

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

FELIPE BEDIN

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS TIPO PERFIL U
SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADOS COM
DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO

BENTO GONÇALVES

2022

FELIPE BEDIN

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS TIPO PERFIL U
SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADOS COM
DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva.

BENTO GONÇALVES

2022

FELIPE BEDIN

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS TIPO PERFIL U
SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADOS COM
DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva.

Aprovado em ___/___/___

Banca Examinadora:

Presidente

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Examinadores:

Prof. Me. Luciano Zatti

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Mauricio Monteiro Almeron

Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental para buscar entender a influência da modificação superficial por corrosão acelerada em relação a resistência de vigas metálicas. Foram utilizados oito corpos de prova do tipo perfil U e aço A-36, sem revestimento, com altura de 75 mm, largura de 40 mm, espessura de chapa de 2 mm e comprimento de 300 mm. Os oito corpos de prova foram divididos em quatro grupos, onde três dos quatro grupos ficaram respectivamente, uma semana, quatro semanas e nove semanas em ensaio de corrosão acelerada, com o uso de câmara de névoa salina. O último grupo foi definido como sendo o grupo de controle e não foi submetido a ensaio de corrosão. O ensaio de corrosão foi conduzido em laboratório com pessoal especializado e ao final foi disponibilizado um relatório para cada grupo e seu respectivo tempo de exposição. Para o ensaio de resistência foi optado por realizar ensaios de flexão, em conformidade com os equipamentos disponíveis em laboratório, dessa forma, possibilitando um ensaio de três pontos. Esse ensaio começou pelos corpos de prova de controle para se ter um valor base em comparação com os outros grupos que foram ensaiados posteriormente. Também foi feita a comparação em relação ao peso dos corpos de prova de controle em relação ao restante dos grupos. O experimento constatou primeiramente que para as peças submetidas a ensaio de corrosão, o revestimento superficial é imperativo para assegurar a integridade dessas peças. E o aumento de peso dos corpos de prova, tem relação com o acúmulo de partículas de cloreto de sódio na superfície das peças. Por fim ficou evidente que a resistência das peças decresce em função do tempo, pois quanto maior o tempo de exposição da peça na câmara de névoa salina, maior é a perda de resistência.

Palavras-chave: Corrosão; Tempo de Exposição; Ensaio de Flexão; Resistência; Corpos de Prova.

ABSTRACT

This work presents an experimental study to seek to understand the influence of surface modification by accelerated corrosion process in relation to the resistance of metallic beams. Were used eight specimens with U profile and A-36 steel type, without coating, with height of 75 mm, 40 mm wide, thickness of 2 mm and length of 300 mm. The eight specimen were divided into four groups, where three of the four groups stayed respectively, one, four and nine weeks in accelerated corrosion test, using the salt spray chamber. The fourth group was defined as being the control group and it wasn't submitted to the corrosion test. The corrosion test was conducted in laboratory with specialized personnel and in the end was provided a report for each group and their respective time of exposition. For the resistance test was opted to perform bending tests, accordingly with the availability of laboratory equipments, therefore, allowing an three point test. This test started with the control specimens for having a base value compared to the other groups that were tested later. There was also made a comparison related to the weight of the control specimen related to the other groups. The experiment first noted that for the pieces exposed to accelerated corrosion test, the superficial coating is imperative to ensure the integrity of the specimens. The increase on the weight of the specimen, have relation with the accumulation of sodium chloride particles in the surface of the pieces. Finally was evident that the resistance of the specimen decreases as a function of the time elapsed, because the grater the time of exposition is in the salt spray chamber, the grater is the lost of resistance.

