

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções

Mestrado Profissional em Construção Metálica

Dissertação

**Avaliação da integridade de uma
estrutura industrial em aço afetada
pela corrosão atmosférica
aplicando simulação
computacional**

Magno Rafael Xavier Pinto

Ouro Preto
2023



AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE UMA ESTRUTURA INDUSTRIAL EM AÇO
AFETADA PELA CORROSÃO ATMOSFÉRICA APLICANDO SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia das Construções da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia das Construções.

Orientadores: Prof. Hisashi Inoue, *D.Sc.*

Profa. Rovadavia Aline de Jesus Ribas, *D.Sc.*

Ouro Preto, 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P659a Pinto, Magno Rafael Xavier.
Avaliação da integridade de uma estrutura industrial em aço afetada pela corrosão atmosférica aplicando simulação computacional. [manuscrito] / Magno Rafael Xavier Pinto. Magno Rafael Xavier Pinto. - 2023.
86 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hisashi Inoue.

Coorientadora: Profa. Dra. Rovadavia Aline de Jesus Ribas.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções.

Área de Concentração: Engenharia das Construções.

1. Aço - Corrosão. 2. Análise estrutural (Engenharia). 3. Simulação (Computadores). I. Pinto, Magno Rafael Xavier. II. Inoue, Hisashi. III. Ribas, Rovadavia Aline de Jesus. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Magno Rafael Xavier Pinto

Avaliação da integridade de uma estrutura industrial em aço afetada pela corrosão atmosférica aplicando simulação computacional

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia das Construções

Aprovada em 15 de agosto de 2023

Membros da banca

- D.Sc - Hisashi Inoue - Orientador - Universidade Federal de São João Del Rei
- D.Sc - Rovadavia Aline de Jesus Ribas - Co-Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
- D.Sc - Walliston dos Santos Fernandes - Universidade Federal de Ouro Preto
- D.Sc - Danielle Meireles de Oliveira - Universidade Federal Minas Gerais

Hisashi Inoue, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 30/10/2023



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Donizetti de Paula, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES**, em 08/11/2023, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0617556** e o código CRC **8B08131B**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, sabedoria para vencer todos os desafios, obstáculos e minhas próprias limitações.

A minha filha Emanuele e esposa Claudia, por terem acreditado e confiado em mim, por ter me apoiado nos momentos em que cheguei a pensar em desistir. Foi por elas que conseguir.

Aos meus pais, Joaquim e Maria, pela educação e ensinamentos, pois o que sou pessoalmente é devido a eles.

Aos meus orientadores Hisashi e Rovadavia e a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

RESUMO

Com alta resistência mecânica, o aço possui inúmeras vantagens na sua utilização nos processos de construção. Muito empregado na indústria, as estruturas em aço possuem melhores condições para vencer grandes vãos com a utilização de perfis de menores dimensão e peso, além da facilidade no transporte, manuseio e montagem. Com o tempo de uso, manifestações patológicas, como corrosão localizada e generalizada, flambagem local e global, além de deformações excessivas causadas por sobrecargas ou relacionadas a ciclos térmicos podem surgir devido a falhas de projetos, execução e caso não sejam submetidas a uma manutenção preventiva adequada. Uma das patologias predominantes nas estruturas em aço e podendo ser caracterizada pela redução de espessura, a corrosão atmosférica pode ter o seu mecanismo de formação acelerado em ambientes industriais, à presença de alguns gases como os óxidos de nitrogênio e enxofre gerados como subprodutos e na queima de combustíveis, que, em contato com a água, geram ácidos altamente corrosivos como ácido sulfúrico e nítrico. A corrosão pode afetar seriamente o desempenho das estruturas, sendo importante compreender e avaliar a redução da capacidade do elemento estrutural. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de uma estrutura de aço considerando a corrosão atmosférica e a possível redução na capacidade resistente. A avaliação é embasada nos métodos analíticos de cálculo e projeto de estruturas em aço descritos na norma ABNT NBR 8800:2008 e realizada com auxílio do *software Autodesk Robot 2023*. Através dos levantamentos realizados em campo, foi possível identificar algumas patologias que precisam ser reparadas de forma imediata e em alguns casos, identificar também a redução na capacidade estrutural do perfil quando se considerado uma determinada perda de espessura acometidos por essa patologia.

Palavras chaves: corrosão; análise estrutural; simulação computacional.

ABSTRACT

With high mechanical strength, steel has numerous advantages when used in construction processes. Widely used in industry, steel structures are better able to overcome large spans with the use of smaller and lighter profiles, in addition to being easier to transport, handle and assemble. Over time, pathological manifestations such as localized and generalized corrosion, local and global buckling, as well as excessive deformations caused by overloads or related to thermal cycles may arise due to design and execution flaws and if they are not subjected to preventive maintenance. One of the predominant pathologies in steel structures and can be characterized by thickness reduction, atmospheric corrosion can have its formation mechanism accelerated in industrial environments, due to the presence of some gases such as nitrogen and sulfur oxides generated as by-products and in burning of fuels, which, in contact with water, generate highly corrosive acids such as sulfuric and nitric acid. Corrosion can seriously affect the performance of structures, and it is important to understand and evaluate the reduction in the capacity of the structural element. In this context, this work aims to evaluate the capacity of a steel structure considering atmospheric corrosion and the possible reduction in resistant capacity. The assessment is based on the analytical methods of calculation and design of steel structures described in the ABNT NBR 8800:2008 standard and carried out with the aid of the Autodesk Robot 2023 software. Through surveys carried out in the field, it was possible to identify some pathologies that need to be repaired immediately and in some cases, also identify the reduction in the structural capacity of the profile when considering a certain loss of thickness affected by this pathology.

Keywords: corrosion; structural analysis; computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Origem das falhas	16
Figura 2 - Perda de massa de um aço ASTM A36	19
Figura 3 - Influência do dióxido de enxofre e carvão na ação corrosiva	21
Figura 4 - Tipos mais comuns de corrosão	22
Figura 5 - Corrosão uniforme	23
Figura 6 - Diferentes formas de pites	24
Figura 7 - Corrosão galvânica	25
Figura 8 - Trinca de corrosão sob tensão	25
Figura 9 - Corrosão intragranular	26
Figura 10 - Estrutura com difícil acesso	28
Figura 11 - Condições de projeto	29
Figura 12 - Disposição dos componentes	30
Figura 13 - Separação elétrica entre materiais com potenciais elétricos muito distintos	31
Figura 14 - Detalhe de solda descontínua e contínua	32
Figura 15 – Condição superficial que facilitam o acúmulo de material	33
Figura 16 – Condição de arestas	33
Figura 17 - Fluxograma da fase de um projeto estrutural	35
Figura 18 - Diagrama tensão/deformação	36
Figura 19 - Aço comum x Aço Resistente à corrosão	37
Figura 20 - Cidade da Música - RJ - Modelo estrutural simulado no ROBOT	38
Figura 21 - Níveis de abstração para análise de uma estrutura	40
Figura 22 - Geometria e malha de elementos finitos	41
Figura 23 - Tipos de elementos	42
Figura 24 - Comportamento linear de uma mola	44
Figura 25 - Comportamento não linear de um sistema com molas	45
Figura 26 - Objeto de estudo	46
Figura 27 - Preferências de trabalho - Normas de projeto	49
Figura 28 - Preferências de trabalho - Seções de aço	49
Figura 29 - Modelo estrutural	50

Figura 30 - Definição do material	52
Figura 31 - Seções transversais e propriedades geométricas	52
Figura 32 - Perfil editado (Medidas em mm)	54
Figura 33 - Sobrecarga de uso aplicada nas escadas	56
Figura 34 - Sobrecarga de uso aplicada nas plataformas	57
Figura 35 - Sobrecarga de uso aplicada em todos passadiços - Acúmulo de pó	57
Figura 36 - Parâmetros do vento	59
Figura 37 – Representação do vento em X	59
Figura 38 – Representação do vento em Y	60
Figura 39 - Mapeamento de perda de espessura	65
Figura 40 - Exemplo de introdução de danos no modelo	66
Figura 41 - Fator de trabalho das barras	67
Figura 42 - Resultados da barra 71	68
Figura 43 - Mapa do fator de utilização das barras	69
Figura 44 - Barras com maiores valores de solicitações de cálculo	70
Figura 45 - Localização das barras mais solicitadas	70
Figura 46 - Deslocamentos máximo	71
Figura 47 - Corrosão generalizada	72
Figura 48 - Corrosão localizada	74
Figura 49 - Corrosão por frestas	75
Figura 50 – Patologias transmitidas	77
Figura 51 - Corrosão na base dos pilares	78
Figura 52 - Indicação das barras mais solicitadas	79
Figura 53 - Resultado da barra 1 (Condição de projeto)	81
Figura 54 - Resultado da barra 5 (Condição de projeto)	81
Figura 55 - Barras 1 e 5	82
Figura 56 - Barras de maiores solicitações com danos introduzidos	83
Figura 57 - Comparativo dos resultados das barras mais solicitadas	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes categorias de corrosividade com base na ISO 9223:2012	19
Tabela 2 - Propriedades mecânica dos materiais	47
Tabela 3 - Tipos de apoios	51
Tabela 4 – Tipo de carregamento e abreviação	55
Tabela 5 - Cargas permanentes	55
Tabela 6 - Sobrecarga de uso	56
Tabela 7 - Fatores para o cálculo da carga de vento	58
Tabela 8 – Coeficiente de ponderação das ações	62
Tabela 9 – Fatores de combinação ψ_0	62
Tabela 10 – Fatores de combinação e redução ψ_1 e ψ_2	63
Tabela 11 - Combinação para Estado Limite Último (ELU)	63
Tabela 12 - Combinação para Estado Limite de Serviço (ELS)	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	<i>Objetivo</i>	14
1.2	<i>Justificativas</i>	14
1.3	<i>Metodologia.....</i>	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	<i>Patologia das estruturas em aço</i>	16
2.1.1	Corrosão das estruturas de aço	18
2.1.2	Ação corrosiva da atmosfera.....	20
2.1.2.1	Umidade relativa do ar	20
2.1.2.2	Substâncias poluentes	21
2.1.3	Classificação da corrosão	22
2.1.3.1	Corrosão uniforme.....	23
2.1.3.2	Corrosão por pites	24
2.1.3.3	Corrosão galvânica.....	24
2.1.3.4	Corrosão intergranular e intragranular.....	25
2.1.3.5	Corrosão por erosão.....	26
2.1.3.6	Corrosão sob tensão	26
2.2	<i>Projeto de estruturas visando a durabilidade</i>	27
2.2.1	Acessibilidade.....	27
2.2.2	Geometria.....	29
2.2.3	Compatibilidade.....	30
2.2.4	Soldagem	31
2.2.5	Superfícies	32
2.3	<i>Projeto estrutural</i>	33
2.3.1	Materiais.....	35
2.4	<i>Software Robot Structural Analysis</i>	38
2.5	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	39
2.5.1	Análise linear	43
2.5.2	Análise não linear	44

3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	<i>Modelagem computacional.....</i>	48
3.1.1	Preferências de trabalho	48
3.1.2	Modelo geométrico	50
3.1.3	Condições de contorno.....	51
3.1.4	Propriedades mecânicas dos materiais.....	51
3.1.5	Propriedades geométricas.....	52
3.1.6	Carregamento.....	55
3.1.6.1	Carga permanente.....	55
3.1.6.2	Sobrecarga de uso e ocupação.....	56
3.1.6.3	Vento	58
3.2	<i>Critério de avaliação.....</i>	60
3.2.1	Estados Limites Últimos	60
3.2.1.1	Combinações dos carregamentos (ELU).....	61
3.2.2	Estados Limites de Serviço	62
3.2.2.1	Combinações dos carregamentos (ELS).....	62
3.3	<i>Combinações das ações</i>	63
3.4	<i>Introdução de danos ao modelo devido à corrosão.....</i>	65
4	RESULTADOS.....	67
4.1	<i>Análise numérica</i>	67
4.1.1	Fator de trabalho	67
4.1.2	Deslocamentos.....	71
4.2	<i>Inspeção Visual.....</i>	72
4.2.1	Peças com maiores solicitações.....	78
4.2.2	Resultados da estrutura para condição corroída	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

Dimensionadas para resistirem às ações permanentes e variáveis, as estruturas em aço podem sofrer uma redução na sua capacidade de carga devido à deterioração durante a sua vida útil ou devido à falta de manutenção adequada. A vida útil de uma construção ou de um elemento construtivo pode ser definida como “o período, depois de entrar em utilização, durante o qual todas as suas propriedades relevantes estão acima de níveis mínimos aceitáveis, considerando uma manutenção corrente” (ASTM E632-82, 1988).

Os aços estruturais geralmente aplicados nas construções possuem resistência ao escoamento de 250 a 350 MPa e são constituídos basicamente de ferro e carbono. Esses materiais em contato com o meio ambiente devem reagir e se transformarem em óxidos, hidróxidos ou outras formas semelhantes. Em ambientes siderúrgicos, alguns gases como o óxido de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x), gerados como subprodutos e na queima de combustíveis podem estar presentes na atmosfera e quando em contato com a água geram ácidos altamente corrosivos como ácido sulfúrico e nítrico, acelerando o processo de corrosão das estruturas metálicas. Sendo uma das manifestações patológicas mais comum nas estruturas, a corrosão pode ser definida como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos, que tende a diminuir a espessura das barras estruturais, podendo vir a comprometer seu comportamento (GENTIL, 2022).

No presente trabalho, pretende-se simular possíveis reduções de espessuras de uma estrutura de aço utilizada em uma indústria devido à corrosão em seus elementos, e avaliar a sua capacidade em suportar os esforços solicitantes considerando os estados limites últimos, além dos estados limites de serviço onde são verificados os deslocamentos da estrutura. A avaliação é feita com auxílio do software *Autodesk Robot Structural Analysis*.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a integridade de uma estrutura de aço em uso, utilizada para manutenção e operação de válvulas industriais de uma siderúrgica, por meio do levantamento de campo e modelamento computacional, considerando a capacidade de carregamento na condição de projeto e da estrutura afetada gravemente pela corrosão. Após a análise dos resultados, são propostas sugestões de adaptações e soluções de melhorias do projeto estrutural visando o prolongamento da vida útil da estrutura.

A estrutura inspecionada e utilizada para realização do estudo, está localizada em uma siderúrgica próximo a área de um alto-forno, é utilizado para manutenção e operação de válvulas e composta por quatro plataformas de trabalho nas seguintes elevações: 8450, 12000, 17650 e 22500mm de altura

1.2 Justificativas

Responsável pela redução da capacidade estrutural e caracterizada pela perda de espessura, a corrosão é a forma de deterioração predominante nas estruturas em aço e que gera perdas econômicas consideráveis, além de colocar em risco vidas de usuários de edificações e outras construções.

Neste contexto, a avaliação da integridade de estruturas de aço em uso que possam apresentar danos ou falhas, quando empregada de forma correta, pode proporcionar um equilíbrio entre redução de custos e a segurança operacional, auxiliando nas tomadas de decisões entre a substituição e ou reparo das estruturas corroídas.

Segundo Pannoni (2009), o custo da corrosão em países industrializados, tem sido estimado em 3,5% do seu PIB e que de 30 a 50% dessas perdas poderiam ser evitadas através da adoção de técnicas de controle da corrosão.

1.3 Metodologia

Para atingir os objetivos da pesquisa, a metodologia empregada constitui-se de:

- Revisão bibliográfica: corrosão atmosférica, proposição de adaptações e soluções visando a durabilidade das estruturas, Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Estudo de uma estrutura compondo-se de levantamento de campo através de sua inspeção;
- Modelagem da estrutura para a condição de projeto e para a condição corroída conforme levantamento de campo;
- Determinação das cargas e sobrecargas atuantes na estrutura e aplicação desses carregamentos nos modelos estruturais;
- Verificação dos fatores de trabalho dos componentes estruturais;
- Análise dos resultados.

Amplamente utilizado na indústria e disponível na versão estudantil, para o modelamento e simulação computacional das estruturas, é utilizado o *software Autodesk Robot Structural Analysis*.

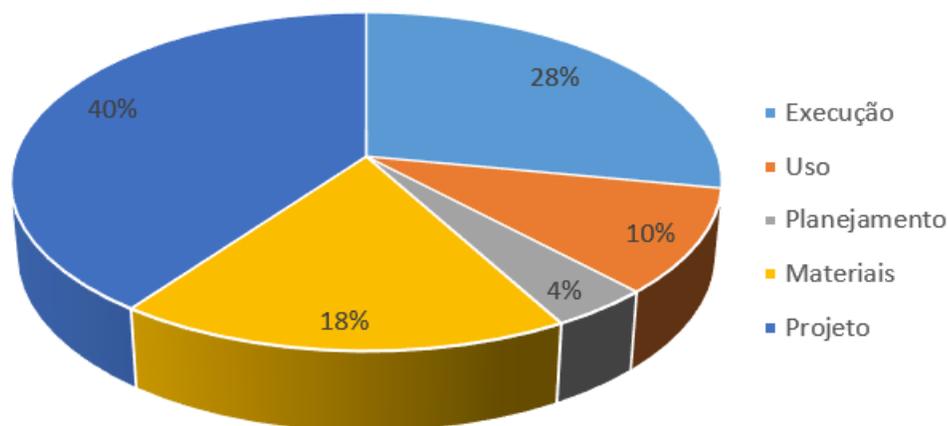
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado uma fundamentação teórica sobre alguns temas considerados chaves para um melhor entendimento do trabalho.

2.1 Patologia das estruturas em aço

A origem das falhas em estruturas pode estar relacionada a erros de projeto, execução, emprego de materiais impróprios e uso. Na Figura 1 indica-se essa distribuição evidenciando erros de projeto e execução como os principais responsáveis pela deterioração de uma estrutura antes do fim de sua vida útil.

Figura 1 - Origem das falhas



Fonte: Adaptado de HELENE (2003).

Segundo Caporrino (2018), patologia no contexto da engenharia civil é a ciência que estuda origens, formas de apresentação, aspectos e soluções de anomalias nas edificações, evitando que os elementos das construções deixem de atender requisitos mínimos para os quais foram projetados. Sendo assim, patologia é um termo mais amplo do que manifestação patológica, pois ela intenciona explicar a ocorrência de tudo que se relaciona com a degradação de uma edificação, enquanto que manifestação patológica é a expressão resultante dos mecanismos de degradação FRANÇA *et al.*, 2011).

O estudo das patologias das estruturas está ligado a pesquisa por suas origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Ripper e Souza (1998) ainda utilizam as expressões “patologia” e “problema patológico” para designar problemas físico-construtivos, os quais são motivados por falhas que podem ocorrer nas etapas de concepção, execução ou manutenção.

Nas estruturas em aço, as manifestações patológicas podem ser causadas por vários fatores, sendo os mais comuns as sobrecargas, variações térmicas, variações de umidade, água (vapor, líquida, sólida), agentes da atmosfera, agentes incorporados, materiais, infestações biológicas e operações de transporte (CÂNDIDO, 2005).

De forma geral, as manifestações patológicas das estruturas de aço podem ser divididas em três categorias conforme descrito a seguir (DAL'BÓ, SARTORTI 2012).

- Adquiridas - São provenientes da ação de elementos externos, como: meios corrosivos, atmosfera poluída, incêndios, vibrações, dentre outros. São resultantes, em geral, de problemas relacionados com a falta de preparo inicial da estrutura ou de manutenção. É o típico caso de estrutura que não consegue se adaptar à ação do agente patológico, sendo a corrosão a mais frequente e visível delas.
- Transmitidas - São originárias de vícios ou desconhecimento técnico do pessoal de fabricação ou montagem da estrutura ou da construção civil. Citam-se como exemplos os casos de falta de prumo, as soldas sobre superfícies pintadas ou corroídas sem limpeza adequada e a não utilização ou a má aplicação de material vedante como o mastique em juntas sujeitas a infiltração.
- Atávicas - São resultantes da má concepção de projeto, erros de cálculo, escolha de perfis ou chapas de espessura inadequada e do uso de tipos de aço com resistências diferentes das consideradas em projeto. Muitas vezes comprometem

a segurança e funcionalidade da estrutura e estão relacionadas com o descuido, cobiça ou economia, sendo difíceis de serem reparadas e normalmente exigem recuperação de alto custo.

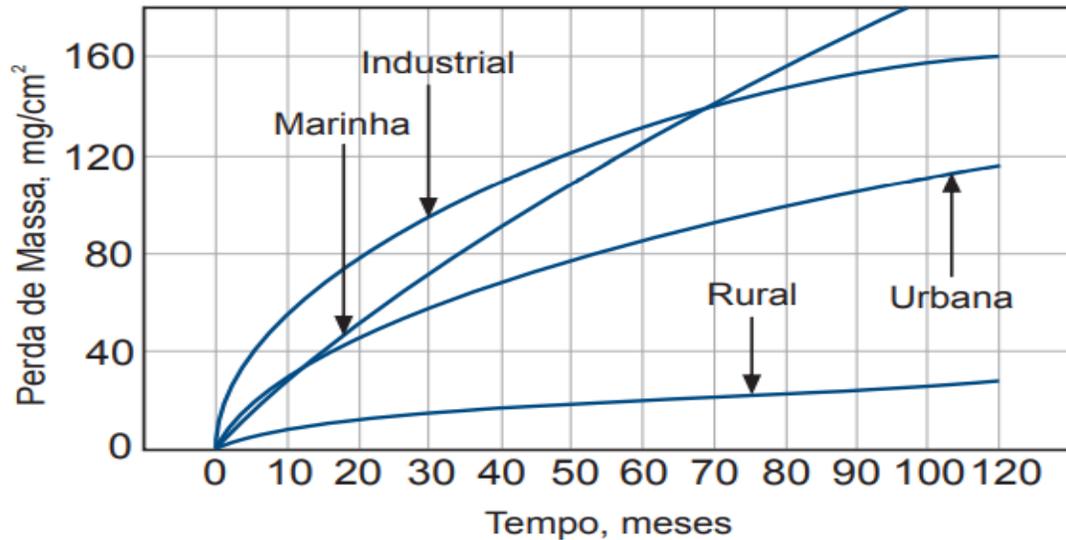
2.1.1 Corrosão das estruturas de aço

Dentre as várias manifestações patológicas que podem afetar as estruturas em aço, a mais comum é a corrosão. Considerada como sendo resultante de reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas onde ocorre o deslocamento de elétrons do eletrodo em que há corrosão (anodo) para o eletrodo que recebe os elétrons (catodo), dentro de uma substância condutora (eletrólito), mediante a existência de uma ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons. Seu principal efeito em estruturas de aço é a perda de massa levando a seções mais finas e, conseqüentemente, a redução do desempenho estrutural (GENTIL, 2022).

Gentil (2022) cita como os meios corrosivos mais frequentemente encontrados, o meio atmosférico, águas naturais, solo, produtos químicos, substâncias fundidas, solventes orgânicos, madeiras e plásticos, sendo a atmosfera, água e o solo os maiores responsáveis pela corrosão das estruturas em aço. A corrosão atmosférica é um processo complexo que depende das interações de múltiplos fatores, como a umidade relativa, temperatura, poluente e vento (RIPPER; SOUZA, 1998).

Em ambientes industriais, a perda de massa de elementos de aço devido ao processo de corrosão é acelerada, o que é devido a atmosfera poder conter eletrólitos diversos e umidade relativa elevada, além da presença de gases como dióxido de enxofre, SO₂, e o trióxido de enxofre, SO₃, em razão da queima de combustíveis, conforme mostra-se no gráfico da Figura 2. Esses gases formam com a umidade presente no ar, respectivamente, os ácidos sulfúrico e sulfídrico, justificando o fato das atmosferas industriais serem bastante corrosivas (FONTANA, 1987).

Figura 2 - Perda de massa de um aço ASTM A36



Fonte: MOHANNAD *et al.* (2018).

A norma ISO 9223:2012 classifica a corrosividade segundo o ambiente em seis níveis como mostra-se na Tabela 1 (ISO, 2012). Fortemente poluídos, os ambientes industriais podem ser classificados na categoria C4, onde os níveis de corrosividade são considerados altos.

Tabela 1 - Diferentes categorias de corrosividade com base na ISO 9223:2012

Categoria	Corrosividade	Ambientes atmosférico Típico
C1	Muito Baixo	Ambientes secos ou fria com poluição muito baixa
C2	Baixo	Ambientes com baixa poluição (SO_2 ($\mu g/m^3$) < 5) Áreas rurais
C3	Médio	Ambiente com média poluição ($5 < SO_2$ ($\mu g/m^3$) < 30) Áreas urbana e costeiras com baixa concentração de cloreto e com baixa poluição
C4	Alto	Ambientes com alta poluição ($30 < SO_2$ ($\mu g/m^3$) < 90) Áreas urbanas poluídas, industriais, costeira sem pulverização de água salgada
C5	Muito Alto	Ambientes com alto nível de poluição ($90 < SO_2$ ($\mu g/m^3$) < 250) Altas taxas de deposição de cloretos, áreas industriais e marítimas
CX	Extremo	Ambientes subtropicais e tropicais com níveis muito alto de depósitos de SO_2 (SO_2 ($\mu g/m^3$) > 250) Incluindo fatores de produção com alta concentração de cloreto, por Área industrial, áreas costeiras e contato com névoa salina

Fonte: ISO (2012).

