação faz com que as chapas e os chumbadores fiquem expostos a empoçamentos das águas de chuvas e também a acúmulo de detritos, o que acelera o processo de corrosão como mostram as figuras a seguir.



Figura 5.16 - Ligação da base de pilar metálico de uma passarela com a fundação mostrando acúmulo de detritos e avançado processo de corrosão. (Fonte: acervo do autor)



Figura 5.17 - Detalhe do avançado processo de corrosão na placa e nos chumbadores da base de um pilar de passarela. (Fonte: CONSÓRCIO CGP-CEPROL-AFIRMA, 2013)



Figura 5.18 - Grau avançado de corrosão nos componentes da fixação do pilar metálico com o bloco de concreto da fundação. (Fonte: PEREIRA, 2018)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É inegável que houve algum avanço no que se refere ao aumento das construções de pontes metálicas e mistas no Brasil nos últimos anos. Isso pode ser comprovado pela maior quantidade dessa tipologia entre as pontes e viadutos cadastrados no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais do DNIT (SGO), que eram apenas 1% em 2009 e em 2022 são 4%, totalizando 276 OAEs cadastradas nas rodovias federais.

Mesmo não existindo dados cadastrais das rodovias estaduais e municipais, é possível supor que também tenha sido construída certa quantidade de pontes e passarelas metálicas pelos estados e municípios. A edição de uma norma nacional em 2020 para o projeto de pontes metálicas e mistas também significa mais uma etapa importante para o aprimoramento dos projetos, melhor conhecimento sobre o tema e para uma maior difusão e incentivo à utilização desse sistema construtivo.

Porém, ainda existe uma carência de produção do conhecimento no que se refere à conservação, e à identificação e correção dos danos estruturais das Obras de Arte Especiais existentes em estruturas metálicas, fazendo-se necessário a realização de estudos e pesquisas sobre os mecanismos relacionados a tais questões, visando possibilitar a melhoria da qualidade das manutenções preventivas sem a necessidade de grandes e onerosas intervenções de recuperação e reforço.

Nesse sentido, os estudos para o conhecimento da vida útil residual das pontes e passarelas metálicas existentes, a exemplo dos realizados atualmente por vários pesquisadores para as pontes de concreto, especialmente as que estão construídas em ambientes de alta agressividade, poderão se constituir em instrumentos importantes para a definição das prioridades e da otimização dos critérios para a manutenção dessas obras.

Especial atenção deve ser dada à prevenção e ao combate à corrosão ainda na fase de projeto, por meio de um bom detalhamento que inclua o tipo mais adequado de proteção anticorrosiva e também evite a ação dos agentes agressivos na estrutura, principalmente nos locais vulneráveis e sensíveis como frestas, pontas de solda, juntas, ligações e bases de pilares, como mostrados neste texto.

Nas obras existentes, a identificação de fissuras e fraturas é fundamental para garantir a integridade estrutural, especialmente quanto à fadiga, e deve contemplar principalmente os locais de concentração de tensões, como as ligações, para evitar maiores danos e os colapsos parciais ou totais.

Outra questão que necessita de um maior conhecimento e aprofundamento quanto às condições de exequibilidade construtiva e financeira, é a utilização de vigas mistas de aço e concreto em

alargamentos e reforços de pontes rodoviárias típicas de concreto, como acontece em outros países.

Isso poderá proporcionar uma boa opção, principalmente nos casos em que o tempo de execução das obras for um fator determinante para a escolha do método de alargamento. Um dado importante para a escolha será também a redução do peso da estrutura, que poderá significar reduções significativas nos custos das novas fundações e do reforço das fundações existentes. Evidentemente, deverão ser estudados com maior profundidade os efeitos da retração, fluência e temperatura na nova seção transversal mista após o alargamento, pois o concreto sob tensão sofre deformações diferidas ao longo do tempo de modo que tais efeitos podem ser responsáveis pela transferência de esforços para as vigas metálicas.

Estudos realizados pelo autor em 2013 mostraram ser bastante competitivo o uso de perfis metálicos com laje de concreto (vigas mistas) e transversinas metálicas para o alargamento de pontes com vãos entre 30m e 40m, para uma seção transversal como a mostrada na figura 3.13 deste texto, utilizando perfis com menores pesos e dentro dos padrões comerciais, com menores custos.

As passarelas metálicas existentes também merecem ser estudadas com maior atenção na busca dos procedimentos mais apropriados para se adequarem às atuais exigências normativas, principalmente quanto à prevenção aos impactos de veículos e ao estado limite de vibrações excessivas, considerando as particularidades dessas estruturas quando comparadas às passarelas de concreto.

