

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ OSVALDO FERREIRA FILHO

**ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS CONVENCIONAIS DE
REABILITAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO**

CAMPO MOURÃO

2017

JOSÉ OSVALDO FERREIRA FILHO

**ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS CONVENCIONAIS DE
REABILITAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

CAMPO MOURÃO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**MÉTODO CONVENCIONAL DE REABILITAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE
AÇO**

por

José Osvaldo Ferreira Filho

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h do dia 23 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a Fabiana Goia

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Góes

(UTFPR)

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil: **Prof. Dr. Ronaldo Rigobello**

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho a quem sempre se dedicou a mim, preocupando-se com a minha vida, meus sonhos e meu futuro. Dedico ao meu querido e sempre presente pai Altamir Ferreira Lacerda, que, apesar de não estar fisicamente entre nós, estará sempre em minhas melhores lembranças e em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Quando uma etapa chega ao fim, o que mais me vem à cabeça são agradecimentos. Esta etapa de minha vida foi muito especial. Foram muitas as pessoas levantadas por Deus para me ajudar e iluminar. Foram inúmeras as situações em que tive a oportunidade de aprender. Acredito que todos nós, a partir das situações que vivenciamos, sejam elas boas ou não, temos a incrível chance de poder crescer como pessoas, aprender a se importar mais com o próximo e fazer a diferença.

Eu agradeço, sobretudo, ao meu Deus, meu refúgio, meu baluarte, meu socorro bem presente em toda tribulação, Aquele que nunca me abandonou e jamais me desampará. Ao Deus de Moisés, Isaque, Jacó, Abraão e José do Egito. Ao Deus que abriu o mar Vermelho para que seu povo pudesse passar. O que era, é e sempre será, que sempre existiu e sempre existirá. Para Ele, todo meu louvor e adoração. Obrigado, Senhor. Meu coração exulta por sua Poderosa Presença em meu viver.

Agradeço aos meus pais, que significam tanto para mim. Lembro-me muito bem de quando eu era pequeno, quando meu papai me levava e buscava, todos os dias, na escola. Com um carinho mais que especial, me incentivava a ler, aprender, procurar conhecer. Ele me instigava a ser curioso. Fazia de tudo para que, em meu alcance, tivesse o melhor para o meu aprendizado. Sempre se preocupando com cada detalhe, me deu grande exemplo de honestidade, integridade e humanidade. Foi o homem mais especial de minha vida: aquele que jamais deixava o próximo despercebido porque ele se importava. Um ser mais que especial enviado por Deus, que tem um espaço enorme em meu coração e sempre terá. Agradeço à minha amada mãe, que sempre foi exemplo de garra, força e perseverança, que, mesmo enfrentando tantas dificuldades de saúde, nunca me deixou de lado, se importando antes com meus problemas do que com os dela. Fez de tudo para que minha criação fosse a melhor possível. Não tenho palavras que poderiam expressar o quanto sou grato aos meus pais. Meu amor é incomensurável.

Agradeço às instituições de ensino Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Univeristy of Southern California* e *Fordham University*, as quais contribuíram para minha formação com recursos, infraestrutura e ensino de boa qualidade.

Agradeço aos meus professores da UTFPR, que exercem tão bem sua profissão que, na verdade, é uma missão devido à importância que carrega, as oportunidades que cria e ao futuro que constrói.

Agradeço especialmente ao professor Dr. Leandro Waidemam, que me orientou tão bem nos programas de monitoria e estágio; à professora Dr^a. Débora Cristina de Souza, que tanto auxiliou em minha primeira pesquisa tecnológica; ao meu tutor e eterno petiano professor Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, que de forma exemplar me orientou em inúmeros trabalhos e eventos do grupo PET; à professora Dr^a. Fabiana Goia Rosa de Oliveira que tanto me ajudou em relação às minhas dúvidas, quando fui para o intercâmbio, e sempre me aconselha e responde minhas perguntas com admirável educação e paciência e ao meu orientador de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso professor Dr. Ronaldo Rigobello, que, com especial atenção e exímia dedicação, me ajudou, ao longo deste ano, a concluir este trabalho. Vocês, com toda certeza, fizeram a diferença em minha formação.

Também sou grato a todos os grupos que tive o prazer de participar e trabalhar. Agradeço à Pórticos Empresa Júnior de Engenharia Civil e ao Grupo de Pesquisa e Ensino Tutorial (PET). Agradeço ao grupo de bolsistas da CAPES, os quais realizaram intercâmbio comigo e me ajudaram tanto em meus primeiros meses longe do Brasil. Agradeço ao grupo de estagiários de verão 2017 da Usina Hidrelétrica de Baixo Iguaçu, bem como às demais pessoas que me ensinaram tanto, enquanto estagiei na Construtora Norberto Odebrecht, especialmente, aos engenheiros André Queiroz e Felipe Alves e aos técnicos Edson Macedo e Eduardo Caldas. Trabalhar em grupo significa obter melhoria contínua.

Agradeço às instituições Fundação Araucária, Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por fomentar meus estudos, através do auxílio com bolsas.

Agradeço à Igreja Presbiteriana e à cidade de Campo Mourão, onde tive o prazer de conhecer e conviver com pessoas que me ajudaram tanto em muitos momentos e mostraram-me cristianismo e gentileza.

Agradeço a todos os meus amigos que participaram de minha formação. “A amizade é um amor que nunca morre”.

E, por fim, a todos que não foram citados diretamente, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para minha formação acadêmica, meu muito obrigado! Deus não coloca ninguém em nossas vidas à toa! Tudo tem seu propósito debaixo dos céus.

**“Não se entristeçam porque a alegria do
Senhor os fortalecerá”
(Neemias 8:10)**

RESUMO

FERREIRA FILHO, José Osvaldo. **Estudo sobre os métodos convencionais de Reabilitação e Reforço de Estruturas de Aço.** 2017. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

Reabilitações e reforços são alternativas viáveis e sustentáveis para recuperação do desempenho de construções. Estruturas reabilitadas são comuns e investimentos nesse campo ocorrem, principalmente, em países da Europa e nos Estados Unidos. Porém, no Brasil, estudos, pesquisas e a própria utilização de técnicas de reparo de estruturas de aço não são tão difundidos no meio técnico, existindo pouca bibliografia sobre o tema. Nesse sentido, buscou-se estudar os métodos convencionais de reabilitação e reforço de estruturas metálicas, que envolvem o corte, a substituição e a adição de materiais, considerando suas aplicações e sua viabilidade técnica. Dessa forma, foi necessário compreender os fundamentos de análise estrutural, o dimensionamento e as patologias das construções em aço, estudar a relevância de reabilitações e reforços e descrever detalhadamente as principais técnicas dos métodos convencionais de reabilitação de estruturas metálicas. Para tanto, revisou-se bibliograficamente publicações, principalmente, internacionais, a fim de obter conhecimento e conteúdo de interesse. Por conseguinte, constatou-se que reabilitações e reforços são soluções economicamente vantajosas e que não existe um número considerável de métodos convencionais que são difundidos, normatizados ou aplicados no Brasil. Ao fim, o trabalho resultou em relatório com informações relevantes sobre reabilitações e reforços de estruturas de aço, que pode ser divulgado ao meio técnico.

Palavras-chave: Métodos convencionais. Reabilitação. Reforço. Estruturas de aço.

ABSTRACT

FERREIRA FILHO, José Osvaldo. **Study of conventional methods for repairing and strengthening steel structures.** 2017. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

Rehabilitation and strengthening of structures are viable and sustainable alternatives for the construction improvement. Repaired and strengthened structures are common and investments in this area occur mainly in Europe countries and in the United States. However, in Brazil, studies and researches about this topic are rarely published in the technical field. In this sense, this work aimed to examine and present conventional methods for the rehabilitation and strengthening of steel structures which involve the cutting and replacement of steel members or addition of steel plates, considering their applications and technical feasibility. For this, it was necessary to understand the fundamentals of structural analysis, the design and pathologies of steel constructions. It was also required to study the relevance of repair and reinforcement and describe the main methods. In this case, publications were bibliographically reviewed mainly the international ones. Therefore, it was concluded that repair and strengthening have economic advantages and there is not a considerable number of conventional methods diffused, standardized, and applied in Brazil. At the end, the work resulted in a report with relevant information available for engineers and architects.

Keywords: Conventional methods. Repair. Strengthening. Steel structure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Edifício Palácio do Comércio, em São Paulo, construído em 1959.....	14
Figura 2 - Edifício Avenida Central, no Rio de Janeiro, construído em 1961.....	15
Figura 3 - Edifício Santa Cruz, em Porto Alegre, construído em 1964.....	15
Figura 4 – Vista do Palacete Prates, em São Paulo, em 1920.....	16
Figura 5 - Vista atual do Edifício Conde de Prates, em São Paulo.....	17
Figura 6 - Correio Central de São Paulo em 1929.....	18
Figura 7 - Correio Central de São Paulo atualmente.....	18
Figura 8 - John Hancock Center, Chicago, EUA.....	20
Figura 9 - Vista geral e detalhe do meio do vão dos arcos atirantados da ponte sobre o Rio Paraíba do Sul.....	21
Figura 10 - Notícia sobre a inauguração do edifício-garagem.....	22
Figura 11 - Edifício Garagem América.....	23
Figura 12 - Ensaio de tração de uma barra metálica com seu respectivo gráfico de tensão-deformação.....	24
Figura 13 - Gráfico tensão-deformação.....	25
Figura 14 – Gráficos tensão-deformação de um material dúctil e um material frágil....	26
Figura 15 - Desabamento do Viaduto Paulo de Frontin em 1971.....	29
Gráfico 1 - Lei de Evolução dos Custos.....	30
Figura 16 - Representação esquemática das etapas de obtenção de um metal e de corrosão.....	32
Figura 17 - Corrosão metálica na ponte Marechal Hermes, em Minas Gerais.....	33
Figura 18 - Corrosão em uma coluna de aço.....	34
Figura 19 - Tipos de Corrosão.....	35
Figura 20 - Corrosão generalizada encontrada na ponte Marechal Hermes.....	36
Figura 21 - Corrosão em frestas encontrada na ponte Marechal Hermes.....	37
Figura 22 - Corrosão puntiforme em tubo de aço inoxidável.....	38
Figura 23 - Vista lateral de uma corrosão localizada.....	38
Figura 24 - Exemplo de corrosão galvanizada.....	40
Figura 25 - Estátua da Liberdade: marco americano construído em cobre e ferro.....	41
Figura 26 - Placa informativa encontrada no interior da estátua.....	41
Figura 27 - Modificações de projeto visando a minimização de corrosão.....	42

Figura 28 – Representação do mecanismo de proteção por revestimento.....	43
Figura 29 - Flambagem lateral em membro estrutural.....	43
Figura 30 - Perda de equilíbrio por impacto e erro de projeto ou montagem.....	44
Figura 31 - Meios e Elementos de ligação.....	45
Figura 32 - Estrutura da roda gigante do píer de Santa Mônica, na Califórnia.....	46
Figura 33 - Ligações responsáveis pelo comportamento e segurança estrutural da roda gigante.....	46
Figura 34 - Radiografia de uma solda porosa.....	47
Figura 35 - Radiografia de uma solda com trincas.....	48
Figura 36 - Tipos de empenamento devido à soldagem irregular.....	48
Figura 38 - Excesso de respingos de solda.....	49
Figura 37 - Situação da solda com superposição.....	49
Figura 39 - Líquidos necessário para o Teste de LP.....	50
Figura 40 - Aplicações dos líquidos para verificação de fissuras na soldagem.....	50
Figura 41 - Realização do Teste de LP.....	51
Figura 42 - Problemas corrosivos em ligações por parafusos	52
Figura 43 - Peça com comprimento menor que o necessário.....	52
Figura 44 - Peça com comprimento maior que o necessário.....	53
Figura 45 - Amassamento de ligação para acesso ao furo.....	53
Figura 46 - Instabilidade de ligação devido à falta de aperto dos parafusos.....	54
Gráfico 2 - Segmento da reabilitação no sector da construção em 2002.....	56
Figura 47 - Reforço da mesa inferior de um perfil metálico.....	60
Figura 48 - Reforço de uma viga.....	61
Figura 50 - Reforço da viga caixão de um píer.....	62
Figura 49 - Reforço da mesa superior de um perfil metálico.....	62
Figura 51 - Ligações parafusadas utilizadas para adição de materiais metálicos para aumento de resistência à fadiga.....	63
Figura 52 - Análise de compatibilidade entre reforços e a estrutura.....	64
Figura 53 – Fissura encontrada em pilar de uma ponte de ferro fundido.....	65
Figura 54 – Pilastra na ponte ferroviária Hungerford.....	66
Figura 55 - Ligações parafusadas utilizadas para adição de elementos estruturais metálicos para aumento de resistência à fadiga.....	67
Figura 56 - Reabilitação de elemento estrutural corroído em ponte.....	68
Figura 57 - Substituição de elementos estruturais corroídos.....	69

Figura 58 - Substituição de elementos estruturais corroídos.....	69
Figura 59 – Reparo mecânico através de macaco hidráulico.....	70
Figura 60 - Reparo térmico em barra metálica.....	72
Figura 61 – Utilização de chamas de oxiacetileno para o reparo estrutural.....	73
Figura 62 - Formas de aquecimento pontual.....	74
Figura 63 - Aquecimento em V e Aquecimento Retangular.....	75
Figura 64 – Etapas dos deslocamentos da flecha durante o aquecimento.....	76
Figura 65 – Formas de aquecimento retangular em uma viga.....	77
Figura 66 – Execução de aquecimento retangular.....	77
Figura 67 – Execução de aquecimento retangular.....	78
Figura 68 - Corrosão em componentes estruturais de uma passarela.....	79
Figura 69 - Aquecimento de rebites e locação de suas hastes na estrutura.....	80
Figura 70 - Pressão exercida sobre o rebite para modela-lo ao local de ligação.....	80

LISTA DE SIGLAS

CBCA	Centro Brasileiro de Construção em Aço
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Civil e Demolição
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IBC	International Building Code
ANSI	American National Standards Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
GARF	Gesso Acartonado Resistente ao Fogo
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LP	Líquido Penetrante
MBC	Michigan Building Code
MEBC	Michigan Existing Building Code

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO	14
4 METODOLOGIA	19
5 ESTUDO SOBRE O AÇO	20
5.1 Aço na Construção Civil	20
5.2 Principais Propriedades e Vantagens e Desvantagens do Aço	23
5.3 Patologias Recorrentes em Estruturas Metálicas	28
5.3.1 Corrosão	32
5.3.1.1 Corrosão Uniforme	36
5.3.1.2 Corrosão Localizada	37
5.3.1.3 Corrosão Galvânica	39
5.3.1.4 Possíveis soluções à corrosão	42
5.3.2 Perda de Estabilidade Estrutural	43
5.3.3 Patologia em Ligações	44
6 REABILITAÇÃO E REFORÇO	55
6.1 Viabilidade Econômica	56
6.2 Cenário Brasileiro	57
7 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE REABILITAÇÃO E REFORÇO	59
7.1 Reforço	60
7.2 Reparo	64
7.3 Principais Métodos Convencionais de Reabilitação e Reforço de Estruturas Metálicas	65
7.3.1 Método de Costura	65
7.3.2 Método para Reabilitação de Componentes Corroídos	67
7.3.3 Método para Reabilitação de Componentes Estruturais Deformados	69
7.3.3.1 Reparo Mecânico	70
7.3.3.2 Reparo Térmico	71
7.3.4 Método de Reabilitação de Meios de Ligações	78
8 CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Reabilitações e reforços estruturais são realizados com o objetivo de melhorar o desempenho de construções, adequando-as a condições de utilização e segurança necessárias. Para tanto, vários métodos, com suas respectivas técnicas, são empregados, possibilitando a recuperação estrutural de elementos submetidos a patologias e problemas construtivos. Entre eles, estão os métodos convencionais de reabilitação e reforço de estruturas de aço.

A aplicação destes métodos é mundialmente comum e a tendência é que haja o crescimento de sua utilização. Isso se deve às vantagens econômicas e sustentáveis que técnicas de reparo e reforço proporcionam, se comparadas a outros fins concedidos a obras deterioradas, como, por exemplo, demolições.

No Brasil, não é diferente: existe uma procura crescente por reformas. Entretanto, como é maior a utilização de concreto armado, são realizados mais estudos sobre determinadas técnicas para o concreto, do que para outros materiais, como madeira e aço, por exemplo.

Em literatura brasileira, não existe número considerável de pesquisas e publicações destinadas ao tema em questão e também não há normatizações específicas, quanto a estes métodos. Além disso, nos cursos de Engenharia Civil, são enfatizados cálculos, projetos e processos construtivos, porém pouco é apresentado no que diz respeito a formas de manutenção e recuperação de edificações. Inclusive, dentro da construção civil, até mesmo a Patologia, como ciência, não é antiga, sendo recentes as pesquisas relacionadas ao tema. Por isso, o desenvolvimento e a divulgação de estudos sobre reabilitações e reforços estruturais são importantes.

No cenário brasileiro, no que tange à construção civil, estruturas metálicas têm representatividade notória, visto que apresentam vantagens de aplicação estrutural e, nos últimos anos, houve grande aumento de sua utilização. O número de obras que foram estruturadas em aço é relevante, sendo assim, estudar o material, bem como as formas de reabilitar estruturas metálicas, tornou-se importante para a engenharia. Deste modo, é preciso identificar e avaliar métodos mundialmente utilizados para reforços e reabilitações de estruturas de aço, constatando sua relevância e descrevendo seus procedimentos, a fim de que se alcance maior abrangência de conhecimento e conteúdo técnico sobre o assunto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar e apresentar os principais métodos convencionais de reabilitação e reforço de estruturas metálicas.

2.2 Objetivos Específicos

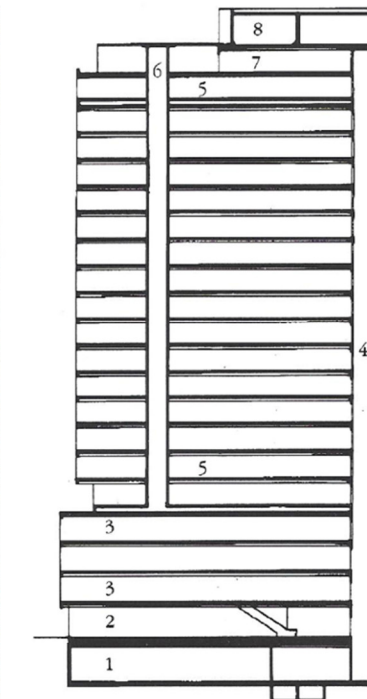
- Compreender as propriedades do aço, bem como suas patologias e vantagens e desvantagens de sua utilização;
- Estudar a relevância e viabilidade econômica de reabilitações e reforços de estruturas de aço;
- Descrever as técnicas presentes nos principais métodos convencionais de reabilitação e reforço de construções em aço.

3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O emprego do aço na construção civil é crescente. Com certeza, este fato é bem mais representativo em países estrangeiros. Porém, estruturas metálicas, mesmo sendo menos utilizadas que estruturas de concreto, estão se tornando comuns, no Brasil. Isso pode ser comprovado através de informações disponibilizadas no Relatório de Atividades de 2016 do Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) que afirmam que a construção em estruturas de aço foi responsável por 36% do consumo de todo o aço destinado à construção civil em 2015.

Desde os anos 50, o país está envolvido em construções em aço. Dias (1999) destaca que pelo menos 30 obras de grande porte foram construídas em estruturas metálicas, até o início da década de 1990. Nas figuras 1, 2 e 3, são apresentadas algumas delas, que representam o marco inicial da utilização do aço como estrutura principal em construções, no Brasil.

Figura 1 - Edifício Palácio do Comércio, em São Paulo, construído em 1959



02.01

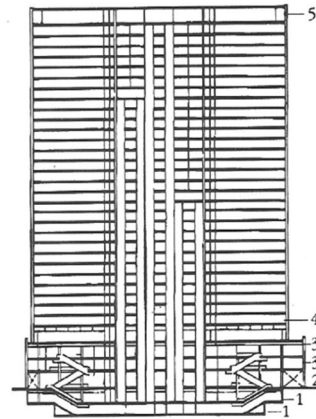
1. Subsolo
2. Pavimento térreo
3. Sobreloja
4. Poço dos elevadores
5. Pavimento tipo
6. Ventilação dos sanitários
7. Ático
8. Caixa d'água

Fonte: Dias (1999)

Figura 2 - Edifício Avenida Central, no Rio de Janeiro, construído em 1961



foto arquivo FEM



03.01

1. Subsolo
2. Pavimento térreo
3. Sobreloja
4. Pavimento tipo
5. Cobertura

Fonte: Dias (1999)

Figura 3 - Edifício Santa Cruz, em Porto Alegre, construído em 1964



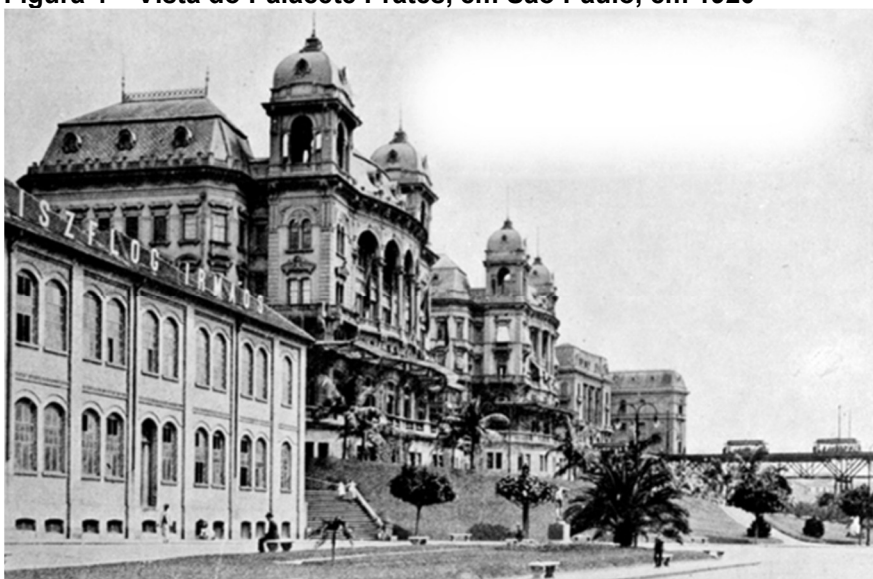
Fonte: Dias (1999)

Todas as edificações citadas em Dias (1999) são antigas, tendo pelo menos 25 anos desde sua inauguração. Segundo a norma brasileira de desempenho da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15575:2015), que discorre sobre o desempenho de edifícios habitacionais, a vida útil estrutural normal, geralmente, varia entre 50 e 60 anos. Conclui-se que, possivelmente, muitas obras citadas deverão sofrer intervenções a fim de atender às condições de segurança e utilização necessárias.

Em casos, nos quais manutenções corretivas já não garantem a qualidade de uso e segurança, técnicas de reabilitação e fortalecimento estrutural são alternativas a serem consideradas. Entretanto, o que geralmente ocorre são demolições, que não é uma opção bem-vinda do ponto de vista ambiental porque causa uma série de impactos ao meio ambiente, tais como: geração de resíduos, poluição sonora, visual, hídrica e atmosférica, alteração da paisagem, exposição do solo, possibilitando a erosão, e danos a edificações adjacentes. Sendo assim, vai contra todos os princípios defendidos pela sustentabilidade.

Talvez pela falta de conhecimento técnico sobre restaurações, ou por interesses políticos e econômicos das cidades, este foi o destino de obras antigas, que possuíam aço em sua constituição estrutural, como, por exemplo, o Palace Hotel da avenida Rio Branco, no Rio de Janeiro (RJ), demolido em 1950 para dar lugar ao Edifício Marquês do Herval e o Palacete Prates, em São Paulo (SP), demolido em 1952 para a construção do Edifício Conde de Prates.