2.1.2 Ação corrosiva da atmosfera

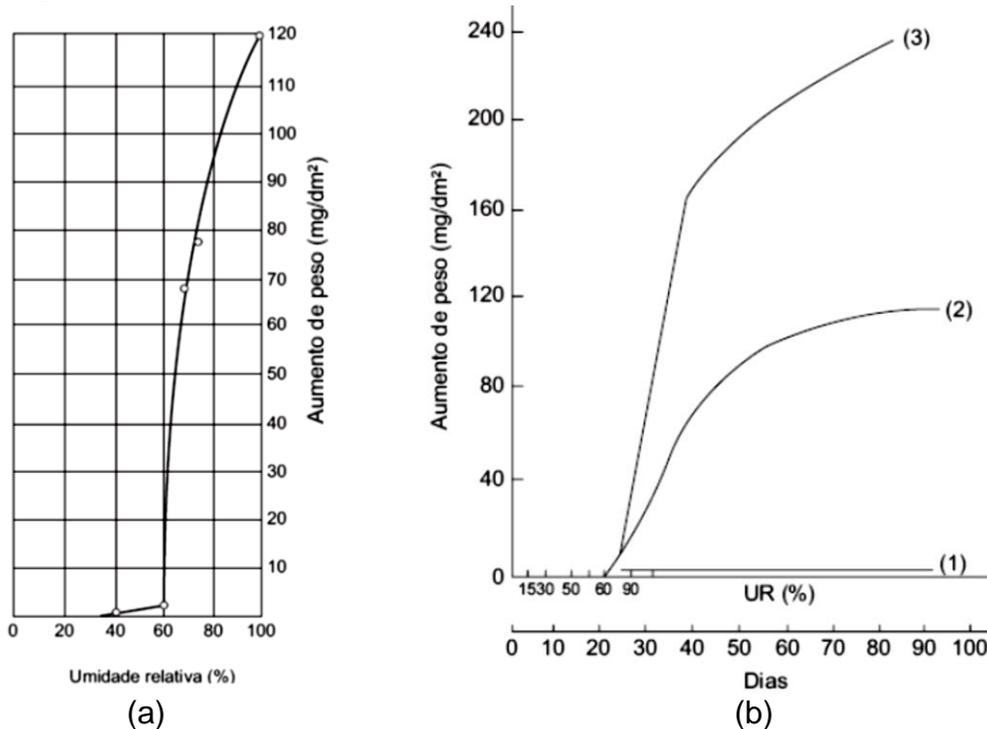
A ação corrosiva da atmosfera depende de alguns fatores, como a umidade relativa, substâncias poluentes, temperatura e tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica (GENTIL, 2022).

2.1.2.1 Umidade relativa do ar

Expressa em porcentagem, a umidade relativa é a relação entre o teor de vapor d'água encontrado no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo, nas condições consideradas ou pela pressão parcial de vapor no ar e a pressão de vapor saturado na mesma temperatura. Em ambientes com baixa umidade, o ferro quase não sofre corrosão, porém, com umidade relativa acima de 70%, o processo corrosivo é acelerado. Na Figura 3 (a) mostra-se a corrosão do ferro em função da umidade relativa da atmosfera contendo 0,01% de dióxido de enxofre (SO_2) durante 55 dias de exposição.

A ação corrosiva é mais severa quando se tem carvão finamente dividido e dióxido de enxofre, a Figura 3 (b) mostra esta ação conjunta: a curva (1) representa a presença de carvão, a curva (2) representa a presença de dióxido de enxofre e a curva (3) representa a ação conjunta de carvão e dióxido de enxofre (GENTIL, 2022).

Figura 3 - Influência do dióxido de enxofre e carvão na ação corrosiva



Fonte: GENTIL (2022).

2.1.2.2 Substâncias poluentes

Gentil (2022) cita como substâncias poluentes os particulados e os gases. Sob a forma de poeira, as partículas se tornam mais corrosivas devido ao depósito de material não metálico como a sílica, de substâncias que retêm umidade, de sais que são eletrólitos fortes, materiais metálicos de natureza química diferente e de partículas sólidas que, embora inertes para o material metálico, podem reter sobre a superfície metálica gases corrosivos existentes na atmosfera, que é o caso de partículas de carvão que, devido ao seu grande poder de adsorção, retiram gases da atmosfera industrial, que, com a umidade, formam substâncias corrosivas como, por exemplo, ácidos sulfúrico, nítrico e sulfídrico).

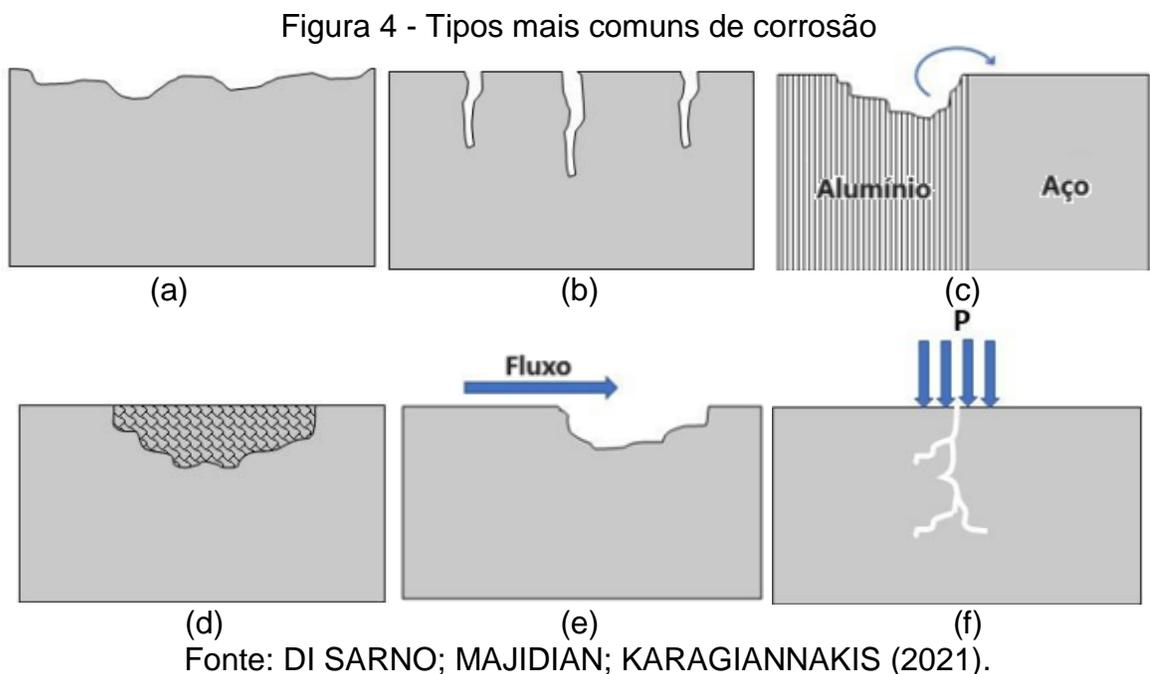
Já os gases, além dos constituintes na atmosfera como oxigênio e nitrogênio a depender do tipo de indústria e os combustíveis utilizados, pode-se encontrar o monóxido de carbono, CO; dióxido de carbono, CO₂; ozônio, O₃; dióxido de enxofre, SO₂; trióxido de enxofre, SO₃; monóxido de nitrogênio, NO; dióxido de nitrogênio, NO₂; e, em áreas mais

localizadas, gás sulfídrico, H_2S ; amônia, NH_3 ; cloreto de hidrogênio, HCl ; fluoreto de hidrogênio, H_2F_2 ; e cloro, Cl_2 .

Outros fatores que podem influenciar na corrosão atmosférica são a temperatura, o tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica, os ventos, as variações cíclicas de temperatura e umidade e a insolação.

2.1.3 Classificação da corrosão

Para Di Sarno, Majidian e Karagiannakis (2021), podem existir várias abordagens para classificar a corrosões, sendo a mais usual classificá-las pelo tipo de aparência, algumas podendo ser visuais e outras não. Os tipos mais comuns de ataque corrosivo nas estruturas de aço são mostrados na Figura 4: (a) uniforme; (b) por pites; (c) galvânica; (d) intergranular; (e) erosão; (f) sob tensão.



2.1.3.1 Corrosão uniforme

Este tipo de corrosão ocorre em toda extensão da superfície exposta ao meio corrosivo, quando sem o emprego de uma proteção adequada e devido à falta de manutenções preventivas. As superfícies são tomadas por uma fina camada de óxido pouco aderente e pode causar perda gradual de espessura nos elementos estruturais. É o tipo mais comum de corrosão e surge principalmente nas estruturas exposta a atmosfera e podem ser agravadas por erro de projeto (GENTIL, 2022). A Figura 5 indica peças em aço carbono estocadas de maneira incorreta, expostas a atmosfera e sem proteção adequada e são bons exemplos de materiais que podem sofrer este tipo de ataque.

Caracterizada pela perda de espessura do metal corroído, a velocidade da corrosão uniforme é, em geral, expressa em termos da perda de massa por unidade de área e por unidade de tempo, ou, ainda, pela perda de espessura do metal em função do tempo (PANNONI, 2011).

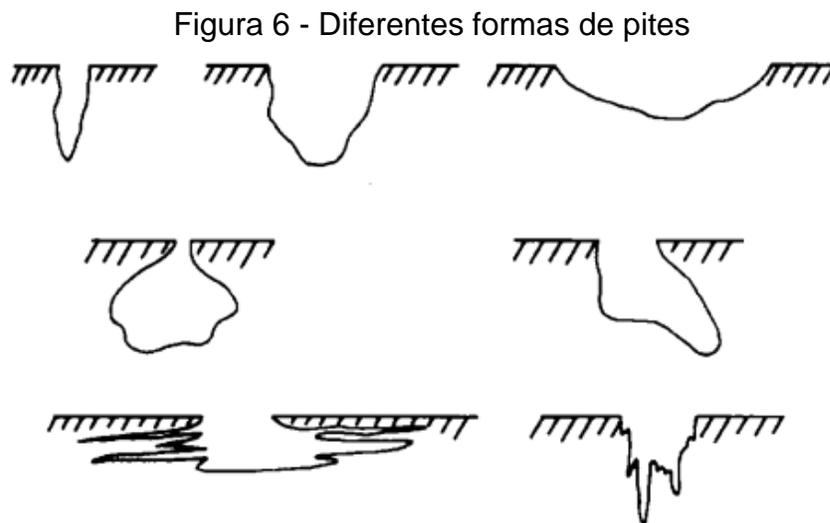
Figura 5 - Corrosão uniforme



Fonte: Fonte: RIBAS (2006).

2.1.3.2 Corrosão por pites

A corrosão por pites é uma forma localizada de corrosão, que se processa em pontos ou em pequenos furos em áreas bem determinadas na superfície metálica (DI SARNO; MAJIDIAN; KARAGIANNAKIS, 2021). Gentil (2022) caracteriza os pites como sendo cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o diâmetro. A Figura 6 apresenta algumas formas de pites.

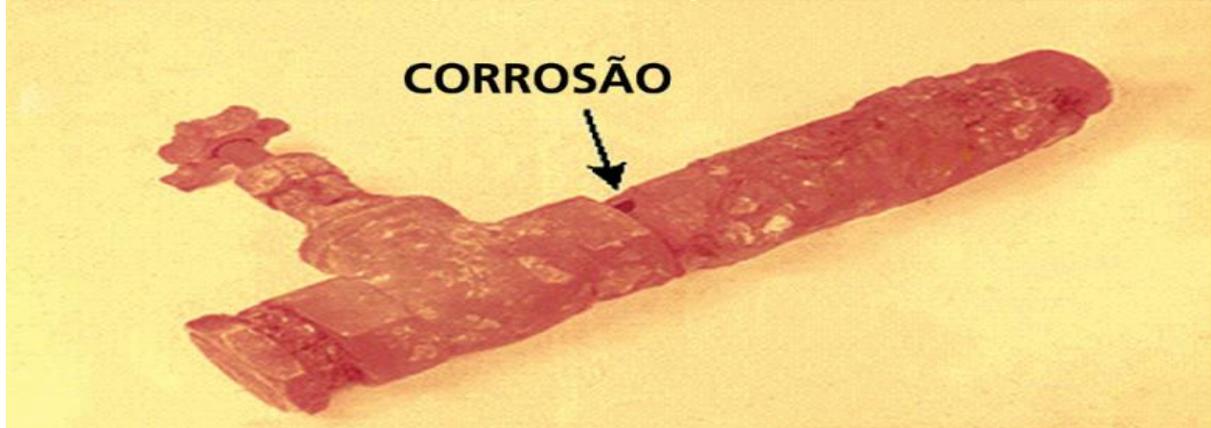


Fonte: ASTM (2005).

2.1.3.3 Corrosão galvânica

A corrosão galvânica ocorre quando existe o contato entre materiais com diferentes potenciais corrosivos e quanto maior essa diferença de potencial eletroquímico entre os materiais, mais intenso será a corrosão. A relação entre as áreas catódicas e anódica deverá ser a menor possível, como exemplo, o contato do aço inoxidável com o cobre, por serem metais cujos potenciais eletroquímicos são próximos, não propicia a formação de corrosão galvânica (GENTIL, 2022). Como exemplo, a Figura 7 indica o contato de um tubo de aço carbono com uma válvula em latão já com início do processo de corrosão devido a materiais com diferentes potenciais eletroquímico.

Figura 7 - Corrosão galvânica

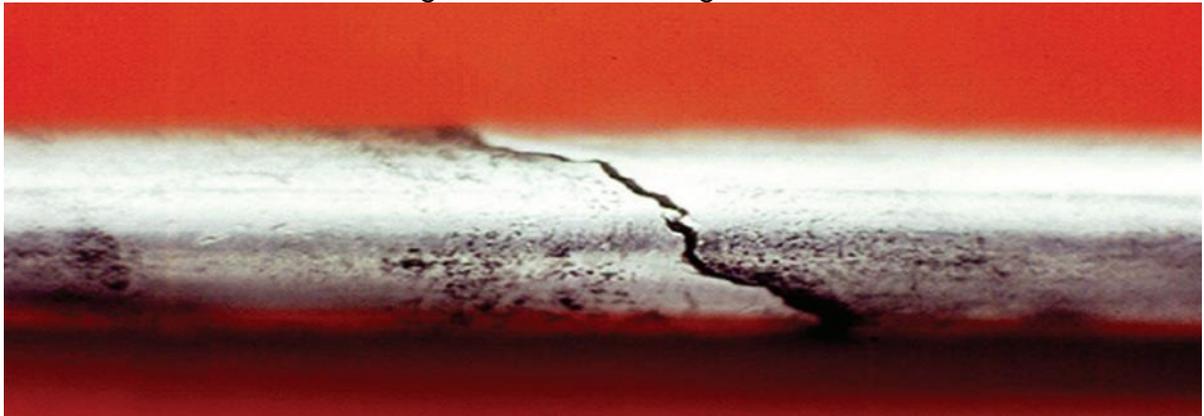


Fonte: OLIVEIRA (2012).

2.1.3.4 Corrosão intergranular e intragranular

É o tipo de corrosão que ocorre entre os contornos de grãos e afetam a propriedades mecânicas dos materiais, são imperceptíveis e necessitando de técnicas mecanográficas para sua identificação (DI SARNO; MAJIDIAN; KARAGIANNAKIS; 2021). A corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material que perde propriedade mecânica, podendo vim a fraturar devido as solicitações tendo-se então a corrosão sob tensão fraturante como indicado no tubo de INOX AISI304, Figura 8.

Figura 8 - Trinca intergranular

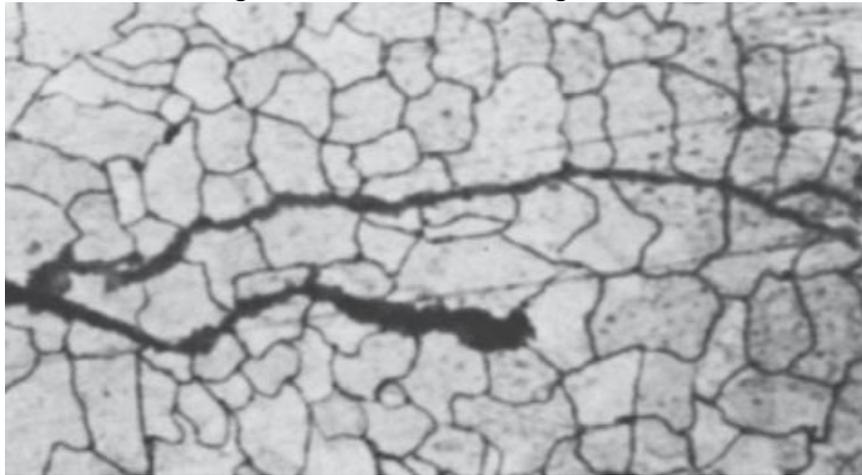


Fonte: OLIVEIRA (2012).

Assim como a corrosão intergranular, a corrosão intragranular faz com que o material perca suas propriedades podendo levar ao colapso quando submetido a uma solicitação

mecânica, ela surge em forma de trincas que se propagam e se ramificam pelo interior dos grãos (GENTIL, 2022). A Figura 9 indica uma trinca devido a corrosão intragranular em um aço inoxidável submetido a ação de cloreto e alta temperatura.

Figura 9 - Corrosão intragranular



Fonte: GENTIL (2022).

2.1.3.5 Corrosão por erosão

Este tipo de corrosão está associado ao escoamento de fluidos com velocidade relativamente alta sobre a superfície metálica, podendo ocorrer a remoção da camada de proteção e acelerar o processo de corrosão (DI SARNO; MAJIDIAN; KARAGIANNAKIS, 2021). Segundo Ribas (2020) os principais tipos de corrosão associada a este escoamento de fluido podem ser a corrosão-erosão, a corrosão com cavitação e a por turbulência.

2.1.3.6 Corrosão sob tensão

Para Gentil (2022) quando os materiais são submetidos a tensões de tração de intensidade superior a um determinado valor limite e em contato com um meio corrosivo, pode acontecer a corrosão sob tensão. Neste tipo de corrosão são formadas trincas intergranulares, que surgem quando a direção preferencial para corrosão é o contorno dos grãos devido à possível existência de segregações ou à precipitação de segundas

fases nesses contornos. Até atingirem dimensões críticas para uma ruptura, as trincas por corrosão sob tensão têm a sua propagação lenta.

2.2 Projeto de estruturas visando a durabilidade

Embora a corrosão esteja diretamente relacionada ao meio em que as estruturas são instaladas, a concepção do projeto inadequado pode criar condições que favoreçam seu aparecimento e acelerar a degradação das estruturas em aço. Para Pannoni (2009) os projetistas devem considerar o detalhamento anticorrosivo logo no início do projeto. Sendo assim, as estruturas projetadas de modo que a corrosão não se estabeleça em um local particular de onde possa se espalhar. As estruturas devem ser o mais simples possível e projetadas de modo a facilitar o preparo da superfície, pintura, inspeção, manutenção, levando em consideração a acessibilidade, geometria, compatibilidade dos materiais empregados, a soldagem e a sua superfície.

Além disso, a durabilidade de uma estrutura de aço está diretamente ligada à correta escolha e aplicação do sistema de pintura além do adequado detalhamento do projeto.

2.2.1 Acessibilidade

A norma para projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto para edifícios, a ABNT NBR 8800:2008, sugere que todas as superfícies pintadas devem ser visíveis e acessíveis por meios seguros de forma a permitir a realização de inspeções e manutenções preventivas, podendo ser por meio de instalação de passarelas e plataformas. Componentes inacessíveis após a montagem e que estejam sujeitos a corrosão severa, deve possuir um sistema de revestimento efetivo por toda a vida útil da estrutura, podendo ainda ser aplicada uma sobre espessura de forma alternativa.

Pannoni (2009) cita algumas boas práticas em acessibilidade que sempre que possível devem ser atendidas na concepção dos projetos.

- a) Todas as precauções especificadas no projeto para controle da corrosão devem ser inspecionáveis e reparáveis com facilidade;
- b) A manutenção da pintura deve requerer o menor tempo para sua execução possível;
- c) Os projetos devem ser de fácil execução, limpeza, manutenção, preparo superficial e de baixo custo;
- d) Componentes sujeitos à corrosão não devem ser instalados em pontos inacessíveis tanto quanto possível;
- e) Sempre que houver obstruções para manutenção, as estruturas devem ser divididas em partes menores de modo que seja possível a realização das operações de manutenção.

A Figura 10 indica uma estrutura de cobertura em que o acesso para inspeção e manutenção é muito dificultado devido à inexistência de espaço para trabalho entre os componentes.

Figura 10 - Estrutura com difícil acesso



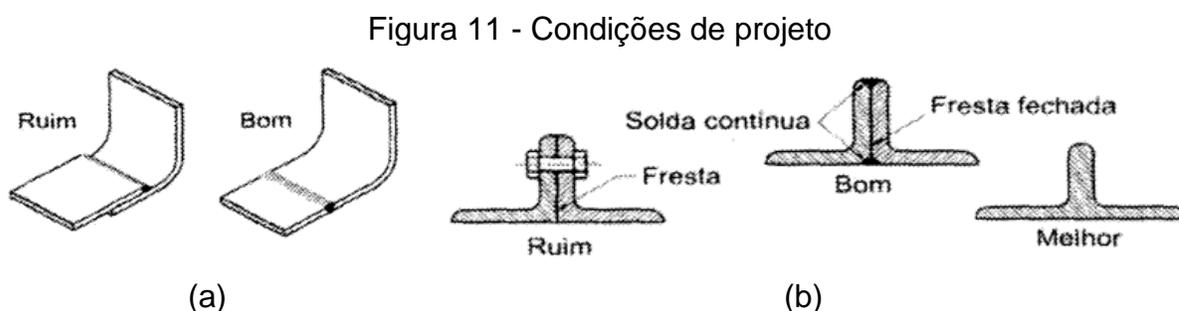
Fonte: PANNONI (2009).

2.2.2 Geometria

Os projetistas das estruturas devem optar por projetos simples, devendo a complexidade excessiva ser evitada sempre que possível. As definições das geometrias dos componentes estruturais devem ser avaliadas em conjunto e não de forma isolada, e, além disso, condições que gerem grandes tensões residuais, gradientes de temperatura, grandes diferenças de seções estruturais devem ser evitadas, a limpeza e o tratamento anticorrosivo deve ser facilitada tanto internamente quanto externamente na montagem e durante o uso (PANNONI, 2009).

Para Genecco, Mariano e Fernandes (2003), as superfícies expostas aos meios corrosivos devem possuir pequena extensão, irregularidades como sobreposição, cantos e arestas vivas devem ser evitadas (Figura 11 (a)), as juntas preferencialmente ser soldadas ao invés de parafusadas ou rebitadas (Figura 11 (b)). Estas condições geométricas são pontos potenciais para o ataque corrosivo devido à retenção de umidade e sujeira podendo ser evitadas com a selagem.

Na maior parte dos ambientes corrosivos, a fresta pode ser preenchida com um calço de aço que se projeta do perfil e é soldado em toda sua volta. Superfícies de acoplamento podem ser seladas por solda contínua, para evitar o armazenamento de abrasivos e penetração de umidade.

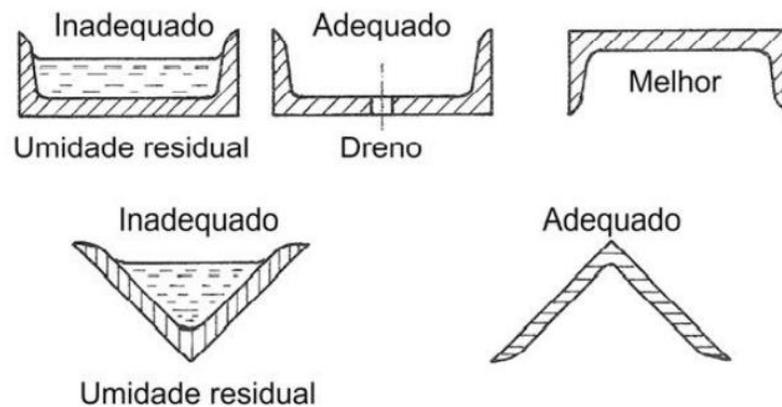


Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

Condições geométricas superficiais que retenham eletrólitos, onde a água possa se acumular, aumentam a tendência à corrosão e podem ser prevenidos. Levando em

consideração o projeto de superfícies inclinadas ou chanfradas, eliminando seções abertas no topo, projetando dispositivos que possam permitir a drenagem da água e de líquidos corrosivos para fora da estrutura, conforma e norma ABNT NBR 8800 (2008). A Figura 12 ilustra algumas dessas precauções com a disposição de componentes que podem promover ou não o acúmulo de água.

Figura 12 - Disposição dos componentes



Fonte: PANNONI (2009).

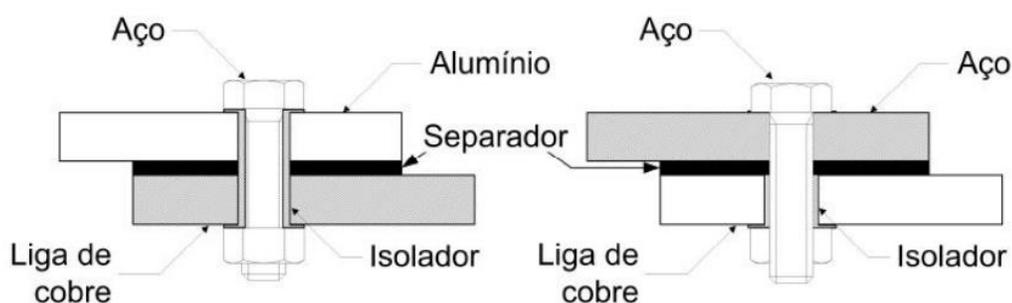
2.2.3 Compatibilidade

Ponto de extrema importância, muitas vezes esquecido na concepção dos projetos, é a compatibilidade dos materiais empregados, pois estruturas complexas e localizadas em ambientes corrosivos utilizam diferentes tipos de ligas metálicas. Para Pannoni (2009) a influência entre os materiais empregados deve ser avaliada antes que a decisão final do projeto seja tomada. Os componentes não ficam isolados e quando uma junção elétrica acontece entre duas ligas de diferentes potenciais eletroquímicos em condição de exposição contínua ou periódica à umidade (eletrólito), uma aceleração da velocidade de corrosão da liga menos nobre pode acontecer.