Com base no exposto ao longo deste texto, é possível concluir que a garantia de maior segurança, durabilidade e vida útil às pontes e passarelas metálicas, depende essencialmente da elaboração de bons projetos para as obras novas e da utilização de métodos de manutenções preventiva e corretiva para as obras existentes que considerem as peculiaridades inerentes a essas tipologias estruturais que, mesmo alcançando uma maior quantidade de unidades construídas nos últimos anos, ainda são opções pouco utilizadas na malha rodoviária brasileira, se comparadas às pontes e passarelas de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - **Standard Specifications For Highway Bridges**, EUA, 2002.
- ABNT NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto- Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 7188 – **Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e Outras Estruturas** – Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT NBR 8800 - **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**, Rio de Janeiro, 2008.
- AFONSO, D. F. – **Verificação à Fadiga de Pontes Metálicas Ferroviárias**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- ASTANEH – ASL, A. – **Progressive Collapse of Steel Truss Bridges, The Case of I-35W Collapse**. 7th International Conference on Steel Bridges. Guimarães, Portugal, 2008.
- BRANCO, H. A. P. – **Colapso de Pontes: Lições Aprendidas**. (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- BRINK, F. M. – **Efeito da Corrosão na Integridade Estrutural da Ponte Metálica Marechal Hermes**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto - Estado de Minas, Ouro Preto, 2004.
- CALADO, L., SANTOS, J. – **Estruturas Mistas de Aço e Betão**. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- CAMPOS, L. E. T. – **Técnicas de Recuperação de Estruturas de Aço**. (Dissertação de Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.
- CARDOSO, M. G. – **Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes Metálicas da Ferrovia Turística Ouro Preto / Mariana (MG) por Meio de Modelagem Numérica e Técnicas Laboratoriais**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, Ouro Preto, 2007.
- CARNEIRO, S. B., MENDES, L. C., ALVES, V. R. – **Patologias em Obras de Pontes em Estruturas Metálicas**. – Anais do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2005.
- CONSÓRCIO CGP – CEPROL – AFIRMA – **Inspeção, Vistoria e Diagnóstico de Passarelas**, Belo Horizonte, 2013.
- DELTA CON ENGENHARIA LTDA. – **Solução Estrutural Para Alargamento de Pontes Existentes Sem Reforço de Fundações – Solução Mista em Concreto e Aço**. Porto Alegre, 2011.

- FERNANDES, H. – **Proteção Anticorrosiva de Pontes Metálicas Ferroviárias**. Anais do V Congresso da Associação de Conservação e Segurança de Pontes, Lisboa, 2015.
- FERRAZ, A. M. S. – **Dimensionamento Ótimo de Pontes Mistas Rodoviárias de Pequeno Vão**. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- GOMES, D. H. M. – **Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília com a utilização de amortecedores de massa sintonizados**. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília, 2006.
- GNECO, C., MARIANO, R., FERNANDES, F. – **Tratamento de Superfície e Pintura**. Série Manual de Construção em Aço. Instituto Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, 2006.
- KEDAR, A., MACHLEV, M. - **Joseph Bridge over the Jordan River**. Israel Case Study-Steel Truss Road Bridge, 2019.
- LACERDA, L. J. B. – **Análise dos Desempenhos Funcional e Estrutural da Ponte Seis de Março, Situada na Cidade do Recife**. (Monografia de Especialização), Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2015.
- MARQUES, P. L. A. – **Comportamento Diferido de Pontes Híbridas Constituídas por Vãos Laterais Pré-Fabricados em Betão Pré-Esforçado e Vão Misto Aço-Betão: Um Caso Prático**. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2011.
- MELO, L. G., REIS, A. J. – **Ponte Metálica Sobre o Rio Corgo – Reabilitação e Reforço**. Anais do Congresso de Construção Metálica e Mista, Lisboa, 2003.
- MENDES, P. T. C. - **Contribuição para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- NELSEN, A. C. H. – **Comportamento Estrutural de Vigas Mistas de Aço e Concreto com Protensão Externa**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2013.
- NELSEN, A. C. H., SOUZA, A. S. C. – **Vigas Mistas de Aço e Concreto com Protensão Externa: Conceitos e Aplicações**. Anais do Construmetal, São Paulo, 2012.
- PANONI, D. F. – **Projeto e Durabilidade**. Série Manual de Construção em Aço. Instituto Brasileiro da Construção e Aço, Rio de Janeiro, 2009.

- PEREIRA, A. C.- **Avaliação de Manifestações Patológicas em Passarelas estruturadas em aço na cidade de Belo Horizonte-MG.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- PERNETA, H. M. B. – **Pontes Metálicas em Ambiente Marítimo – Metodologias de Avaliação.** (Dissertação de Mestrado). Universidade de Madeira, Funchal, 2010.
- PFEIL, W., PFEIL, M. - **Estruturas de Aço – Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008.** Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2009.
- PRAVIA, Z. M. C. – **Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas.** (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- SANTOS, A., VITÓRIO, J. A. P. – **Projeto Executivo de Recuperação das Estruturas Metálicas da Ponte Arquiteto Wilson Campos Júnior.** Recife, 2019.
- VITÓRIO, J. A. P. - **Conservação, Segurança Estrutural e Reforço de Pontes Metálicas e Mistas.** X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.
- VITÓRIO, J. A. P. - **Fundamentos, Inspeções, Patologias e Reforço de Pontes Metálicas e Mistas.** Notas de Aula, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.
- VITÓRIO, J. A. P. - **Pontes Rodoviárias – Fundamentos, Conservação e Gestão.** CREA-PE, Recife, 2002.