Figura 4 – Vista do Palacete Prates, em São Paulo, em 1920



Fonte: acervo fotográfico do website São Paulo Antiga

Figura 5 - Vista atual do Edifício Conde de Prates, em São Paulo



Fonte: acervo fotográfico do website São Paulo Antiga

De acordo com o Relatório de Pesquisa Setorial de 2015 da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (ABRECON), a produção média anual brasileira de resíduos de construção e demolição (RCD) é de 500 kg/hab. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em outubro de 2017, o país contava com 208.162.748 habitantes. Considerando que a massa unitária de RCD é de 1200 kg/m³, em concordância com dados obtidos pela ABRECON, estima-se que sua geração por ano seja de 86.734.240,83 m³.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), estes resíduos representam um grave problema urbano, sendo que sua disposição irregular pode gerar problemas estéticos e ambientais. Além disso, Karpinsk et al. (2009) aborda que, junto a estes, é possível encontrar matéria orgânica, produtos perigosos, e embalagens propícias à acumulação de água, que possibilitam a proliferação de vetores de doenças. Sendo assim, podem ser nocivos à saúde pública. Nesse sentido, diminuir o número de demolições também representa reverter este cenário tão crítico dentro da construção civil.

O prédio do Correio Central de São Paulo (SP), inaugurado em 22 de outubro de 1922, é exemplo de que construções não precisam ser demolidas e ceder lugar a outras. Passou por processos de preservação e restauração e hoje é um importante centro cultural considerado grande marco de arquitetura na cidade.

Figura 6 - Correio Central de São Paulo em 1929



Fonte: acervo do jornal Estadão (2014)

Figura 7 - Correio Central de São Paulo atualmente



Fonte: website dos Correios (2017)

Por conseguinte, a comunidade técnica terá de lidar com o envelhecimento de estruturas metálicas. Tendo em vista tudo o que foi exposto, a forma mais sustentável de realizar isto definitivamente não é lançando-se mão de demolições. Deve-se atentar para outros fins, que geram menores impactos e que sejam economicamente viáveis. A reabilitação e o reforço estrutural são caminhos que minimizam a geração de resíduos sólidos. Além disso, podem contribuir para menores prejuízos financeiros, o que será discutido e aprofundado em capítulos a seguir.

4 METODOLOGIA

Para que haja o estudo e a discussão adequados sobre o método convencional de reabilitação e reforço de estruturas metálicas, primeiramente, é indispensável entender as principais propriedades e patologias do aço, assim como a experiência nacional quanto à sua utilização. Para isto, foi necessário a revisão bibliográfica sobre o que se tem de mais representativo, quanto ao uso do aço, encontrado na literatura brasileira.

Além disso, o estudo prévio de manuais e normas, como o *International Building Code (IBC):2012*, *ANSI/AISC 360-10 (Specification for Structural Steel Buildings Specification for Structural Steel Buildings)* e *ABNT NBR 8800:2008*, enfocando, principalmente, na obtenção de conhecimento técnico, foi importante para facilitar na compreensão de conteúdo que discorresse sobre as técnicas descritas.

A avaliação bibliográfica sobre a viabilidade econômica de reabilitação e reparo de estruturas metálicas também foi feita, a fim de que fosse reforçada a ideia de sua exequibilidade. Comparou-se também os investimentos necessários para a reconstrução e para a recuperação de uma edificação.

Compreendidos os principais fundamentos do aço, seu contexto e suas patologias e estudada a relevância econômica das técnicas de reparo e reforço estrutural, buscou-se trabalhos que abordam sobre a reabilitação de estruturas e suas vantagens e desvantagens, destacando-se aqueles relacionados a estruturas metálicas.

Logo após, realizou-se a avaliação bibliográfica de livros e publicações, comparando-os para que fossem encontradas informações confiáveis e o conhecimento fosse compilado e empregado, a fim de se obter um relatório que descrevesse as principais técnicas do método convencional de reabilitação e reforço de estruturas de aço.

Por fim, o principal método para o trabalho em questão foi a revisão literária. Através dela, as respostas aos objetivos previamente especificados foram alcançadas. Por isso, foi importante haver estudo criterioso e interpretações corretas. Como não há muito publicado sobre o tema em literatura brasileira, também foi fundamental que as traduções fossem coerentes, a fim de que fosse estabelecido conteúdo conveniente e significativo para influenciar na continuidade de estudos a cerca do assunto.

5 ESTUDO SOBRE O AÇO

5.1 Aço na Construção Civil

Conforme Bellei (2010), as primeiras construções metálicas datam em torno de 1750, época na qual se descobriu como produzir o ferro fundido ou forjado industrialmente para aplicações estruturais. A partir de então, seu uso foi difundido e, em 1780, já era empregado estruturalmente em obras como a escadaria do *Louvre* e o teatro do *Palais Royal*, na França. Entretanto, a aplicação do aço, como matéria estrutural, deu-se apenas a partir em 1880, sendo os Estados Unidos o país pioneiro. Na cidade de Chicago, principalmente, o aço passou a ser empregado na construção de edifícios de forma significativa. Um exemplo de destaque da construção americana em aço é o edifício John Hancock Center. Inaugurado em 1969, o arranha-céu conta com 94 andares, que juntamente com suas duas antenas, garantem 457,2 metros de altura, que podem ser visualizados na figura abaixo.

Figura 8 - John Hancock Center, Chicago, EUA

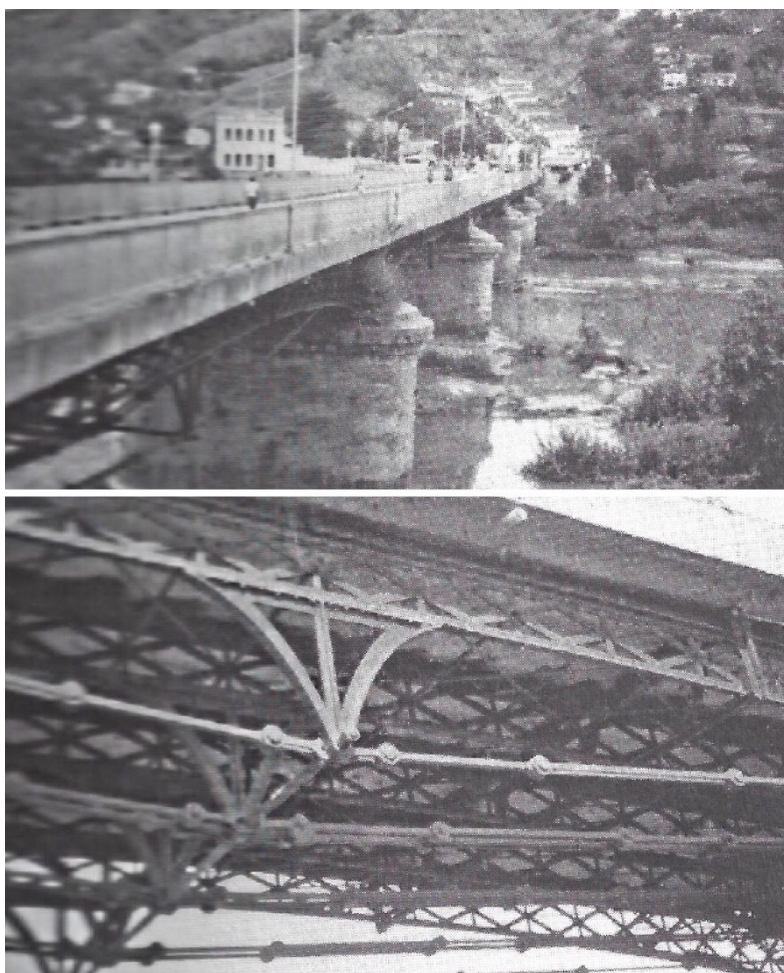


Fonte: autor (2016)

Atualmente, as estruturas metálicas representam solução e são utilizadas e consagradas mundialmente. Países industrializados como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, França e Japão exibem grandes exemplos de construções em aço. (DIAS, 1999).

No Brasil, acredita-se que a primeira obra a utilizar material metálico na estrutura foi a construção da ponte sobre o rio Paraíba do Sul, em Niterói, no estado do Rio de Janeiro, que pode ser visualizada na figura 9. Construída em 1857 em ferro fundido e constituída por 5 vãos de 30 metros, a ponte é ainda utilizada. A partir de então, nos anos posteriores, a aplicação do aço em construções brasileiras se disseminou. (BELLEI, 2010).

Figura 9 - Vista geral e detalhe do meio do vão dos arcos atirantados da ponte sobre o Rio Paraíba do Sul



Fonte: Pfeil, W. e Pfeil, M. (2000)

Em 1954, houve o início da construção do primeiro prédio em aço totalmente brasileiro, ou seja, projetado e construído por tecnologia e materiais nacionais.

Denominado de Garagem América, representou o mais moderno edifício-garagem da América do Sul, na época. Sua construção foi finalizada em 1957, contando com 16 andares e a capacidade de acomodar 500 automóveis.

De acordo com Andrade (2009), era previsto, antes do projeto e construção, a utilização do concreto armado como estrutura principal da edificação. Porém, graças a dois fatores decisivos, isso não ocorreu. As colunas do primeiro pavimento, se fossem construídas de concreto armado, teriam dimensões que impossibilitariam dois carros estacionarem frente à frente, no trecho da rua Riachuelo, o que dificultaria a entrada e saída. Além do mais, para a fundação do edifício eram previstas escavações que perfurariam o solo em até 18 metros abaixo do nível da rua citada, a fim de suportar a estrutura em concreto, o que geraria movimentação de terra, que, por consequência, colocaria em risco as construções vizinhas e possibilitaria desabamentos. Nessa época, construir muros de arrimo e escoramentos não era opção econômica.

Figura 10 - Notícia sobre a inauguração do edifício-garagem

SÃO PAULO MARCHA COM O PROGRESSO

Um empreendimento que nos coloca, mais uma vez, como pioneiros - Inaugura-se o maior edifício-garagem da América do Sul. Notável sistema de rampas independentes com active inferior a 10%

S. Paulo, cidade pioneira em iniciativas de fôlego nos mais variados setores da atividade humana, conquista agora outro primeiro lugar ao inaugurar o maior e mais moderno edifício-garagem da América do Sul, o Edifício Saint Patrick, cuja primeira garagem será agora entregue aos condôminos.

O fato reveste-se de importância incommum porque vem resolver um questão de transcendência na vida do nosso Capital. O vertiginoso progresso de São Paulo, do que tanto nos orgulhamos, é também motivo para o aparecimento de graves e numerosos problemas urbanos, cuja solução tem sido das mais difíceis e demoradas.

Se o caso de estacionamento sendo resolver, pelo menos contribuir para a solução desse velho problema, e que se deve a S. A. Anglo Brasileira, é das mais oportunas e que merece a atenção geral.

A propósito da entrega das primeiras garagens do Edifício Saint-Patrick, citamos alguns detalhes desse importante empreendimento cobertos através dos seus construtores que explicaram o funcionamento pelo lado das garagens: "O automóvel ao entrar ganha a rampa completamente despendida, uma vez que esta serve unicamente para a ascensão do carro ao pavimento onde são localizadas as boxes, não havendo a possibilidade de encontrar carros em sentido contrário. A idéia de planejar e executar uma obra que visava ser independente: um para subir, outro para descer. A maioria para entrada no box é feita por uma rua com 8,20 m de largura, completamente de

boxes existentes paredes de concreto que se destinam à sustentação da estrutura e proteção dos carros contra qualquer risco como incêndio, abalo, etc. Quanto ao acesso aos boxes fosse difícil ou demorado, isto porém não aconteceu. Por um original sistema de rampas helicoidais, os carros ganham facilmente os últimos andares, não levando mais do que 80 segundos para alcançarem os últimos boxes, situados nos andares mais elevados. Cada volta completa da rampa atinge dois andares, ou, em outra palavra, meia volta da rampa conduz ao pavimento superior".

Seria interessante ressaltar que as rampas são realmente de pequena inclinação, não oferecendo qualquer perigo de derrapagem, sem exigir um esforço especial do motor. Em suas rampas (com 4,50 m de largura) dispõem, portanto, o uso de elevadores e veltam anam as demoras ou "filas" que poderiam sobrevir caso se empregassem sacacoreas. Por outro lado, as referidas rampas servem, separadamente para a saída e a entrada de veículos, não havendo a mínima possibilidade de conflitos nem mão de direção a seguir".

A localização do Edifício Saint Patrick é indubitavelmente excelente - Av. 9 de Julho, em frente ao Claridge Hotel, a 50 m. da Praça da Bandeira, ponto que atende a todas as exigências.

Conclui-se das opiniões abalizadas acima expostas que S. Paulo pode orgulhar-se de possuir um edifício-garagem modelo que honra a arquitetura brasileira e dá bem do empenho dos nossos técnicos em acompanhar a evolução e o progresso dos maiores centros mundiais em seus dias. A S. A. Anglo Brasileira de Colômbier não apenas para o engrandecimento de nossa Ca-



O sugestivo edifício-garagem Saint Patrick, o maior do genero da America do Sul, com capacidade para acomodar aproximadamente 500 carros.

Em cada volta completa que dá, o carro atinge dois andares. O sistema de rampas helicoidais facilita o acesso ao active de no máximo de 10%, sem exigir qualquer esforço do motor do automóvel.




V. S. POSSUI LETRAS
DUPLICATAS - VALES - CHEQUES S' FUNDO

ORGANIZACAO MATHEUS STARV
Rua Barão de Passaguai, 41 - 1º andar - BT - Fone: 24-4612
Das 8 às 11 e 20 horas e das 14 às 20 às 17 e 20 horas

SOPEC
já organizou 54 grupos de financiadores que aplicaram suas economias mensais com GARANTIA HIPOTECÁRIA, ganhando JUROS DE 12% e um LUCRO FIXO DE 10%. — SOPEC - Rua 7 de Abril, 277.

A MELHOR MAQUINA DO MUNDO
PARA O MELHOR CAFE DO MUNDO!

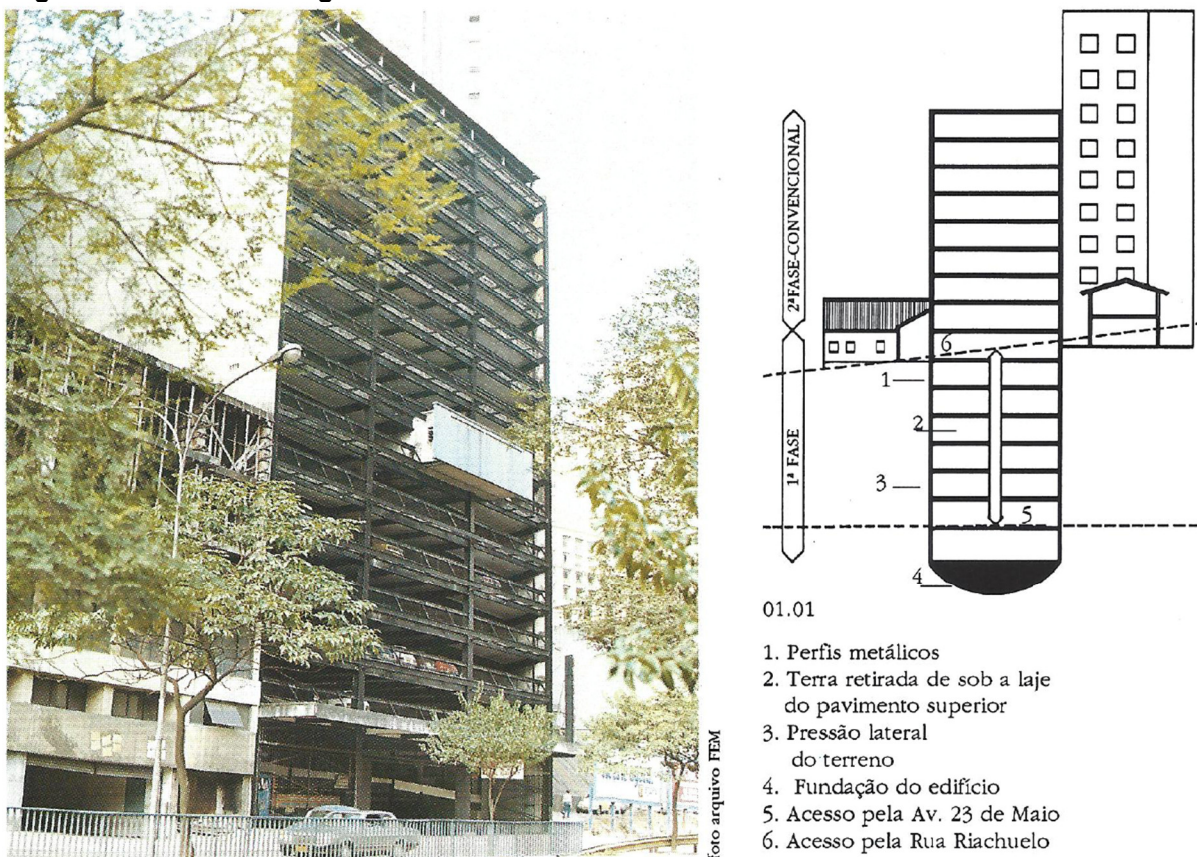
GAGGIA
máquina de café expresso sem vapor - Ind. Bros.
INFORMAÇÕES E VENDAS:
Preço do Republicão, 128 - R. Vander - sala 801
Fone: 35-5533 - End. Teleg. "Maquinogaggia"

DEPARTAMENTO DE PUBLICIDADE DO
"O ESTADO DE S. PAULO"
Tel.: 32-2002 + 36-6273

Fonte: acervo do jornal Estadão

Ainda em funcionamento, o edifício Garagem América representa um grande marco do emprego de estruturas metálicas na construção civil, sendo a primeira experiência brasileira em construções de edifícios estruturados em aço.

Figura 11 - Edifício Garagem América



Fonte: Dias (1999)

Apesar dos avanços, no cenário brasileiro, ainda existem vários fatores que limitam a utilização do aço em construções. A maioria deles está ligada à ausência de instrução da mão de obra e à falta de conhecimento sobre a utilização do aço como material construtivo e sobre suas propriedades.

5.2 Principais Propriedades e Vantagens e Desvantagens do Aço

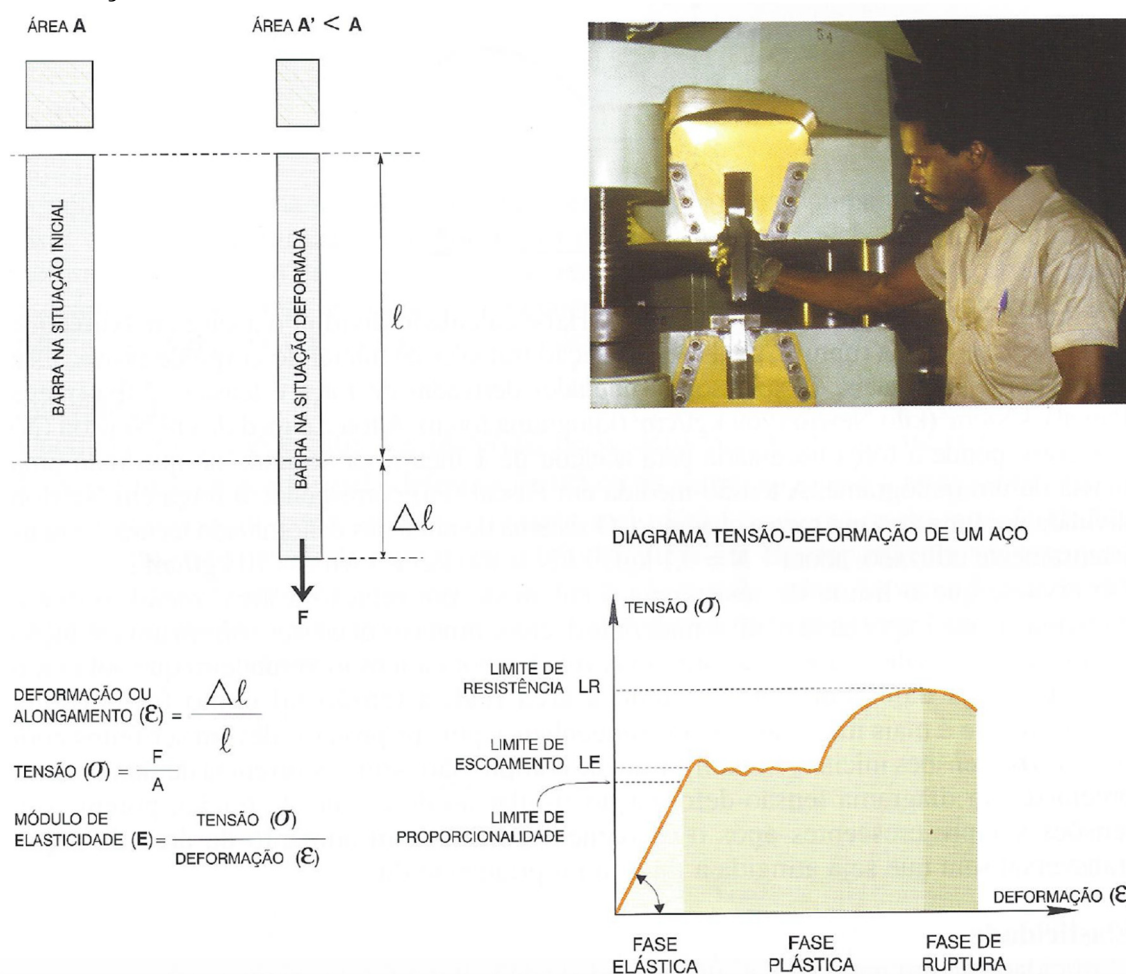
A composição do aço é fator determinante sobre sua finalidade. Quanto a isso, o material é um composto formado predominantemente por ferro (98% de sua constituição) e apresenta pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês, etc. Porém, o carbono é o componente que exerce maior influência nas

propriedades do aço (BELLEI, 2010). Entre elas, as que merecem destaque são: alta resistência mecânica e ductilidade.

As propriedades mecânicas são responsáveis pelas características mais marcantes do material. A partir de seu conhecimento, são fundamentados o projeto e a execução das estruturas porque são responsáveis por determinar o comportamento dos materiais, quando submetidos a forças mecânicas (DIAS, 2006).

Na figura 12, o gráfico de tensão-deformação de uma barra metálica, que foi sujeita a esforços de tração crescentes e sofreu deformação progressiva de sua extensão, é apresentado. É possível observar que o comportamento inicial do material obedece à Lei de Hooke, ou seja, a deformação inicial foi proporcional à tensão aplicada, caracterizando a parte retilínea do gráfico (fase elástica).

Figura 12 - Ensaio de tração de uma barra metálica com seu respectivo gráfico de tensão-deformação



Fonte: Dias (2006)

Quando o limite de proporcionalidade é ultrapassado, inicia-se a fase plástica. A princípio as deformações são crescentes e não há variação de tensão. Esse

processo ocorre no patamar de escoamento, sendo o valor constante da tensão denominado de limite de escoamento. Para o aço, este é bem definido e considerado a constante física mais importante no cálculo de estruturas metálicas (DIAS; 2006).

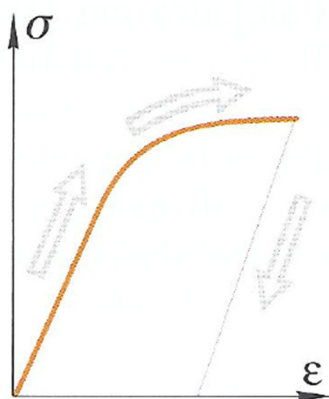
Após o escoamento, o material continua na fase plástica, porém com o rearranjo de sua estrutura interna. Passando pelo encruamento, há novamente a variação da tensão em conformidade com a variação da deformação, porém sem linearidade. Isso acontece até que seja atingido o limite de resistência do aço, que é basicamente o valor máximo de tensão suportado. É importante observar que materiais dúcteis, como o aço, sofrem o fenômeno de redução da área quando sujeitos à carga máxima.