Segundo a norma ABNT NBR 8800:2008, se o projeto for aplicado em atmosferas agressivas e de modo que a junção galvânica não possa ser evitada, o contato elétrico entre as superfícies deve ser desfeito, por exemplo, por meio da isolamento elétrica (uso de

dielétricos, como polímeros orgânicos), ou ainda por meio da pintura das superfícies de ambas as ligas. Se somente for possível pintar uma das ligas adjacentes à junção, a pintura deve ser aplicada no componente mais nobre. A Figura 13 indica formas de se aplicar a separação elétrica quando houver emprego de materiais de diferentes potenciais elétricos.

Figura 13 - Separação elétrica entre materiais com potenciais elétricos muito distintos



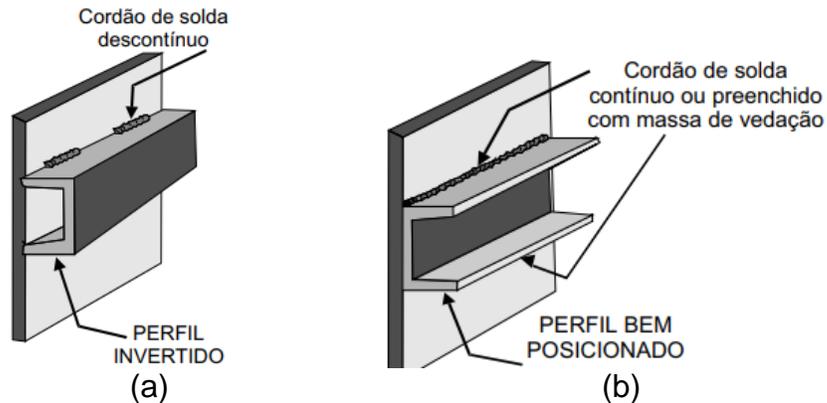
Fonte: PANNONI (2009).

2.2.4 Soldagem

A soldagem dos componentes estruturais pode ter grande influência no processo e controle da corrosão. As soldas devem ser livres de descontinuidades e imperfeições que dificultem a aplicação da proteção anticorrosiva e contínua, soldas com cordões intermitentes pode reter sujeira e água. A Figura 14 (a) indica uma solda descontinua em um perfil tipo C que favorece a corrosão por fresta e um difícil acesso para pintura, e na Figura 14 (b) é indicada uma solda contínua e o perfil disposto de maneira que tenha fácil acesso (PANNONI, 2009).

Pannoni (2009) cita ainda que, devido à alta capacidade de absorção de umidade pela escória liberada pelo eletrodo, a não remoção desse composto compromete o sistema de pintura que não atingirá a durabilidade estimada.

Figura 14 - Detalhe de solda descontínua e contínua



Fonte: GENECCO; MARIANO; FERNANDES (2003).

2.2.5 Superfícies

Condições superficiais como ilustrado na Figura 15 em que a água pode se acumular ou ficar retida, bem como a inclusão de materiais estranhos como sujeiras, aumentam a condição corrosiva. Algumas precauções devem ser tomadas pelo projetista, das quais Genecco, Mariano e Fernandes (2003) citam:

- a) Desenhos devem mostrar superfícies inclinadas ou chanfradas;
- b) Seções abertas no topo ou arranjo em uma posição inclinada favorável ao acúmulo de umidade devem ser eliminadas;
- c) Bolsas e reentrâncias nas quais a água e sujeira podem ficar retidas devem ser evitadas;
- d) Drenos que conduzam a água e líquidos corrosivos para fora da estrutura devem ser indicados.

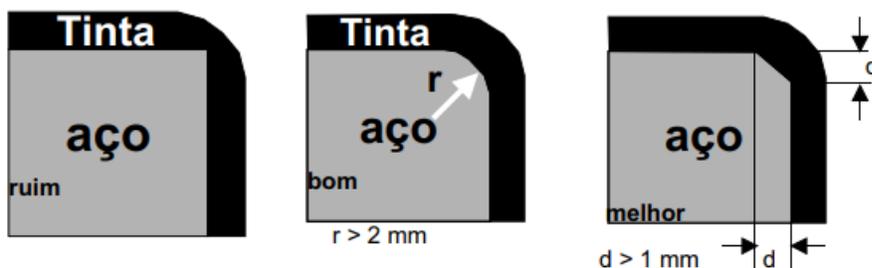
Figura 15 – Condição superficial que facilitam o acúmulo de material



Fonte: PANNONI (2009).

Em superfícies em ângulo, para permitir uma uniformidade do sistema de pintura, são sugeridos contornos arredondados. As arestas com cantos vivos recebem uma camada de tinta menos espessa do que aquela depositada em uma superfície plana devido a tensão superficial da tinta e conseqüentemente o revestimento aplicado apresentará menor resistência aos danos mecânicos (PANNONI, 2009). A Figura 16 ilustra condições superficiais de aresta desfavoráveis e favoráveis ao sistema de proteção.

Figura 16 – Condição de arestas



Fonte: GENECCO; MARIANO; FERNANDES (2003).

2.3 Projeto estrutural

O projeto estrutural se constitui de todos os aspectos gerais, tais como locação, desenhos e todos os detalhes necessários para a sua construção e tem como objetivo a concepção de uma estrutura que atenda a todas as necessidades para as quais ela será construída, satisfazendo condições de segurança, de utilização, econômicas, estéticas, ambientais, construtivas e legais. São inúmeras e muito complexas as etapas de um projeto estrutural, e entre elas está a previsão do comportamento da estrutura de tal forma que

ela possa atender satisfatoriamente às condições de segurança e de utilização para as quais foi concebida (MARTHA, 2017).

Quanto à análise estrutural, Martha (2017) define como sendo a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos da estrutura. De maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das tensões correspondentes, bem como a determinação dos deslocamentos e as correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada. Essa análise deve ser realizada para os possíveis estágios de carregamentos e solicitações que devem ser previamente determinados.

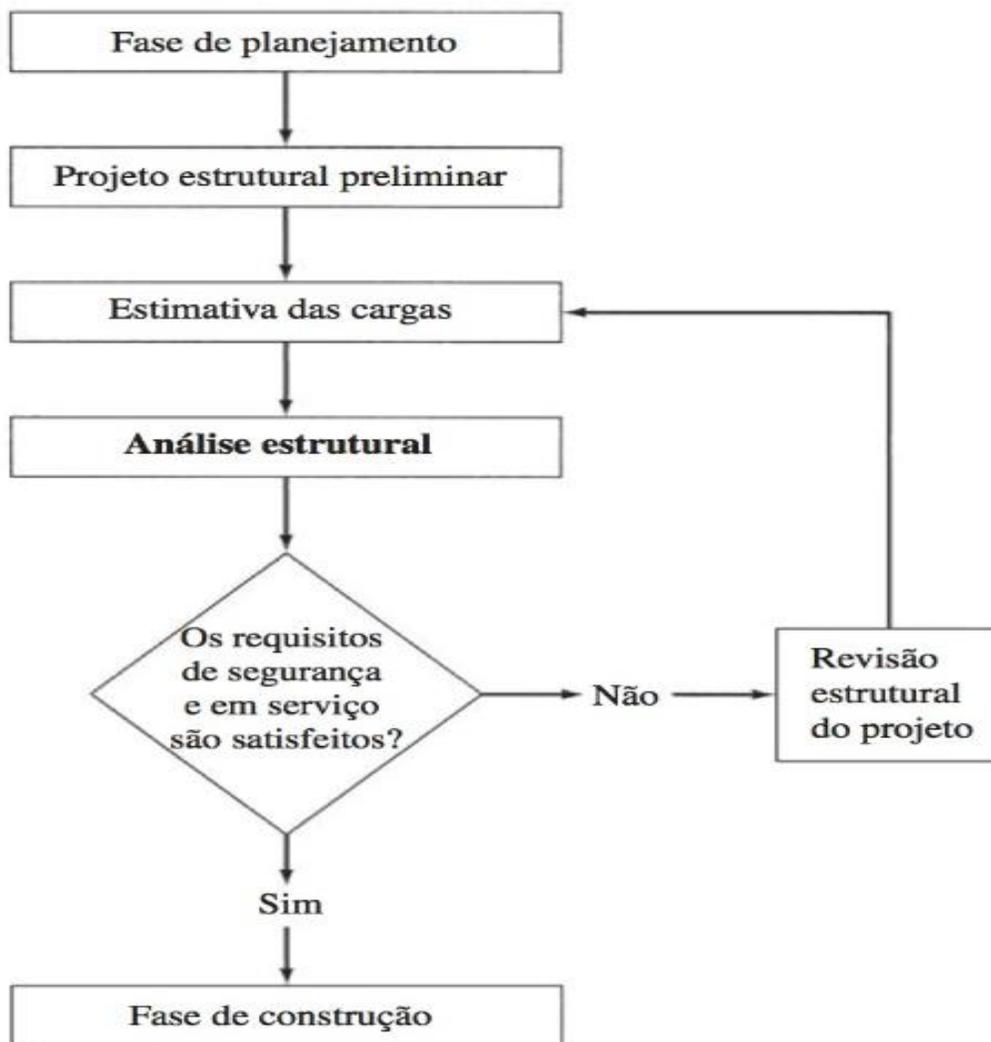
Fase crucial do projeto, no planejamento são definidos os requisitos funcionais das estruturas, arranjo geral, dimensões, normas de projeto e requer um grande conhecimento das práticas de construção e do comportamento das estruturas, devem ser levados em consideração os possíveis tipos de estruturas e materiais.

Baseados em experiências passada e normas aplicáveis, no projeto estrutural preliminar, as dimensões dos elementos estruturais são estimadas e utilizados na fase seguinte para estimar o peso da estrutura. Na fase da estimativa de carga, são determinadas as possíveis cargas que devem agir sobre a estrutura como peso próprio, sobrecargas, vento etc. Já na análise estrutural, os valores das cargas são definidos com base no projeto e normas aplicáveis, são utilizadas com objetivo de determinar as tensões e deslocamentos nos elementos estruturais.

Atendendo todos os requisitos de segurança e as normas de projeto, passa-se para fase de construção, onde são elaborados todos os desenhos detalhados e especificações técnicas, caso contrário, as dimensões dos elementos devem ser revistas e a análise estrutural repetida até que os resultados sejam satisfeitos (KASSIMALI, 2016).

Kassimali (2016) propõe o fluxograma mostrado na Figura 17 para um projeto típico de engenharia estrutural com as várias fases do projeto.

Figura 17 - Fluxograma da fase de um projeto estrutural



Fonte: KASSIMALI (2016).

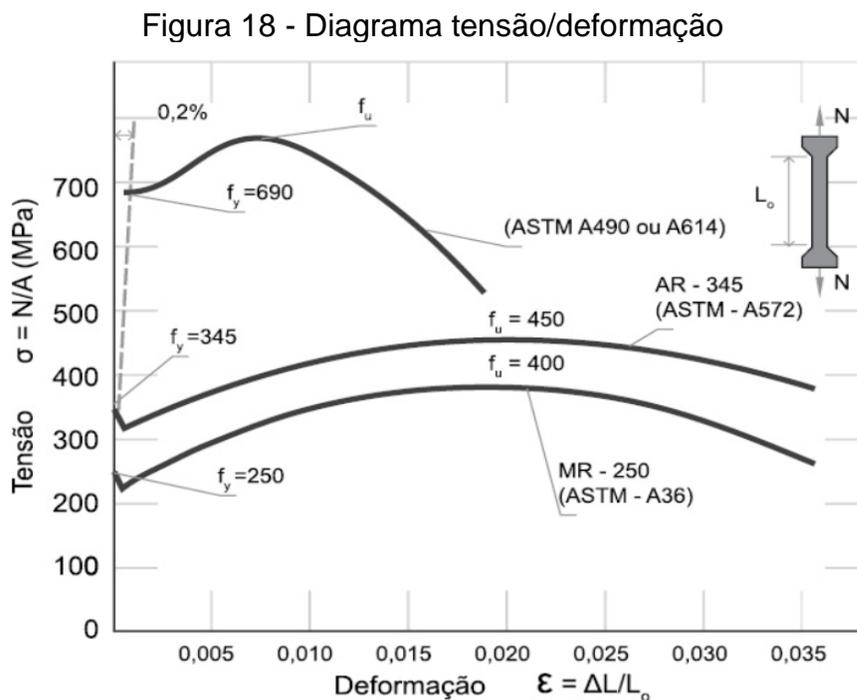
2.3.1 Materiais

Com alta resistência mecânica, o aço possui inúmeras vantagens na sua utilização nos processos de construção. Muito empregado na indústria, as estruturas em aço possuem melhores condições para vencer grandes vãos com a utilização de perfis de menores dimensão e peso, além da facilidade no transporte, manuseio e montagem.

Segundo Fakury, Silva e Caldas (2016), os aços empregados na concepção das estruturas devem possuir propriedades mecânicas adequadas para utilização em peças submetidas a tensões e deformações, devem ter nível apropriado de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, soldabilidade e um padrão mínimo de resistência à corrosão no que se refere à durabilidade.

As propriedades mecânicas do aço estrutural são determinadas a partir de ensaios padronizados, como o ensaio de tração, em que a curva tensão-deformação é obtida tracionando-se um corpo de prova padrão até a ruptura. A Figura 18 mostra essas curvas para três materiais muito empregados nos projetos de estrutura em aço. O limite de escoamento (f_y) indica final do comportamento elástico do material, e é bem caracterizado nos aços de baixo teor de carbono (ANDRADE; VELLASCO, 2016).

A norma ABNT NBR 8800 (2008) especifica que perfis, barras e chapas possuam resistência ao escoamento máxima de 450 MPa e que a relação entre resistências à ruptura (f_u) e ao escoamento (f_y) não seja inferior a 1,18.

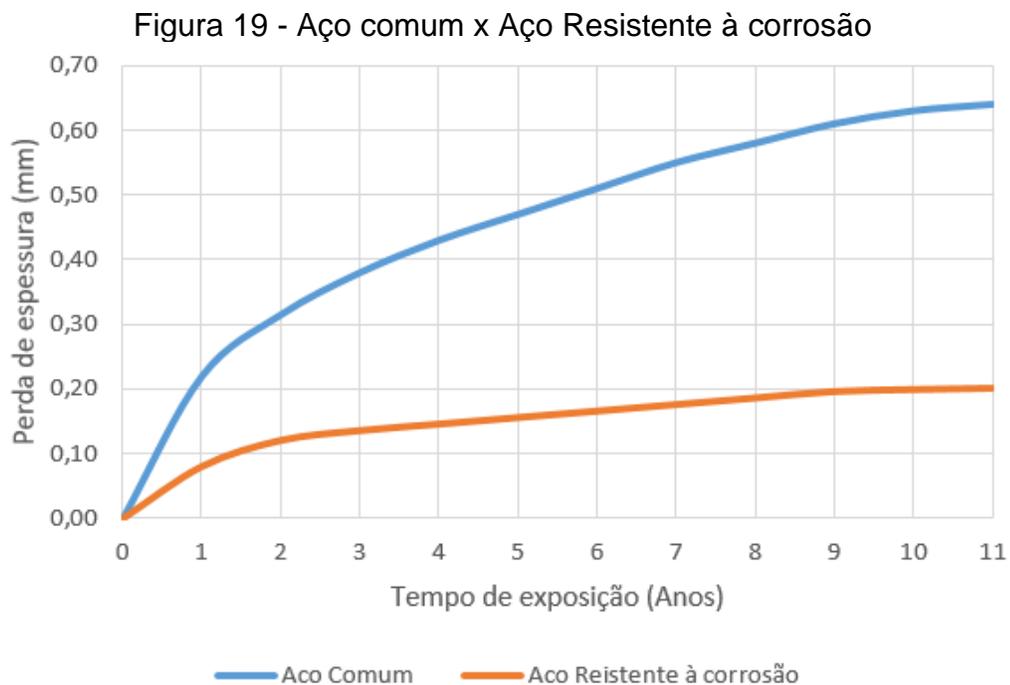


Fonte: ANDRADE; VELLASCO (2016).

Quanto à composição química, os aços estruturais podem ser classificados em aço carbono, de baixa liga e resistente a corrosão atmosférica.

Os aços carbono são liga de ferro e carbono com pequenas quantidades de silício (Si), manganês (Mn), enxofre (S) e fósforo (P), e apresentam média resistência mecânica, já os aços de baixa liga possuem alta resistência mecânica. Além dos elementos contidos no aço carbono, podem conter em sua composição química o cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo), entre outros. Os aços carbono resistentes à corrosão contêm em sua composição o cobre (Cu), cromo (Cr) e níquel (Ni) em porcentagens adequadas, que propiciam a formação de uma película de óxidos que adere às superfícies expostas à atmosfera e funcionam como proteção anticorrosiva. Estes aços também são conhecidos como patináveis. Não são, no entanto, imunes a corrosão, mas apresentam uma perda de espessura com o tempo bastante inferior aos aços carbono e de baixa liga (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016).

A Figura 19 apresenta a perda de espessura em (mm) em função do tempo (anos) de um aço comum e de outro resistente à corrosão.



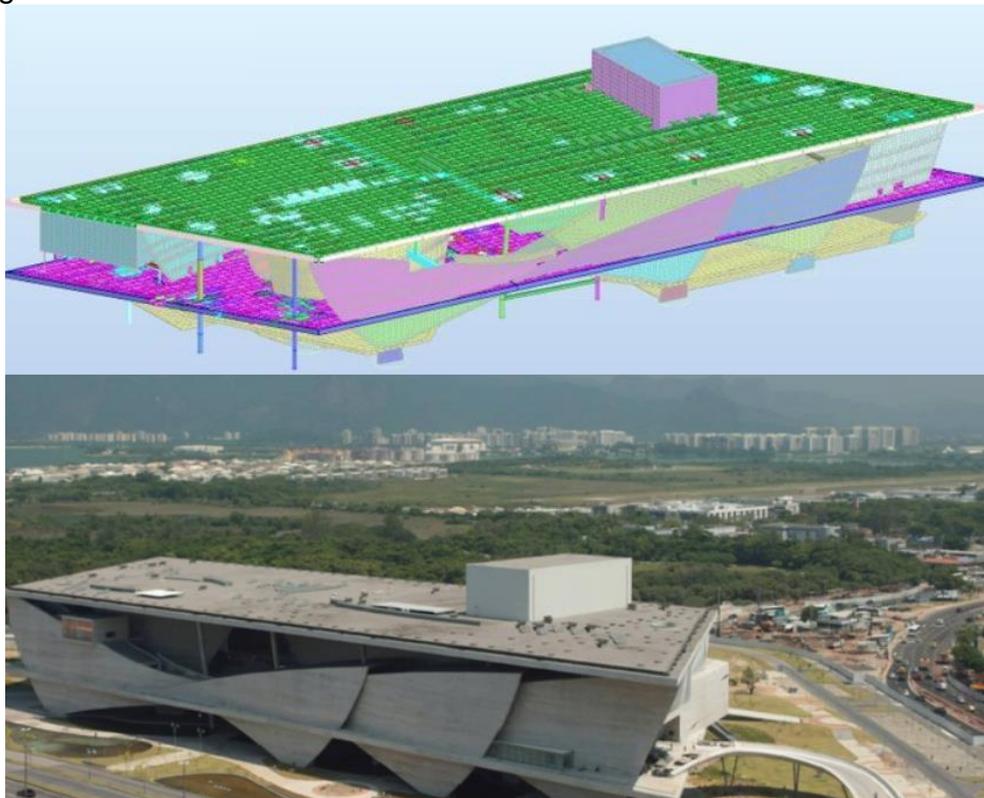
Fonte: Adaptado de FAKURY; SILVA; CALDAS (2016).

2.4 Software Robot Structural Analysis

O *Robot Structural Analysis* é um *software* com ênfase na análise estrutural através do método dos elementos finitos, amplamente utilizado na indústria na concepção de grandes projetos, podendo ser de estruturas metálicas, concreto ou madeira. O *software* possui em seu banco de dados normas para cálculo estrutural de diversos países que permite a análise das mais complexas e atípicas estruturas como mostra-se na Figura 20 (FERNANDES, 2022). Na versão de 2023 já é possível encontrar a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008.

Com uma interface 3D, fácil e intuitiva, o ROBOT permite a modelagem no seu próprio ambiente ou a importação de modelos de outros *softwares* CAD, por meio de fluxos de trabalho integrados ao *Building Information Modeling* (BIM), possibilitando a análise de possíveis interferências em projetos multidisciplinares.

Figura 20 - Cidade da Música - RJ - Modelo estrutural simulado no ROBOT



Fonte: AUTODESK (2022).

O *software Robot Structural Analysis* possibilita que o projeto seja estruturalmente sólido antes da construção da estrutura. Durante todo o processo de projeto, é possível prever o efeito das cargas aplicadas e ajustar o projeto para corrigir quaisquer problemas. Com os resultados da análise, é possível verificar e ajustar os elementos estruturais de acordo com as normas e regulamentos locais. Esse processo de projeto permite garantir a segurança e a otimização de custos da estrutura (AUTODESK, 2023).

2.5 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para análise estrutural através da resolução de equações diferenciais, que consiste em discretizar o sistema em vários elementos. Originalmente o método foi desenvolvido para análise estrutural, mas hoje também é utilizado na resolução de problemas relativos aos diversos fenômenos físicos envolvendo transferência de calor, fluidodinâmica, lubrificação e eletromagnetismo (COOK *et al.*, 2002).

Martha (2017) propõe quatro níveis de abstração em uma análise de estrutura como indicado na Figura 21, que trata da transformação de um determinado modelo estrutural em um modelo discreto. O primeiro é o físico, nível que representa a estrutura real, já o segundo nível é o modelo analítico utilizado para representar matematicamente a estrutura que está sendo analisada, neste nível são incorporadas todas as teorias e hipóteses que descrevem o comportamento da estrutura em função das diversas solicitações. No terceiro nível ocorre a passagem do modelo matemático para o discreto, e comumente é utilizado na análise estrutural o método dos elementos finitos que introduz simplificações em relação à idealização matemática feita para o comportamento da estrutura. E por último o modelo computacional, onde a análise das estruturas é vista como uma simulação computacional do comportamento de estruturas. Neste nível questões como estruturas de dados e procedimentos para a criação do modelo geométrico, geração do modelo discreto, aplicação de atributos de análise como, propriedades de materiais, carregamentos, condições de contorno e visualização dos resultados são fundamentais.

Figura 21 - Níveis de abstração para análise de uma estrutura

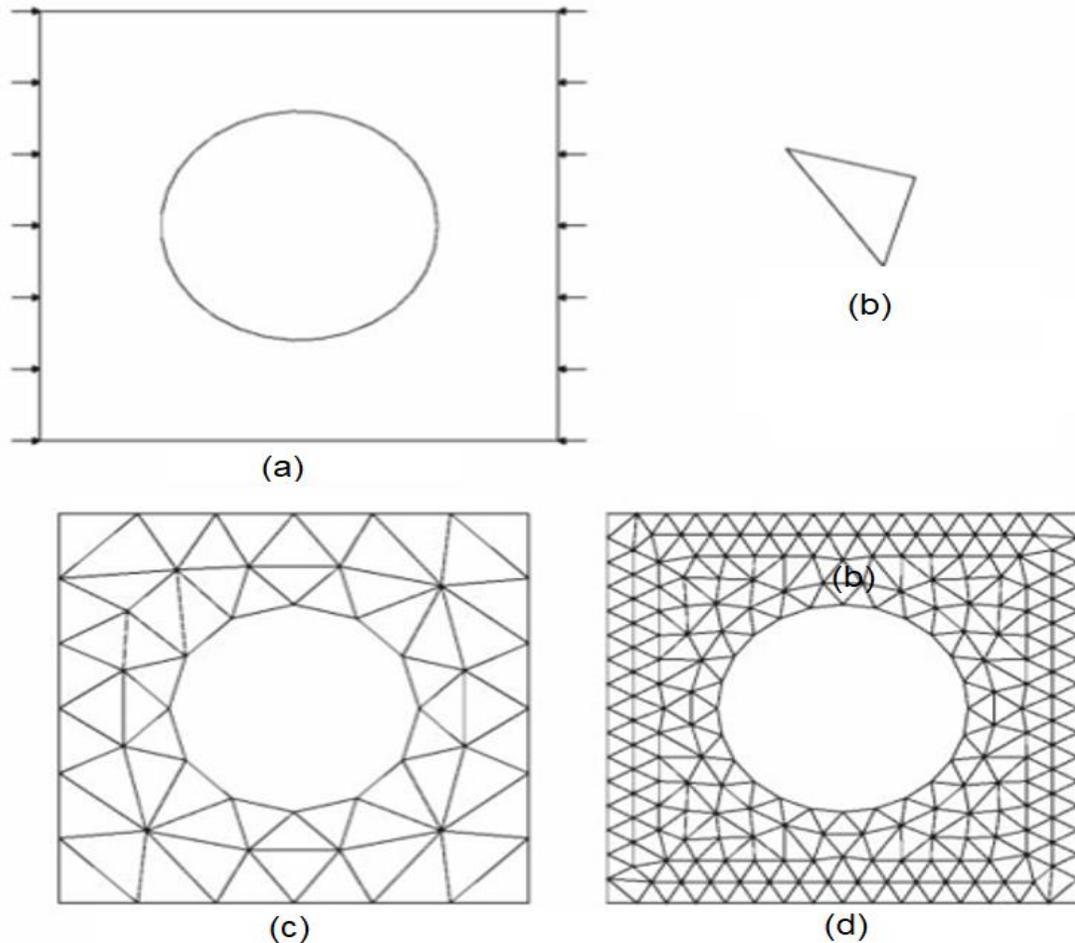


Fonte: MARTHA (2017).

Para Alves Filho (2007) o método dos elementos finitos consiste em buscar soluções aproximadas numericamente, com erros aceitáveis para problemas de engenharia que apresentam certa complexidade, sobre os quais não é possível obter respostas exatas através dos métodos analíticos clássicos.