Porém, o aço é capaz de retornar ao seu formato original, após ciclos sucessivos de carregamentos e descarregamentos. Esse desempenho se deve à natureza cristalina dos metais, uma vez que são constituídos, em sua estrutura, por planos de fluidez e de menor resistência mecânica no interior do reticulado.

Contudo, isso ocorre apenas se o material não tiver atingido o limite de elasticidade. Ao contrário, o aço apresentará deformação plástica. Nesse sentido, começa a existir alterações na estrutura interna do metal, o que aumenta sua dureza, causando elevação no valor do limite de escoamento e de resistência, porém reduzindo sua ductilidade.

Na figura 13, apresenta-se o gráfico tensão-deformação de um material metálico que ultrapassou seu limite de elasticidade. Observa-se que, após o descarregamento, ocorre um “rearranjo” da estrutura interna do material e este apresenta uma deformação que não pode ser recuperada, denominada de deformação residual.

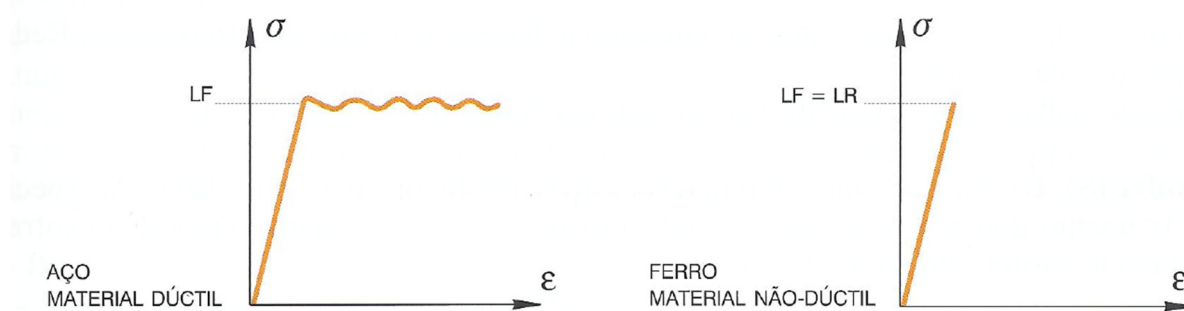
Figura 13 - Gráfico tensão-deformação



Fonte: Dias (2006)

A ductilidade está relacionada com a capacidade que o material possui em se deformar plasticamente sem que haja rompimento. Quanto mais dúctil a estrutura, maior será seu alongamento ou a redução de sua área transversal, antes da ruptura. Esta propriedade é extremamente importante porque possibilita a redistribuição das tensões locais elevadas. Além disso, permite que haja um aviso, quando as estruturas estão submetidas a estas tensões. Também propicia maior tenacidade ao material. Sendo assim, o aço consegue absorver mais energia, quando submetido a cargas de impacto, diferentemente do concreto, por exemplo, que é um material não dúctil, ou frágil (DIAS, 2006).

Figura 14 – Gráficos tensão-deformação de um material dúctil e um material frágil



Fonte: Dias (2006)

Por fim, quanto às propriedades mecânicas, o aço comporta-se como sendo um material resistente, dúctil e tenaz. Com isso, é capaz de resistir e transmitir os esforços nos quais está submetido e não romper ou deformar-se excessivamente (TEOBALDO, 2004).

As estruturas de aço são mais flexíveis que as de concreto porque são constituídas de peças com menores dimensões e peso. Dependendo do tipo de ligação e do sistema de estabilização vertical, tornam-se ainda mais flexíveis. Deste modo, em vigas de aço, por exemplo, pode ocorrer o fenômeno de flambagem lateral. Advindo geralmente de problemas de mau dimensionamento, este ocorre quando a viga não suporta o momento fletor, que é maior do que o admissível considerado, incidindo em deslocamentos laterais combinados com torção (CASTRO, 1999). Entretanto, por serem mais esbeltas e leves, contribuem também para o melhor aproveitamento de espaços internos da edificação e diminuem custos de várias etapas da construção, a saber: estruturas metálicas são capazes de reduzir os custos de fundações em até 30% (TEOBALDO, 2004).

Outra vantagem é que o aço é um material homogêneo. Dessa forma, as deformações de estruturas metálicas em edificações serão possivelmente muito próximas das calculadas em projeto. Portanto existe maior precisão nestas, em critérios de dimensionamento, que nas de concreto, por exemplo. Contudo, em situações de sobrecarga, as estruturas metálicas serão mais significativamente afetadas (CASTRO, 1999).

A reversibilidade é outra característica importante das estruturas de aço. É definida como sendo a capacidade de remover algum elemento sem causar danos a outros adjacentes. Isso faz com que haja maior facilidade de desmontagem e reaproveitamento nas construções em aço (TEOBALDO, 2004).

A produção de estruturas metálicas é padronizada e executada em grande escala, colaborando para melhor aplicabilidade de peças, em situações de dimensões reduzidas ou difícil acesso, maior praticidade em transporte e montagem e velocidade de execução. Porém, por serem pré-fabricadas e apenas montadas em campo, ajustes em estruturas metálicas podem ser inexequíveis, em casos de modificações inesperadas. É por isso que, em construções em aço, a compatibilização de projetos é critério que merece total atenção. A comunicação entre projetistas é extremamente necessária e qualquer mudança deve ocorrer com antecedência (CASTRO, 1999).

Existem também algumas limitações relacionadas à trabalhabilidade do aço, por ser um material geométrico e não plástico. Isso não implica na impossibilidade de existirem estruturas de aço com determinadas curvaturas (CASTRO, 1999). De acordo com o anexo C da ABNT NBR 8800/2008, contra-flechas ou curvas estéticas podem ser criadas, desde que criteriosos sistemas de cálculo e métodos de execução sejam seguidos.

Outro cuidado necessário é o revestimento com material protetor, considerando fenômenos como corrosão e incêndio. Esses revestimentos podem ser aproveitados para contribuir para a estética da edificação. Em relação à corrosão, as proteções comumente utilizadas são pintura, galvanização e adição de aços com alta resistência à corrosão. Para a proteção contra situações de altas temperaturas, existem vários materiais específicos que protegem o aço contra o fogo, tais como: argamassa projetada, tinta intumescente, alvenarias de blocos de concreto ou cerâmico e gesso acartonado resistente ao fogo (GARF). Estas proteções minimizam o fluxo de calor, determinando maior tempo de resistência a altas temperaturas (ANDRADE; SOUZA, 2015).

Por conseguinte, as principais vantagens das estruturas metálicas são: alta resistência do material, proporcionando o dimensionamento de pequenas seções de área transversal para grandes esforços e, conseqüentemente, menores custos de produção; material pré-fabricado em oficinas e montagem mecanizada, contribuindo para menores prazos de construção e maiores chances de lucros; possibilidades de desmontagem e substituição de peças de forma simples, sem comprometer a estrutura em geral, o que propicia facilidade para aplicação de reforço e reparo, quando necessários.

Quanto às desvantagens, a necessidade de proteção contra corrosão e altas temperaturas, o que acarreta em maiores custos à construção, se destaca. Outras desvantagens, como, por exemplo, a possibilidade do fenômeno de flambagem lateral, são consideradas reversíveis, se houver o devido conhecimento e a correta aplicação do material.

5.3 Patologias Recorrentes em Estruturas Metálicas

Problemas patológicos surgem a qualquer momento em uma edificação, tendo sua origem encontrada em fases de projeto, construção e utilização. Para evitá-los, surgiu-se a necessidade de uma ciência que os estudasse, examinasse e predispuesses soluções viáveis, para, então, corrigi-los. À ciência, deu-se o nome de “Patologia de Edificações”.

A patologia, como área de estudo, dentro do campo da construção civil não é antiga. Mostrando-se muito recente, ganhou destaque, principalmente, nos últimos anos, pela importância que apresenta.

Helene (1988 apud Castro, 1999, pg.13) discorre que a primeira catalogação de acidentes, causas e correções, objetivando a criação de um sistema de informações para futuras prevenções, foi realizada em 1856, pelo presidente do Instituto dos Engenheiros Civis da Grã-Bretanha Robert Stephenson. Isso impulsionou pesquisas e trabalhos a cerca das causas e conseqüências das patologias recorrentes em edificações em geral.

Conforme Lichenstein (1985), no Brasil, o impulso inicial para estudos de patologias ocorreu em 1971, quando dois grandes acidentes ocorreram: o desabamento do Pavilhão da Gameleira, em Belo Horizonte, e do viaduto Paulo de Frontin, que segundo Silveira (2016) deixaram, respectivamente, 65 e 29 mortos, além

de pessoas feridas. No ano seguinte, com a fundação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), foi promovida a ideia de um estudo sistematizado sobre problemas patológicos corriqueiros em edifícios de concreto. Em 1979, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo implantou o primeiro curso de especialização relacionada a patologia em construções. A partir de então, vários estudos vêm sendo publicados a cerca do tema, porém, a grande maioria relacionada a estruturas de concreto.

Figura 15 - Desabamento do Viaduto Paulo de Frontin em 1971



Fonte: acervo do jornal O Globo

A preocupação com o desempenho de edifícios construídos é antiga e Lichenstein (1986) relata que esta surgiu com o próprio ato de construir. Entretanto, não existia um caráter sistemático. Isso restringia o estudo apenas a problemas mais comuns, geralmente, àqueles que resultavam em alguma instabilidade ou falta de segurança estrutural. Atualmente, discute-se muito não só sobre aspectos de segurança, mas também a respeito do atendimento às expectativas dos clientes. Portanto, não só problemas estruturais são tratados, sendo também considerados problemas em outros elementos da edificação.

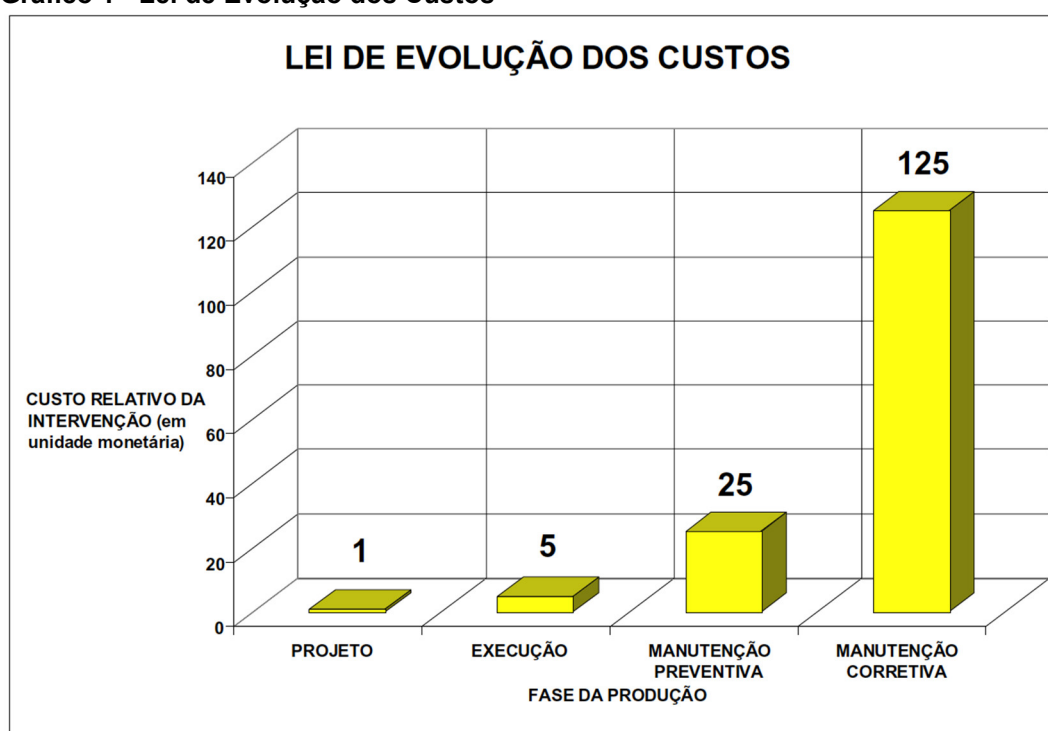
De acordo com Panossian (1993), as principais manifestações patológicas estão relacionadas a erros de elaboração de projetos, cálculos e execução. Em geral, ocorrem determinação inadequada de perfilados ou de espessuras de chapas e utilização de aço com resistências não equivalentes àquelas do projeto.

Castro (1999) explana que a maioria dos problemas de patologia estão relacionados à falta de conhecimento. Se o indivíduo possui entendimento de como fazer, dificilmente se desviará do cumprimento de seus objetivos. Por outro lado, existem casos em que há ausência de cuidado, principalmente, em obras, nas quais é inexistente uma gestão de qualidade eficaz. Já aquelas situações em que há cobiça, por parte do construtor, são consideradas, em termos morais, o pior modo de surgimento de problemas, pois causam desgastes e preocupações ao consumidor, que poderiam ser evitados, se não existisse maior interesse em lucros do que na realização do processo construtivo correto.

Mckaig (1962) também aborda a origem de patologias como sendo ocasionada pela ignorância, descuido ou cobiça do homem. Reitera que não é comum qualquer tipo de falha que não esteja inclusa como consequência de algum destes itens.

É mais econômico arcar com os custos necessários para que não haja detrimento da qualidade da obra, incluindo gastos referentes a manutenções periódicas, do que economizar na construção e ser responsável por futuros gastos para recuperação da estrutura. Além disso, quanto mais tardia for a tomada de decisões para readequar a estrutura em condições de qualidade e durabilidade, maiores são os prejuízos gerados, como pode ser observado no gráfico 1.

Gráfico 1 - Lei de Evolução dos Custos



Fonte: Helene (1993)

Segundo Helene (1993), as causas responsáveis por patologias em edificações podem estar relacionadas a fenômenos que contribuem para originar anomalias em estruturas. Entre eles, estão: agentes atmosféricos e biológicos, variações de temperatura e de umidade, incompatibilidades de materiais e cargas excessivas. Esclarece que os problemas patológicos também podem ocorrer devido à ação de agentes agressivos responsáveis por causar falhas ou deficiências na obra.

Cada tipo de material possui resistência característica contra cada tipo de agente ao qual está submetido. Sendo assim, o que prejudica alguns materiais, pode não influenciar outros. Souza e Ripper (1998) expõem que os materiais que constituem o sistema estrutural reagem de forma própria aos agentes internos e externos aos quais estão sujeitos. Inclusive, a velocidade de deterioração de cada material é diferente.

Nesse sentido, Salmon e Johnson (1990) relatam que é incerto generalizar a reação dos diferentes tipos de edificação, quando em contato com agentes agressivos. Por conseguinte, faz-se necessária, a determinação das origens dos problemas, formas de como evitá-los e, caso já tenham ocorrido, modos de repará-los, para cada tipo de material.

Embora estejam sujeitos a condições estáticas semelhantes, Castro (1999) aborda que existem diferenças consideráveis em relação às patologias ocasionadas em estruturas de aço e de concreto. Isso se deve ao fato de que as características e propriedades dos materiais, por serem tão distintas, determinam diferentes respostas a fenômenos externos ou dimensionamentos incorretos. Portanto, para a compreensão adequada sobre como reabilitar e reforçar estruturas de aço, é necessário à priori o estudo das principais patologias do material.

As principais causas das patologias encontradas em estruturas de aço são: ação de agentes externos, falta de conhecimento técnico, ausência de instrução de responsáveis pela execução ou montagem e erros na elaboração de projetos. Nesse sentido, Andrade (1998 apud COZZA, 1998) divide as manifestações patológicas de estruturas metálicas em três categorias: adquiridas, atávicas e transmitidas.

As patologias adquiridas são consequências da ação de elementos externos, tais como: líquidos corrosivos, poluição atmosférica, temperaturas elevadas e vibrações. São ocasionadas em estruturas que não conseguem adaptar-se à ação de

agentes patológicos. A manifestação patológica mais frequente deste gênero é a corrosão.

Quando o problema está relacionado à má concepção de projetos ou erros de cálculos e dimensionamentos, as patologias são consideradas atávicas. Na maioria das vezes, o erro está relacionado com descuidos, cobiça ou tentativa de lucros. Sendo seu reparo considerado complicado, há maiores despesas para executá-lo.

Já os problemas patológicos originados devido ao desconhecimento técnico dos responsáveis pelas etapas de fabricação ou montagem são denominados de patologias transmitidas. São exemplos: falta de prumo e soldagens em superfícies enferrujadas ou pintadas.

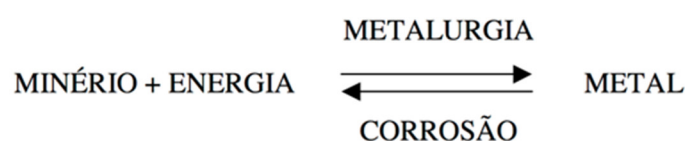
Dentre os principais problemas patológicos que estruturas metálicas sofrem, destacam-se: corrosão, problemas patológicos em ligações e perda de estabilidade estrutural. Entender suas causas e consequências é também uma forma de os evitar, prevenir e remediar.

5.3.1 Corrosão

Considerada a patologia mais frequente, tanto em metais ferrosos, como em metais não ferrosos (zinco, manganês, alumínio, prata, ouro, platina, entre outros), a corrosão é um processo de formação natural e espontânea pelo qual materiais têm suas propriedades alteradas. Ocorrem perdas de resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e estética, uma vez que a corrosão atua no sentido de gerar um novo elemento, com características diferentes do original (PANOSSIAN, 1993).

Em resumo, a corrosão é o sentido contrário da metalurgia, ou seja, é responsável por fazer com que metais voltem à sua forma primitiva de composto (DIAS; 2000; JONES, 1992; GENTIL, 2012). Na figura 16, essa definição é esquematizada.

Figura 16 - Representação esquemática das etapas de obtenção de um metal e de corrosão



Fonte: Gentil (2012)

Além de metais ferrosos e não ferrosos, alguns autores consideram que o processo de deterioração que ocorre em materiais não metálicos, como a borracha, concreto, madeira e polímeros, também é corrosão. Assim, é um fenômeno amplo, responsável por gerar complicações em vários elementos. Contudo, em construções, ganha destaque quando se trata de materiais metálicos, tendo em vista que o processo corrosivo ocorre principalmente em ferragens, esquadrias de metal, armaduras e aço estrutural.

De acordo com Brinck (2004), quanto à durabilidade, a vida útil de uma estrutura corroída pode ser dividida em duas fases: fase inicial e fase de propagação. Na primeira, não ocorre perda de seção transversal dos perfis metálicos. Já na segunda sim.

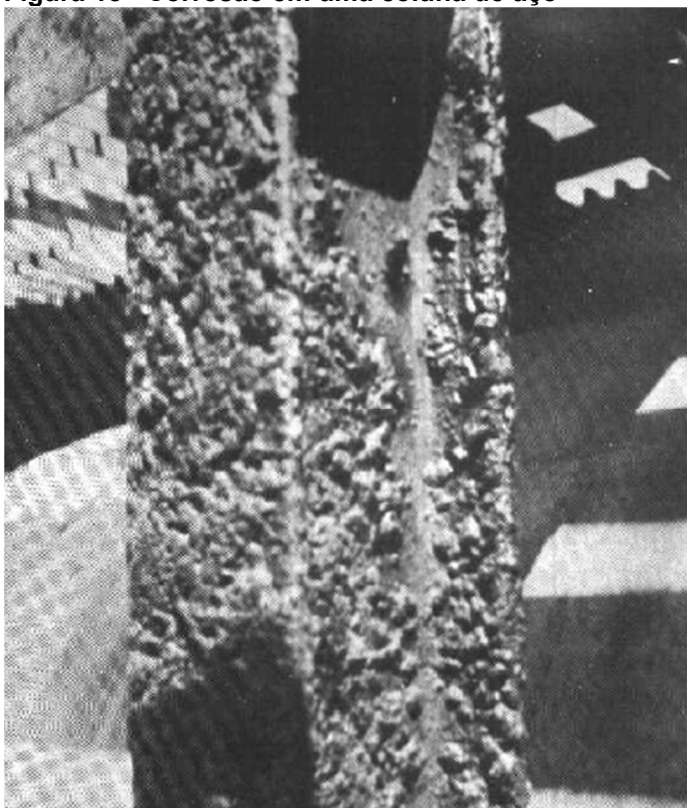
Gonçalves et al. (1989) afirmam que essa perda é o pior problema gerado pelo processo corrosivo porque reduz a capacidade da estrutura, possibilitando sua ruína por causar instabilidade. Isso ocorre porque aumenta-se a concentração de tensões, já que a área efetiva se torna menor.

Figura 17 - Corrosão metálica na ponte Marechal Hermes, em Minas Gerais



Fonte: Brinck (2004)

Figura 18 - Corrosão em uma coluna de aço



Fonte: Castro (1999)

O processo corrosivo pode ser classificado em dois grandes grupos, dependendo de qual é a ação que o meio corrosivo exerce sobre o material, a saber: corrosão química e corrosão eletroquímica (NUNES; LOBO, 1998).

A corrosão química surge através da presença de reações químicas em superfícies metálicas. Isso ocorre quando estas entram em contato com gases poluentes (como anidrido sulfuroso, gás sulfídrico e gás clorídrico), tendo como resultado a formação de sal ou óxido. Enquanto isso, a corrosão eletroquímica incide em pequenas regiões ou pontos das estruturas com potenciais eletroquímicos diferentes, ou seja, existem áreas que tendem a receber elétrons (cátodo), enquanto outras, a doá-los (ânodo). Quando na presença de umidade, há também a dissolução de sais ou gases nos metais, o que desencadeia o processo corrosivo. É importante ressaltar que o material responsável por doar elétrons sofre oxidação e, por conseguinte, corrosão (Furtado, 1981; Dias, 2006).

Além disso, Gentil (2012) e Jones (1992) abordam que o processo corrosivo pode ocorrer de diferentes formas, a saber: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, em frestas, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, gráfitica, dezincificação, empoamento pelo hidrogênio e em torno de cordão de solda.

Conhecê-las e entendê-las é essencial para preveni-las ou remediá-las. Na figura 19, algumas podem ser visualizadas e, no capítulo a seguir, serão esclarecidas as causas, áreas de ocorrência e possíveis formas de recuperações das corrosões uniforme, localizada e galvânica, que são patologias comuns em estruturas metálicas.

Figura 19 - Tipos de Corrosão



Uniforme



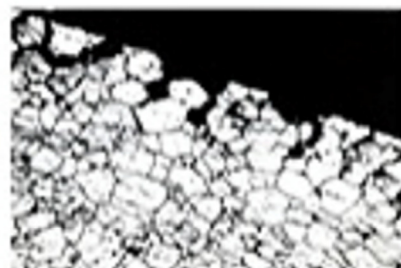
Em placas



Alveolar



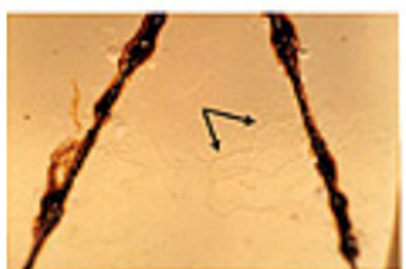
Puntiforme (pites)



Intergranular



Transgranular



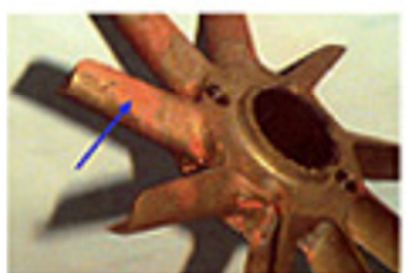
Filiforme



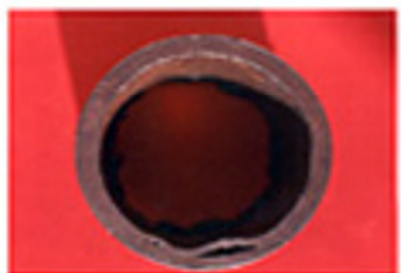
Por esfoliação



Grafitica



Dezincificação



Empolamento pelo hidrogênio



Em torno de solda

5.3.1.1 Corrosão Uniforme

Sendo a forma mais comum de corrosão, é caracterizada pela formação de uma camada indesejável de óxido de ferro pouco aderente, ao longo da superfície de estruturas metálicas, conhecida como ferrugem. Em seu processo, ocorre perda de material ao longo de todo perfil metálico e, conseqüentemente, diminuição da espessura do metal. Por ser visível, é fácil ser detectada e, assim, representa menor perigo que outros tipos de corrosão. Pode ser causada pela exposição direta do aço a um ambiente agressivo e geralmente ocorre quando o material está sem proteção, ou foi protegido inadequadamente. Também é comumente denominada de corrosão generalizada (CASTRO, 1999; GENTIL, 2012).

Figura 20 - Corrosão generalizada encontrada na ponte Marechal Hermes



Fonte: Brinck (2004)

A recuperação de perfis metálicos, dependendo do grau de corrosão em que estão submetidos, é viável. Se a corrosão for apenas superficial, basta limpeza, utilizando-se jato de areia, e uma nova pintura.

Porém, existem casos em que o nível de corrosão é tamanho que as únicas soluções adequadas são o reforço ou a substituição dos elementos corroídos. A primeira alternativa é recomendável quando apenas uma parte da estrutura está danificada. Assim, a soldagem de chapas pode ser a solução, por proporcionar

continuidade física, além de garantir as mesmas propriedades geométricas do perfil metálico. Enquanto isso, a segunda opção deve ser realizada quando for concluído que apenas reforços não são suficientes para manter a segurança estrutural. Considerando que estruturas de aço são facilmente substituíveis, esta última alternativa pode apresentar menores custos (CASTRO, 1999).

5.3.1.2 Corrosão Localizada

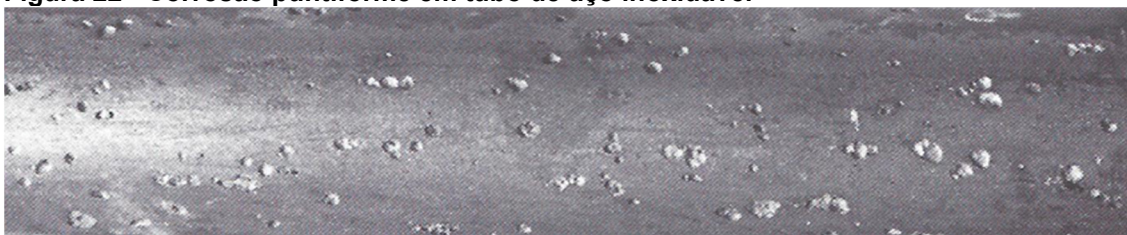
A corrosão localizada pode ser acometida de várias formas, entre elas, a corrosão puntiforme e a corrosão em frestas. O processo corrosivo puntiforme ocorre através da formação de pites, que são cavidades com fundo anguloso e profundidade maior que seu diâmetro. Já a corrosão em frestas é ocasionada em regiões pontuais que estão muito próximas entre si. Geralmente, entre duas superfícies em contato. Atingem principalmente ligações, áreas entre metais e não metais (concreto, madeira, plásticos, etc.) e com impurezas em geral (GENTIL, 2012; CASTRO, 1999).

Figura 21 - Corrosão em frestas encontrada na ponte Marechal Hermes



Fonte: Brinck (2004)

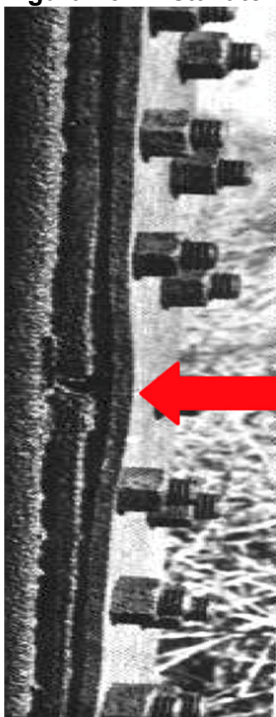
Figura 22 - Corrosão puntiforme em tubo de aço inoxidável



Fonte: Gentil (2012)

Castro (1999) afirma que esse tipo de corrosão é considerado mais perigoso que a corrosão uniforme, uma vez que não são tão perceptíveis, já que incidem em áreas pequenas. Normalmente, afetam a seção transversal da estrutura, enquanto todo o resto permanece intacto, como pode ser visualizado, na figura 23.

Figura 23 - Vista lateral de uma corrosão localizada



Fonte: Castro (1999)

Em condições ambientais, é normal a ocorrência de acúmulo de água nas regiões pontuais de perfis metálicos (principalmente, em ligações), sendo assim, a corrosão localizada é originada por meio de um processo eletroquímico, no qual o oxigênio dissolvido na água atua como elemento responsável por receber elétrons, ou seja, reagente catódico. Deste modo, o material metálico torna-se a área anódica, que será corroída.

Para que a patologia não ocorra, recomenda-se que haja inspeção periódica realizada por profissionais especializados, que serão responsáveis por manutenções

preventivas e corretivas. A maioria dos problemas relacionados à corrosão localizada são facilmente corrigidos, se o problema for detectado em tempo hábil. Muitas vezes, apenas a limpeza manual ou mecânica são soluções ao problema.

Entretanto, Castro (1999) explica que regiões de frestas são de difícil manutenção porque também é difícil definir o estado de deterioração que ocorre em seu interior. Grandes complicações surgem quando a disposição dos elementos estruturais não é adequada, impossibilitando ainda mais o acesso para manutenção. Por isso, na etapa de projeto, isto deve ser levado em consideração.

Quando a corrosão está em um estágio mais avançado, que compromete o desempenho da estrutura, causando insegurança, a limpeza superficial procedida da aplicação de selante adequado na entrada da fresta e de revestimento protetor não é mais opção. Com isso, deve-se realizar o reforço estrutural ou a substituição de elementos comprometidos.

5.3.1.3 Corrosão Galvânica

Sedricks (1996) explica que a corrosão galvânica pode ocorrer quando dois materiais de diferentes potenciais eletroquímicos estão em contato, resultando na transferência de elétrons entre estes. Assim, o material mais nobre torna-se o cátodo, recebendo elétrons do material mais propenso a se corroer (ânodo).

Castro (1999) aborda que, em estruturas que são galvanizadas, a superfície de aço é revestida por materiais que possuem maior tendência a se corroerem e que, portanto, são responsáveis por protegê-la. Geralmente, o material escolhido para galvanizar estruturas metálicas é o zinco. Por causa de suas características, este passa a ser o ânodo, quando em contato com o aço, ou seja, passa a doar carga negativa, se deteriorando. Dessa forma, torna-se material de “sacrifício”, em processos corrosivos.

Pode-se observar, portanto, que o fenômeno é considerado uma corrosão eletroquímica, sendo que o resultado final da corrosão é o aparecimento da ferrugem branca. Representando a reação do zinco, frente ao oxigênio, seu surgimento é comum em telhas de aço galvanizadas. De início, não representa danos significativos à estrutura, porém, se não corrigida, favorece à corrosão do aço protegido.

Para evita-la, é necessário prevenir elementos metálicos galvanizados contra a umidade, tanto os que já estão montados, quanto aqueles em armazenamento ou transporte. Para removê-la, em casos de telhas, por exemplo, deve-se adotar o procedimento de escovação com escovas de nylon ou a aplicação de detergente especial.

Figura 24 - Exemplo de corrosão galvanizada



Fonte: ETS Cable Componentes website

Segundo Weber (2012), um grande exemplo de ocorrência de corrosão galvânica é a que atingiu a Estátua da Liberdade. Como o monumento se localiza no meio de um ambiente marinho, cuidados relacionados à corrosão devem ser dobrados. Porém, na década de 80, através de manutenções periódicas, descobriu-se que a patologia havia atingido 150 regiões, nas quais havia contato direto entre a cobertura de cobre da estrutura e o suporte de ferro interno responsável por sustentá-la. Isso ocorreu porque, para evitar a corrosão galvânica, foi utilizado um revestimento inadequado entre o cobre e o ferro, que se deteriorou devido a ação da umidade e sal do local. A armadura em contato com o cobre perdeu cerca de dois terços de sua massa original e várias partes da estrutura necessitaram ser substituídas ou restauradas.

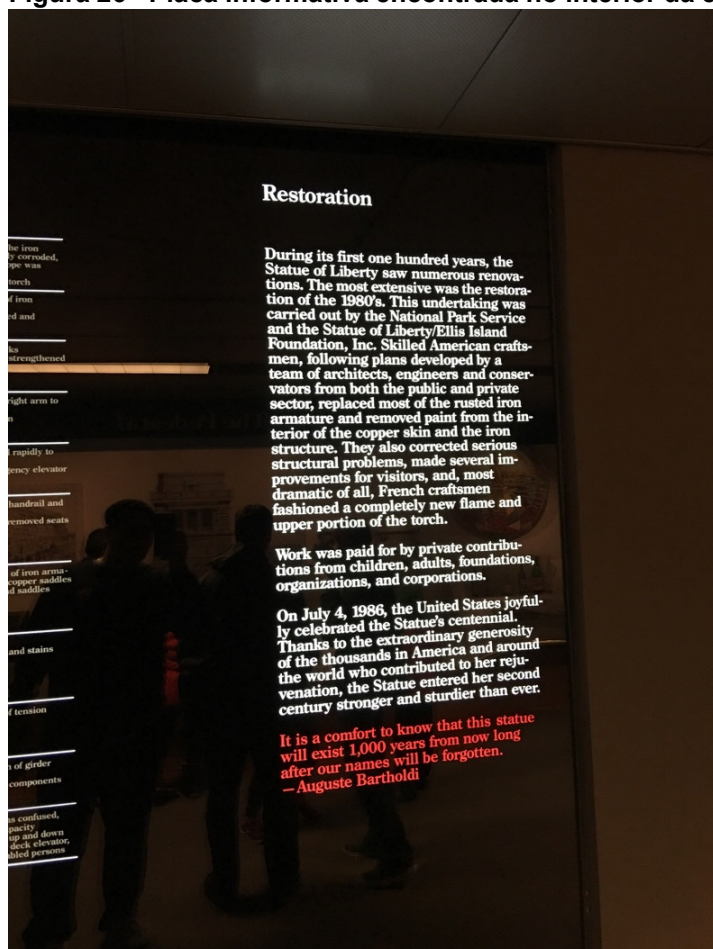
O prejuízo foi tamanho que até hoje é lembrado através de placas informativas, no interior do monumento, noticiando sobre a restauração do marco americano ocorrida no ano de 1980 e financiada por doações de organizações e dos próprios cidadãos americanos, como pode ser visto na figura 26.

Figura 25 - Estátua da Liberdade: marco americano construído em cobre e ferro



Fonte: autor (2016)

Figura 26 - Placa informativa encontrada no interior da estátua sobre as restaurações realizadas



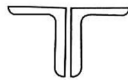
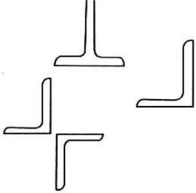
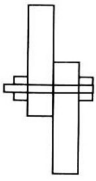

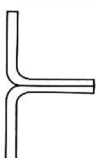
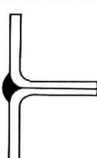
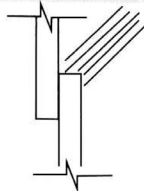
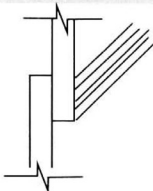


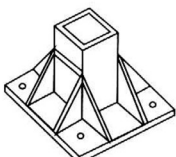
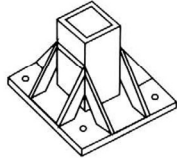
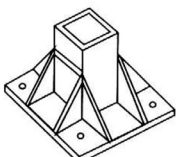
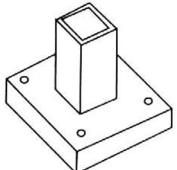
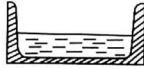

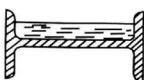

Fonte: autor (2016)

5.3.1.4 Possíveis soluções à corrosão

Dias (2006), Nunes e Lobo (1998) afirmam que alguns métodos são importantes para que a corrosão seja evitada, entre eles: maior resistência do material à corrosão, redução da ação corrosiva do meio, revestimentos, correta elaboração de projetos e utilização de inibidores de corrosão. Entretanto, nem todos são investimentos baratos.

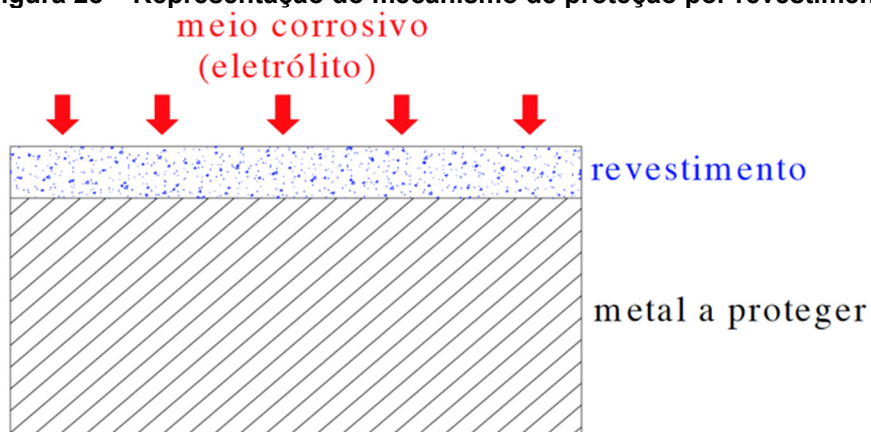
Sendo assim, o ideal é buscar a forma mais vantajosa para prevenir elementos metálicos contra a corrosão. Muitas das vezes, essas soluções apresentam-se em escolhas de projeto. A seguir, nas figuras 27 e 28, algumas soluções são demonstradas.

Figura 27 - Modificações de projeto visando a minimização de corrosão

PROBLEMA	SOLUÇÃO TÍPICA	PROBLEMA	SOLUÇÃO TÍPICA
UMIDADE E SUJEIRA PODEM SE ACUMULAR NA FENDA	UTILIZE PERFIL T OU OUTRA GEOMETRIA	UMIDADE PENETRA NA FENDA	UTILIZE CORDÃO DE SOLDA OU SELANTE
			
CORROSÃO POTENCIAL (FRESTA)	ELIMINE A FENDA POR SOLDAGEM OU SELANTE (EPOXI OU POLIURETANO)	CONDIÇÃO DESFAVORÁVEL	CONDIÇÃO FAVORÁVEL
			
CANTOS VIVOS E SOLDA DESCONTÍNUA	CANTOS ARREDONDADOS E SOLDA CONTÍNUA	REFORÇOS CRIAM ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA	ELIMINE O ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA
			
CUIDADO COM O ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA	CRIE SITUAÇÕES QUE EVITEM O ACÚMULO DE SUJEIRA E ÁGUA		
			
			

Fonte: Pannoni (2004)

Figura 28 – Representação do mecanismo de proteção por revestimento



Fonte: Brinck (2004)

5.3.2 Perda de Estabilidade Estrutural

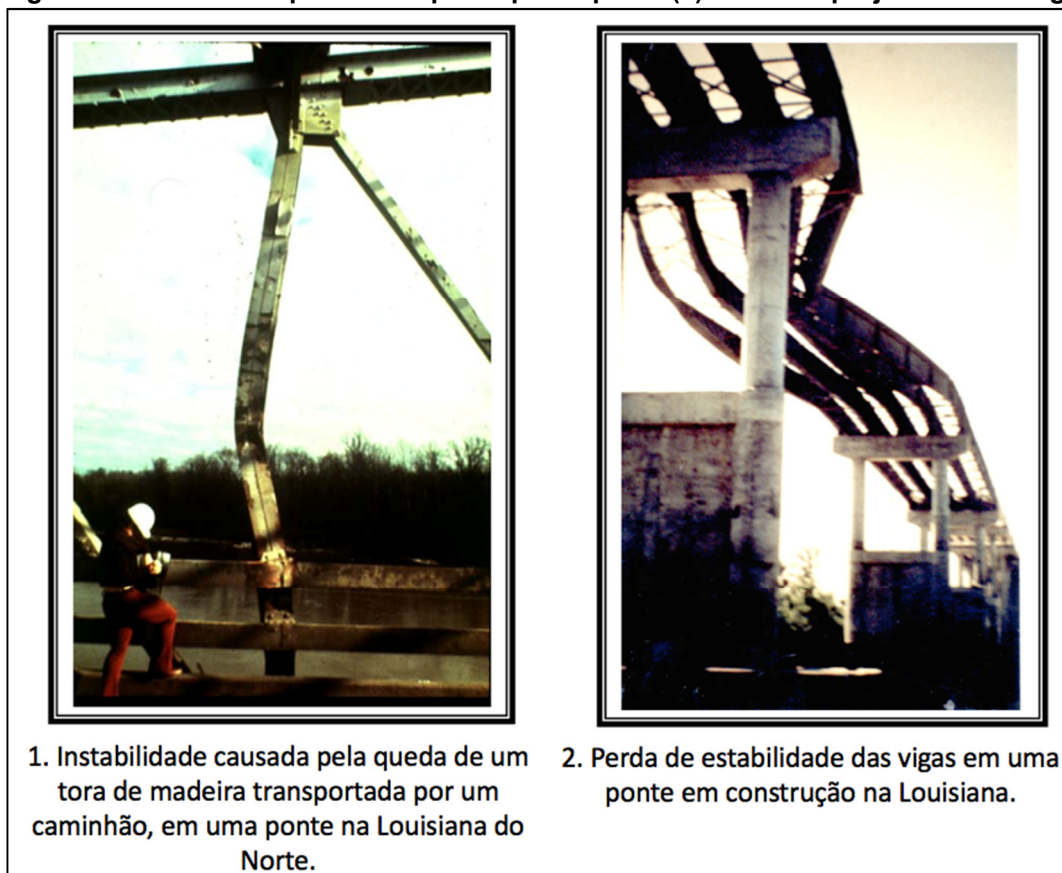
De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, estruturas metálicas entram em colapso quando estão sujeitas a falhas, como perda de equilíbrio, rupturas e instabilidades global e parcial. A falta de estabilidade estrutural pode ser vista em todas estas situações e sua principal causa é devido à ausência de resistência necessária para suportar esforços solicitantes. Nas figuras 29 e 30, alguns casos de instabilidade nos elementos estruturais são apresentados.

Figura 29 - Flambagem lateral em membro estrutural da Ponte do Rio Mississippi, em Minnesota



Fonte: adaptado de U.S. Department of Transportation

Figura 30 - Perda de equilíbrio de ponte por impacto (1) e erro de projeto ou montagem (2)



Fonte: adaptado de U.S. Department of Transportation

Quando problemas de instabilidade ocorrem, Castro (1999) aborda que estão geralmente associados a descuidos ou erros relacionados à concepção de projetos, processos e detalhes construtivos, à manutenção preventiva, ao uso inadequado ou falta de qualidade dos materiais, a alterações ambientais ao redor da construção e à utilização da estrutura inadequadamente, de modo a não respeitar sua apropriada finalidade prevista em projeto.

Uma vez cometidos, estes erros tornam o material suscetível às falhas citadas, posto que este não consegue resistir a esforços de flexão e cisalhamento, sendo, conseqüentemente, mais propício ao colapso. Na maioria dos casos, para que haja a recuperação da estrutura, é necessário o reforço ou a substituição do perfil acometido pela falha.

5.3.3 Patologia em Ligações

Conforme Ribeiro (1997) apud Castro (1999), ligações são elementos responsáveis por unir membros estruturais, a fim de que ocorra a transmissão de

esforços, que são originados da reação de determinados membros ao peso próprio, à sobrecarga ou as ações variáveis. As ligações são constituídas pelos meios de ligações e elementos de ligação. Os primeiros são importantes por unirem membros estruturais com a finalidade de configurar a ligação, sendo estes: parafusos, pregos, rebites e soldas. Enquanto isso, os elementos de ligação têm por finalidade promover a transmissão de esforços, sendo exemplos: enrijecedores, placas de base, cantoneiras, talas de mesa e de alma e, até mesmo, partes de peças conectadas e envolvidas localmente na ligação.

As ligações podem ser rígidas ou flexíveis e exercem um papel de essencial importância para as estruturas metálicas, posto que garantem continuidade física, que estas não possuem independentemente. Sendo assim, observa-se que a maioria das ligações entre elementos estruturais é rígida, para que se assegure a estabilidade estrutural. Portanto, pode-se dizer que o comportamento de estruturas de aço depende diretamente das características de suas ligações.

Na figura 31, demonstra-se exemplos de meios e elementos de ligação e, nas figuras 32 e 33, são apresentadas algumas das ligações responsáveis por garantir o desempenho da roda gigante do píer de Santa Mônica, na Califórnia. Através das ligações, a estrutura consegue propiciar segurança a um dos pontos turísticos mais frequentados dos Estados Unidos.

Figura 31 - Meios e Elementos de ligação em ponte sobre o Chicago River, EUA



Fonte: autor (2016)

Figura 32 - Estrutura da roda gigante do pier de Santa Mônica, na Califórnia



Fonte: autor (2016)

Figura 33 - Ligações responsáveis pelo comportamento e segurança estrutural da roda gigante

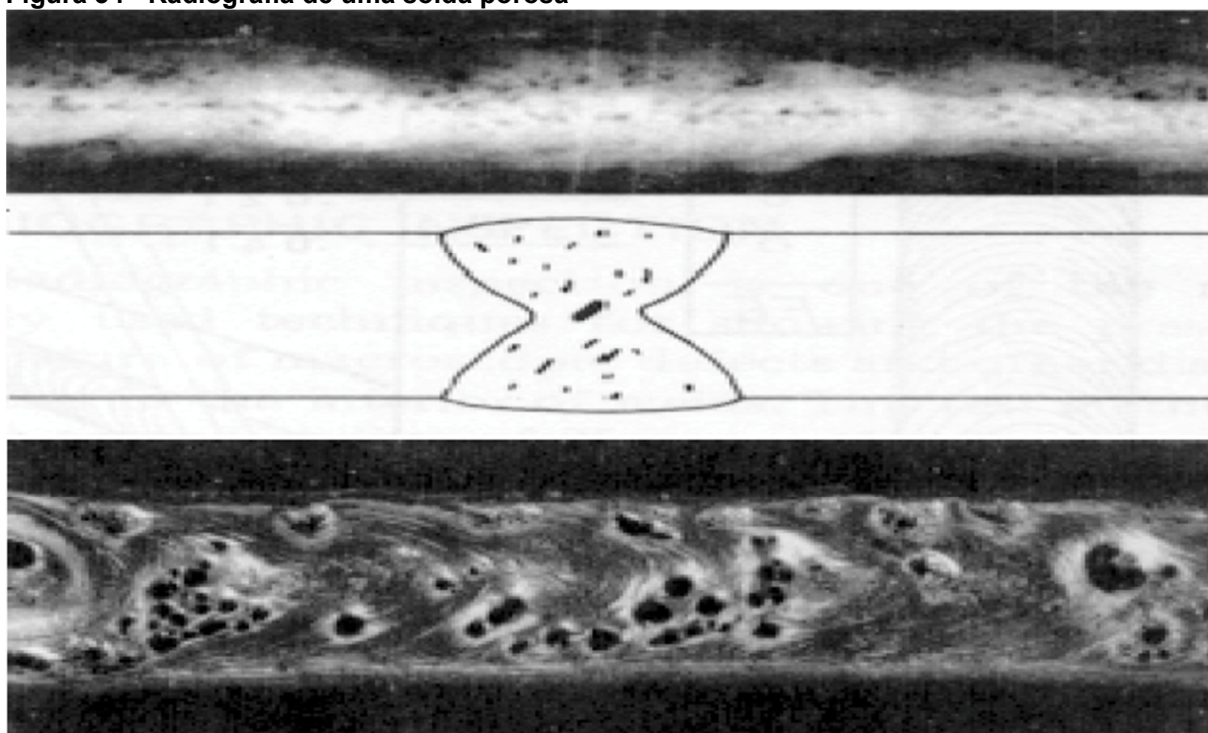


Fonte: autor (2016)

Castro (1999) ressalta que, dependendo da ligação, existem diferentes patologias associadas. As ligações comumente utilizadas são soldas e parafusos. Quando se utiliza soldagens, a transmissão de tensões acontece de forma direta, uma vez que toda estrutura funciona como se fosse uma única peça moldada no formato que adquire, após a solda. Já em ligações parafusadas, o mecanismo de transmissão de tensões é indireto. Nesse sentido, os problemas relacionados a estruturas soldadas se restringem ao meio de ligação, ou seja, ao cordão de solda durante sua execução, enquanto isso, aqueles associados a estruturas parafusadas estão ligados a problemas de resistência do fuste do parafuso e da chapa de ligação.