Segundo Fish e Belytschko (2009), a ideia básica do MEF é dividir um determinado corpo em um número finito de elementos discretos considerados simples que são conectados por nós ou pontos nodais, e esta divisão do corpo em elementos é chamada de malha. A Figura 22 (a) indica uma placa com furo dividida em vários elementos (b) conectados através dos nós (c) e (d). Por se tratar de um método por aproximação, para obter uma solução razoavelmente exata, muitas vezes se faz necessária a geração de malhas com um grande número de elementos e nós (d). Refinando-se as malhas obtêm-se melhores resultados.

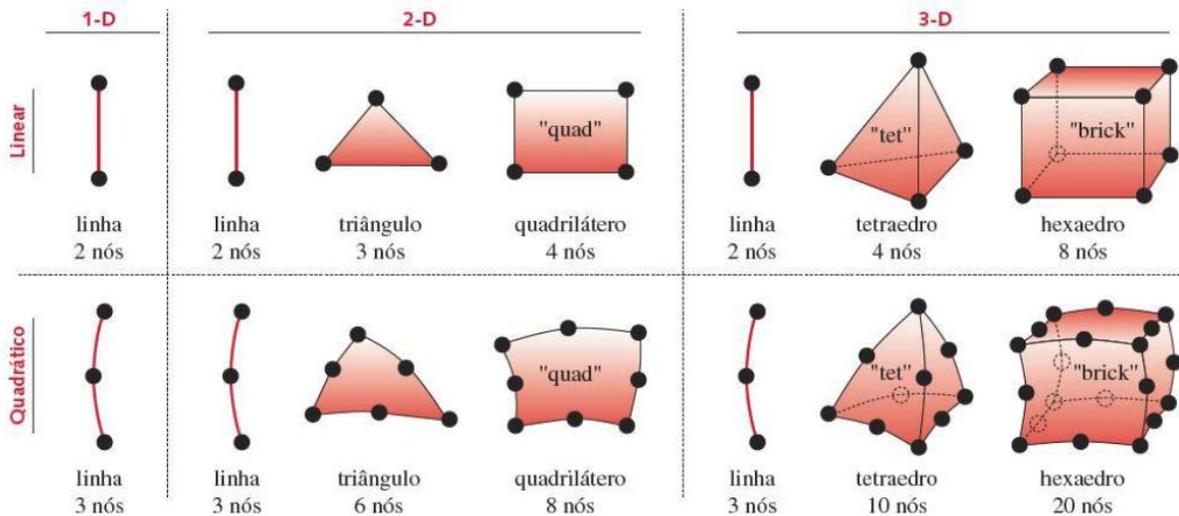
Figura 22 - Geometria e malha de elementos finitos



Fonte: FISH; BELYTSCHKO (2009).

Conforme mostrado na Figura 23, existem vários tipos de elementos, com diversas formas e características que podem ser utilizados nas análises. Esses elementos apresentam diferentes graus de liberdade, números distintos de nós, podem ser uni, bi ou tridimensionais e possibilitam análises e respostas específicas. A escolha do correto elemento para cada situação é imprescindível para obtenção de resultados corretos (ALVES FILHO, 2007).

Figura 23 - Tipos de elementos



Fonte: NORTON (2013).

Fish e Belytschko (2009) descrevem o MEF em cinco passos:

1. Pré-processamento
2. Formulação dos elementos
3. Montagem
4. Resolução das equações
5. Pós-processamento

Para resolução de um problema de análise de estrutura, Azevedo (2003) sugere a classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. Destacam-se também alguns aspectos que são necessários levar em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura, como o comportamento do material e dos efeitos de deslocamentos, podendo ser classificada em análise linear ou não-linear.

2.5.1 Análise linear

Para Fakury, Silva e Caldas (2016), na análise linear ou de primeira ordem, as equações de equilíbrio são definidas com base na geometria indeformada da estrutura, em que a composição dos elementos estruturais é de comportamento sempre elástico-linear.

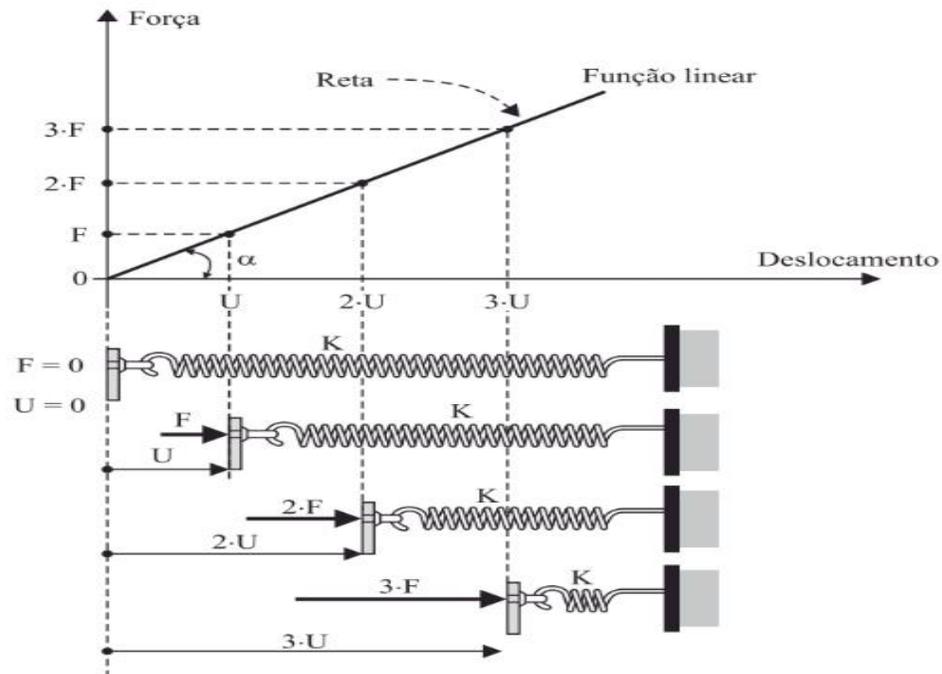
Alves Filho (2007) define rigidez como sendo a relação entre as forças e os deslocamentos nodais para cada elemento, que pode ser comparada a uma mola. Nos modelos lineares as cargas não variam com o tempo e a rigidez definida através da equação algébrica na forma matricial a seguir é constante (Equação 1).

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad 1$$

Onde $\{F\}$ é uma matriz coluna com todas as cargas nodais, $[K]$ é uma matriz quadrada de rigidez da estrutura, contendo os coeficientes de rigidez de toda a estrutura, que relacionam todos os deslocamentos nodais com as cargas nodais, e $\{U\}$ é uma matriz coluna com todos os deslocamentos nodais.

Em uma estrutura que apresenta um comportamento linear, os deslocamentos são proporcionais à intensidade da carga, conforme ilustrado na Figura 24, e o conhecimento da rigidez da mola, por intermédio da sua constante k , permite determinar os deslocamentos para os diversos incrementos de carga (ALVES FILHO, 2012).

Figura 24 - Comportamento linear de uma mola



Fonte: ALVES FILHO (2012).

2.5.2 Análise não linear

Na análise não linear ou de segunda ordem, o comportamento dos materiais é considerado sempre elástico linear e as equações de equilíbrio são estabelecidas com base na geometria deformada da estrutura. Neste tipo de análise como a geometria deformada da estrutura não é conhecida durante a resolução das equações de equilíbrio, é necessário empregar um procedimento incremental iterativo e considerar os efeitos global e local de segunda ordem (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016).

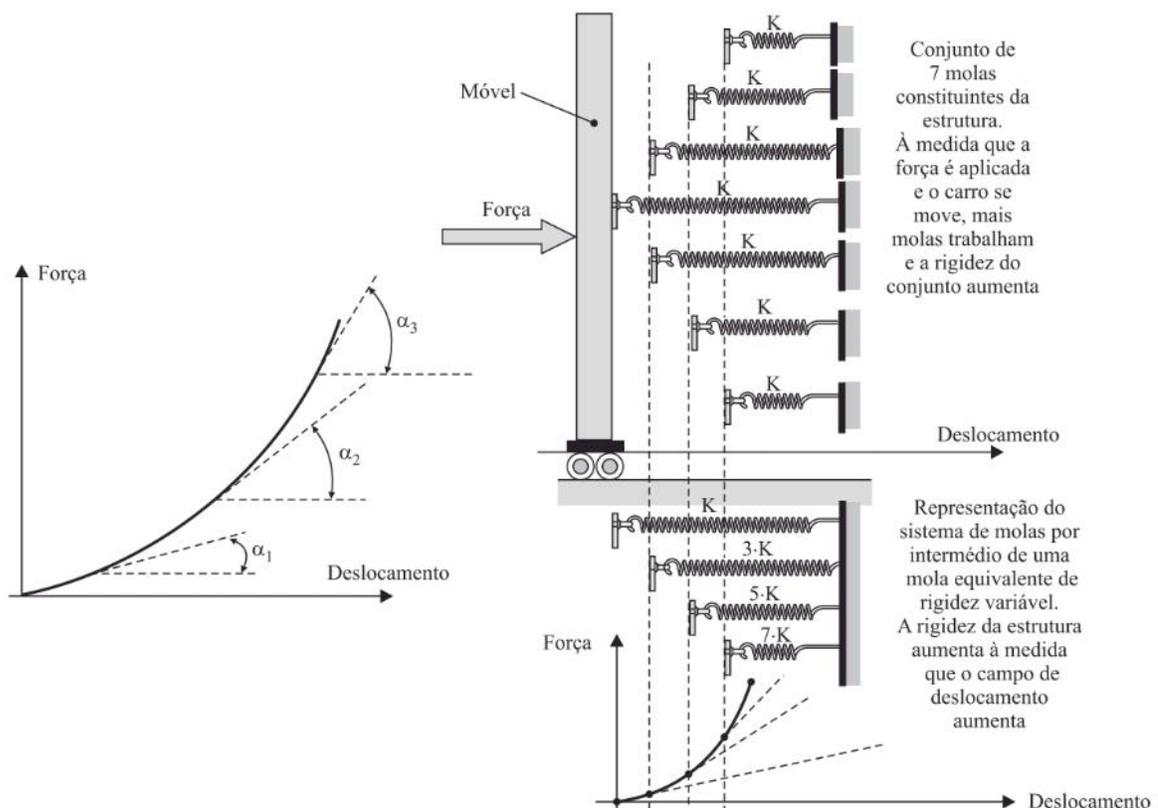
Em uma análise não-linear, a rigidez da estrutura varia e depende do estágio em que o carregamento atuante se encontra, a matriz $[K]$ é atualizada à medida que a estrutura se deforma e, conseqüentemente, a equação geral de equilíbrio é atualizada para a estrutura deformada a cada passo da análise (Equação 2).

$$\{F\} = ([K] + [K_G]) \cdot \{U\} \quad 2$$

Onde $\{F\}$ é uma matriz coluna contendo as cargas nodais, $[K]$ é a matriz quadrada de rigidez antes do incremento, $[K_G]$ é a matriz quadrada de correção da rigidez para o incremento e $\{U\}$ é a matriz coluna referente ao deslocamento. A cada novo incremento, a matriz de rigidez é corrigida (ALVES FILHO, 2012).

Diferentemente do que ocorre em uma estrutura linear, em uma estrutura que apresenta comportamento não linear, ao dobrar a intensidade da carga atuante nela, os deslocamentos não seguem na mesma proporção, ou seja, não dobram como ilustrado na Figura 25. O conhecimento da rigidez do conjunto, por intermédio da sua constante K , nesse caso variável, permite determinar os deslocamentos para os diversos incrementos de carga.

Figura 25 - Comportamento não linear de um sistema com molas



Fonte: ALVES FILHO (2012).

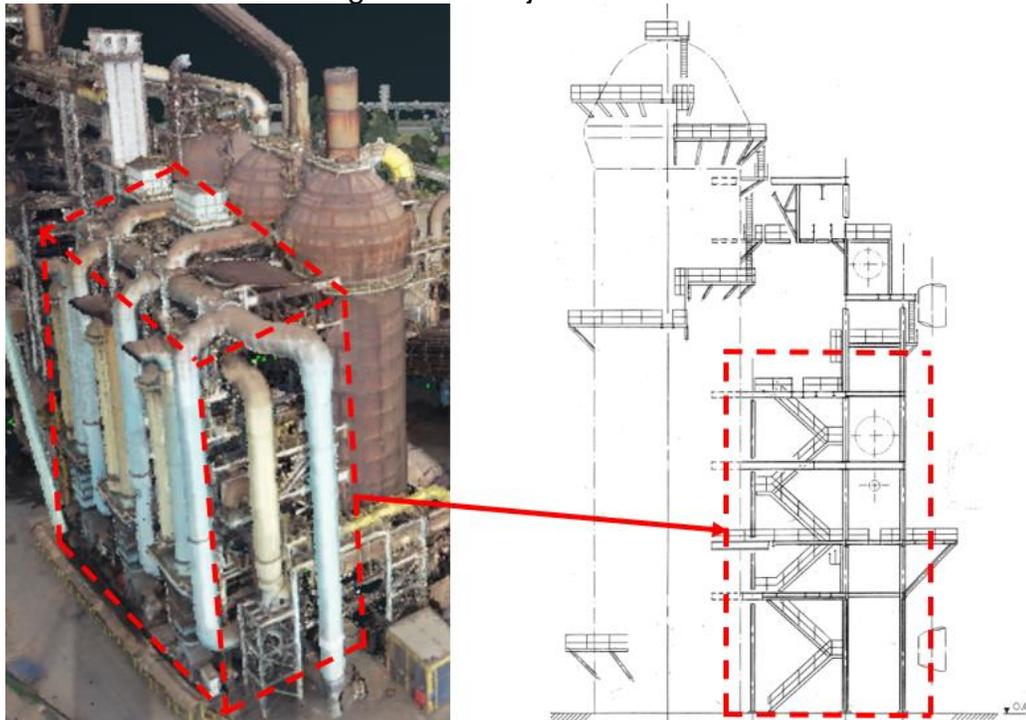
A análise de segunda ordem é necessária quando acontece uma interação entre as ações verticais e os deslocamentos causados pelas ações horizontais, acentuando esses deslocamentos (SILVA, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados todos os parâmetros necessários para a análise estrutural, como as informações principais das estruturas, dos perfis utilizados, dimensões, materiais, condições de contorno e as combinações de carregamento. São mostradas ainda as principais vistas e seções da estrutura, além de todas as considerações aplicadas na elaboração do modelo computacional.

O objeto para realização do estudo é uma estrutura em aço localizada na área de redução de uma indústria siderúrgica. Na Figura 26 apresenta-se uma visão em 3D e uma vista lateral de um desenho em 2D da estrutura.

Figura 26 - Objeto de estudo



Fonte: O autor (2023).

Os processos corrosivos são considerados com base nos dados levantados em campo através de inspeções visuais. As verificações das estruturas são realizadas baseando-se nas seguintes normas técnicas:

- AISC – *American Institute of Steel Construction*;
- AWS – *American Welding Society*;
- ABNT NBR 8800:2008, Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios;
- ABNT NBR 6123:1988, Forças devidas ao vento em edificações;
- ABNT NBR 6120:2019, Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR 8681:2003, Ações e segurança nas estruturas.

A estrutura metálica é composta, de forma geral, pelo aço estrutural ASTM A36. As propriedades definidas conforme a norma NBR 8800:2008, Anexo A, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânica dos materiais

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ou faixa de espessura disponível	Grau	fy MPa	fu MPa
Aços Carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e Barras	t ≤ 200 mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
Aços de baixa liga e alta resistência Mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	42	290	415
				50	345	450
				55	380	485
			1 e 2	60	415	520
				65	450	550
		Chapas e Barras	t ≤ 150 mm	42	290	415
			t ≤ 100 mm	50	345	450
			t ≤ 50 mm	55	380	485
	t ≤ 31,5 mm		60	415	520	
	A992	Perfis	1, 2 e 3	-	345 a 450	450

Fonte: ABNT (2008).

3.1 Modelagem computacional

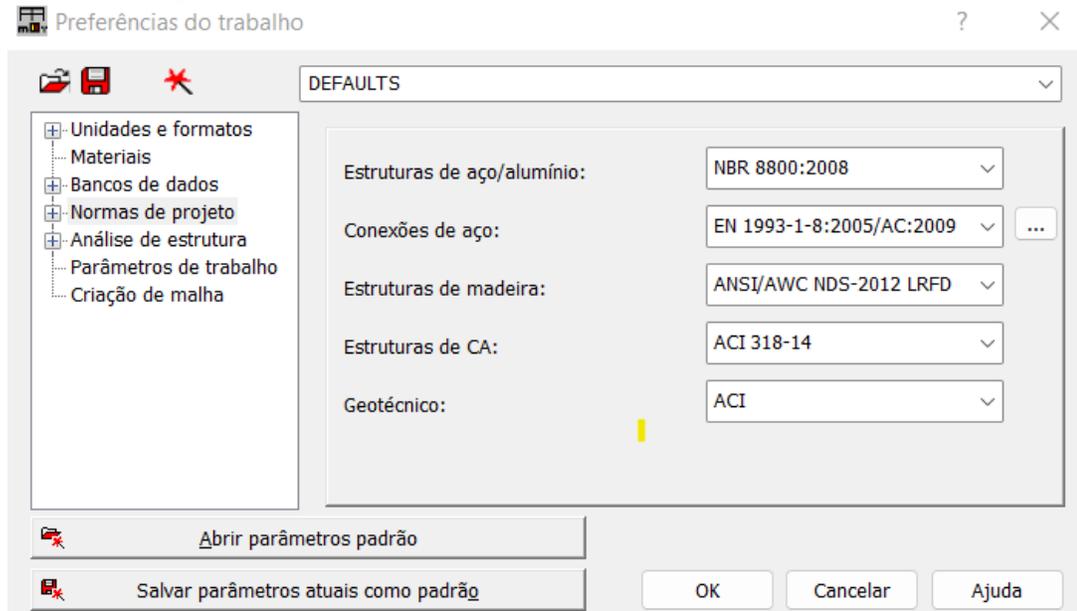
Toda a estrutura metálica é modelada em três dimensões no ambiente do Autodesk Robot Structural Analysis 2023, versão estudantil, software que utiliza o método de análise por elementos finitos. É realizada uma análise estática de primeira ordem da estrutura considerando a condição de projeto e, depois, é arbitrada uma redução de espessura em alguns perfis conforme levantamento realizado em campo. Para essa análise, são definidas as seguintes etapas:

1. Preferências de trabalho;
2. Elaboração do modelo geométrico;
3. Definição das condições de contorno;
4. Definição das propriedades mecânicas dos materiais;
5. Definição das propriedades geométricas das barras;
6. Definição dos carregamentos aplicados.

3.1.1 Preferências de trabalho

Antes de iniciar o modelamento ou análise estrutural, algumas configurações são realizadas no software. Incluída na versão de 2023, o Autodesk Robot possui em seu banco de dados a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, que será utilizada neste estudo. A Figura 27 mostra a tela de preferencias do software.

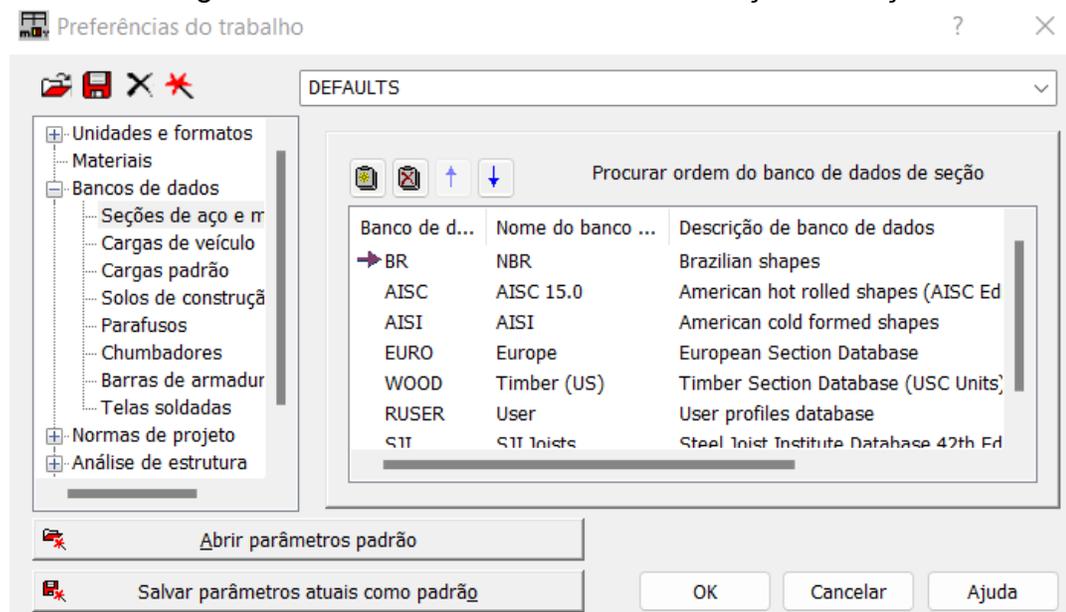
Figura 27 - Preferências de trabalho - Normas de projeto



Fonte: Autodesk Robot (2023).

Na Figura 28, indica-se outro recurso disponível na caixa de preferências, também incluído na versão de 2023 do software, que são as seções de perfis conforme especificação da norma NBR 8800:2008. Observa-se que alguns dos perfis precisaram ser modelados e incluídos em um banco de dados.

Figura 28 - Preferências de trabalho - Seções de aço

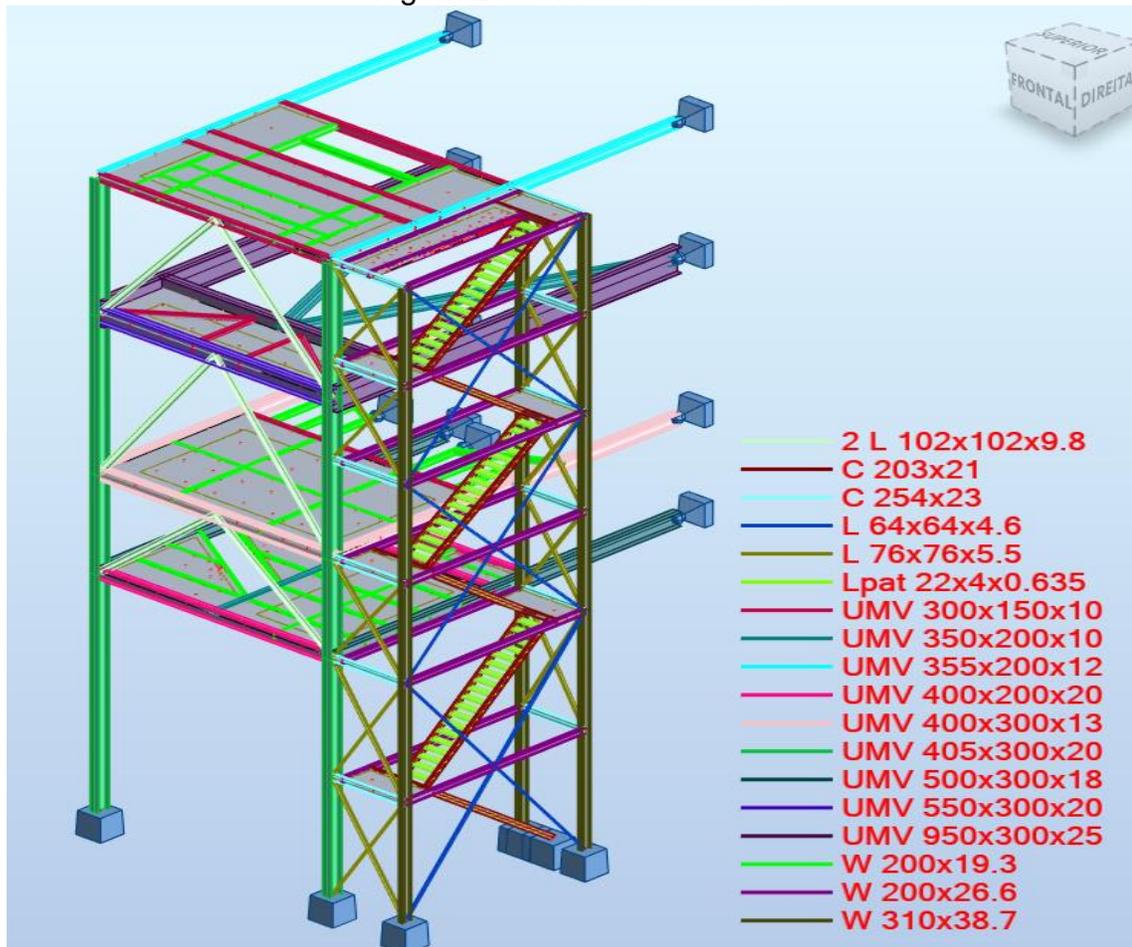


Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.1.2 Modelo geométrico

O modelo é constituído por elementos de barras e placas e, as simulações são desenvolvidas para a combinações de cargas definidas pela norma NBR 8800:2008. A geometria modelada representa a geometria atual da estrutura com as devidas propriedades mecânicas de seu material, incluindo o módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e massa específica. A Figura 29 mostra o modelo elaborado no ambiente do *software Autodesk Robot* com as devidas seções previamente definidas e de acordo com levantamento realizado em campo.

Figura 29 - Modelo estrutural

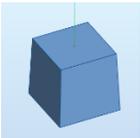


Fonte: O autor (2023).

3.1.3 Condições de contorno

Os apoios definem os graus de liberdade de cada nó e são definidos de forma a representar o melhor comportamento da estrutura. A Tabela 3 indicia os tipos de apoios utilizados no modelo.

Tabela 3 - Tipos de apoios

Símbolo	Função
	Engastado – Não permite deslocamento e rotação
	Rotulado – Não permite deslocamento. Rotação em torno dos eixos x e y

Fonte: O autor (2023).

3.1.4 Propriedades mecânicas dos materiais

As propriedades mecânicas do material inseridas no software são mostradas na Figura 30. Devido ao projeto estrutural ser de 1985 e não haver histórico de alteração dos materiais, por segurança é adotado o aço ASTM A36, que possui tensão limite de escoamento de 250 MPa.

Figura 30 - Definição do material

Definição de material

Aço Concrete Alumínio Madeira Outros

Nome: ASTM A36 Descrição: Laminados Fy=250 Mpa

Elasticidade

Módulo de Young, E: 200000.00 (MPa)

Coefficiente de Poisson, ν: 0.3

Módulo de cisalhamento, G: 77000.00 (MPa)

Peso específico (peso 78.50 (kN/m³))

Coef. de expansão térmica: 0.000012 (1/°C)

Relação de amortecimento: 0.06

Resistência

Características 250.00 (MPa)

Fator de redução de cisalh.: 1.66

Resistência limite da tensão: 400.00 (MPa)

Aço recozido

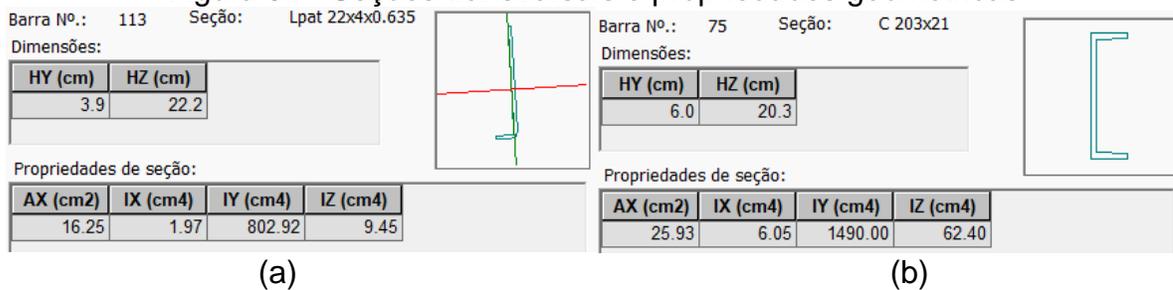
Adicionar Excluir OK Cancelar Ajuda

Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.1.5 Propriedades geométricas

Através do levantamento de campo foi possível identificar as seções transversais de todos elementos estruturais. Pode-se observar que algumas modificações foram feitas em relação ao projeto original. A Figura 31 apresenta os perfis que compõem a estrutura objeto de estudo e suas propriedades geométricas.

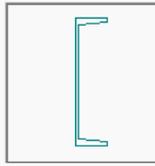
Figura 31 - Seções transversais e propriedades geométricas



Barra Nº.: 45 Seção: C 254x23

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
6.6	25.4



Propriedades de seção:

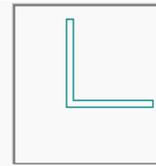
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
29.00	7.39	2800.00	95.00

(c)

Barra Nº.: 1034 Seção: L 64x64x4.6

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
6.3	6.3



Propriedades de seção:

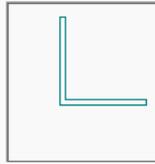
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
5.80	0.44	23.00	23.00

(d)

Barra Nº.: 1006 Seção: L 76x76x5.5

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
7.6	7.6



Propriedades de seção:

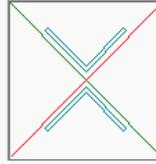
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
7.03	0.53	40.00	40.00

(e)

Barra Nº.: 991 Seção: 2 L 102x102x9.8

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
14.4	17.2



Propriedades de seção:

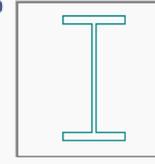
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
25.02	3.36	810.16	401.05

(f)

Barra Nº.: 267 Seção: UMV 300x150x10

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
15.0	30.0



Propriedades de seção:

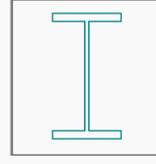
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
86.00	86.24	13244.67	1127.17

(g)

Barra Nº.: 241 Seção: UMV 350x200x10

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
20.0	35.0



Propriedades de seção:

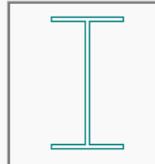
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
111.00	114.19	24289.25	2669.25

(h)

Barra Nº.: 1085 Seção: UMV 355x200x12

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
20.0	35.5



Propriedades de seção:

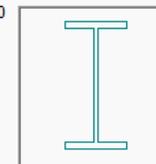
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
81.10	36.04	17145.70	1602.76

(i)

Barra Nº.: 961 Seção: UMV 400x200x20

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
20.0	40.0



Propriedades de seção:

AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
123.20	128.58	33572.27	2671.85

(j)

Barra Nº.: 266 Seção: UMV 400x300x13

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
30.0	40.0



Propriedades de seção:

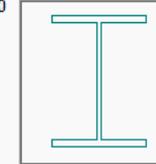
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
115.40	59.11	33575.41	5853.12

(k)

Barra Nº.: 13 Seção: UMV 405x300x20

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
30.0	40.5



Propriedades de seção:

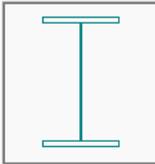
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
156.50	173.47	48559.76	9003.04

(l)

Barra Nº.: 4 Seção: UMV 500x300x18

Dimensões:

HY (cm)	HZ (cm)
30.0	50.0



Propriedades de seção:

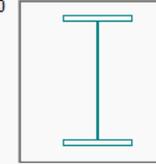
AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
154.40	135.73	71081.42	8103.87

(m)

Barra Nº.: 239 Seção: UMV 550x300x20

Dimensões:

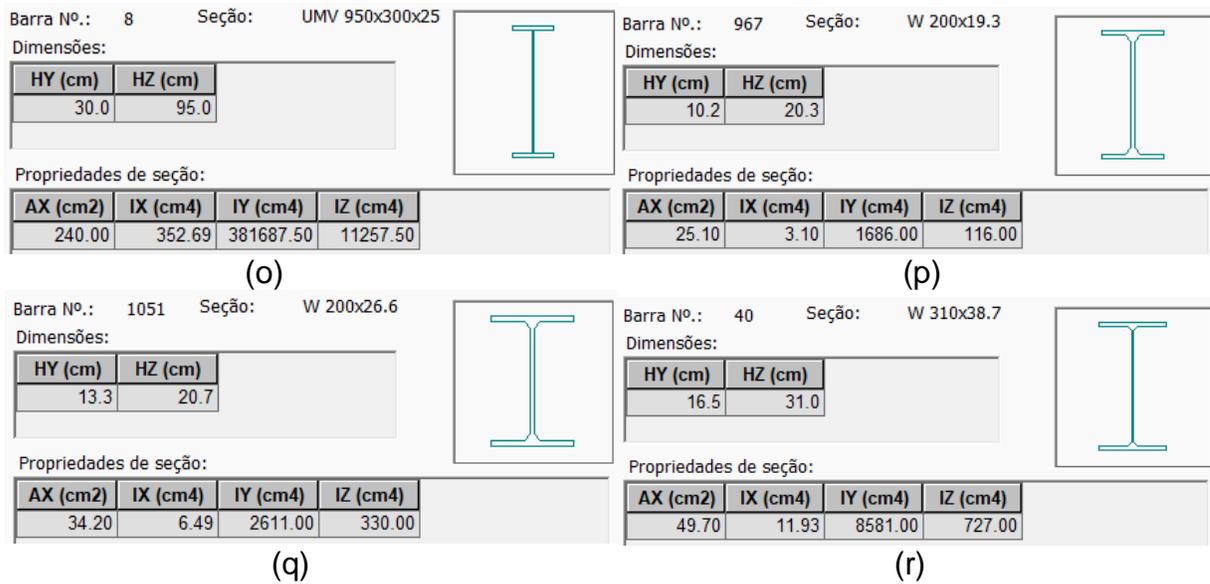
HY (cm)	HZ (cm)
30.0	55.0



Propriedades de seção:

AX (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)
171.00	180.49	95364.25	9004.25

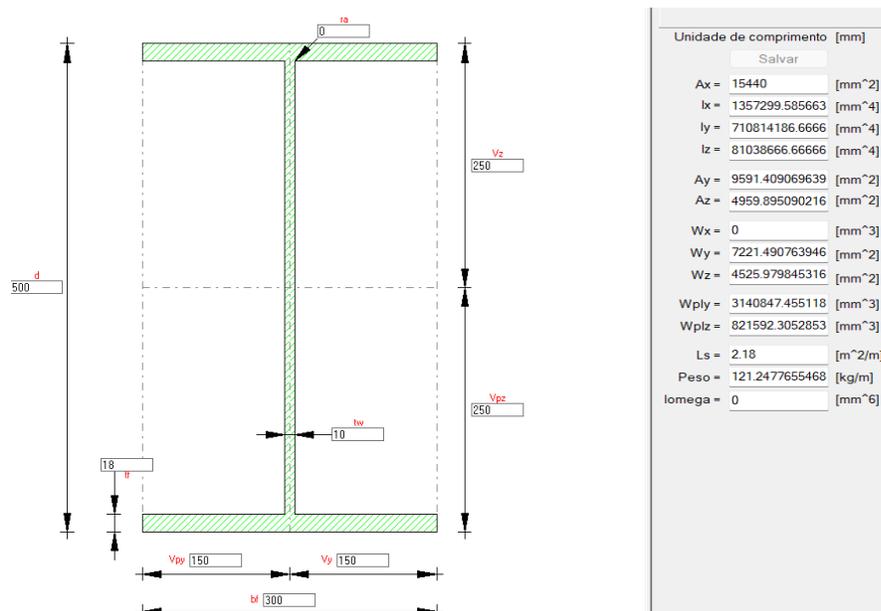
(n)



Fonte: Autodesk Robot (2023).

Embora o software contenha um banco de dados com várias normas de perfis estruturais, de acordo com o levantamento dimensional e desenhos de referência, a estrutura objeto do estudo possui vigas com dimensões não encontradas em sua biblioteca. Para modelagem destes perfis, foi utilizado um perfil existente como modelo, editando-se as dimensões e criando-se um banco de dados específico como é mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Perfil editado (Medidas em mm)



Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.1.6 Carregamento

Para o carregamento da estrutura, consideram-se as ações permanentes (F_g), ações variáveis (F_q) e ações excepcionais como classificado pela norma ABNT NBR 8800:2008. As combinações de carregamento são estipuladas aplicando-se todas as cargas possíveis, atuando em todos os elementos estruturais e são agrupadas como mostra-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipo de carregamento e abreviação

Grupo	Carregamento	Abreviação
1	Carga permanente	CP
2	Sobrecarga de uso	SC
3	Vento X+ (0°)	VX+
	Vento Y+ (90°)	VY+

Fonte: O autor (2023).

3.1.6.1 Carga permanente

As ações permanentes são as que ocorrem com valores constantes ao longo da vida útil da estrutura, compondo-se, neste caso, basicamente do peso próprio. Esse valor em relação à estrutura modelada é calculado pelo *software* de forma automática, a partir das dimensões geométricas e da massa específica de cada perfil. Os valores adotados como cargas permanentes são listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Cargas permanentes

Descrição	Valor	Unidade
Peso próprio (estrutura)	Modelado	kN

Fonte: ABNT NBR 6120 (2019).

3.1.6.2 Sobrecarga de uso e ocupação

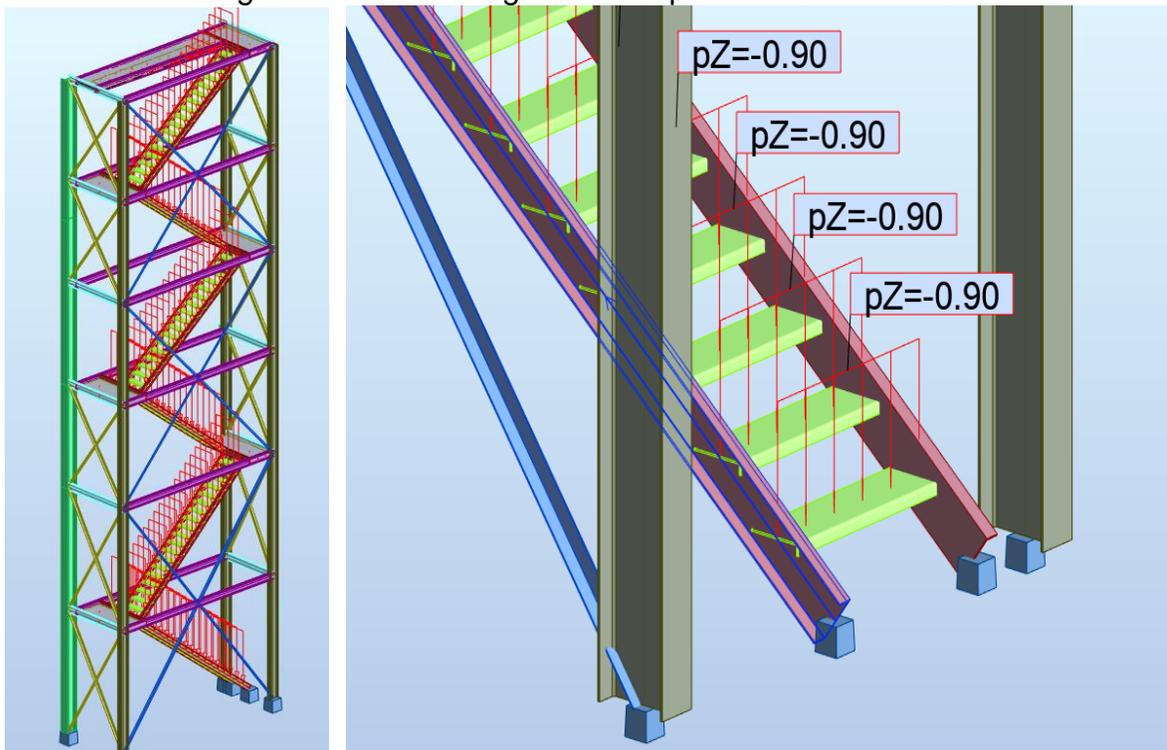
As sobrecargas são ações variáveis que ocorrem com valores de cargas que apresentam variações significativas durante a vida útil da estrutura. Essas ações são causadas pelo uso e ocupação da edificação e definidas pela norma ABNT NBR 6120:2019, sendo consideradas todas as solicitações que atuam em escadas, plataformas, passadiços, incrustação e acúmulo máximo de materiais. A Tabela 6 apresenta os valores adotados baseados na ABNT NBR 6120 (2019) e as Figura 33, Figura 34 e Figura 35 a aplicação das cargas no modelo.

Tabela 6 - Sobrecarga de uso

Descrição	Valor	Unidade
Escadas	0,9	kN/m
Plataformas de trabalho	3	kN/m ²
Acúmulo de material	1,5	kN/m ²

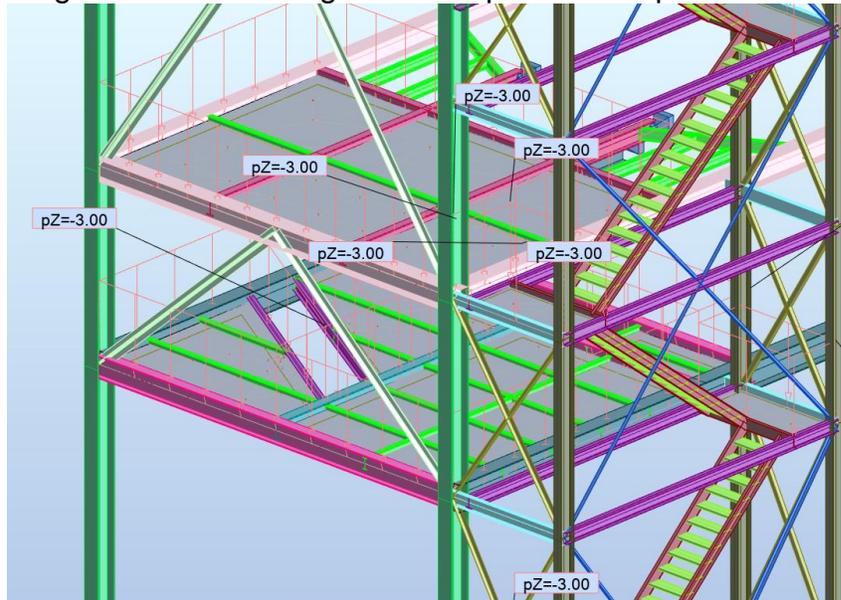
Fonte: O autor (2023).

Figura 33 - Sobrecarga de uso aplicada nas escadas



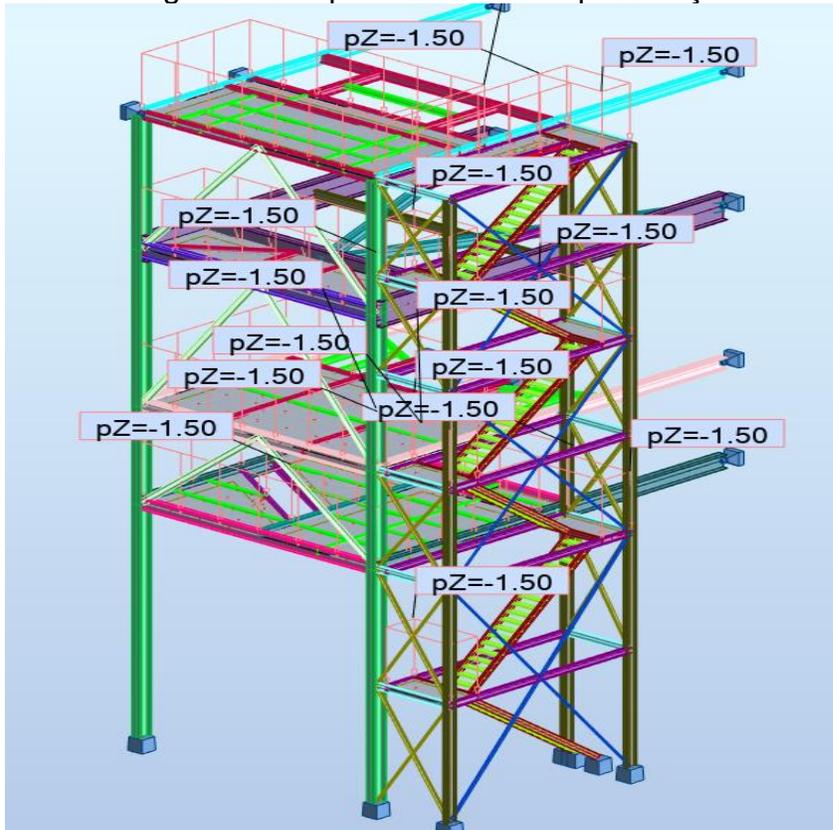
Fonte: Autodesk Robot (2023).

Figura 34 - Sobrecarga de uso aplicada nas plataformas



Fonte: Autodesk Robot (2023).

Figura 35 - Sobrecarga de uso aplicada em todos passadiços - Acúmulo de pó



Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.1.6.3 Vento

A velocidade do vento foi definida conforme a norma ABNT NBR 6123:1988, sendo considerada sua atuação na direção horizontal perpendicular a todas as faces da edificação. Para o seu cálculo, consideram-se os fatores velocidade básica do vento, topográfico, de rugosidade, estatístico e de ocupação.

O fator velocidade básica do vento V_0 é a velocidade de uma rajada de três segundos de duração, a dez metros de altura, em um campo aberto e plano, ultrapassada, em média, uma vez em 50 anos e definida de acordo com a região. O fator topográfico S_1 considera as grandes variações da superfície do terreno, ou seja, é uma classificação do nível de rugosidade. O fator de rugosidade S_2 define, a partir da categoria de rugosidade, uma classe. O cálculo desse fator leva em consideração parâmetros meteorológicos e a dimensão vertical da edificação. O fator de estatístico S_3 considera o grau de segurança e a vida útil que a edificação requer, com base em um período de recorrência de 50 anos. O fator de ocupação atribuído à edificação neste trabalho é alto. A Tabela 7 apresenta os valores adotados para determinar a velocidade do vento.

Tabela 7 - Fatores para o cálculo da carga de vento

Velocidade de vento V_0 – região de localização do prédio	32,5 m/s
S_1 (Terrenos planos ou fracamente acidentados)	1
S_2 (Categoria IV); (Classe C); ($Z \approx 10m$)	1,04
S_3 (Edificações industriais com alto fator de ocupação)	1
$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$	32,11 m/s

Fonte: ABNT NBR 6123 (1980).

A partir da velocidade do vento indicada na Figura 36, o Robot utiliza a tecnologia do Autodesk *simulation* CFD para simular o fluxo de ar em torno da estrutura e gerar as cargas de vento automaticamente segundo os eixos X (Figura 37) e Y (Figura 38).

Figura 36 - Parâmetros do vento

Direção do vento

X+Y- Y- X-Y-

X+ X- X-Y+

X+Y+ Y+ X-Y+

Parâmetros de vento

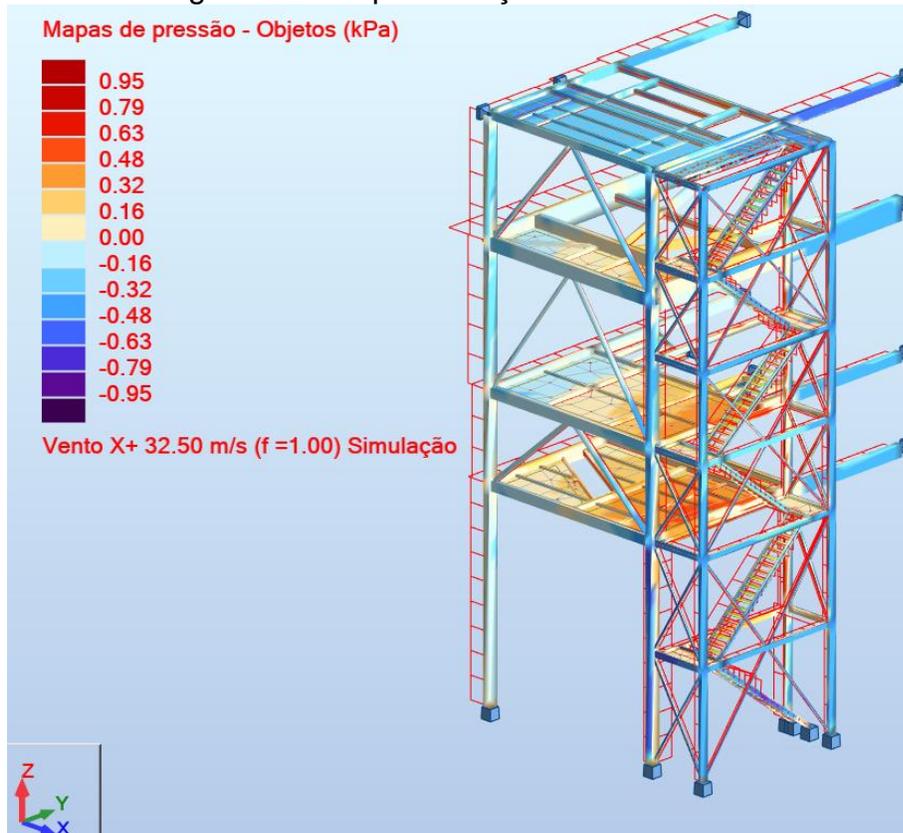
Velocidade do vento: 32.5 (m/s)

Pressão do vento: 0.25 (kPa)

Nível do terreno: 0.00 (m)

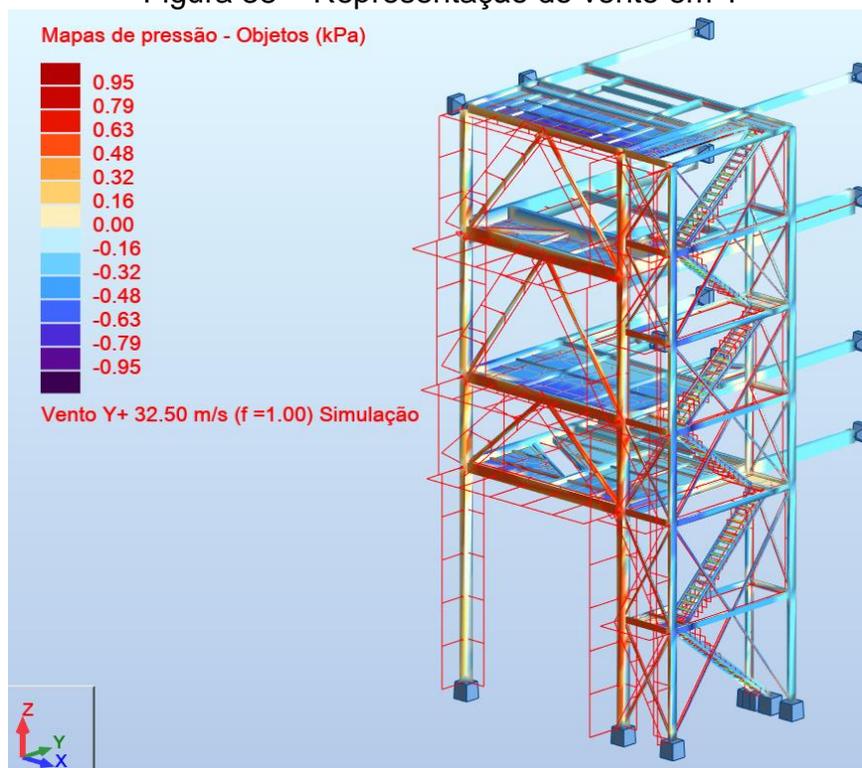
Fonte: Autodesk Robot (2023).

Figura 37 – Representação do vento em X



Fonte: Fonte: Autodesk Robot (2023).

Figura 38 – Representação do vento em Y



Fonte: Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.2 Critério de avaliação

Para avaliação dos resultados, é utilizado o Método dos Estados Limites, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 8800:2008. Esse método utiliza uma sistemática de dimensionamento na qual a estrutura é verificada em várias situações extremas, caracterizadas pelo chamado método dos estados limites últimos.

3.2.1 Estados Limites Últimos

Os Estados Limites Últimos são aqueles relacionados com a segurança. A ocorrência desse tipo de estado limite significa colapso estrutural, total ou parcial. A condição de dimensionamento é considerada satisfatória se for atendida a relação do Fator de Trabalho, conforme equação 3.