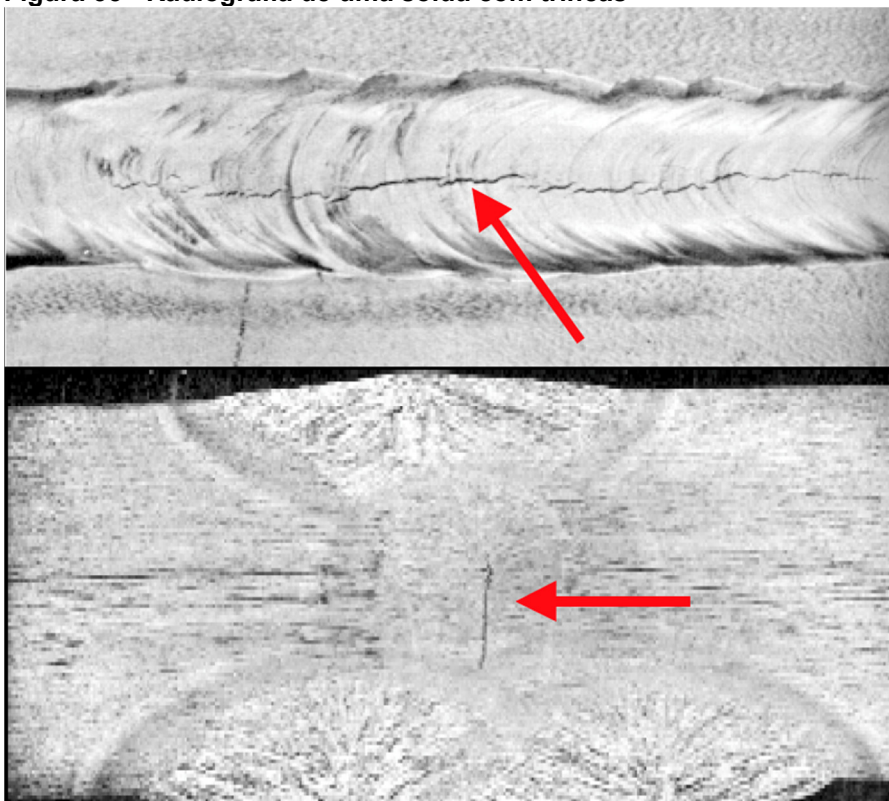
Entre as principais patologias que podem se manifestar em ligações soldadas, destacam-se: porosidade, trincas, empenamentos, superposição (excesso de solda sobre o metal-base e que não está incorporado a este) e excesso de respingos. Suas causas principais estão associadas ao tipo de equipamento utilizado para o processo de soldagem ou à própria execução da solda. Mais especificamente, são causadas por falta de usinagem entre as extremidades da ligação, mistura de ligações parafusadas e soldadas e incompatibilidade entre os perfis de aço a serem soldados. Nas figuras 34, 35, 36, 37 e 38, as patologias envolvendo soldas podem ser visualizadas.

Figura 34 - Radiografia de uma solda porosa



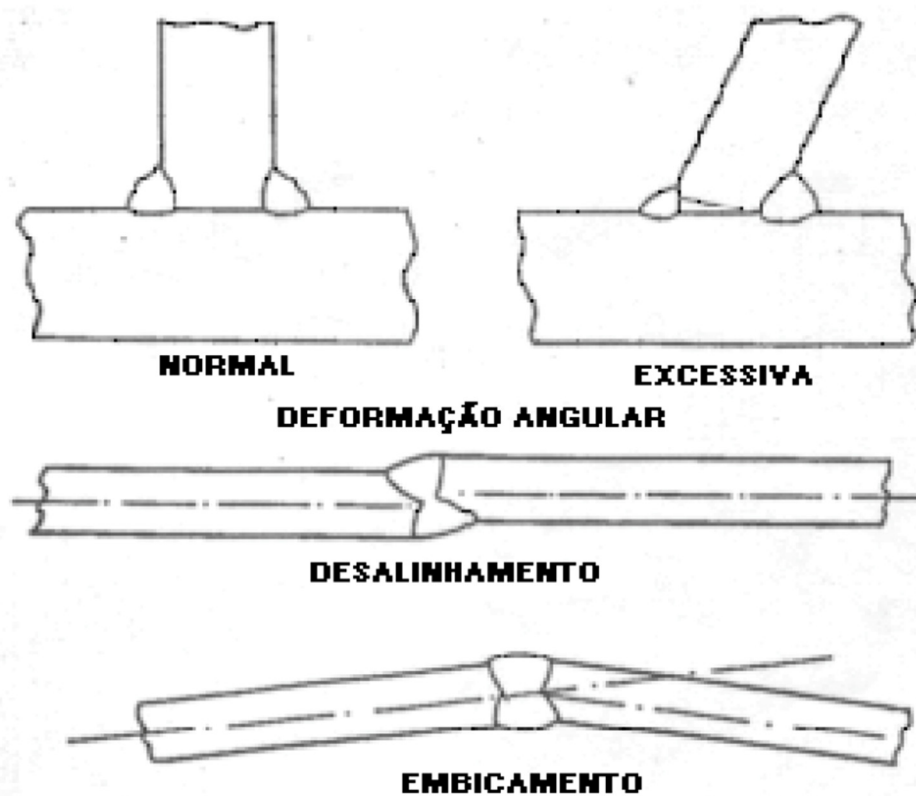
Fonte: Castro (1999)

Figura 35 - Radiografia de uma solda com trincas



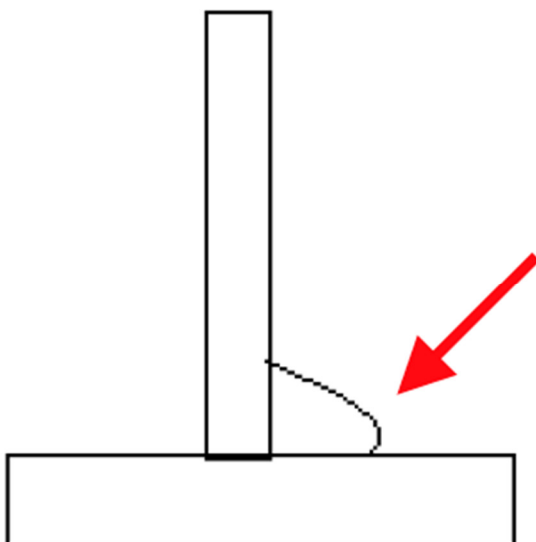
Fonte: Castro (1999)

Figura 36 - Tipos de empenamento devido à soldagem irregular



Fonte: Castro (1999)

Figura 37 - Situação da solda com superposição



Fonte: Castro (1999)

Figura 38 - Excesso de respingos de solda



Fonte: Castro (1999)

Para prevenir problemas de segurança relacionados à falta de qualidade da solda é fundamental que haja capacitação do soldador para o trabalho e outros controles preventivos, além do visual. Entretanto, muitas das vezes este cuidado é apenas realizado em obras de grande porte, em que ocorre fiscalização pelo contratante.

A seguir, nas figuras 39, 40 e 41, o controle da qualidade de soldas, através do teste de Líquido Penetrante (LP), realizado na construção da Usina Hidrelétrica de Baixo Iguaçu, em Capanema, Paraná é demonstrado. Este consiste na aplicação de um líquido penetrante (geralmente, vermelho) composto de solventes, tensoativos, pigmentos orgânicos, glicol e plastificante, que é absorvido pelas microfissuras das

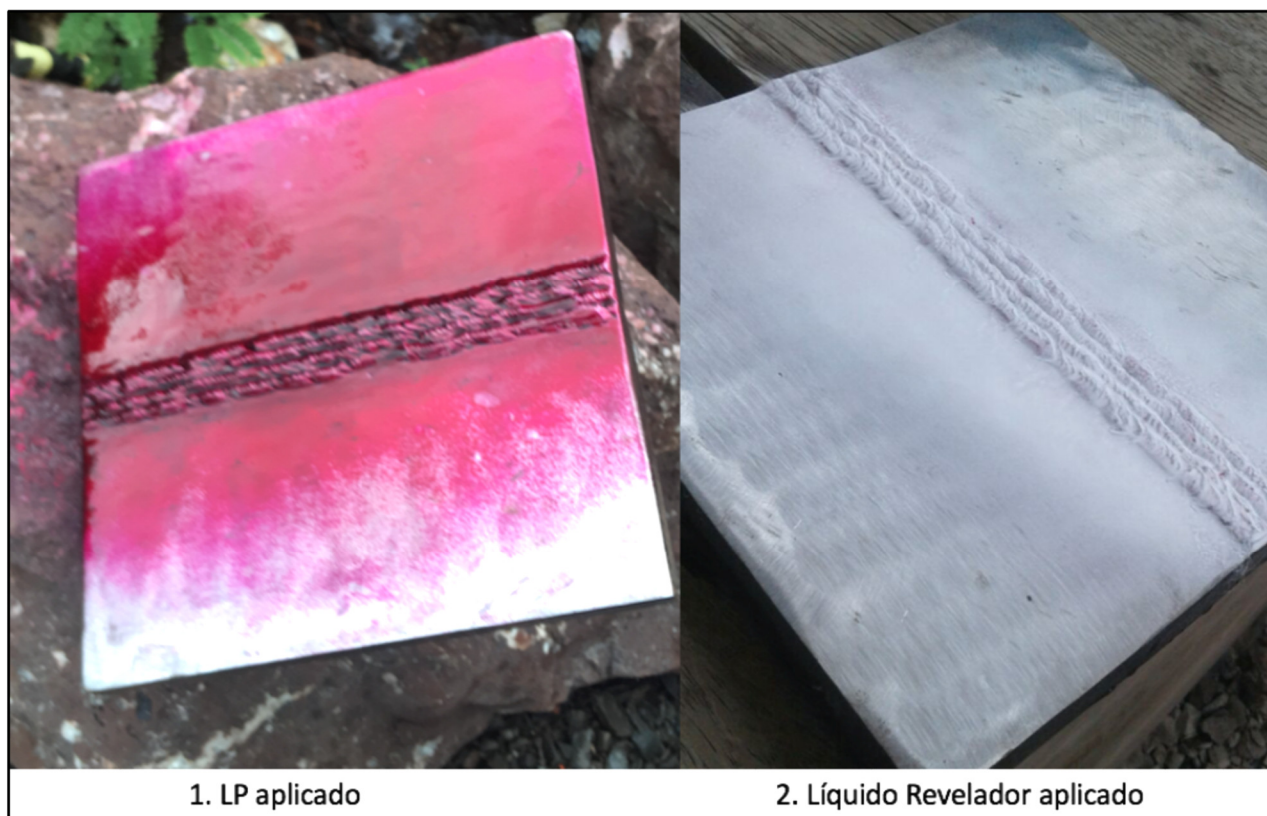
soldas. Logo após 15 minutos, a superfície da solda deve ser limpa para que seja aplicado o líquido revelador (geralmente, branco). Deste modo, se existirem trincas, estas se destacarão da superfície branca, já que absorveram o líquido vermelho.

Figura 39 - Líquidos necessário para o Teste de LP



Fonte: autor (2017)

Figura 40 - Aplicações dos líquidos para verificação de fissuras na soldagem



Fonte: autor (2017)

Figura 41 - Realização do Teste de LP em soldagem entre elementos constituintes de uma das comportas do vertedouro da UHE Baixo Iguaçu



Fonte: autor (2017)

As patologias de ligações parafusadas estão associadas a problemas envolvendo ruínas, corrosões e detalhamento de projeto.

Segundo Salmon e Johnson (1996), as ruínas de parafusos estão relacionadas à resistência ao cisalhamento do fuste do parafuso, à resistência inadequada da chapa de ligação e ao esmagamento do fuste e da chapa.

Conforme Castro (1999), a corrosão de parafusos ocorrerá sempre por frestas entre os parafusos e os elementos de ligação, ou seja, haverá um processo corrosivo localizado. Este é consequência do contato excessivo dos elementos com umidade. Para minimizá-lo ou evita-lo, pintura anticorrosiva, utilização de mastique nas bordas das frestas e revestimentos são utilizados.

Problemas envolvendo o detalhamento de projeto são os mais comuns de ocorrerem em ligações parafusadas, uma vez que é exigido alto grau de precisão para que haja o encaixe adequado entre os meios e elementos de ligação. Deve sempre ser respeitada a decisão em projeto do tipo de ligação, uma vez que, sendo utilizados outros, problemas patológicos, tais como deslocamentos, deformações excessivas e esmagamentos, podem aparecer. Consequentemente, para elaborações de projeto e execução, é fundamental atentar-se para a escolha do tipo de ligação.

Da figura 42 até a 46, exemplos de problemas em ligações parafusadas são apresentados.

Figura 42 - Problemas corrosivos em ligações por parafusos em uma ponte metálica



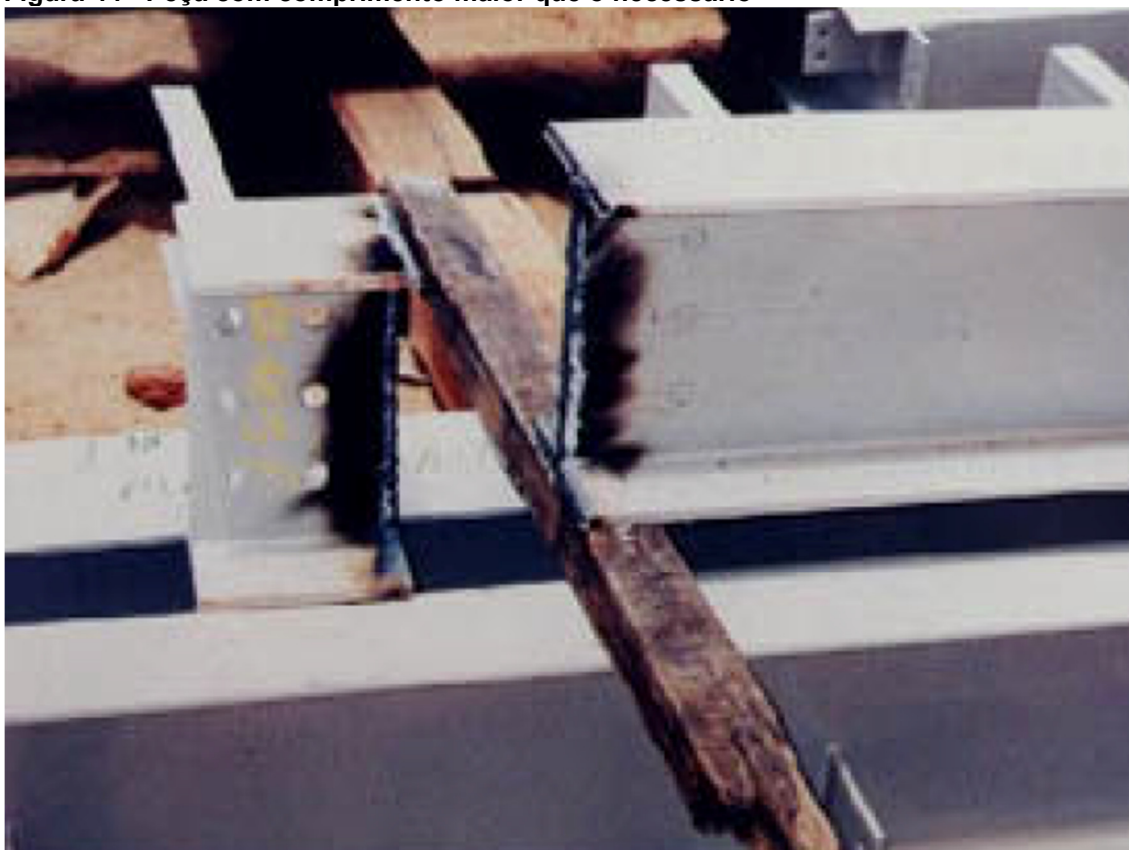
Fonte: adaptado de Brinck (2004)

Figura 43 - Peça com comprimento menor que o necessário



Fonte: Castro (1999)

Figura 44 - Peça com comprimento maior que o necessário



Fonte: Castro (1999)

Figura 45 - Amassamento de ligação para acesso ao furo



Fonte: Castro (1999)

Figura 46 - Instabilidade de ligação devido à falta de aperto dos parafusos



Fonte: Castro (1999)

Independente de qual seja o caso, se a ligação for atingida por patologias, de modo a comprometer a segurança estrutural, devem ser executados processos de reabilitação, restabelecendo sua capacidade de resistência.

6 REABILITAÇÃO E REFORÇO

Como se pode observar, patologias em edificações trazem insegurança aos usuários. Nesse sentido, devem existir manutenções ou reabilitações para que haja o atendimento às expectativas de segurança dos edifícios. Por meio de manutenções, são realizadas na edificação correções e prevenções, objetivando a preservação e o reestabelecimento da capacidade inicial da construção. Enquanto isso, através de reabilitações, ações de conservação, modificação, restauração, *retrofit*, reparo e reforma são executadas na edificação, para que haja o estabelecimento da obra às novas condições de utilização.

No que tange ao *retrofit*, de acordo com Ciocchi (2003), usa-se esse tipo de processo para atualização de sistemas prediais, sendo que, em geral, a grande funcionalidade do retrofit é a adequação que promove ao edifício. Não se limitando apenas a edifícios antigos, a técnica também é aplicada àqueles com cerca de 15 anos, tendo sempre como principais objetivos a valorização do imóvel, atendimento a requisitos de funcionalidade e desempenho, conforto acústico e térmico e à redução de custos energéticos do prédio.

Também existem métodos convencionais responsáveis pela reabilitação, reforma e reparo, deixando a estrutura viável à utilização. Além de proporcionar segurança, muitas medidas são responsáveis por tornar a estrutura nova, ou praticamente nova, com seu estado inicial de desempenho. Para estruturas de aço, não é diferente. Existem formas responsáveis por adequar e solucionar problemas existentes na estrutura, viabilizando o uso em segurança.

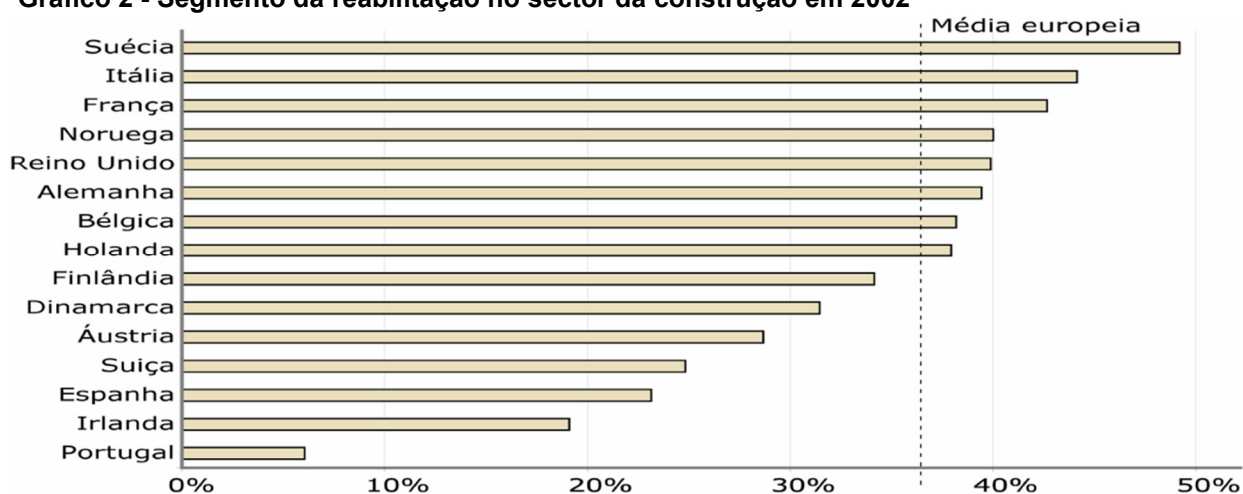
Com objetivos de otimização da infraestrutura pré-existente, conexão de diferentes localidades, dentro de grandes áreas urbanas, melhoria da qualidade do meio, no qual a construção está inserida, diminuição de gastos energéticos e ocupação de áreas degradadas, como alternativa à degradação de áreas verdes, a reabilitação de áreas urbanas e edifícios tornou-se importante e difundida, em níveis mundiais. Além disso, a técnica mostra-se economicamente vantajosa, o que incentiva ainda mais seu crescimento.

6.1 Viabilidade Econômica

De acordo com Syal e Shay (2001), em 1996, na cidade de New Jersey, nos Estados Unidos, foram gastos \$7 bilhões de dólares para reabilitação de edificações. Outras cidades americanas, como Newark e Trenton, que também estão situadas no estado de New Jersey, apresentaram dados significativos, quanto à reabilitação de construções. Em Newark, 75% dos gastos associados em licenças para construção foram para casas já existentes e, em Trenton, a relação entre os custos de reabilitação de casas e novas construções foram mais de 14 para 1.

Além dos Estados Unidos, outros países também apresentam dados significativos quanto à utilização da reabilitação de construções. Através do Gráfico 2, pode-se aferir que países como Suécia, Itália e França, desde o início do século 21, apresentam cerca de 40% do setor de produção da construção de edifícios concentrado em atividades de recuperação e reabilitação.

Gráfico 2 - Segmento da reabilitação no sector da construção em 2002



Fonte: Euroconstruct (2003)

Técnicas de retrofit e reabilitação também já fazem parte do cenário brasileiro, principalmente, no que tange a estruturas de concreto armado. Alguns edifícios como o Panorama Paulista Corporate, em São Paulo, Chiquito Lopes e Excelsior, em Belo Horizonte, passaram pelo processo de retrofit e, hoje, são mais modernos e adequados à utilização. Como se vê, a tendência de reabilitações em construções e edifícios já é algo marcante e tende apenas a aumentar. Esse crescimento é justificado principalmente pelas vantagens econômicas proporcionadas pelas técnicas.

Como estudo de caso que comprova a viabilidade financeira, temos um edifício de 1910, na cidade de Detroit, cuja área total de construção é de 10.587,79 m². Analisado por Anjaneyulu (2003), a avaliação dos custos de reabilitação do edifício, observando os requisitos estabelecidos pelos códigos Michigan Building Code (MBC) – código de obras para construções novas – e Michigan Existing Building Code (MEBC) – novo código de obras de reabilitação -, foi realizada. Conforme a análise, este edifício era comercial e passou a ser habitacional. Com isso, identificou-se que se a obra se baseasse nos requisitos do MBC, o custo seria maior em 22% que a mesma obra baseada nas normas do MEBC. Além do mais, se o edifício, por acaso, fosse demolido e novamente construído, de acordo com o mesmo projeto, o custo seria ainda maior, sendo 35% a mais que o edifício reabilitado considerando o MEBC. Na tabela 1, é demonstrado o comparativo de valores entre os custos de produção da demolição e nova construção, reabilitação com o uso do MBC e reabilitação com o uso do MEBC.