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1,0$$

3

Onde S_d é o valor de cálculo dos esforços atuantes e R_d é o valor de cálculo dos esforços resultantes. Valores de Fator de Trabalho acima de 1,00 indicam que a estrutura está inadequada e valores abaixo indicam que a estrutura está apta a operar. Para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pela Equação 5 quando a Equação 4 for atendida ou a Equação 7 quando a Equação 6 for atendida (ABNT NBR 8800:2008).

$$\frac{S_d}{R_d} \geq 0,2 \quad 4$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad 5$$

$$\frac{S_d}{R_d} < 0,2 \quad 6$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad 7$$

Onde N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo, $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo tomados, respectivamente, em relação aos eixos x e y . N_{Sd} é a força axial solicitante de tração ou compressão, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos solicitantes tomados, respectivamente, em relação aos eixos x e y .

3.2.1.1 Combinações dos carregamentos (ELU)

As combinações de carga são realizadas de acordo com a norma ABNT NBR 8800:2008 de forma a simular a maior solicitação possível na estrutura. As cargas são majoradas conforme sua natureza e combinação. As combinações são aplicadas conforme a Equação 8 a seguir. Na Tabela 8 apresentam-se os fatores de majoração da carga e na Tabela 9 os fatores de combinação para garantir a segurança operacional do equipamento.

$$Fd = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k})$$

8

Tabela 8 – Coeficiente de ponderação das ações

Carga permanente (γ_g)	1,25
Sobrecarga de uso e ocupação (γ_q)	1,50
Vento (γ_q)	1,40

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

Tabela 9 – Fatores de combinação ψ_0

Ações variáveis de uso e ocupação	0,70
Pressão de vento nas estruturas	0,60

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

3.2.2 Estados Limites de Serviço

Os Estados Limites de Serviço são relacionados, neste caso, à deformação da estrutura. Para a análise em questão, enquadram-se as combinações quase permanentes, as quais são definidas como aquelas que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual a uma parte não desprezível desse período. Essas combinações são utilizadas para os estados limites reversíveis, isto é, que não causam danos permanentes à estrutura ou a outros componentes da construção, incluindo os relacionados ao conforto dos usuários e ao funcionamento de equipamentos, tais como vibrações excessivas e movimentos excessivos que comprometam a vedação da construção etc. (ABNT NBR 8800:2008).

3.2.2.1 Combinações dos carregamentos (ELS)

As combinações de carga são realizadas de forma a simular a condição crítica para deformação. As cargas são majoradas conforme sua natureza e combinação. As combinações são então aplicadas conforme a equação 9 e a Tabela 10.

$$Fd = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

9

Tabela 10 – Fatores de combinação e redução ψ_1 e ψ_2

Sobrecarga de uso e ocupação	0,40	0,30
Vento	0,30	0,00

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

3.3 Combinações das ações

As combinações são geradas de forma automática pelo software e são mostradas na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11 - Combinação para Estado Limite Último (ELU)

Combinação (ELU)	Descrição
1	1*1.25 + 2*1.50 + 4*1.50 + 13*0.84
2	1*1.00 + 3*0.75 + 14*1.40
3	1*1.00 + 3*1.50
4	1*1.00 + 13*1.40
5	1*1.25 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50 + 14*0.84
6	1*1.25 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50 + 13*0.84
7	1*1.00 + 14*1.40
8	1*1.00 + 3*1.50 + 13*0.84
9	1*1.00 + 3*0.75 + 13*1.40
10	1*1.25 + 2*1.50 + 4*1.50
11	1*1.25 + 2*1.50 + 4*1.50 + 14*0.84
12	1*1.00
13	1*1.25 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50
14	1*1.00 + 2*1.50 + 4*1.50 + 14*0.84
15	1*1.25 + 3*0.75 + 13*1.40
16	1*1.25 + 2*0.75 + 4*0.75 + 13*1.40
17	1*1.25 + 3*0.75 + 14*1.40
18	1*1.00 + 2*1.50 + 4*1.50

19	$1*1.00 + 3*1.50 + 14*0.84$
20	$1*1.25 + 3*1.50 + 13*0.84$
21	$1*1.25 + 2*0.75 + 4*0.75 + 14*1.40$
22	$1*1.00 + 2*0.75 + 4*0.75 + 13*1.40$
23	$1*1.25 + 3*0.75 + 2*0.75 + 4*0.75 + 14*1.40$
24	$1*1.25 + 3*0.75 + 2*0.75 + 4*0.75 + 13*1.40$
25	$1*1.00 + 2*0.75 + 4*0.75 + 14*1.40$
26	$1*1.00 + 2*1.50 + 4*1.50 + 13*0.84$
27	$1*1.25 + 3*1.50 + 14*0.84$
28	$1*1.25$
29	$1*1.25 + 3*1.50$
30	$1*1.00 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50 + 14*0.84$
31	$1*1.25 + 13*1.40$
32	$1*1.00 + 3*0.75 + 2*0.75 + 4*0.75 + 13*1.40$
33	$1*1.25 + 14*1.40$
34	$1*1.00 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50$
35	$1*1.00 + 3*0.75 + 2*0.75 + 4*0.75 + 14*1.40$
36	$1*1.00 + 3*1.50 + 2*1.50 + 4*1.50 + 13*0.84$

Fonte: Autodesk Robot (2023).

Tabela 12 - Combinação para Estado Limite de Serviço (ELS)

Combinação (ELS)	Descrição
1	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00 + 13*0.30$
2	$1*1.00 + 3*0.40 + 14*1.00$
3	$1*1.00 + 3*1.00$
4	$1*1.00 + 13*1.00$
5	$1*1.00 + 3*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00 + 14*0.30$
6	$1*1.00 + 3*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00 + 13*0.30$
7	$1*1.00 + 14*1.00$
8	$1*1.00 + 3*1.00 + 13*0.30$
9	$1*1.00 + 3*0.40 + 13*1.00$
10	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00$
11	$1*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00 + 14*0.30$
12	$1*1.00 + 2*0.40 + 4*0.40 + 13*1.00$
13	$1*1.00$
14	$1*1.00 + 3*1.00 + 2*1.00 + 4*1.00$
15	$1*1.00 + 3*0.40 + 2*0.40 + 4*0.40 + 13*1.00$
16	$1*1.00 + 2*0.40 + 4*0.40 + 14*1.00$
17	$1*1.00 + 3*0.40 + 2*0.40 + 4*0.40 + 14*1.00$
18	$1*1.00 + 3*1.00 + 14*0.30$

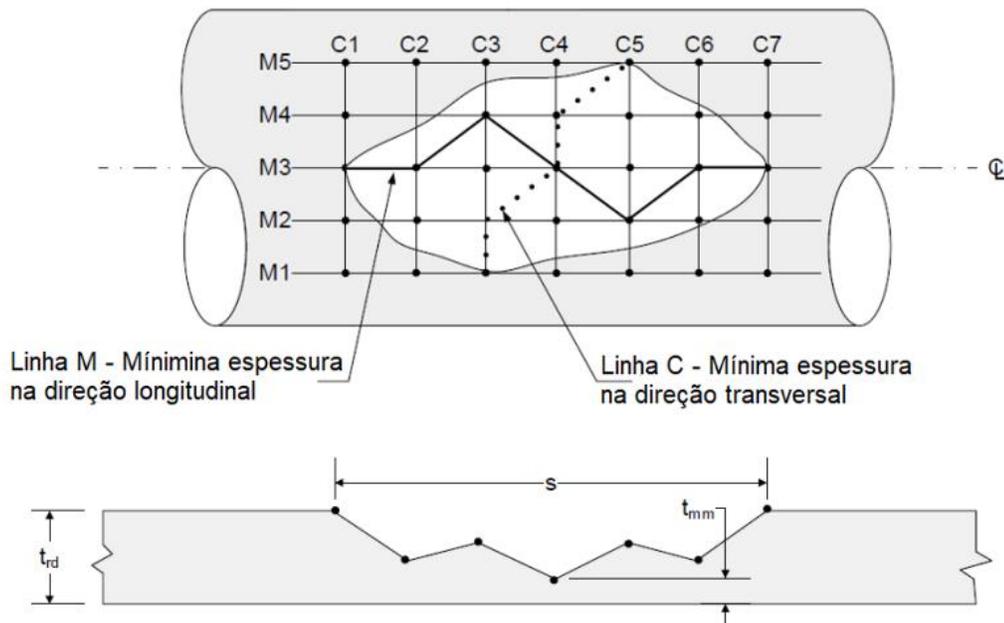
Fonte: Autodesk Robot (2023).

3.4 Introdução de danos ao modelo devido à corrosão

A norma API 579 (2000) que trata de práticas, recomendações para adequação ao uso e avaliação da integridade estrutural de equipamentos com danos, recomenda que, para regiões corroídas com variações significativas no perfil corroído e/ou regiões em que a perda de espessura é elevada em relação à espessura requerida do componente, seja definido o perfil crítico da corrosão. A direção longitudinal é obtida pela mínima espessura a cada projeção ao longo dos planos de inspeção C1-C7 e a direção transversal é obtida pela mínima espessura a cada projeção ao longo dos planos de inspeção M1-M5, como indicado Figura 39.

Vale salientar que, tratando-se de estruturas em aço, quantificar a redução de espessura em perfis que se encontram em estado de deterioração devido à corrosão atmosférica e determinar exatamente a localização e extensão dos danos, não é uma atividade simples, e, para grandes estruturas com varios tipos de perfis, torna-se quase que inviável sua realização.

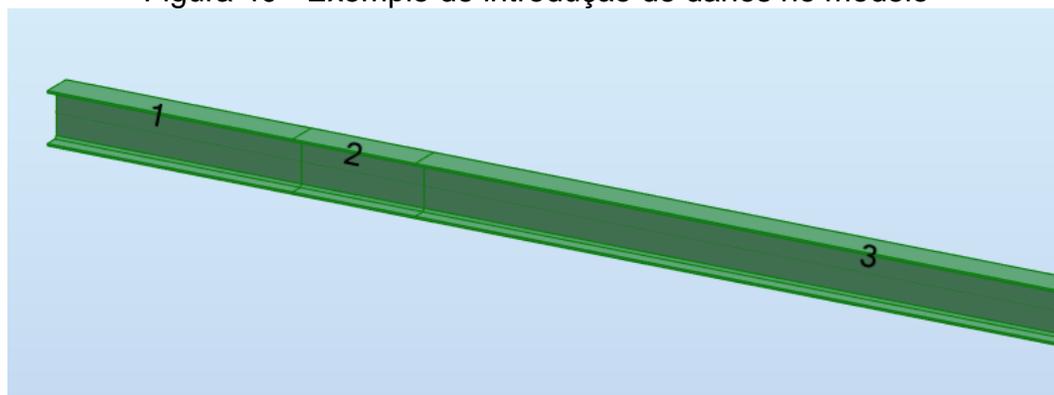
Figura 39 - Mapeamento de perda de espessura



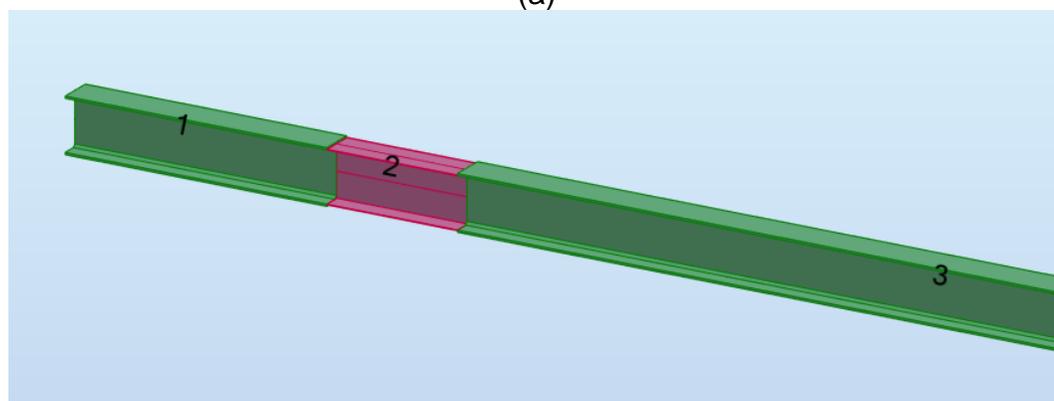
Fonte: Adaptado de API 579 (2000).

O método de introdução de danos utilizado neste trabalho, levando em consideração a redução de espessura, é realizado de forma simplificada, diminuindo-se através da edição dos perfis no *software*, a seção transversal da alma e ou somente de mesas em trechos de algumas barras, baseado no levantamento realizado em campo. A Figura 40 exemplifica o método, sendo que na Figura 40 (a) são apresentadas as barras na condição de projeto e na Figura 40 (b) tem-se uma redução da seção da barra 2, indicando uma possível redução de espessura localizada devido à corrosão. Outros danos como, a remoção de contraventamentos, vigas e ou outros elementos estruturais também são considerados no modelo.

Figura 40 - Exemplo de introdução de danos no modelo



(a)



(b)

Fonte: Autodesk Robot (2023).

4 RESULTADOS

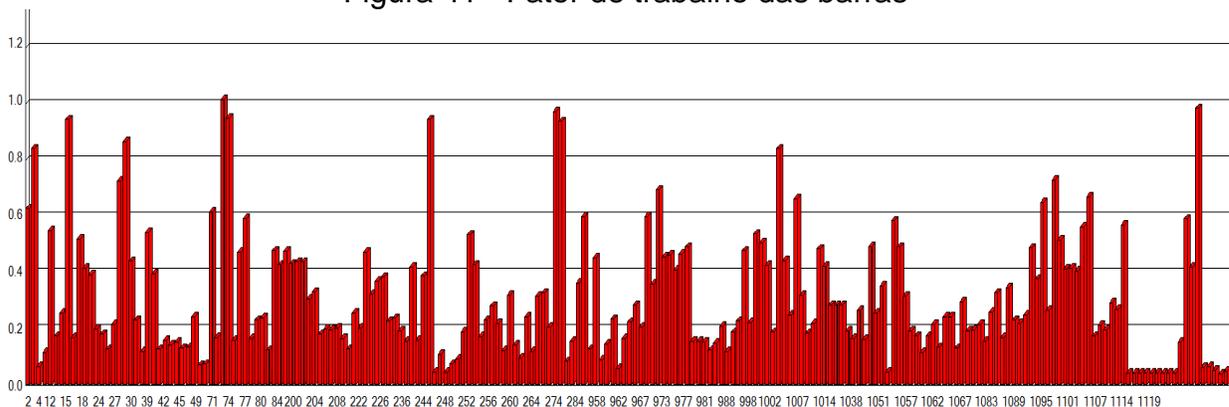
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as inspeções de campo e análise numérica, considerando a estrutura na condição de projeto e afetada pela corrosão. A estrutura inspecionada e utilizada para realização do estudo, está localizada em uma siderúrgica próximo a área de um alto-forno, é utilizado para manutenção e operação de válvulas e composta por quatro plataformas de trabalho nas seguintes elevações: 8450, 12000, 17650 e 22500mm de altura. Para acesso às plataformas, a estrutura ainda conta com escadas com lances de aproximadamente 4000mm.

4.1 Análise numérica

4.1.1 Fator de trabalho

Neste item são apresentados os resultados obtidos na verificação estrutural, os valores dos fatores de trabalho apresentados já consideram o maior fator presente na estrutura, entre todos os casos e combinações. Os fatores de trabalho encontrados para todas as barras estão apresentados na Figura 41, as barras com Fator de Trabalho acima de 1,00 correspondem às vigas que não estão aptas a operar segundo a norma de projeto ABNT NBR 8800:2008.

Figura 41 - Fator de trabalho das barras

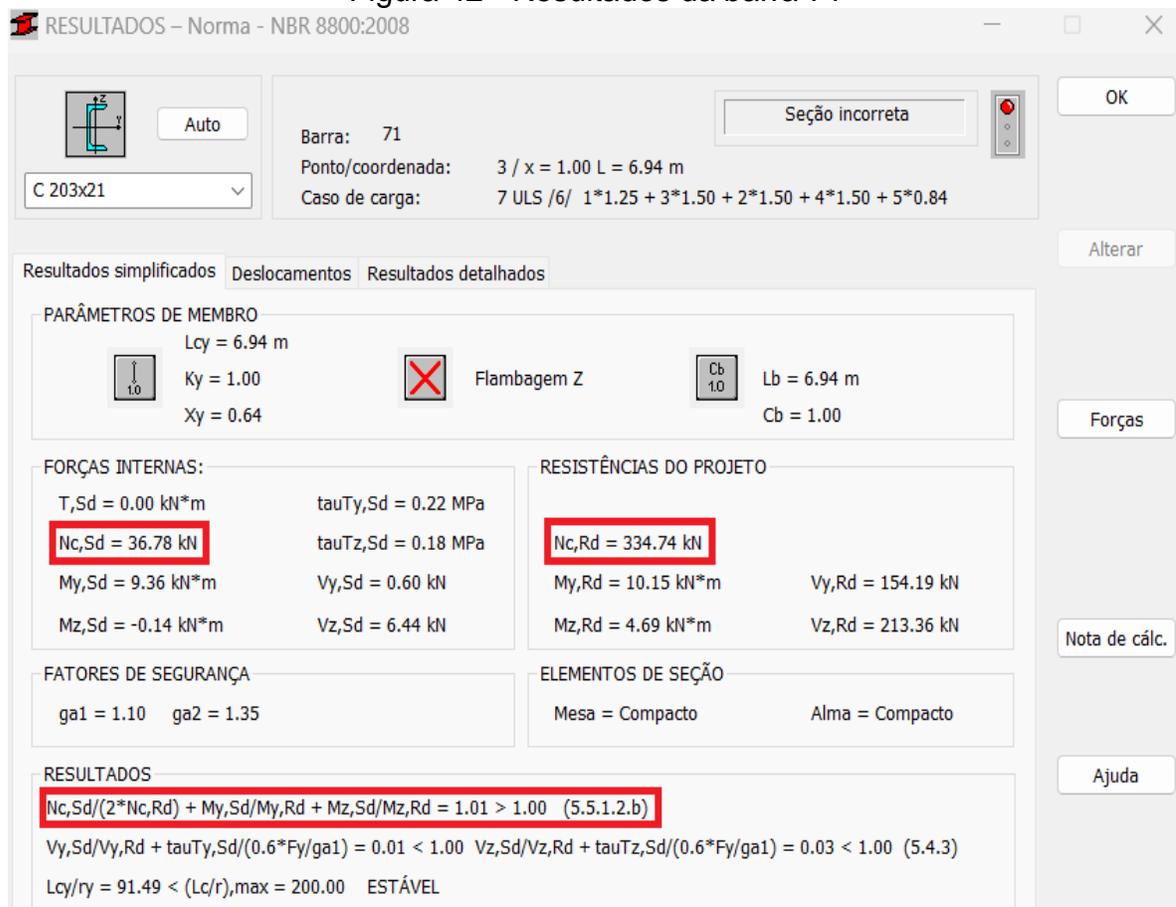


Fonte: Autodesk Robot (2023).

De acordo com a Figura 42, para condição de projeto, estrutura íntegra, somente a barra 71, um perfil C 203x21, utilizado na escada de acesso ao primeiro passadiço, apresentou

fator de trabalho acima de 1,0 ficando em 1,01. De acordo com a Figura 42 a barra 71 apresentou relação entre a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão (Nc,Sd) e a força resistente de cálculo (Nc,Rd) menor que 0,2. O item 5.5.1.2 da norma NBR 8800:2008 solicita que, para as ações simultâneas de força axial de tração ou de compressão e de momento fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida por algumas expressões de interações. Para este caso é seguida a alínea b da norma e barra é reprovada de acordo com Equação 7.

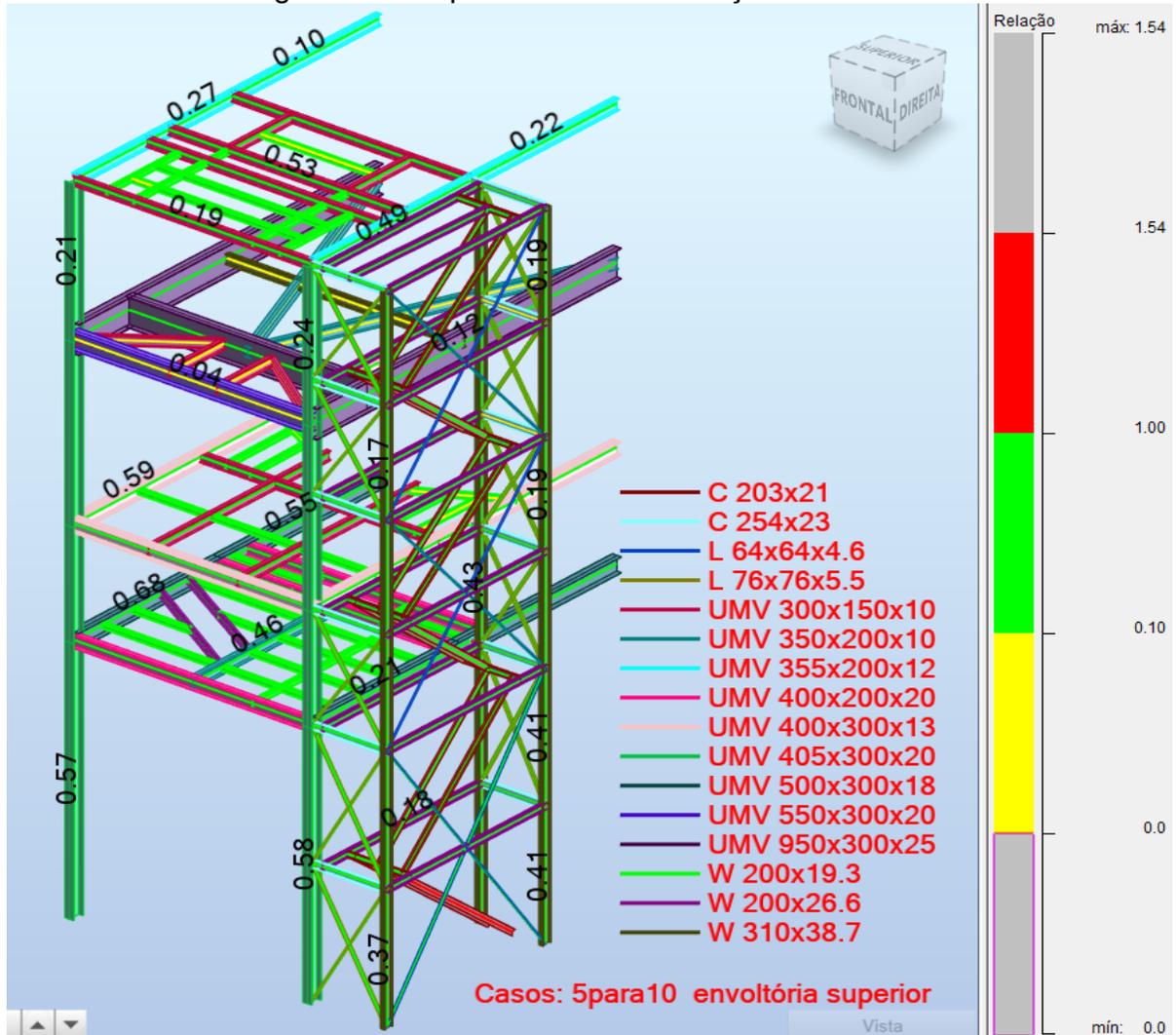
Figura 42 - Resultados da barra 71



Fonte: Autodesk Robot (2023).

A Figura 43 indica o mapa do fator de utilização das barras segundo a norma NBR 8800:2008.

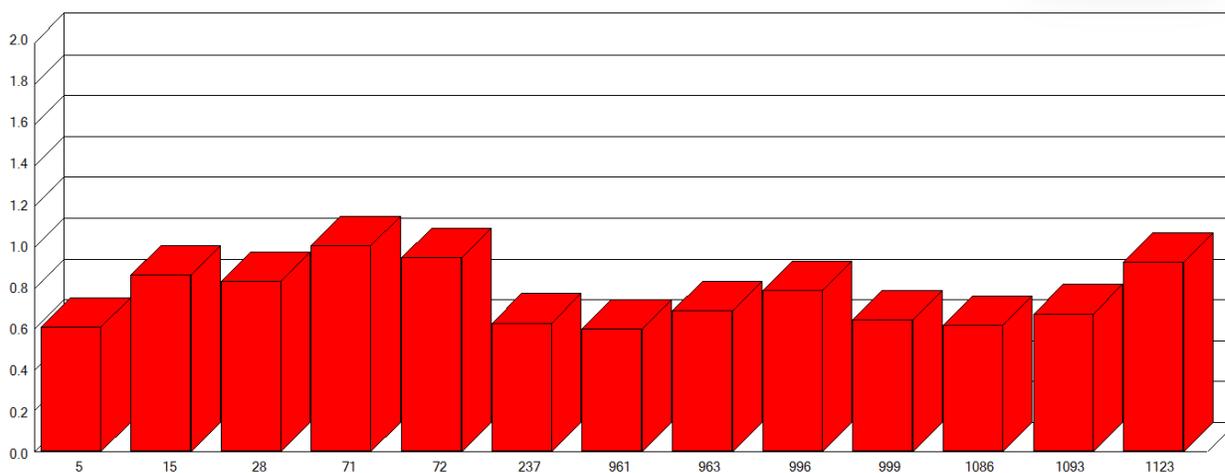
Figura 43 - Mapa do fator de utilização das barras



Fonte: Autodesk Robot (2023).

Com objetivo de identificar as peças que apresentam maiores valores de solicitação de cálculo, foi inserido um filtro no software para que fossem apresentadas somente as barras com fatores de utilização acima de 60% como indicado na Figura 44.