Tabela 1 - Comparativo de custos de produção entre demolição e construção nova, reabilitação com uso do MBC e reabilitação com uso do MEBC

Tipo de obra	Demolição e nova construção	Reabilitação com uso do MBC	Reabilitação com uso do MEBC
Custo Total (US\$)	10.183.320,00	9.220.528,00	7.544.638,00
Custo Unitário (US\$/m ²)	961,80	870,86	712,58
Variação de custo em relação ao uso do MEBC (%)	34,97	22,21	---

Fonte: Anjaneyulu (2003)

6.2 Cenário Brasileiro

Embora apresente crescimento considerável, no Brasil, a representatividade de métodos e técnicas de reabilitação e reforço de estruturas ainda é pequena, se comparada a países da Europa e aos Estados Unidos. Nos últimos anos, a reabilitação

de empreendimentos habitacionais foi impulsionada, principalmente, pelo Programa de Arrendamento Residencial (PAR), que tem como um dos objetivos disponibilizar recursos para que haja a recuperação de construções. Entretanto, ainda há muito a ser alcançado (JESUS, 2008).

A quantidade de empreendimentos reabilitados concluídos não é alta. Para que hajam melhores resultados, é importante existir avanços em relação às pesquisas e estudos referentes às técnicas de reforço e reparo de estruturas. No Brasil, por exemplo, a aplicação de reabilitação em estruturas de concreto armado é difundida, porém o mesmo não ocorre em estruturas de aço.

Em literatura brasileira, existem poucas técnicas normatizadas para a compreensão e utilização de reabilitação ou reforço de estruturas de aço. Até mesmo, o estudo de patologias e problemas em estruturas de aço é escasso, quanto mais formas de preveni-los e corrigi-los.

7 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE REABILITAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO

Zhao (2014) explica que os métodos convencionais para reparar ou reforçar estruturas metálicas consistem no corte, na substituição e na adição de placas de aço aos elementos estruturais, principalmente, em regiões críticas. Existem várias técnicas por meio das quais executam-se obras de reforço e reparo. Entretanto, no Brasil, apesar de serem aplicadas há anos, são pouco estudadas e há pouca referência normativa sobre o assunto. Este problema não é apenas nacional. Em muitos países, ainda não há códigos que estabelecem o correto uso dos métodos convencionais.

Conforme Tilly et al. (2008) e Zhao (2014), o método alternativo aos convencionais é a aplicação de polímeros reforçados com fibra à estrutura. Eles são constituídos por três principais componentes: fibras reforçadas, que podem ser de carbono, aramida ou vidro, compósitos de matriz polimérica e aditivos. Esta forma de reabilitação estrutural é capaz de aumentar a resistência a tensões axiais, à flexão, ao cisalhamento, além de contribuir para maior rigidez estrutural e melhor desempenho contra fadiga.

Contudo, de acordo com Haghani (2010), existem algumas limitações para a utilização deste método. Relacionado à aplicação de ligações com materiais adesivos, necessária para seu desempenho, as normatizações e códigos existentes são insuficientes, em termos mundiais, não contribuindo, assim, para melhores noções sobre como este sistema de ligação atua. O método também requer mão de obra qualificada, com conhecimento técnico adequado para sua execução, o que em muitos países é escasso. Além disso, não se tem conhecimento suficiente sobre o comportamento a longo prazo dos polímeros reforçados com fibra aplicados como material de reforço de estruturas metálicas.

Tendo em vista o que foi exposto, em muitas situações, a utilização dos métodos convencionais ainda é escolhida. Portanto, o estudo sobre as técnicas que os constituem é importante para que se otimize sua aplicação, seu desempenho e se desenvolvam novas técnicas relacionadas ao corte, substituição e adição de materiais metálicos para reforço estrutural.

Sendo assim, nos próximos capítulos, serão abordados os métodos convencionais encontrados e que representam o que há de mais utilizado para a

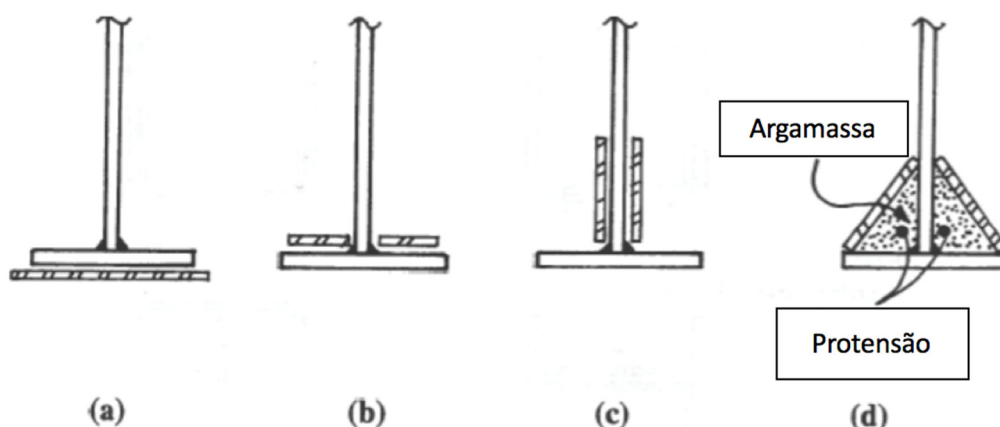
recuperação de componentes estruturais. É importante salientar que este relatório se atentou a reunir o que há de mais utilizado referente ao reforço de estruturas metálicas pelo método convencional. Sendo assim, muitas outras técnicas, geralmente, mais específicas para determinadas regiões não serão abordadas, sendo sugerido seu estudo em trabalhos posteriores.

7.1 Reforço

As obras de reforço, segundo Tide (1990), são responsáveis por aumentar a capacidade das estruturas em resistir aos esforços atuantes. Consistem na adição de materiais à estrutura, buscando, inúmeras vezes, modificar os caminhos de carga ou diminuir o comprimento de flambagem. Aplicada à estrutura quando esta não é dimensionada para suportar a quantidade total de carga a qual está submetida, a técnica de reforço é requerida devido a dimensionamentos incorretos, problemas construtivos, deteriorações, corrosões e fadigas em geral.

Na figura 47, exemplos de reforços da mesa inferior do perfil de uma viga são demonstrados. Em (a) e (b), há o reforço através da adição de chapas horizontais, em (c), por duas chapas verticais e, em (d), duas chapas de seção transversal triangulares são adicionadas.

Figura 47 - Reforço da mesa inferior de um perfil metálico



Fonte: adaptado de Radomski (2002)

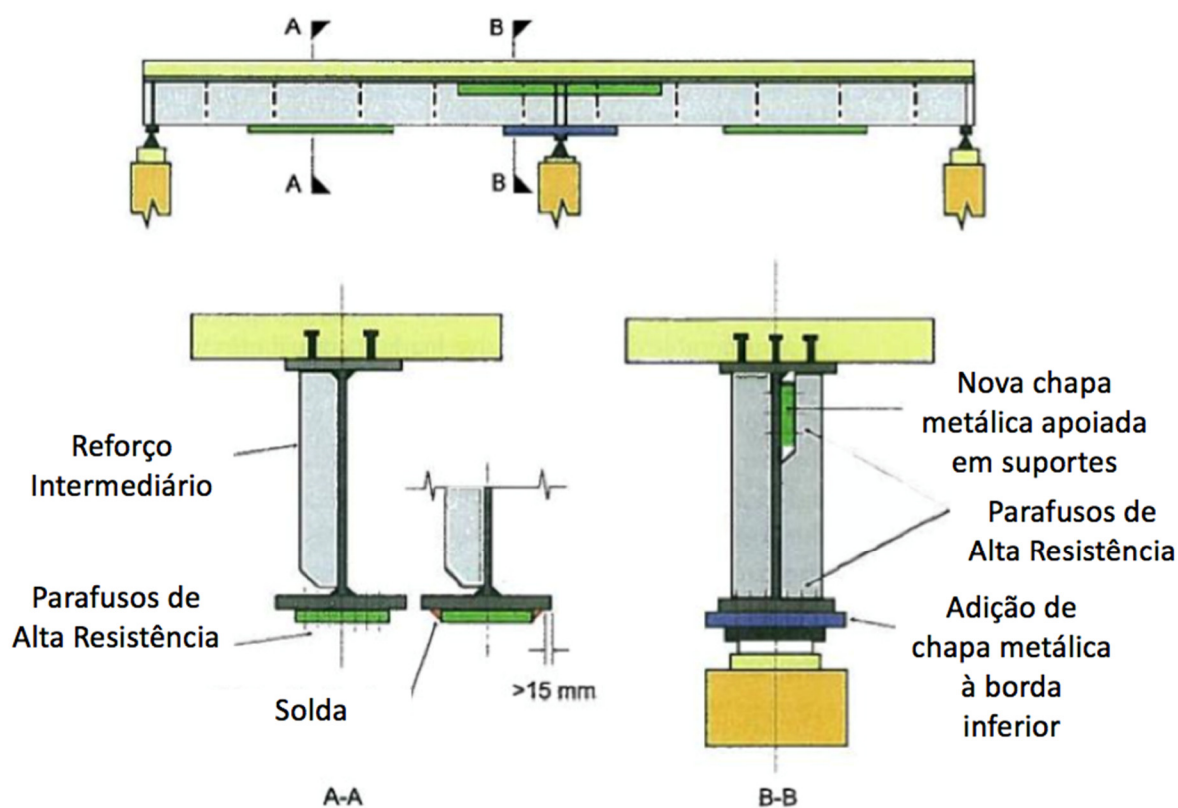
O objetivo da adição de materiais à estrutura é aumentar a resistência mecânica e/ou a resistência à fadiga dos elementos estruturais. Baseada na incorporação de chapas metálicas à estrutura, através de soldas, parafusos ou rebites,

a adição de chapas é comum e, geralmente, não tão complexa, podendo ser aplicada a vários elementos estruturais.

Entretanto, Tilly et al. (2008) e Radomski (2002) explicam que quando materiais são adicionados aos elementos estruturais, ocorre a redistribuição de suas cargas internas, o que deve ser cuidadosamente analisado, para que não ocorram outros problemas na estrutura.

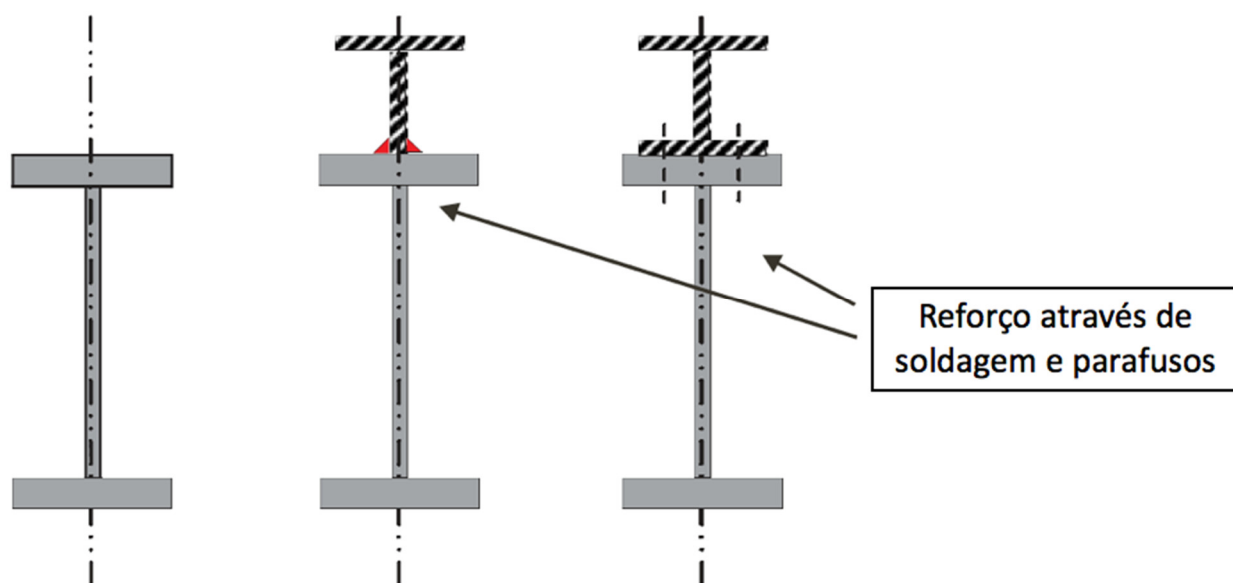
Segundo Tilly et al. (2008), chapas metálicas devem ser adicionadas para aumentar a resistência mecânica de elementos estruturais que são robustos e não possuem riscos de flambagem. Porém, deve-se analisar criteriosamente o elemento e avaliar a influência que a adição exerce sobre todas as outras partes da estrutura, uma vez que, em muitos casos, outras adições podem ser necessárias em demais elementos. Abaixo, as figuras mostram o reforço comum de uma viga (figura 48), o reforço da mesa superior do perfil de uma viga utilizando-se soldas e parafusos (figura 49) e o reforço de uma viga caixão de um píer (figura 50).

Figura 48 - Reforço de uma viga



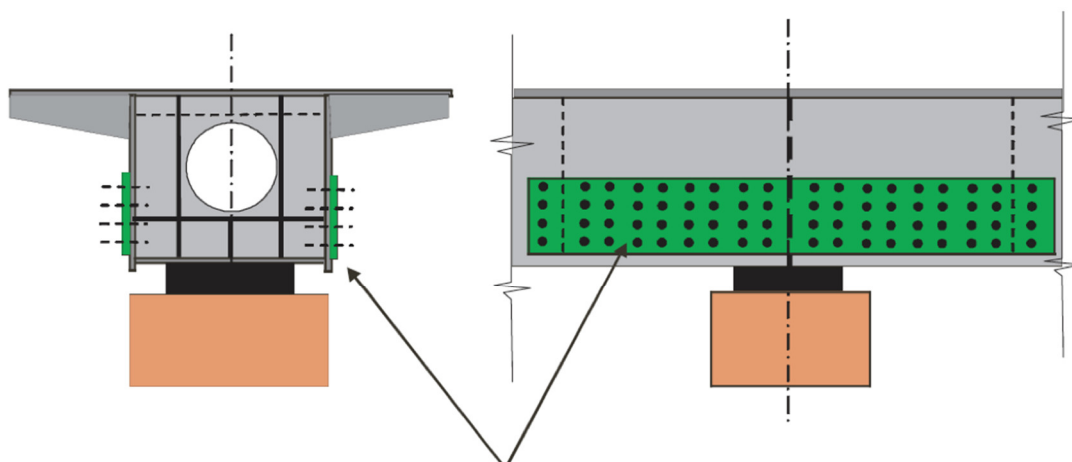
Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Figura 49 - Reforço da mesa superior de um perfil metálico



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Figura 50 - Reforço da viga caixão de um píer



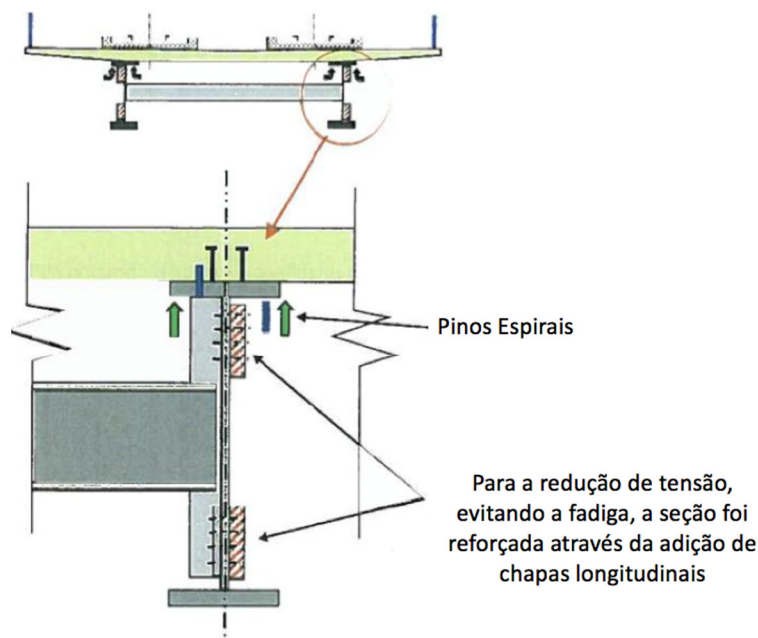
Parafusos de alta resistência, separados de forma que a transferência de carga seja adequada ao longo da chapa metálica de reforço.

Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

A fadiga é conhecida como fenômeno relacionado à ruptura de componentes estruturais submetidos a condições cíclicas de tensão e deformação, ou seja, aqueles que são carregados e descarregados repetidamente (como ocorre em pontes, por exemplo, nas quais a carga não é fixa). Segundo Tilly et al. (2008), a adição de chapas é capaz de aumentar a resistência contra o fenômeno, ao longo do tempo, uma vez que a tensão aplicada no elemento reduz, quando a área se torna maior. Dessa forma, partes mais sensíveis ou susceptíveis à ruptura tem maior vida útil, desempenhando

maior resistência contra a fadiga. Na figura 51, através de ligações parafusadas, materiais metálicos são adicionados à estrutura, aumentando sua resistência à fadiga.

Figura 51 - Ligações parafusadas utilizadas para adição de materiais metálicos para aumento de resistência à fadiga



Observação: Geralmente, conexões parafusadas estão relacionadas a melhores desempenhos contra à fadiga

Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

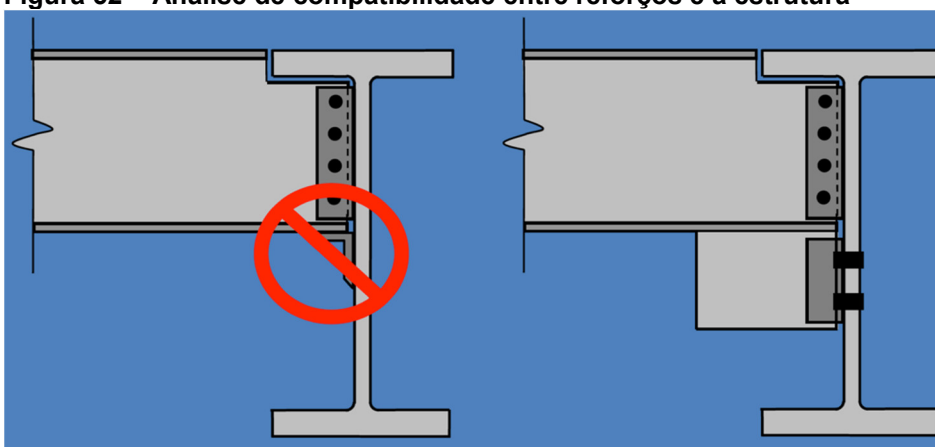
O reforço estrutural, na maioria das vezes, é utilizado como solução para problemas de concentração de cargas em regiões críticas e fenômenos de flambagem.

Conforme Demir (2011), para reforçar estruturas modificando o caminho de influência de carga, o principal objetivo a se alcançar é desviar os efeitos dos esforços de uma região crítica da estrutura para outras. Para isso, é necessário modificar a rigidez estrutural. Enrijecer uma estrutura está relacionado com aumentar sua área transversal ou diminuir seu comprimento longitudinal. Através da adição de chapas, escoramentos e materiais extras aos elementos estruturais, o aumento da rigidez torna-se possível.

Em componentes estruturais esbeltos submetidos à compressão, a flambagem é um problema comum, porém pode ser solucionada realizando o contraventamento da estrutura. Para isso, adiciona-se escoramentos ao membro estrutural, o que diminui o seu comprimento efetivo de flambagem e, portanto, aumenta sua resistência a este fenômeno.

A escolha do tipo de reforço a ser utilizado é critério importante para que haja compatibilidade entre este e a estrutura. Por exemplo, muitas das vezes, opta-se pela utilização de reforços, que exercem sua função apenas quando deformações consideráveis ocorrem. Sendo assim, se não houver grandes deformações, o reforço não acontecerá. Análises para a escolha do reforço adequado devem ser realizadas. Na figura 52, por exemplo, cantoneiras não são consideradas opções adequadas para a estrutura em questão, sendo as mísulas recomendadas, uma vez que garantirão maior suporte estrutural, mesmo quando em pequenas deformações.

Figura 52 – Análise de compatibilidade entre reforços e a estrutura



Fonte: adaptado de Muir (2011)

7.2 Reparo

Reparar estruturas significa restaura-las às condições que desempenhavam antes de terem seu desempenho comprometido por patologias. Tilly et al. (2008) discorre que obras de reparo, geralmente, são executadas por redução dos efeitos gerados pela carga aplicada e/ou substituições dos elementos estruturais.

Os efeitos dos esforços aos quais a estrutura está submetida podem ser reduzidos ou redistribuídos, de modo a não interferir seriamente no comportamento de regiões estruturais críticas, evitando, assim, casos de ruptura. Para reduzi-los, é necessário tornar os componentes estruturais mais rígidos. Portanto, o aumento da rigidez estrutural, além de desviar os efeitos gerados pela carga, como foi discutido anteriormente, também faz com que haja a redução destes. Quanto à distribuição de cargas nas estruturas, esta deve ser baseada em análises computacionais ou ensaios de campo, para que sejam determinadas as técnicas adequadas de reparo.

Entretanto, quando a estrutura está deteriorada de tal modo que o reparo através do aumento da rigidez não é viável tecnicamente e economicamente, a substituição dos componentes estruturais de regiões críticas deve ser levada em consideração. Para isso, os custos relacionados a este tipo de reparo devem ser precisamente analisados.

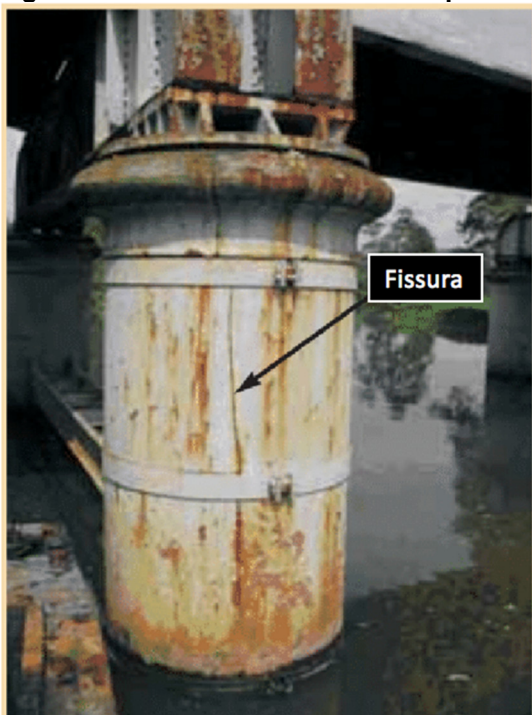
7.3 Principais Métodos Convencionais de Reabilitação e Reforço de Estruturas Metálicas

A seguir, serão descritos os principais métodos convencionais encontrados e considerados como sendo os mais utilizados no mundo, no que diz respeito ao reparo e reforço de estruturas de aço.

7.3.1 Método de Costura

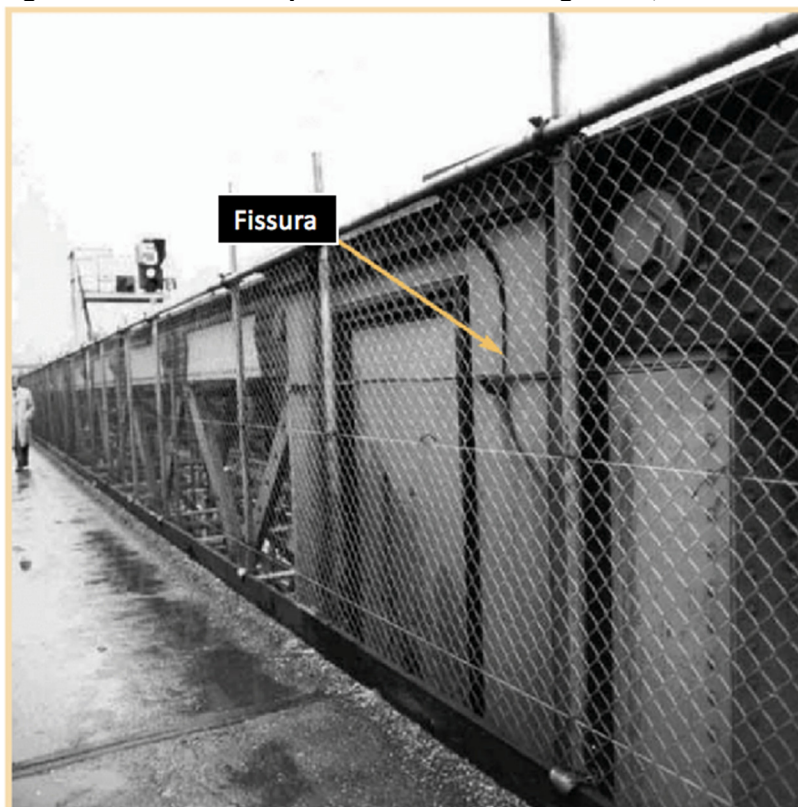
Estruturas construídas em aço, alumínio e ferro fundido que possuem fissuras, tais como as apresentadas nas figuras 53 e 54, podem ser reparadas pelo Método de Costura (*“Stitching Method”*). Tal reparo consiste basicamente em vedar totalmente as rupturas existentes nos elementos estruturais.

Figura 53 – Fissura encontrada em pilar de uma ponte de ferro fundido



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Figura 54 – Pilastra na ponte ferroviária Hungerford, em Londres, com fissura considerável



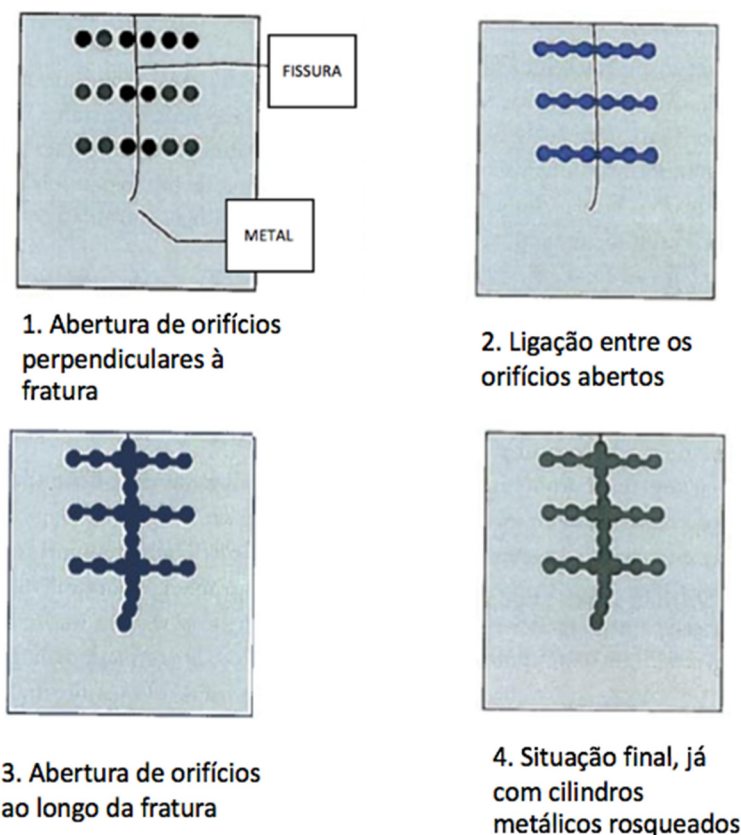
Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Primeiramente, com a utilização de furadeiras, brocas e gabaritos, são perfurados vários orifícios ao longo de eixos perpendiculares à fratura. Logo após, as regiões intermediárias superficiais entre as aberturas são removidas, com cinzéis pneumáticos, propiciando ligação entre elas. Assim, uma liga metálica, com formato de pequenos cilindros, é introduzida e rosqueada nos furos, de modo a fechá-los. Novas aberturas são feitas, porém, desta vez, ao longo da própria fratura. Os cilindros metálicos são novamente rosqueados dentro dos furos, contribuindo para que toda a fenda seja selada.

Conforme Tilly et al. (2008), é importante destacar que a liga metálica utilizada deve possuir o mesmo coeficiente de dilatação que o aço a ser reabilitado, para que problemas futuros sejam evitados. É preferível que esta seja de níquel de alta resistência (*“high-nickel”*), uma vez que o material em questão resiste bem a tensões cisalhantes e apresenta boa ductilidade.

Tilly et al. (2008) também abordam que uma das vantagens em utilizar este método é o fato de não ocorrerem distorções ou tensões térmicas por ser um processo totalmente a frio. Na figura abaixo, as etapas do processo de reparo pelo método de costura (*“stitching method”*) podem ser visualizadas.

Figura 55 - Ligações parafusadas utilizadas para adição de elementos estruturais metálicos para aumento de resistência à fadiga



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

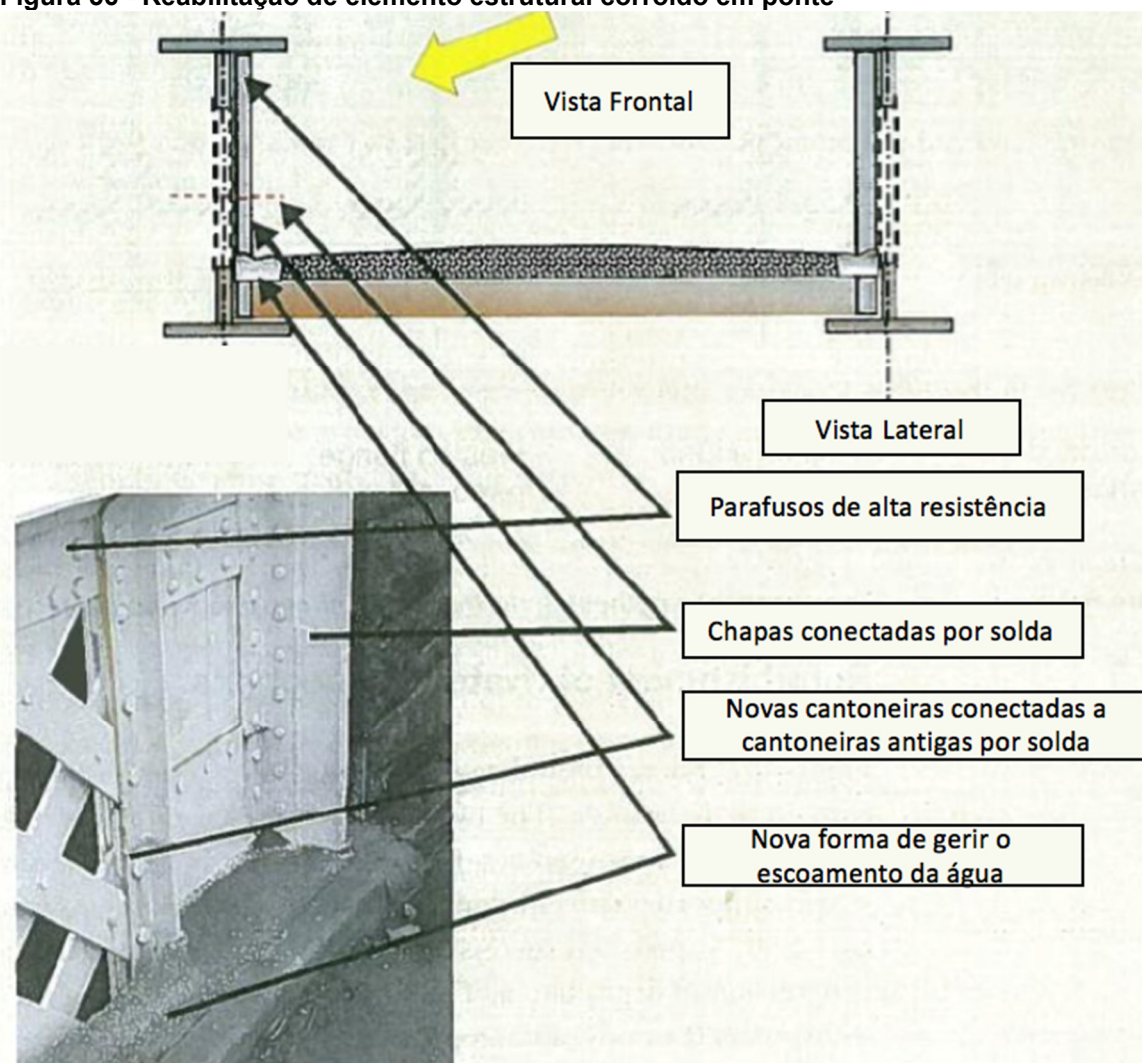
7.3.2 Método para Reabilitação de Componentes Corroídos

De acordo com Demir (2011), quando estruturas metálicas estão corroídas, é possível realizar o reparo através da substituição dos elementos atingidos pela corrosão. Em muitos casos, entretanto, apenas a remoção da corrosão é necessária, mantendo, assim, os mesmos componentes estruturais originais. É importante, nestes casos, se certificar que não haverá o comprometimento com a segurança da construção.

A restauração estrutural também pode ocorrer por meio de reforço. Para tanto, é necessário que se lance mão de novas chapas ou lâminas estruturais, que são adicionadas à estrutura antiga.

Na figura 56, é exemplificada a situação de uma estrutura corroída que foi beneficiada pelo processo de reabilitação, contando com substituição e adição de novos elementos estruturais através de soldas e parafusos.

Figura 56 - Reabilitação de elemento estrutural corroído em ponte

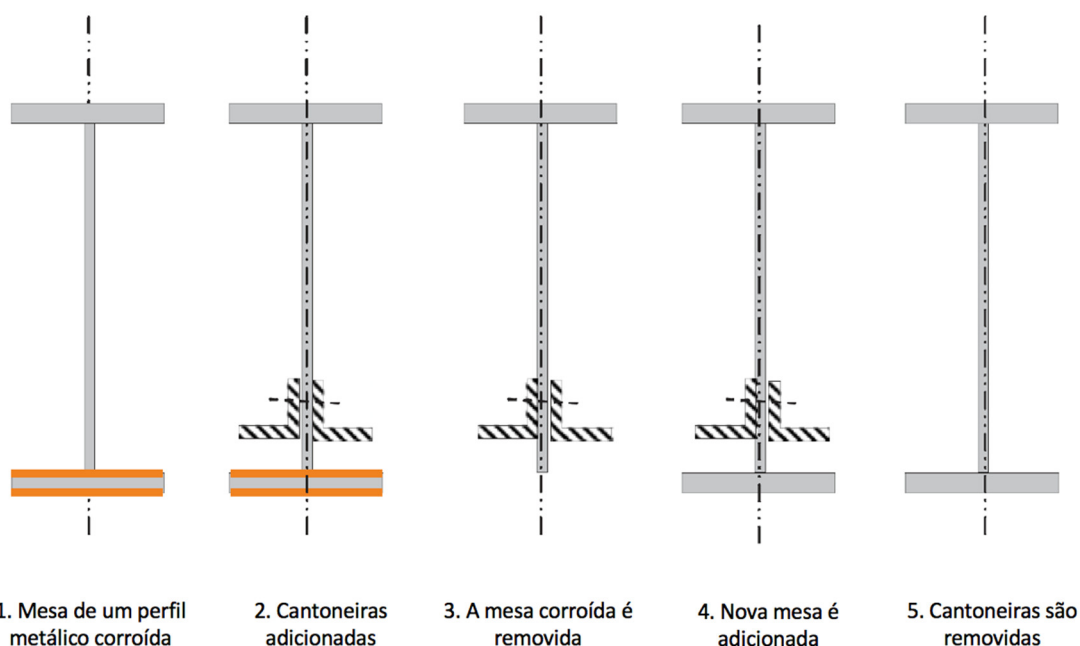


Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Conforme Tilly et al. (2008), primeiramente, rebites utilizados para ligarem determinados elementos na estrutura são removidos e substituídos por parafusos de alta resistência. Outros parafusos também são usados, juntamente com soldas, para acoplar uma nova chapa metálica à parte superior da estrutura original. Cantoneiras novas também não adicionadas à cantoneiras antigas, de modo a fortalecer a estrutura. Há também a preocupação com o escoamento de água na localidade, a fim de que não entre em contato direto com a estrutura e colabora para que ocorra processos corrosivos posteriores. Assim, através de soldagem de um perfil U metálico à parte inferior da estrutura, a água passa a ser gerida de uma nova forma.

Em situações nas quais se opta pela substituição de componentes estruturais, o reforço de algumas partes da estrutura pode ser requerido. Isto ocorre quando mesas de perfis metálicos corroídas são substituídas. A seguir, na figura 57, observa-se o procedimento utilizado nestas circunstâncias.

Figura 57 - Substituição de elementos estruturais corroídos



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

7.3.3 Método para Reabilitação de Componentes Estruturais Deformados

De acordo com Radomski (2002), membros estruturais deformados podem ser reparados por métodos mecânicos e térmicos. Essas deformações ocorrem, muitas vezes, em pontes, devido a acidentes causados por veículos ou ocasionados no próprio processo de construção da ponte. Na figura 58, é observada uma deformação ocasionada pelo impacto de um veículo em uma passarela, que exigiu reparos mecânicos *in situ* para que se recuperasse o desempenho inicial da estrutura.

Figura 58 - Substituição de elementos estruturais corroídos



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

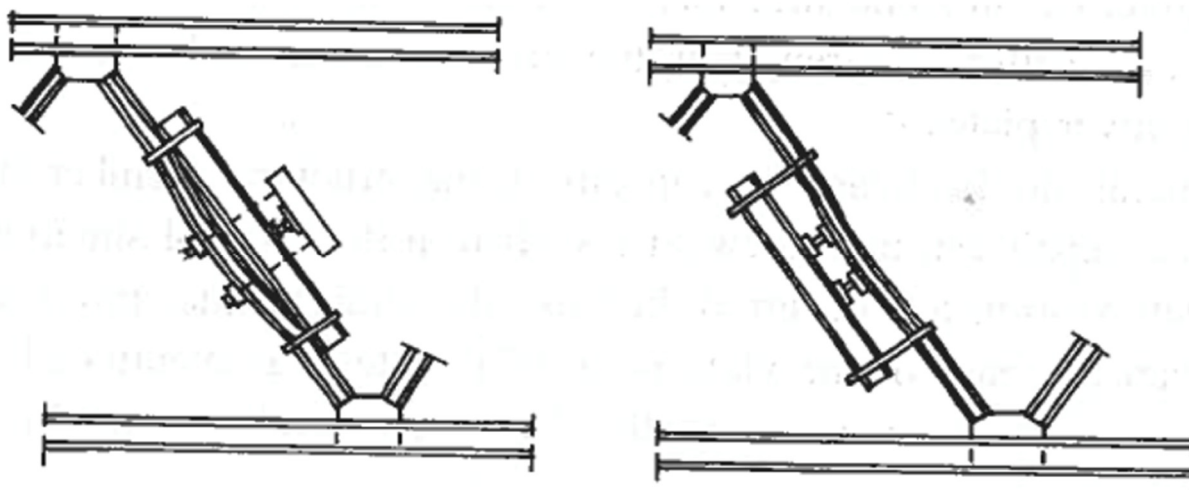
7.3.3.1 Reparo Mecânico

Sendo o método de reparo mais comum, o reparo mecânico consiste basicamente na aplicação de cargas externas ao membro deformado, sendo isso feito na direção oposta à deformação.

Para determinar as ferramentas necessárias que devem ser utilizadas no processo de reparo mecânico, Radomski (2002) afirma que é fundamental conhecer a localização e o tamanho da deformação. Outro critério importante é a espessura das chapas metálicas que sofrerão o reparo. Por exemplo, em casos de deformações pequenas e chapas menos espessas, ferramentas manuais podem ser usadas. Para maiores deformações e chapas mais grossas, macacos hidráulicos e guinchos elétricos devem ser escolhidos, para que se consiga criar forças externas consideráveis.

Na figura 59, é demonstrada a situação em que elementos estruturais diagonais são reabilitados através do reparo mecânico com a utilização de um macaco hidráulico.

Figura 59 – Reparo mecânico através de macaco hidráulico



Fonte: Radomski (2002)

Apesar de ser o método mais difundido e facilmente aplicável, sendo necessário pouco conhecimento técnico para executá-lo, Radomski (2002) cita algumas recomendações necessárias, presente em normas internacionais, referentes à sua utilização:

- 1) Temperaturas inferiores a -20 graus não são permitidas para a realização do processo de reparo mecânico;
- 2) A força externa máxima empregada deve permanecer ao longo dos últimos 15 minutos do processo;
- 3) Fraturas ou defeitos não podem ser gerados de forma alguma;
- 4) Em casos de estruturas deformadas por flexão e torção, deve ser removida, primeiramente, a deformação por flexão e, apenas depois, as deformações causadas pela torção.

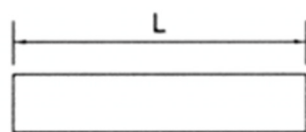
7.3.3.2 Reparo Térmico

Tilly et al. (2008) citam que processos de reparo por aquecimento são capazes de solucionar situações de distorção e flambagem, que atingem estruturas metálicas. Segundo informações do *United States Department of Transportation*, este método é baseado no fornecimento de calor, sob controle, para componentes estruturais plasticamente deformados. A técnica consiste em ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento para que, gradualmente, a estrutura seja endireitada.

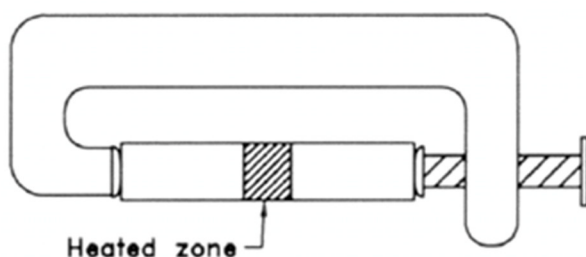
Avent e Mukai (2001) explicam que o processo funciona porque duas propriedades específicas do aço tornam-no possível: existência de deformação residual, após o limite de escoamento ser atingido (o que faz com que parte do aço continue alongada ou comprimida), e menores valores de limite de escoamento, quando em altas temperaturas (370 a 700 °C). Também ilustram como o reparo térmico ocorre, exemplificando seus procedimentos aplicados em uma pequena barra de aço, como pode ser visualizado na figura 60.

A barra não deformada é alocada em um grampo de fixação nodular (conhecido popularmente como sargento), que é responsável por fixá-la. Assim, uma pequena área da estrutura é aquecida, o que faz com que a barra tente se deslocar longitudinalmente. Isto não ocorre, uma vez que o sargento impede deslocamentos nesta direção. Entretanto, a barra consegue se deslocar nas direções lateral e transversal, o que forma uma certa saliência de material na zona aquecida. Como esta região vem sendo aquecida a altas temperaturas, seu limite de escoamento torna-se menor, o que resulta em deformações plásticas. Apenas a região aquecida sofre este fenômeno. Quando o aquecimento se finaliza, a barra se contrai tridimensionalmente, não podendo, agora, ser impedida pelo sargento no sentido longitudinal.

Figura 60 - Reparo térmico em barra metálica



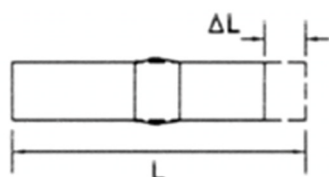
a. Barra de aço não deformada



b. Fixação da barra utilizando um sargento



c. Formação da Protuberância durante o aquecimento



d. Configuração final da barra

Fonte: adaptado de Avent e Mukai (2001)

Com isso, conclui-se que uma redistribuição de material ocorre na região em que há o aquecimento, o que acarreta no encurtamento da barra e o aparecimento de uma pequena protuberância. À redistribuição dá-se o nome de deformação plástica e à força provocada pelo sargento, que restringe o deslocamento da barra, força de travamento. Em suma, através de ciclos, que envolvem travamento, aquecimento e resfriamento, a barra pode ser encurtada de modo a praticamente atingir comprimento desejado.

Este exemplo, segundo Avent e Mukai (2001), expõe os princípios fundamentais do reparo térmico. Entretanto, a maioria dos danos ocasionados em

estruturas metálicas é muito mais complexa que um alongamento ou encurtamento de uma barra de aço. Diferentes situações requerem diferentes formas de reparo.

Segundo Radomski (2002), quanto à aplicação do reparo térmico, são utilizadas chamas de oxiacetileno. Além disso, existem diferentes técnicas de aquecimento, sendo as principais: aquecimento pontual, aquecimento em V, aquecimento retangular e aquecimento linear.

Figura 61 – Utilização de chamas de oxiacetileno para reparo estrutura



Fonte: Ohio Department of Transportation

Quanto ao aquecimento pontual, sua aplicação ocorre em pequenas áreas circulares do componente estrutural. Geralmente, o diâmetro dessas áreas é encontrado através da equação (1):

$$D = 8g + 10 \quad (1)$$

Onde:

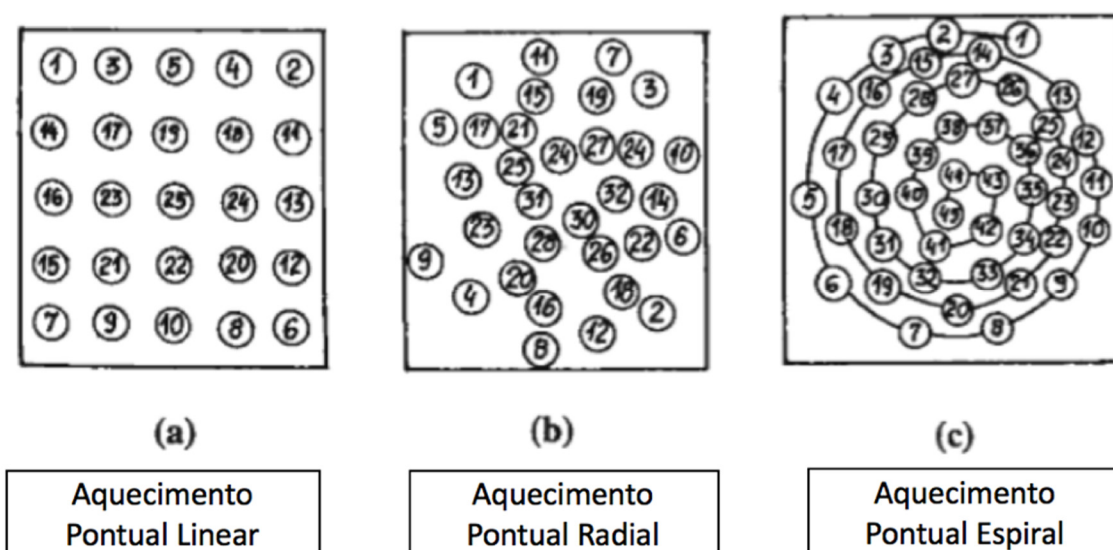
D é o diâmetro de pequenas áreas do componente estrutural, em milímetros;

g é a profundidade da chapa deformada em milímetros;

A temperatura de aplicação nas chapas metálicas, para o processo de aquecimento pontual, deve estar entre 650 e 723 °C. Temperaturas maiores que 723 °C não devem ser utilizadas, podendo gerar alterações na composição do material.