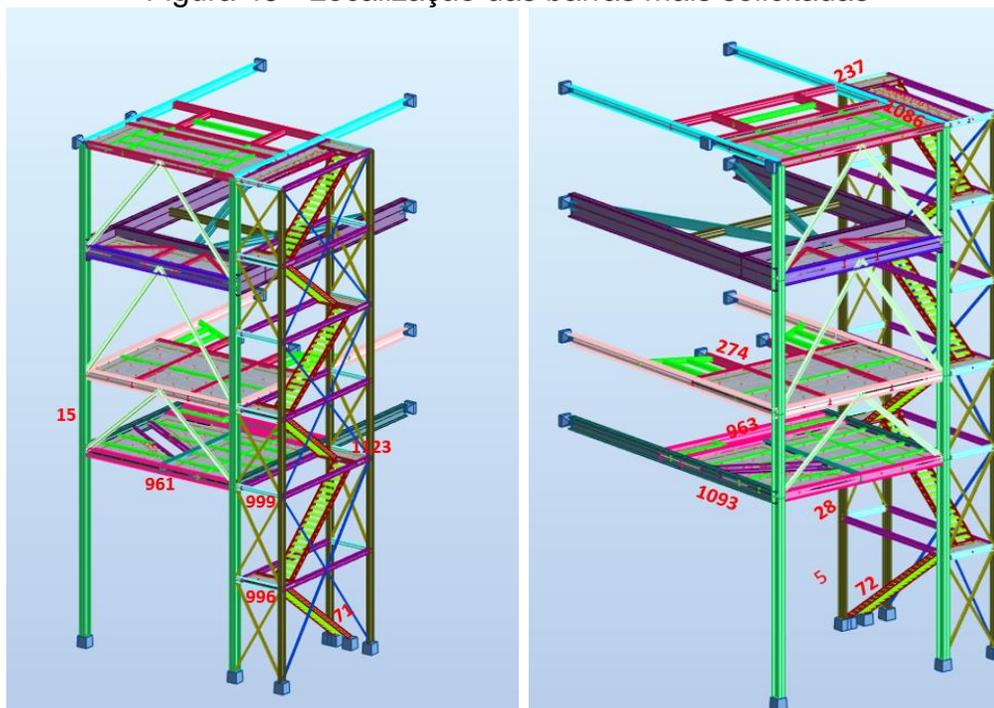
Figura 44 - Barras com maiores valores de solicitações de cálculo



Fonte: Autodesk Robot (2023).

A localização dessas peças é indicada na Figura 45, e irá servir como referência na análise das patologias encontradas e replicadas ao modelo computacional, com objetivo de avaliar a capacidade dessas barras em suportar os esforços estando as mesmas apresentando danos por corrosão.

Figura 45 - Localização das barras mais solicitadas



(a)

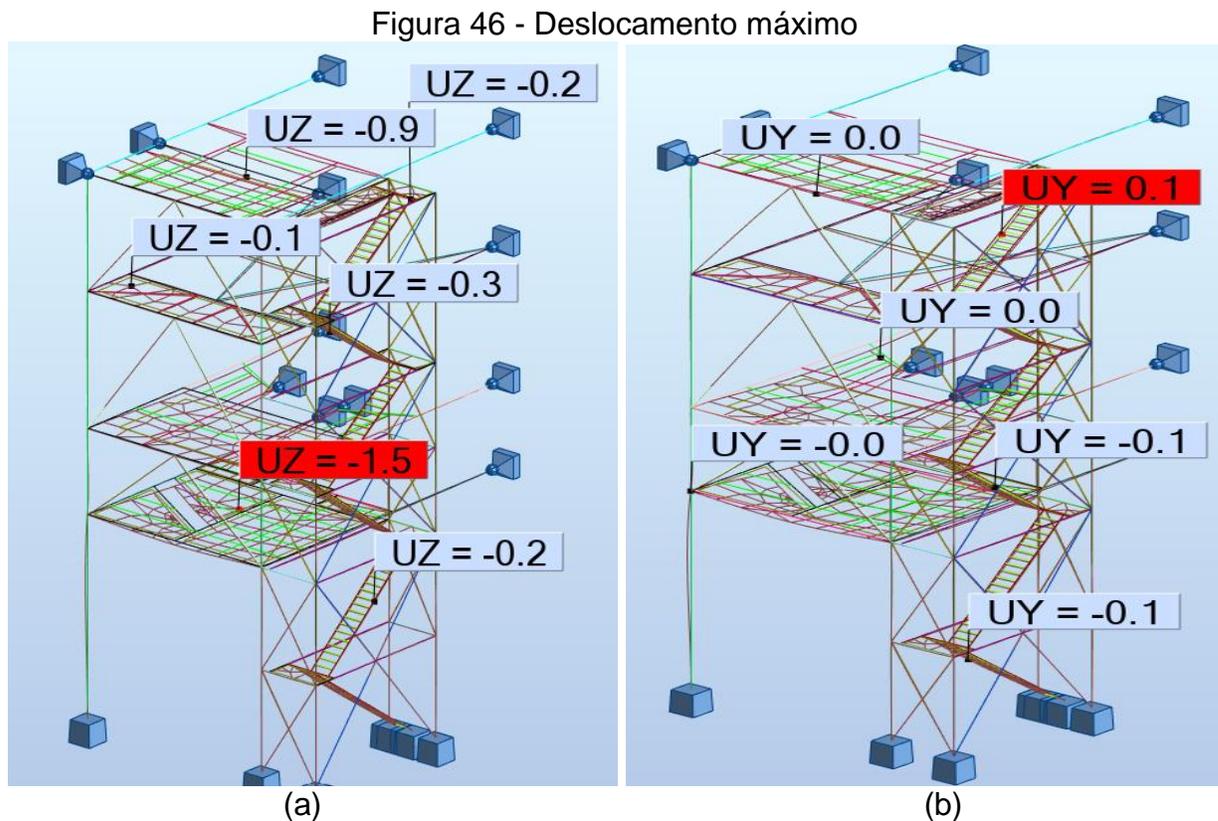
(b)

Fonte: Autodesk Robot (2023).

4.1.2 Deslocamentos

O deslocamento máximo da estrutura é baseado na norma ABNT NBR 8800:2008, no seu Anexo C. O deslocamento vertical da estrutura, segundo essa norma, é calculado pelo comprimento do vão/350. E o deslocamento horizontal para edifícios de dois ou mais pavimentos é dado por altura/400, tomando-se a altura do pilar em relação à base, segundo a norma.

A estrutura apresenta deslocamento máximo na vertical de 15mm como indicado na Figura 46 (a), sendo o limite definido como 35mm. Já o maior deslocamento horizontal é de 10mm nas direções X e Y como mostra-se na Figura 46 (b), sendo que o limite definido para esta estrutura é de 56mm.



Fonte: Autodesk Robot (2023).

4.2 Inspeção Visual

Através da inspeção visual identificam-se várias manifestações patológicas, desde as adquiridas devido a ação do meio e falta de manutenção, sendo a corrosão predominante, até as transmitidas, que são relacionadas ao desconhecimento e despreparo das pessoas, e as atávicas, que são aquelas relacionadas à concepção do projeto.

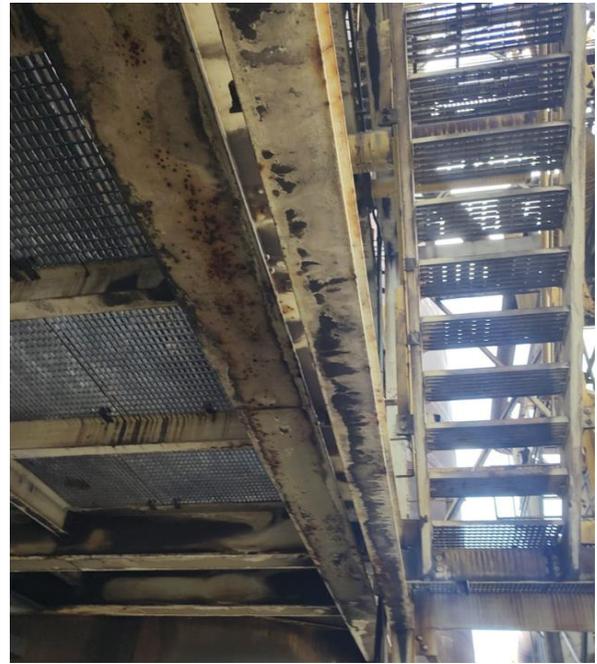
Devido à exposição à atmosfera industrial e sem proteção adequada, tem-se toda a estrutura tomada por uma camada fina de óxido caracterizando a corrosão como uniforme ou generalizada, Figura 47. Embora esse tipo de corrosão seja considerado menos perigoso se comparado com outros tipos, ele é capaz de causar uma redução de espessura nos perfis e, conseqüentemente, a redução da sua capacidade estrutural.

Figura 47 - Corrosão generalizada





(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: O autor (2023).

Observa-se também a corrosão localizada em várias regiões que propiciam o acúmulo de materiais e substâncias que retêm eletrólitos. Na Figura 48 indicam-se alguns pontos

com esse tipo de corrosão, que é muito comum devido a erros de projeto, disposição inadequada dos perfis, falta de furos para evitar acúmulo de água e perfis enterrados.

Figura 48 - Corrosão localizada

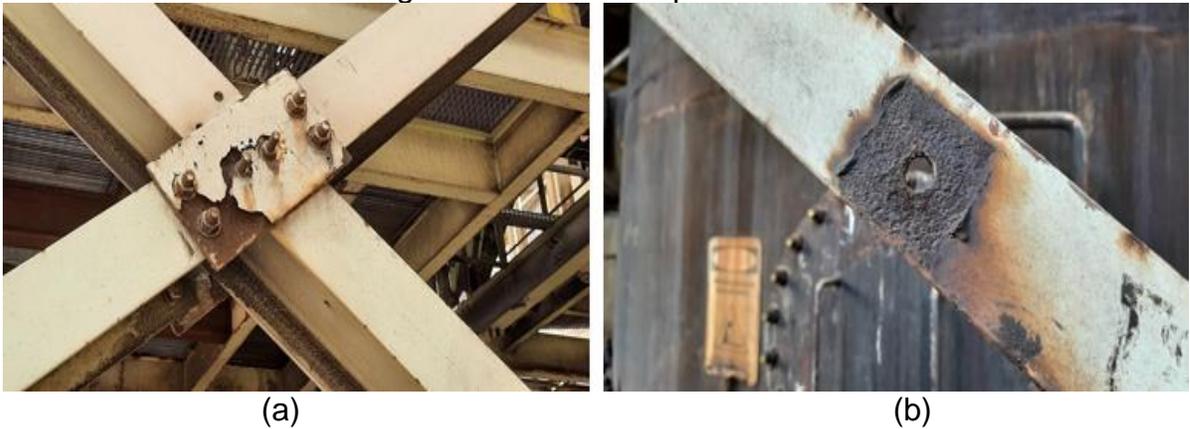




Fonte: O autor (2023).

E, ainda, têm-se alguns pontos críticos com a corrosão se iniciando devido a condições geométricas onde são estabelecidas frestas, entre junções de chapa e fixadores. Nessas regiões tem-se um grande acúmulo de eletrólitos (Figura 49). Esse tipo de corrosão é denominado corrosão por frestas e ocorre quando duas superfícies estão em contato ou muito próximas entre si, propiciando a formação de depósitos de poeira e umidade. É bastante recorrente em ligações estruturais.

Figura 49 - Corrosão por frestas





(c)



(d)



e)



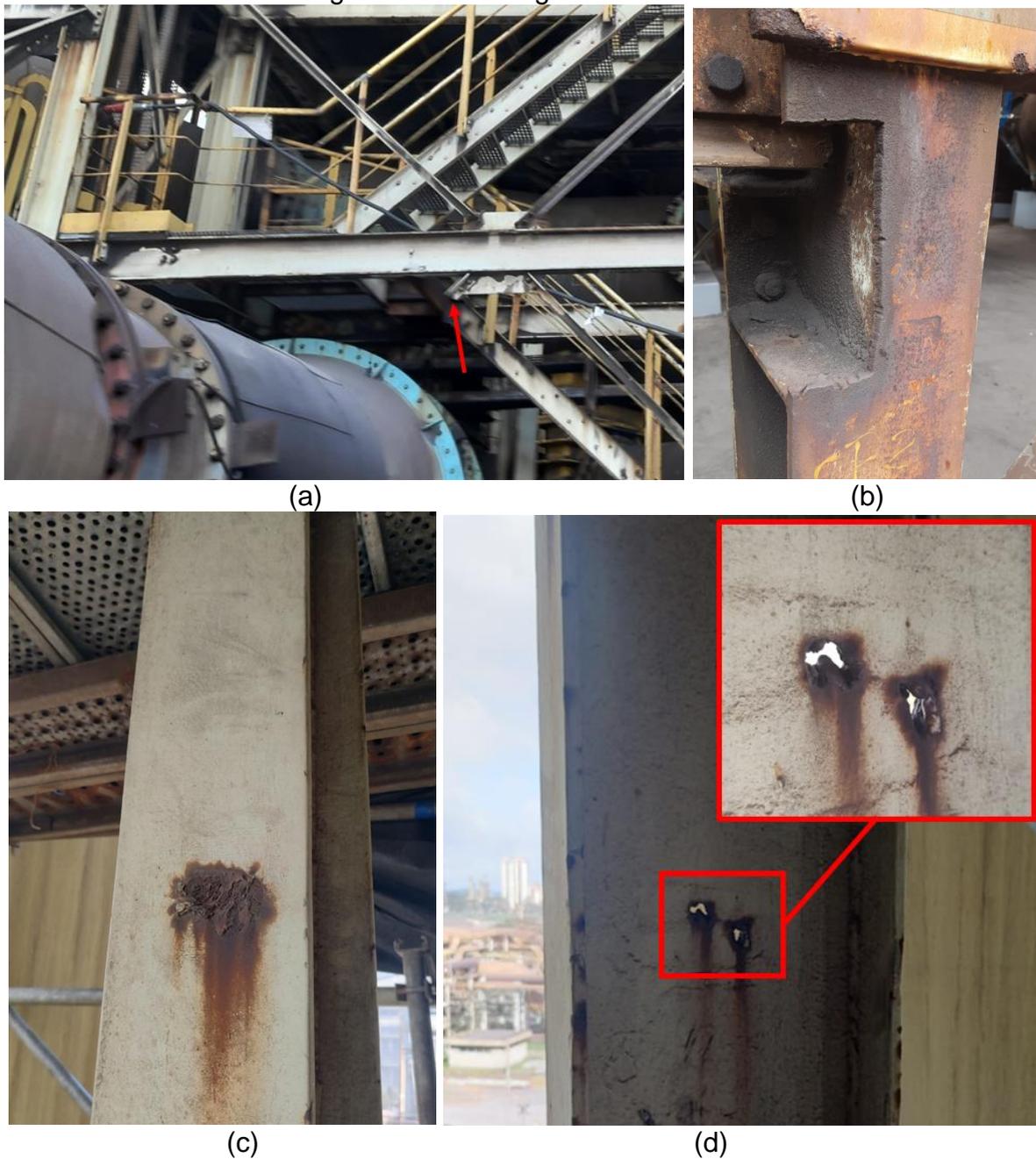
(f)

Fonte: O autor (2023).

Caracterizada como patologia transmitida, também foi evidenciado um tipo de manifestação patológica muito comum na indústria, em que, por questões de interferências com novas instalações ou mesmo por falta de conhecimento, profissionais removem membros estruturais concebidos em projeto. Na Figura 50 (a) a seta indica local onde um contraventamento foi removido e em (b) um recorte realizado na mesa do perfil. Em (c) e (d) indicam-se locais que podem ter sido utilizados para fixação de dispositivos temporários que, após eliminados, deixaram furos e reduções nos perfis.

Vale salientar que, dependendo do nível de modificação e sem a devida verificação estrutural necessária, toda a estrutura pode chegar ao colapso. É de extrema importância que toda e qualquer modificação seja verificada e aprovada por profissionais capacitados.

Figura 50 – Patologias transmitidas



Fonte: O autor (2023).

É possível verificar, que devido à evolução da corrosão em alguns elementos das estruturas próximo ao piso, onde, em geral, ocorre o acúmulo de água devido à necessidade de lavagem, pode-se notar a situação crítica em alguns pontos da estrutura, destacando-se, na Figura 51, a base de um pilar, cuja alma do perfil apresenta furos passantes.

Figura 51 - Corrosão na base dos pilares

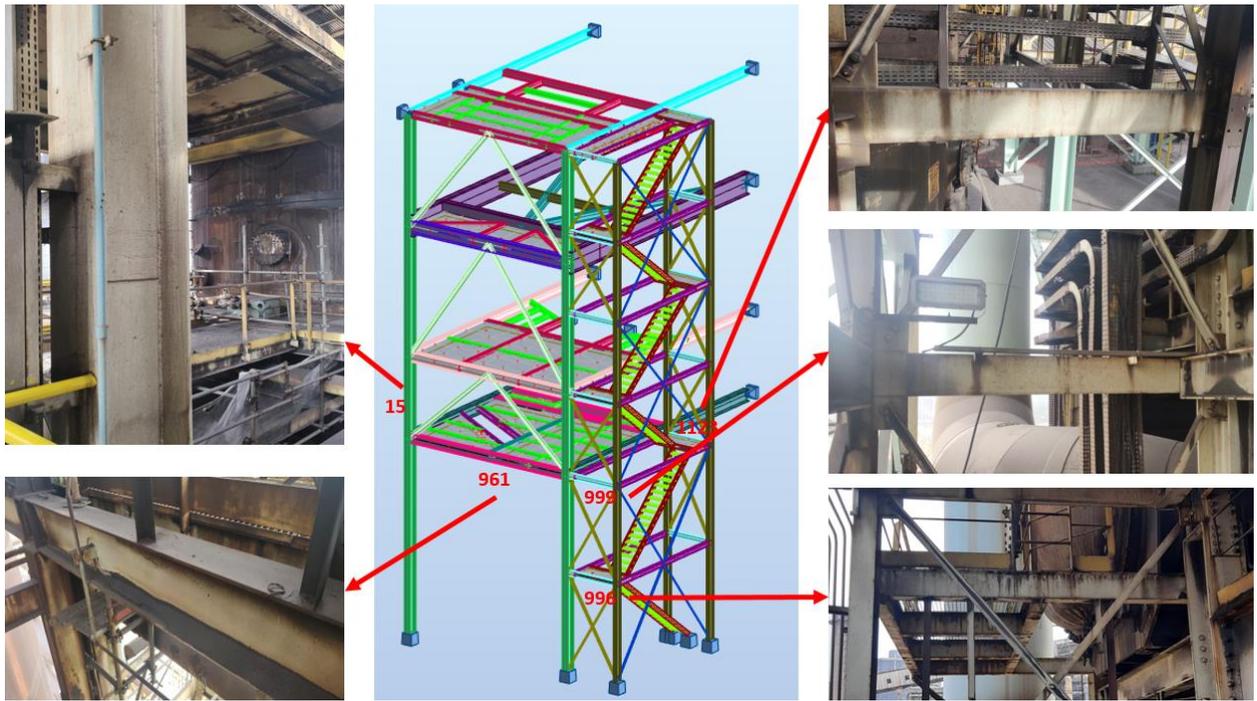


Fonte: O autor (2023)

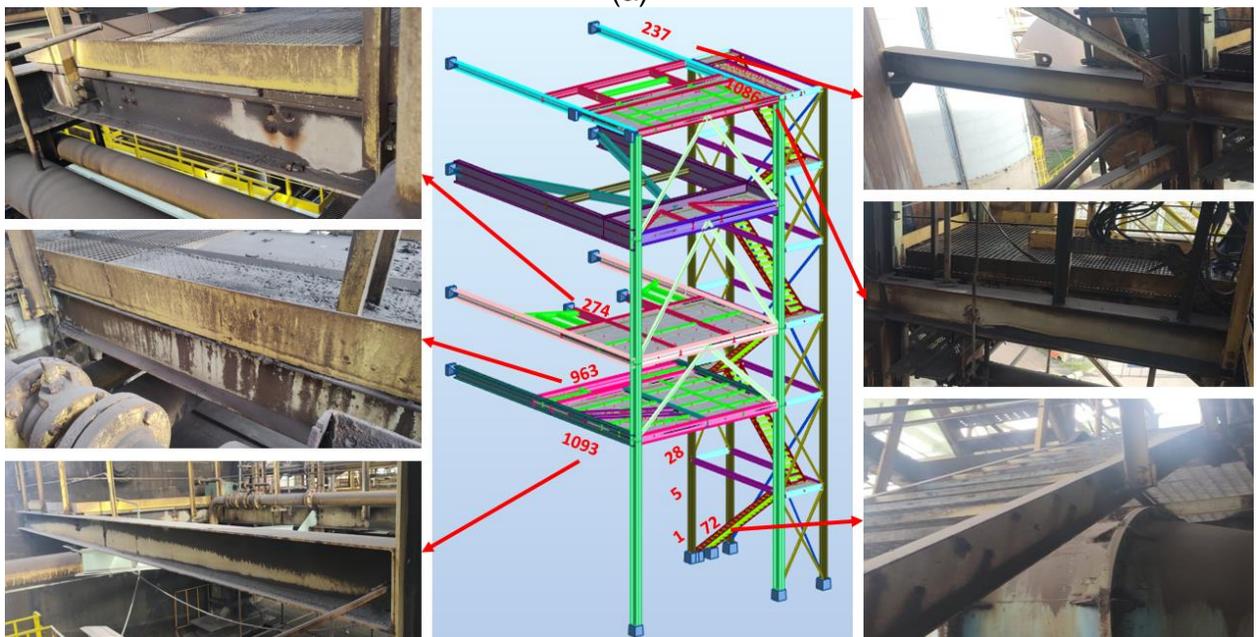
4.2.1 Peças com maiores solicitações

Como mostrado no item 4.1.1, algumas barras apresentaram razão entre os valores de cálculo dos esforços atuante pelos os esforços resistentes acima de 0,6. Na Figura 52 são apresentados os resultados obtidos na inspeção visual realizada nestas barras identificadas como sendo as de maiores solicitações de cálculo.

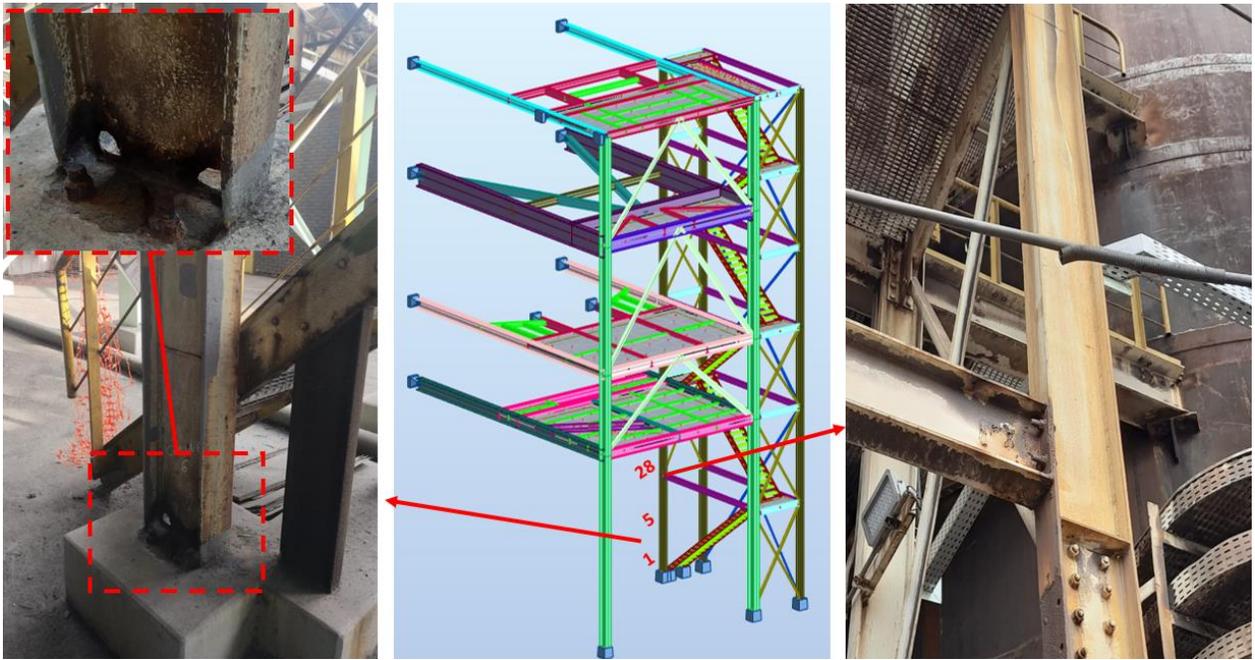
Figura 52 - Indicação das barras mais solicitadas



(a)



(b)



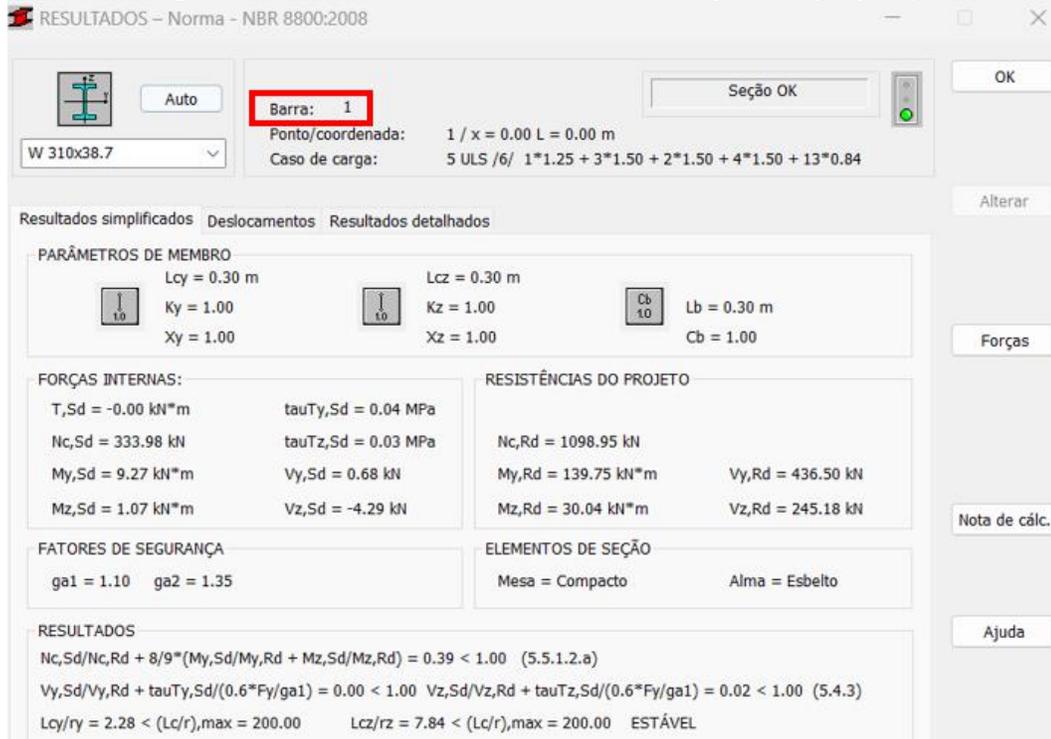
(c)

Fonte: O autor (2023).