É responsável pela remoção de deformações ondulares, sendo realizado de três maneiras: linear, radial e espiral, conforme é demonstrado na figura 62. Independente da forma de aquecimento pontual utilizada, existem algumas limitações que devem ser observadas: inicia-se o aquecimento a partir de 100 mm da borda da chapa a ser reparada e nenhum local pode ser aquecido mais de uma vez.

Figura 62 - Formas de aquecimento pontual

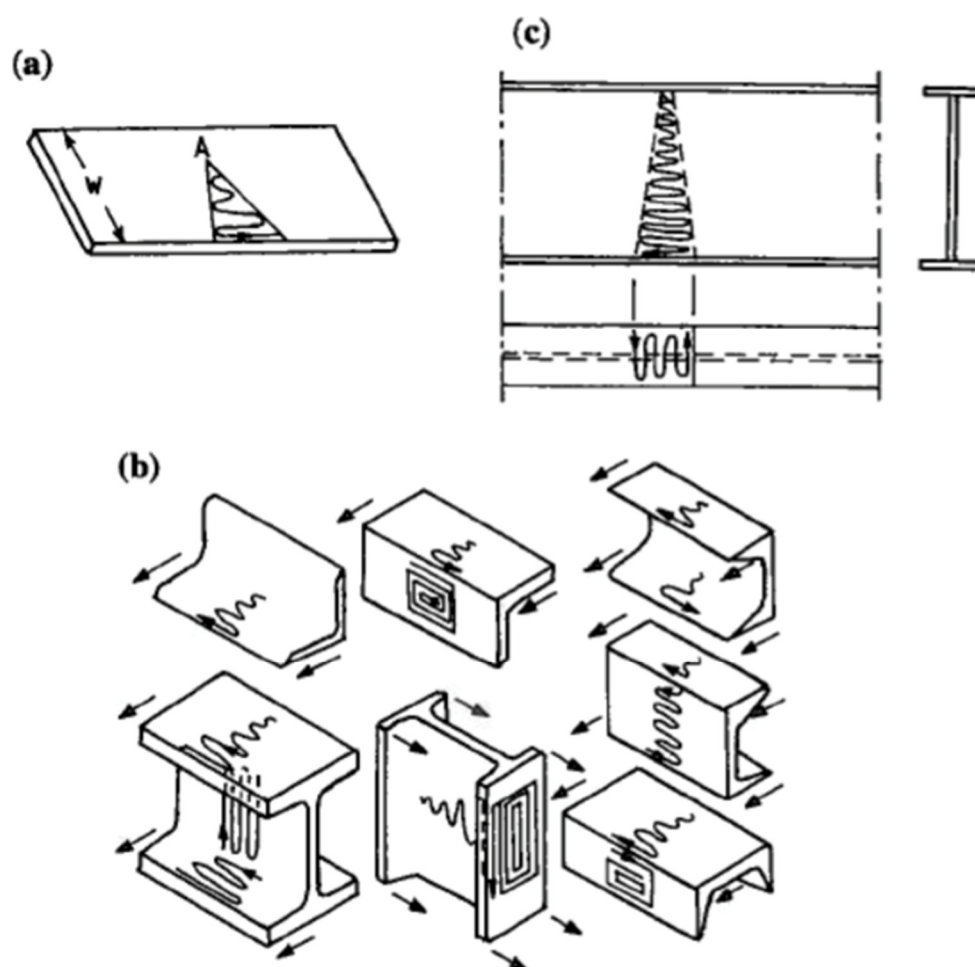


Fonte: adaptado de Radomski (2002)

Radomski (2002) explica que o aquecimento em V (*Vee Heating*) é comumente utilizado para endireitar abaulamentos e deflexões em estruturas metálicas constituídas por seções soldadas ou laminadas. O método deve ser executado sob as seguintes condições: o ponto inicial do aquecimento é a ponta do V, ilustrado na figura 63 (a) como ponto A; a direção do processo de aquecimento em V depende do formato do perfil metálico e ocorre como demonstrado, na figura 63 (b) e a operação deve ser realizada de forma contínua, sem interrupções e retomadas.

Avent e Mukai (2001) reiteram que durante o processo ocorrem deslocamentos de flecha da estrutura. De início, como resultado da expansão longitudinal do material acima de sua linha neutra (local em que ocorre o início do aquecimento), forma-se uma flexão negativa, diminuindo a flecha resultante da estrutura, observado na figura 63 (a). Entretanto, quando todas as partes estão igualmente aquecidas (fase final do aquecimento), o material abaixo da linha neutra também se expande, gerando flexão positiva e maior flecha resultante, como demonstrado na figura 63 (b).

Figura 63 - Aquecimento em V e Aquecimento Retangular

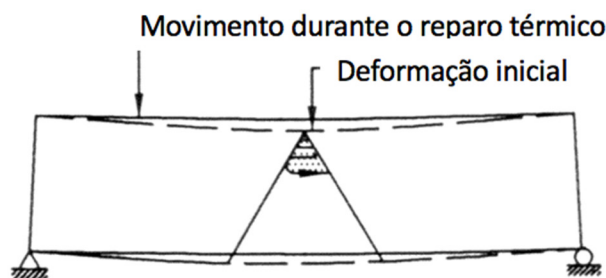


Fonte: Radomski (2002)

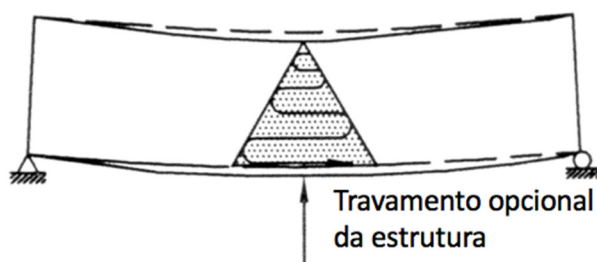
Avent e Mukai (2001) reiteram que durante o processo ocorrem deslocamentos de flecha da estrutura. De início, como resultado da expansão longitudinal do material acima de sua linha neutra (local em que ocorre o início do aquecimento), forma-se uma flexão negativa, diminuindo a flecha resultante da estrutura, observado na figura 64 (a). Entretanto, quando todas as partes estão igualmente aquecidas (fase final do aquecimento), o material abaixo da linha neutra também se expande, gerando flexão positiva e maior flecha resultante, como demonstrado na figura 64 (b).

Logo após, sendo retiradas as chamas de oxiacetileno, a estrutura começa a se resfriar e, com isso, se contrai. A contração ocorre proporcional à largura do aquecimento. Assim sendo, a parte estrutural abaixo da linha neutra (aquecida por último), por ter sofrido maior largura de aquecimento, tende a se contrair mais que aquela acima da linha neutra. Deste modo, novamente, forma-se flexão negativa, resultando em menor flecha resultante, como pode ser visto na figura 64 (c).

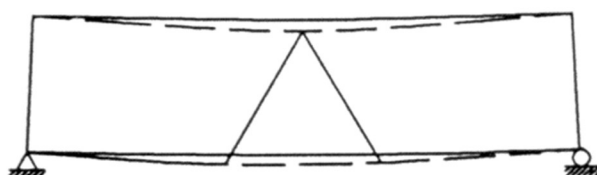
Figura 64 – Etapas dos deslocamentos da flecha durante o aquecimento



- (a) Deslocamento da chapa metálica durante o início do aquecimento, diminuindo a flecha.



- (b) Deslocamento da chapa metálica, próximo ao fim do aquecimento, aumentando a flecha.



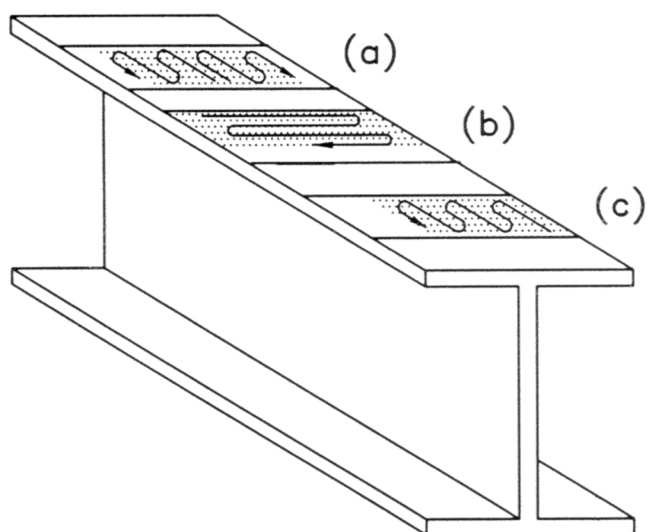
- (c) Situação final depois do resfriamento. Resultado: menor flecha.

Fonte: Avent e Mukai (2001)

Avent e Mukai (2001) também abordam que a técnica de aquecimento retangular (“*Strip Heating*”) é utilizada para completar o aquecimento em V. As duas técnicas semelhantes, quanto à ação que executam sobre os elementos deformados, se diferindo, principalmente, pelo formato de aplicação do aquecimento.

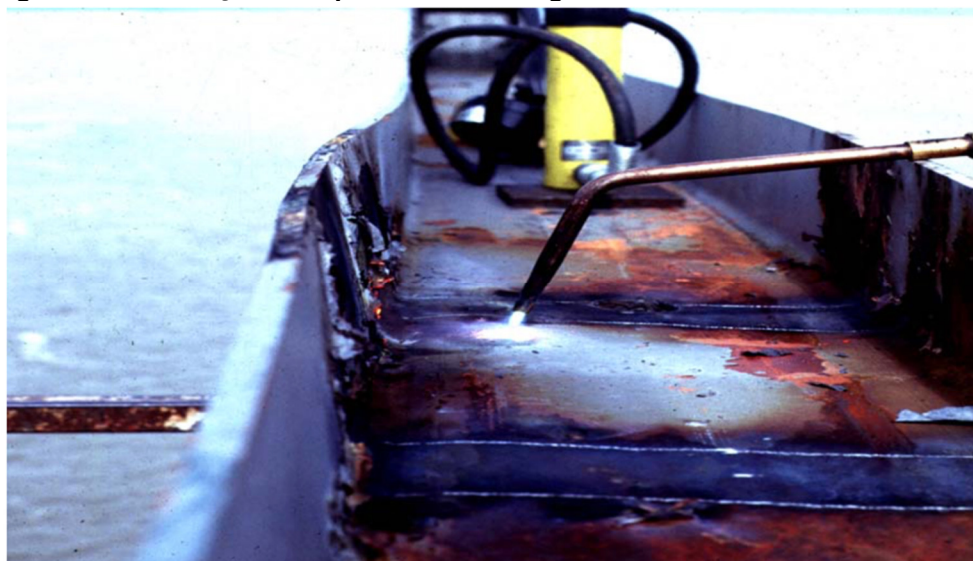
Como pode ser observado na figura 65, o aquecimento retangular pode se iniciar no meio da estrutura, utilizando duas tochas de chamas de oxiacetileno simultaneamente (figura 65(a)). Outra alternativa é iniciar o aquecimento de um lado, utilizando apenas uma tocha (figura 65(b)). Além disso, a estrutura também pode ser aquecida inicialmente pela borda (figura 65(c)). É importante observar que o aquecimento, em qualquer uma das formas citadas, é sempre de modo serpentino.

Figura 65 – Formas de aquecimento retangular em uma viga



Fonte: Avent e Mukai (2001)

Figura 66 – Execução de aquecimento retangular



Fonte: U.S. Departamento of Transportation

Avent e Mukai (2001) destacam que este tipo de aquecimento pode produzir flexão sobre o eixo mais fraco da estrutura, se forças de travamento não forem aplicadas, enquanto ocorre o processo. Outra forma de evitar problemas quanto ao aparecimento de flechas é alternar o ponto inicial de aquecimento, ao longo do comprimento da estrutura a ser reparada.

Segundo Avent e Mukai (2001) e Radomski (2002), o aquecimento linear é empregado para reparar deformações ocasionadas no eixo menos resistente de chapas metálicas. Consiste basicamente em uma simples aplicação linear de chama

de oxiacetileno, na região convexa da deformação. Na figura 66, a aplicação da técnica pode ser visualizada.

Figura 67 – Execução de aquecimento retangular



Fonte: U.S. Departamento of Transportation

Radomski (2002) afirma que, para todas as formas de aquecimento citadas acima, não há a necessidade de apoios temporários ou fechamento de estradas (em reparo de pontes, por exemplo). Experiência e competência são requeridas para a execução dessas operações, uma vez que o processo é complexo.

7.3.4 Método de Reabilitação de Meios de Ligações

Em estruturas com ligações deterioradas, novos meios de ligação podem substituir os anteriores. Como exemplo, tem-se o reparo realizado na estrutura da figura 68, na qual rebites utilizados para conectar elementos estruturais de uma passarela encontram-se fraturados, após sofrerem pressões externas.

Figura 68 - Corrosão em componentes estruturais de uma passarela



Fonte: adaptado de Tilly et al. (2008)

Tilly et al. (2008) explicam que a exposição à água foi responsável por formar o processo corrosivo entre as chapas e as cantoneiras demonstrado na figura anterior. A camada de cobertura e proteção foi deteriorada e, assim, ocorreu a corrosão nos elementos de ligação. Como foi discutido em capítulos anteriores, em corrosões, o produto final é um material de volume superior ao dos componentes metálicos originais. Desta forma, ocorreu abertura entre os elementos metálicos e, conseqüentemente, problemas de insegurança estrutural.

Para solucionar o problema, neste caso, lançou-se mão de um simples reparo envolvendo a limpeza dos elementos metálicos, seguida pela substituição dos rebites por parafusos de alta resistência. Ao fim, estrutura foi novamente pintada e revestida, para evitar problemas futuros.

Do mesmo modo, poderia lançar-se mão do reparo através da substituição dos antigos rebites por novos. Sendo assim, a técnica comumente utilizada é o aquecimento destes, para que posteriormente suas hastes sejam alocadas, em um dos lados da estrutura. Para que se moldem ao local da ligação, é importante que as hastes dos rebites sejam pressionados e martelados.

Após estarem alocados e se resfriarem, os elementos conectados pelos rebites são dispostos em conjunto e permanecem unidos. Nas figuras abaixo, fases da técnica podem ser visualizadas.

Figura 69 - Aquecimento de rebites e locação de suas hastes na estrutura



Fonte: Euthenics e Vermes (2007)

Figura 70 - Pressão exercida sobre o rebite para modelá-lo ao local de ligação



Fonte: Euthenics e Vermes (2007)

Antes de substituir os rebites, Tilly et al. (2008) afirmam que o engenheiro deve entender os caminhos de carga na conexão. É de responsabilidade técnica do engenheiro o impacto que a substituição pode causar, assim como os efeitos de cargas na estrutura e conexão.

8 CONCLUSÃO

Por conseguinte, o aço como é um material resistente, dúctil e tenaz propicia importantes vantagens estruturais a edificações. Por apresentarem características como flexibilidade, reversibilidade e facilidade, no que se refere a substituições de elementos, estruturas metálicas proporcionam maior aproveitamento de espaços internos e diminuem custos em várias etapas da construção. Por isso, sua utilização tornou-se comum e crescente.

Obras construídas em aço e com mais de 30 anos já são realidade, no cenário brasileiro. Provavelmente, daqui a alguns anos, a demanda por reformas também será corriqueira, visto que demolições, do ponto de vista econômico e sustentável, de acordo com o que foi apresentado, não são consideradas alternativas viáveis. Atualmente, muitas obras já apresentam graves problemas patológicos que colocam em risco a segurança da edificação e precisam de solução. É exatamente por esse motivo que conhecer formas de reforçar e reparar estruturas mostra-se importante.

Entretanto, a quantidade de normatizações, em literatura brasileira, a cerca de métodos para reabilitação de estruturas de aço, conforme discutido, é irrisória, se comparada ao número de normas e estudos desenvolvidos em outros países. Sendo assim, avanços, no que diz respeito a pesquisas e estudos sobre o tema, são fundamentais para que existam recuperações estruturais adequadas.

Conclui-se, assim, que os métodos convencionais que foram apresentados, bem como o método de aplicação de polímeros reforçados com fibras, são alguns dos meios pelos quais o desempenho de estruturas metálicas pode ser restabelecido. A partir de procedimentos envolvendo técnicas específicas para cada caso, patologias e problemas construtivos são solucionados e a estrutura torna-se novamente segura para utilização. Sugere-se também que mais estudos sejam realizados sobre o assunto, a fim de se descobrir novos métodos capazes de reabilitar e reforçar estruturas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, 2010, 610 p.

ANDRADE, C.C.; SOUZA, J.C. Projeto de arquitetura: proteção contra incêndio em elementos estruturais de aço. **Estação Científica (UNIFAP)**, Macapá, v. 5, p. 49-68, 2015.

ANDRADE, P.A. Garagem América: Um exemplo de Pioneirismo e Arrojo Tecnológico. **Portal Met@lica Construção Civil**. São Paulo, 19 nov. 2009. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=883>. Acesso em: 12 out. 2017.

ANJANEYULU, L. **Building Rehabilitation: A promising tool for urban revitalization**. 2003. 351 p. Master's Thesis – School of Planning, Design and Construction, Michigan State University, Detroit, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais: Desempenho. Rio de Janeiro, 2015, 54 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008, 247 p.

AVENT, R.R., MUKAI, D.J. What You Should Know About Heat Straightening Repair of Damaged Steel. **Engineering Journal**, American Institute of Steel Construction. Chicago, v. 38, p. 27-49, 2001.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço**: projeto e cálculo. São Paulo: Pini, 2010.

BRINCK, F.M. **Efeito na corrosão na integridade estrutural da ponte metálica Marechal Hermes**. 2004. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

CASTRO, E.M.C. **Patologia dos edifícios em estrutura metálica**. 1999. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Relatório de Atividades de 2016**. Rio de Janeiro, 2016, 38 p.

Centro Cultural São Paulo. **Correios**. São Paulo. Disponível em: <<https://www.correios.com.br/sobre-correios/educacao-e-cultura/centros-e-espacos-culturais-dos-correios/centro-cultural-sao-paulo>>. Acesso em: 20 out. 2017.

CIOCCHI, L. As técnicas que renovam antigos edifícios. **Téchne**, v.73, p. 2, 2003.

COZZA, E. Uma nova era para o aço. **Revista Techné**, São Paulo, v. 36, p. 18-23, 1998.

DEMIR, H. **Strengthening and repair of steel bridges**. 2011. 133 p. Master's Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2011.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zigate, 2006.

_____. **Edificações de Aço no Brasil**. São Paulo: Zigate, 1999.

EM NOVEMBRO de 1971, Elevado Paulo de Frontin desabou, matando 29 pessoas. **O Globo**. Rio de Janeiro, 18 nov. 2013. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/em-destaque/em-novembro-de-1971-elevado-paulo-de-frontin-desabou-matando-29-pessoas-10808571>>. Acesso em: 12 out. 2017.

Estimativa da População. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2017.

EUROCONSTRUCT CONFERENCE, 56., 2003, Madeira. **Anais...** Madeira, 2003.

FURTADO, P. **Introdução à Corrosão e Proteção das Superfícies Metálicas**: Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte, 1981.

GALVANIC Corrosion Protection and Prevention in Harsh Environments. **ETS Cable Components**. Hilsea, 14 ago. 2013. Disponível em: <<https://www.etscablecomponents.com/2013/08/galvanic-corrosion-protection-prevention-harsh-environments/>>. Acesso em: 20 out. 2017.

GENTIL, V. **Corrosão**, Rio de Janeiro: LTC, 2012. JONES, Denny. **Principles and Prevention of Corrosion**, New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

GONÇALVES, R.M.; SÁLES, J.J.; NIMIR, W.A. Alguns aspectos da deterioração e inspeção de pontes metálicas. In: 4º SEMINÁRIO USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO, 1989, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1989. p.199-212.

HAGHANI, R. **Behaviour and design of adhesive joints in flexural steel members bonded with FRP laminates**. 2010. 225 p. Ph.D. Thesis - Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2010.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Brasília, 2012, 34 p.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL. **International Building Code**. Country Club Hills, 2011, 732 p.

JESUS, C.R.M. **Análise de Custos para Reabilitação de Edifícios para Habitação**. 2008. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KARPINSK, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre, RS: EDIPUCRS, 2009.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções**: procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações. 1985. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

_____. **Patologia das construções**. 1986. 29 p. Boletim Técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

MUIR, L.S. Rehabilitation and Retrofit of Existing Steel Structures. Presentation to The Structural Engineers Association of Georgia, Atlanta, 2011. Disponível em: <<http://www.larrymuir.com/Documents/Existing%20Structures.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2017.

NASCIMENTO, D. Palacete e Edifício Conde de Prates. **São Paulo Antiga**. São Paulo, 6 jul. 2015. Disponível em: <<http://www.saopauloantiga.com.br/palacete-prates/>>. Acesso em: 10 de out. 2017.

NUNES, L. P. ; LOBO, Alfredo Carlos. **Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva**, Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

PANOSSIAN, Z.; ALMEIDA, N. L.; OHBA, M. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: IPT, 1993.

MCKAIG, T.H. **Building failures**: case studies in construction and design. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas**: dimensionamento prático. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

PONTE, H. A. Fundamentos da Corrosão. **Apostila da disciplina eletroquímica aplicada e corrosão**. Curitiba, 2003. Disponível em: <<http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Apostila%20Corrosao.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017

RADOMSKI, W. **Bridge rehabilitation**. Londres: ICP, 2002.

SACONI, R. O mais moderno edifício-garagem da América do Sul. **Estadão**. São Paulo, 12 jul. 2011. Disponível em: < <http://brasil.estadao.com.br/blogs/arquivo/o-mais-moderno-edificio-garagem-da-america-do-sul>>. Acesso em: 10 de out. 2017.

SALMON, C.; JOHNSON, J. **Steel structures**: design and behaviour. Madison: HarperCollins College Publishers, 1996.

SCHOLZ, C. Prédios de São Paulo: Correios. **Estadão**. São Paulo, 5 mai. 2014. Disponível em: <<http://acervo.estadao.com.br/noticias/acervo,predios-de-sao-paulo-correios,10022,0.htm>>. Acesso em: 10 de out. 2017.

SEDRIKS, J. **Corrosion of Stainless Steels**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.

SILVEIRA, M. Pavilhão da Gameleira, desabamento deixou 65 mortos e 50 feridos em 1971. **O Globo**. Rio de Janeiro, 4 fev. 2016. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/fatos-historicos/pavilhao-da-gameleira-desabamento-deixou-65-mortos-50-feridos-em-1971-18608430>>. Acesso em: 12 de out. 2017.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

Steel Beam Defects: Bent Beams. Ohio Department of Transportation. Columbus. Disponível em: <https://www.dot.state.oh.us/Divisions/Engineering/Structures/bridge%20operations%20and%20maintenance/PreventiveMaintenanceManual/BPMM/repairs/sbrdefects3.htm>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

SYAL, M., SHAY, C. **Implementing a building rehabilitation code in Michigan**. Disponível em: <<http://ced.msu.edu/upload/reports/syal%20rehab%20hsg%20reportword.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

TEOBALDO, I. N. C. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TIDE, R. H. R. Reinforcing Steel Members and the Effects of Welding. **Engineering Journal**, American Institute of Steel Construction. Chicago, v. 27, p. 129-131, 1990.

TILLY, G. P. et al. **Iron and steel bridges**: condition appraisal and remedial treatment. Londres: Ciria, 2008.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Guide for heat-straightening of damaged steel bridge members**. New Jersey, 2011, 62 p.

WEBER, R. Coming to grips with corrosion. **Trailer/Body Builders**. Houston, p. 47-49, 2012.

ZHAO, X. **FRP-Strengthened Metallic Structures**. Boca Raton: CRC Press, 2014.