No geral, observa-se que as peças possuem uma camada fina de óxido, o que pode ser caracterizada como corrosão uniforme ou generalizada, indicando uma perda de espessura máxima de 1,0mm e conseqüentemente não havendo grandes redução da sua capacidade resistente. De forma a introduzir danos a essas barras, as seções dos perfis foram editadas de forma que representam esta perda de espessura máxima.

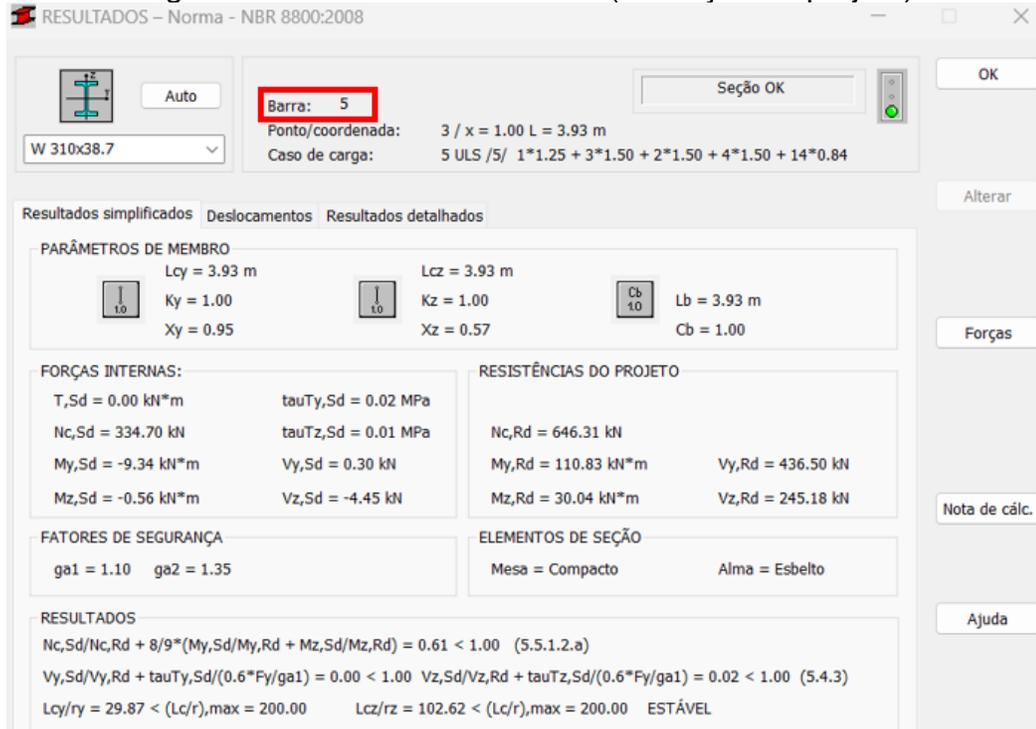
Como mostrado na Figura 52 (c), verifica-se que o pilar identificado com as barras 1 e 5 é o que apresenta pior situação, com intensa degradação devido ao ataque corrosivo, indicando furos passantes na alma do perfil. Embora este elemento tenha apresentado fator de utilização de 0,39 e 0,61 para condição de projeto, como indicado na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente, trata-se de um dos pilares de sustentação das escadas de acesso às plataformas, indicando-se sua imediata substituição.

Figura 53 - Resultado da barra 1 (Condição de projeto)



Fonte: Autodesk Robot (2023).

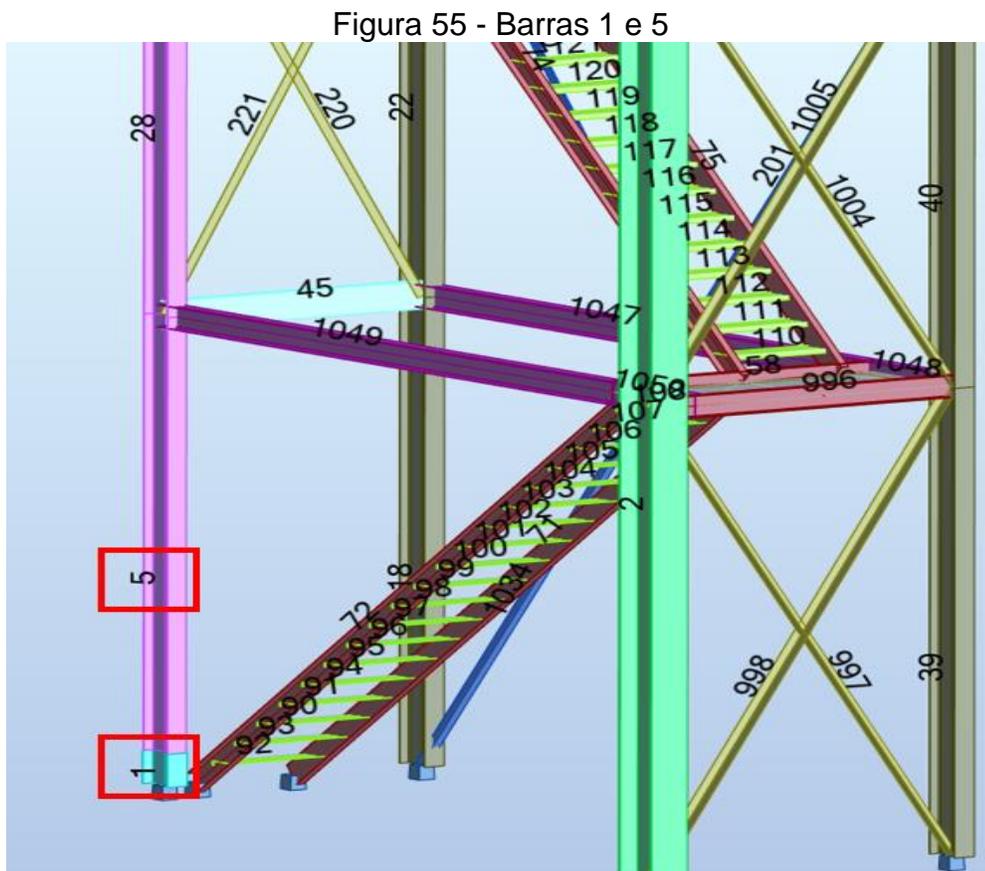
Figura 54 - Resultado da barra 5 (Condição de projeto)



Fonte: Autodesk Robot (2023).

4.2.2 Resultados da estrutura para condição corroída

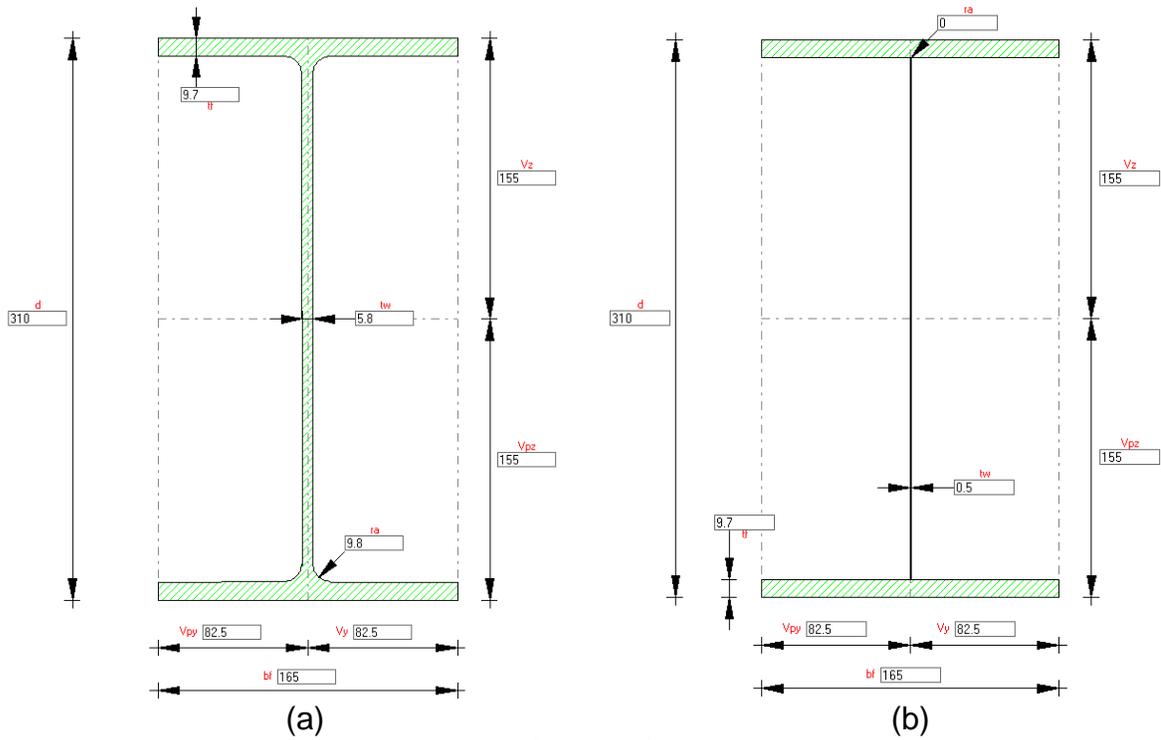
Na sequência, são apresentados os resultados da simulação considerando as devidas reduções por perda de espessura nas barras de maiores solicitações. Devido a considerável perda de espessura na base do pilar, foi feita a divisão da barra, sendo a barra 1 modelada com 300mm como mostra-se na Figura 55, na altura aproximada da perda de espessura da estrutura real.



Fonte: Fonte: Autodesk Robot (2023)

E para representar a intensa degradação evidenciada neste pilar, Figura 56 (a), foi aplicado uma redução na espessura da alma t_w conforme indicado na Figura 56 (b).

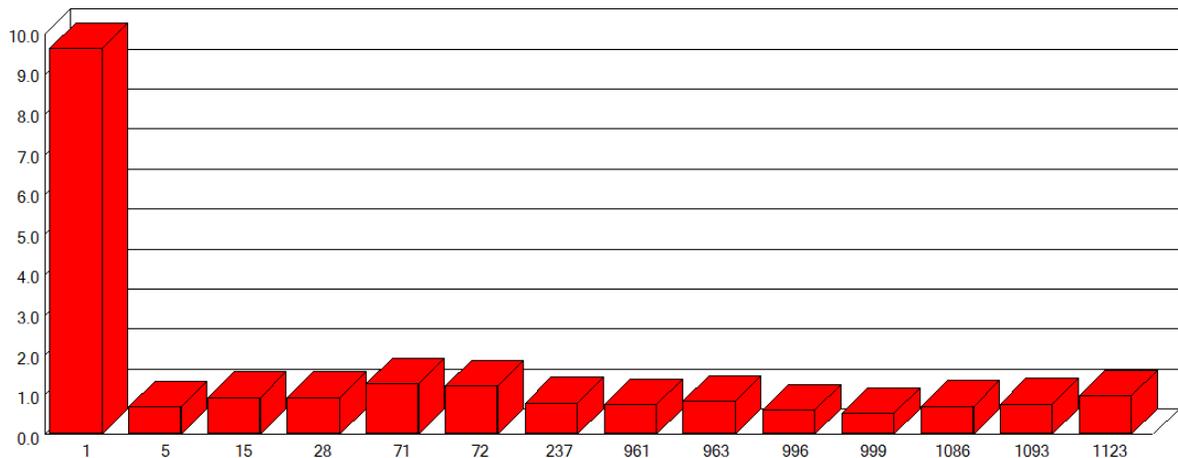
Figura 56 - Perfil do pilar (barra 1)



Fonte: O autor (2023).

Conforme o gráfico da Figura 57 utilizando a norma ABNT NBR 8800:2008 para avaliação dos perfis, tem-se que as barras 1, 71 e 72 não atenderam as prescrições normativas. Para as demais barras, a introdução do dano teve pouca influência na sua resistência.

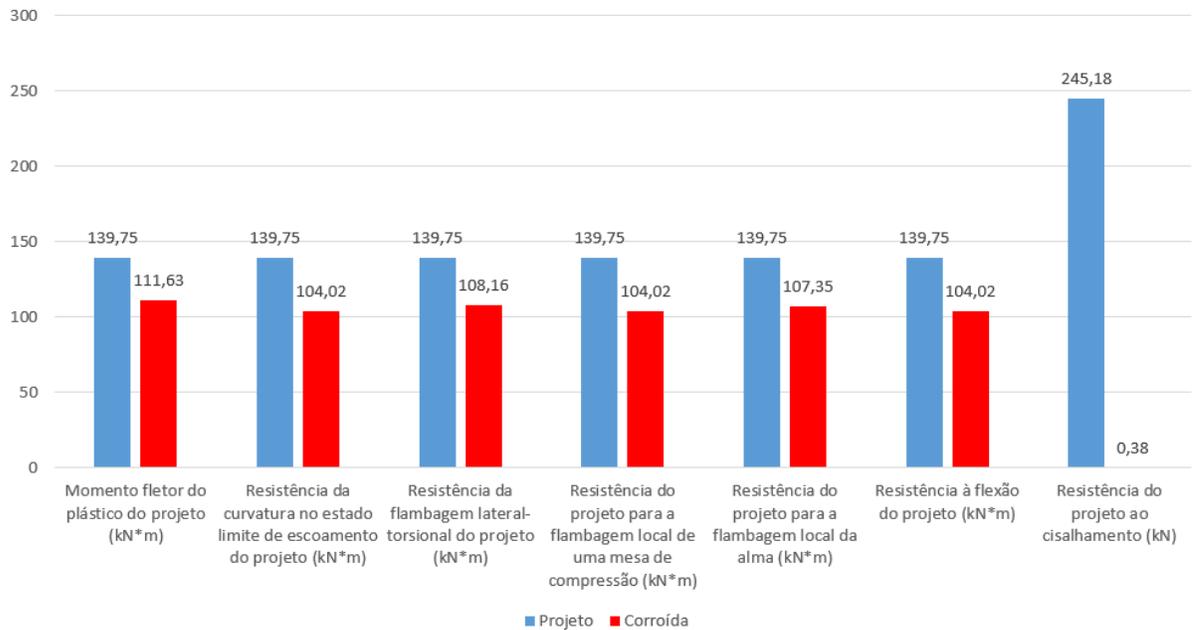
Figura 57 - Barras de maiores solicitações com danos introduzidos



Fonte: Fonte: Autodesk Robot (2023).

Em relação à barra 1, com a perda na espessura da alma, pode-se evidenciar uma grande redução na capacidade resistente do pilar quanto ao cisalhamento como demonstrado no gráfico da Figura 58 , o que justifica o aumento no fator de utilização da barra.

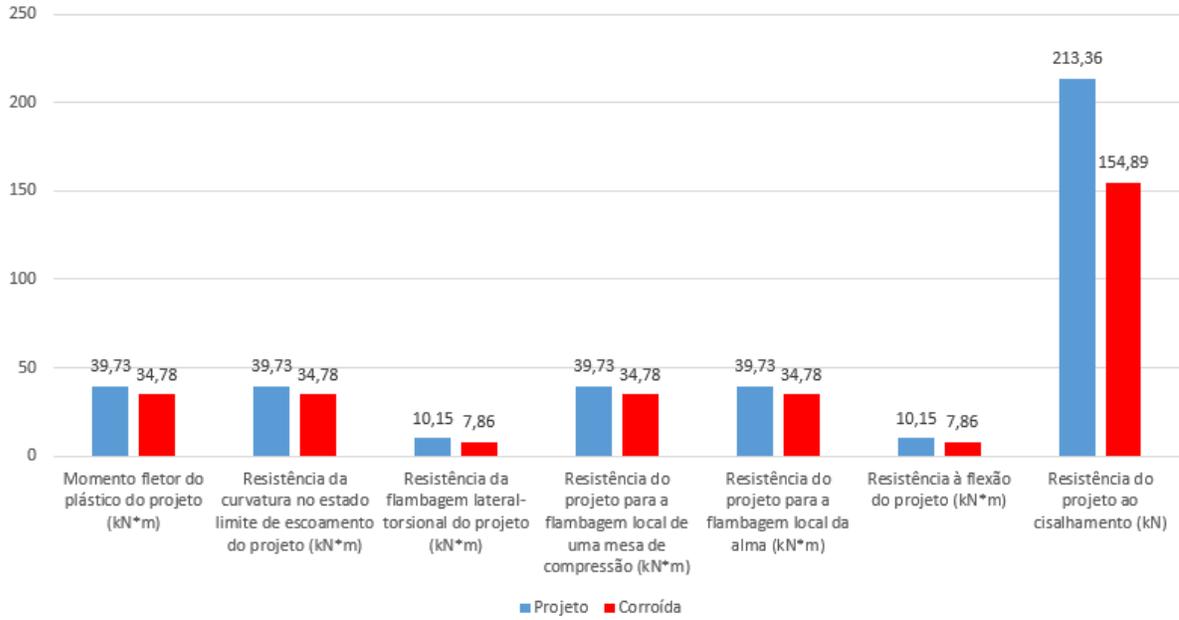
Figura 58 - Resistência de cálculo (Barra 1)



Fonte: O autor (2023).

O gráfico da Figura 59 indica os resultados comparativo das resistências das barras 71 e 72 de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, para condição de projeto e condição corroída. Para ambas as barras, a reprovação se dá através da eq. 7, quando ocorre a atuação simultânea de força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores.

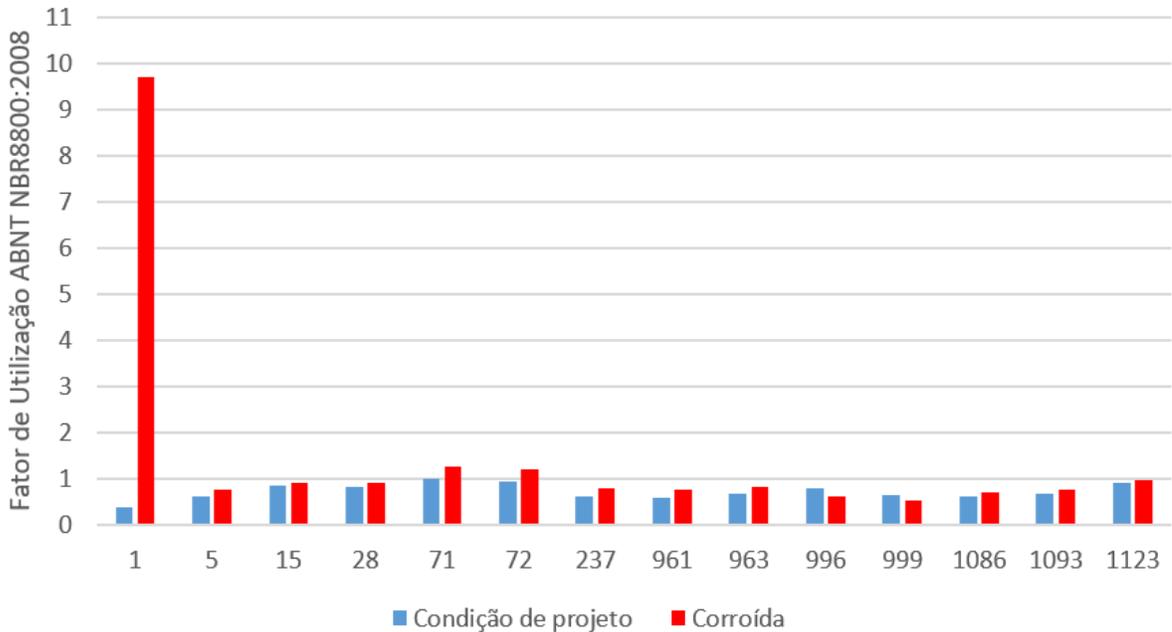
Figura 59 - Resistência de cálculo (Barra 71 e 72)



Fonte: O autor (2023).

O gráfico da Figura 60 mostra um comparativo entre os resultados das barras mais solicitadas considerando a condição de projeto e com os danos introduzidos no modelo.

Figura 60 - Comparativo dos resultados das barras mais solicitadas



Fonte: O autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do levantamento de campo foi possível identificar a corrosão sendo predominante em grande parte das estruturas. Em geral, por estarem localizadas em uma área industrial, as estruturas de aço inspecionadas apresentam perda na sua proteção por tinta, corrosão generalizada em grande parte, corrosão localizada com alta severidade indicando elevada perda de espessura e o risco de colapso em algumas peças.

Foi possível identificar também a falta de alguns elementos estruturais retirados por possíveis interferências com novas instalações e outros em não conformidade com o projeto disponível.

Com o presente estudo, foi possível introduzir danos na estrutura de forma para simular, com o auxílio do software Autodesk Robot, possíveis reduções de espessura nos perfis de aço devido à corrosão. Com exceção do pilar que apresenta elevado grau de degradação e que necessita de substituição de forma imediata, pode-se observar que a introdução dos danos no modelo matemático teve influência insignificante na resistência dos elementos estruturais. Essa situação foi obtida comparando-se os fatores de trabalho calculados conforme a norma ABNT 8800:2008.

Através deste trabalho pode-se concluir também que muitos dos problemas evidenciados poderiam ser menores e alguns até mesmo não existir, caso fosse adotado um programa de manutenção preventiva com frequência, treinamento das equipes responsáveis de forma a evitar as patologias transmitidas e a realização de inspeções periódicas. Com isso, é possível garantir a vida útil das estruturas e reduzir os elevados custos com a substituição de peças já em estado avançado de degradação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120: Ações para cálculos de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

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

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 6ª ed. Editora Érica Ltda. São Paulo, 2007.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE – Análise não linear**. 1ª ed. Editora Érica Ltda. São Paulo, 2012.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E632-82: Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials (Withdrawn 2005)**. West Conshohocken, 1988.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS (ASTM). **G-46: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**. West Conshohocken, 2005.

ANDRADE, S; VELLASCO, P. **Comportamento e Projeto de Estruturas de Aço**. Grupo GEN, Rio de Janeiro, RJ. 2016.

AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE. **API 579: Recommended practice for Fitness-For-Service**. Washington, 2000.

AUTODESK. **Robot Structural Analysis Professional**. Versão estudantil 2023. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/robot-structural-analysis-professional?sort=score>> Acesso em: 18 abr. 2023.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1ª. ed. Porto, 2003. Disponível em: <<http://www.alvaroazevedo.com/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CÂNDIDO, L. C. **Patologia – Notas de aula do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**. Universidade federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

CAPORRINO, Cristiana Furlan: **Patologia em alvenarias**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

COOK, Robert D.; MALKUS, David S.; PLESHA, Michael E.; WITTI, Robert J. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4th. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, 2002.

DAL'BÓ, T.C.M.; SARTORTI, A.L. **Falhas e Patologias nas Estruturas Metálicas**. Construmetal. São Paulo, 2012.

DI SARNO, L.; MAJIDIAN, A.; KARAGIANNAKIS, G. **The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study**. Buildings 2021, 11, 571. Disponível em <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>. Acesso em 10 de mai. 2022.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. D. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto**. São Paulo: Pearson, 2016.

FERNANDES, T. G. **Análise estrutural comparativa dos resultados obtidos pelos softwares robot structural analysis e sap2000 por meio do estudo de caso de um centro administrativo**. Monografia (Graduação engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2022.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Grupo GEN, Rio de Janeiro, 2009.

FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. 3ª ed. New York, 1987.

FRANÇA, A. V.; MARCONDES, C. G. N.; ROCHA, F. C. da; MEDEIROS, M. H. F. de; HELENE, P. R. L. **Patologia das construções: uma especialidade na engenharia civil (2011)**. Técnica. V. 19, n. 174, p. 72-77, set. 2011.

GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. **Manual Tratamento de Superfície e Pintura**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Grupo GEN, 2022.

HELENE, Paulo R. Do Lago. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9223: Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification, Determination and Estimation**. Geneva, Switzerland, 2012.

KASSIMALI, A. **Análise Estrutural** - Tradução da 5ª edição norte-americana. Cengage Learning Brasil, 2016.

MARTHA, L. **Análise de Estruturas - Conceitos e Métodos Básicos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Grupo GEN, 2017.

MOHANNAD, H. A; VYACHESLAV, L.; ESRAA, M. E; SVITLANA, S. **Corrosion of metal construction structures**. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e tratamento de superfície**. IFPA, Santa Maria, UFSM, Belém, 2012. 104p

PANNONI, F. D. **Projeto e durabilidade**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2009.

RIBAS, R, A, J. **Avaliação das condições físico-construtivas e de desempenho de uma edificação estruturada em aço. Estudo de caso: Prédio da EM da UFOP**. Dissertação (pós-graduação engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

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

SILVA, S. B. F. **Otimização de sistemas estruturais para galpões utilizando o método dos elementos finitos**. Dissertação (pós-graduação construções metálicas) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.