Keywords: Corrosion; Exposition Time; Bending Test; Resistance; Specimen.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Delineamento das Etapas do Trabalho | 11 |
| Figura 2 – Ponte Coalbrookdale | 12 |
| Figura 3 – Ponte sobre o rio Paraíba do Sul | 13 |
| Figura 4 – Exemplo de falha de projeto em obra | 20 |
| Figura 5 – Exemplo de defeito de montagem em obra..... | 21 |
| Figura 6 – Exemplo de corrosão em fresta de uma ligação parafusada | 24 |
| Figura 7 – Exemplo de corrosão uniforme em coluna de aço | 24 |
| Figura 8 – Exemplo do mecanismo de corrosão por frestas..... | 28 |
| Figura 9 – Mecanismo de corrosão em frestas | 29 |
| Figura 10 – Seções transversais mais usadas em elementos fletidos | 34 |
| Figura 11 – Esquema de aplicação de cargas em viga submetida a flexão simples | 35 |
| Figura 12 – Enrijecedor transversal em apoio de primeiro gênero..... | 36 |
| Figura 13 – Enrijecedor transversal em apoio de segundo gênero | 36 |
| Figura 14 – Esquema dos apoios de primeira e segundo gênero respectivamente..... | 36 |
| Figura 15 – Esquema de ensaio de flexão | 37 |
| Figura 16 – Esquema montado para ensaio | 37 |
| Figura 17 – Posicionamento dos extensômetros ao longo da viga | 38 |
| Figura 18 – Posicionamento dos extensômetros em seção transversal | 38 |
| Figura 19 – Posicionamento dos extensômetros..... | 38 |
| Figura 20 – Posicionamento dos deflectômetros | 39 |
| Figura 21 – Perfil das peças ensaiadas | 40 |
| Figura 22 – Corpos de prova | 42 |
| Figura 23 – Corpos de prova identificados..... | 42 |
| Figura 24 – Câmara de névoa salina modelo USX-6000/2012 utilizada no ensaio | 43 |
| Figura 25 – Prensa hidráulica de 200 kN, modelo Emic DL2000..... | 44 |
| Figura 26 – Esquema de ensaio de flexão | 45 |
| Figura 27 – Distancia dos apoios..... | 45 |
| Figura 28 – Corpos de prova de controle | 46 |
| Figura 29 – Peça V4A posicionada para início do ensaio de flexão | 47 |
| Figura 30 – Peça V4A após ensaio de flexão | 47 |
| Figura 31 – Peças V4A e V4B após ensaio de flexão | 48 |
| Figura 32 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V4A | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V4B..... | 49 |
| Figura 34 – Imperfeições e manchas V1A e V1B | 50 |
| Figura 35 – Imperfeições e manchas V1A e V1B | 50 |
| Figura 36 – Peças V1 com 24 horas de exposição | 51 |
| Figura 37 – Peças V1 com 24 horas de exposição | 51 |
| Figura 38 – Peças V1 com 72 horas de exposição | 52 |
| Figura 39 – Peças V1 com 72 horas de exposição | 52 |
| Figura 40 – Peças V1 com 168 horas de exposição | 53 |
| Figura 41 – Peças V1 com 168 horas de exposição | 53 |
| Figura 42 – Peças V1A e V1B preparadas para ensaio de flexão | 55 |
| Figura 43 – V1A posicionada nos apoios..... | 55 |
| Figura 44 – V1A Submetida a flexão | 56 |
| Figura 45 – V1A Após ensaio de flexão..... | 56 |
| Figura 46 – V1B posicionada nos apoios | 57 |
| Figura 47 – V1B Após ensaio de flexão..... | 57 |
| Figura 48 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V1A | 58 |
| Figura 49 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V1B..... | 58 |
| Figura 50 – Imperfeições e manchas V2A e V2B | 59 |
| Figura 51 – Imperfeições e manchas V2A e V2B | 60 |
| Figura 52 – Peças V2 com 24 horas de exposição | 60 |
| Figura 53 – Peças V2 com 168 horas de exposição | 61 |
| Figura 54 – Peças V2 com 336 horas de exposição | 61 |
| Figura 55 – Peças V2 com 504 horas de exposição | 62 |
| Figura 56 – Peças V2 com 672 horas de exposição | 62 |
| Figura 57 – Peças V2A e V2B preparadas para ensaio de flexão | 64 |
| Figura 58 – V2A posicionada nos apoios..... | 65 |
| Figura 59 – V2A Após ensaio de flexão..... | 65 |
| Figura 60 – V2B posicionada nos apoios | 66 |
| Figura 61 – V2B Após ensaio de flexão..... | 66 |
| Figura 62 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V2A | 67 |
| Figura 63 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V2B..... | 67 |
| Figura 64 – Imperfeições e manchas V3A e V3B | 68 |
| Figura 65 – Imperfeições e manchas V3A e V3B | 68 |
| Figura 66 – Peças V3 com 24 horas de exposição | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 67 – Peças V3 com 168 horas de exposição | 69 |
| Figura 68 – Peças V3 com 336 horas de exposição | 70 |
| Figura 69 – Peças V3 com 504 horas de exposição | 70 |
| Figura 70 – Peças V3 com 1008 horas de exposição | 71 |
| Figura 71 – Peças V3 com 1344 horas de exposição | 71 |
| Figura 72 – Peças V3 com 1512 horas de exposição | 72 |
| Figura 73 – Peças V3A e V3B preparadas para ensaio de flexão | 73 |
| Figura 74 – V3A posicionada nos apoios..... | 74 |
| Figura 75 – V3A após ensaio de flexão..... | 74 |
| Figura 76 – V3B posicionada nos apoios | 75 |
| Figura 77 – V3B após ensaio de flexão..... | 75 |
| Figura 78 – Gráfico Froça x Deslocamento Vertical Peça V3A | 76 |
| Figura 79 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V3B..... | 76 |
| Figura 80 – Gráfico Força Máxima x Tempo de Exposição | 77 |
| Figura 81 – Gráfico Peso dos Corpos de Prova x Tempo de Exposição | 78 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Normas referentes aos ensaios acelerados de corrosão | 32 |
| Quadro 2 – Quantidade e tempo de exposição dos corpos de prova | 41 |
| Quadro 3 – Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V1 | 54 |
| Quadro 4 – Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V2 | 63 |
| Quadro 5 – Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V3 | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Principais origens de manifestações patológicas na construção civil..... | 19 |
| Tabela 2 – Resumo força máxima em relação ao tempo de exposição | 77 |
| Tabela 3 – Resumo peso em relação ao tempo de exposição | 78 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABCEN | Associação Brasileira da Construção Metálica |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AISC | American Institute of Steel Construction |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAGED | Cadastro Geral de Empregados e Desempregados |
| CBCA | Centro Brasileiro de Construção em Aço |
| CSN | Companhia Siderúrgica Nacional |
| FEM | Fábrica de Estruturas Metálicas |
| ICMS | Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação |
| LCOR | Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial |
| LRFD | Load and Resistance Factor Design |
| NBR | Norma Brasileira |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 5 |
| 1.1 DIRETRIZES DE PESQUISA..... | 9 |
| 1.1.1 Questão de pesquisa..... | 9 |
| 1.1.2 Objetivos..... | 9 |
| 1.1.2.1 Geral | 9 |
| 1.1.2.2 Específicos..... | 9 |
| 1.1.3 Hipótese | 9 |
| 1.1.4 Delimitações | 10 |
| 1.1.5 Delineamento..... | 10 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.1 HISTÓRIA DO AÇO | 12 |
| 2.2 TIPOLOGIAS..... | 13 |
| 2.2.1 Aços na construção civil..... | 14 |
| 2.2.2 Aços em armaduras para concreto | 15 |
| 2.2.3 Aços em estruturas metálicas | 16 |
| 2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AÇO ESTRUTURAL..... | 17 |
| 2.4 PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS | 18 |
| 2.5 PROCESSOS CORROSIVOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS..... | 22 |
| 2.5.1 Formas de corrosão | 23 |
| 2.5.1.1 Corrosão uniforme..... | 24 |
| 2.5.1.1.1 Causas..... | 25 |
| 2.5.1.1.2 Terapia e controle | 26 |
| 2.5.1.2 Corrosão em frestas | 26 |
| 2.5.1.2.1 Causas..... | 27 |
| 2.5.1.2.2 Terapia e controle | 29 |
| 2.5.1.3 Corrosão galvânica | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.2 Ensaio de corrosão atmosférica | 31 |
| 2.5.2.1 Ensaio de corrosão em laboratório | 31 |
| 2.6 ENSAIO DE FLEXÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS | 33 |
| 3 METODOLOGIA..... | 40 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL..... | 40 |
| 3.2 ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA | 43 |
| 3.3 ENSAIO DE FLEXÃO | 44 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 46 |
| 4.1 ENSAIO DE FLEXÃO PEÇAS V4A E V4B CORPOS DE CONTROLE | 46 |
| 4.2 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE UMA SEMANA - PEÇAS V1A E V1B | 50 |
| 4.2.1 Ensaio de flexão peças V1A e V1B | 54 |
| 4.3 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE QUATRO SEMANAS - PEÇAS V2A E V2B | 59 |
| 4.3.1 Ensaio de flexão peças V2A e V2B | 64 |
| 4.4 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE NOVE SEMANAS - PEÇAS V3A E V3B | 68 |
| 4.4.1 Ensaio de flexão peças V3A e V3B | 73 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 80 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 81 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |

1 INTRODUÇÃO

Estruturas metálicas são elementos estruturais onde sua seção é feita totalmente em material metálico, geralmente aço. Sua composição se dá essencialmente em ferro e carbono e sua resistência está ligada a quantidade de carbono utilizada. Quanto mais carbono for adicionado no elemento, maior será sua resistência, porém este se tornará mais duro e frágil. Dessa forma, se faz necessário a importância de um profissional qualificado para realizar o projeto estrutural, tendo noção do correto dimensionamento e definição do aço a ser utilizado (PEREIRA, 2018).

De acordo com Chiaverini (1982), para a maioria dos aços estruturais, o teor de carbono varia de 0,15% a 0,40%, com elementos como manganês, silício e enxofre considerados com seus teores normais. Para o aço carbono com manganês usado em torno de 0,20% e 0,50% respectivamente, apresenta um limite de escoamento de 245 MPa e limite de resistência de 410 MPa.

Quanto mais se eleva o teor de carbono mais esses limites aumentam, consequentemente elevando o teor de manganês. A melhora destas características acarreta na redução da trabalhabilidade ou deformabilidade do aço, desse modo, sempre deve-se levar em conta esses fatores quando se projeta a utilização de algum aço com maior resistência mecânica (CHIAVERINI, 1982).

Na construção civil o aço representa uma das principais matérias primas, com diversas aplicações, como armaduras em concreto, fundações, pontes, viadutos, estruturas metálicas, etc. (IMIANOWSKY e WALENDOWSKY, 2018). Castro (1999) comenta que o Brasil, em sua época, possuía um grande mercado para o aço em prédios industriais e de shoppings centers por causa das características estéticas, de industrialização, rapidez e a elevada capacidade de carga que possuíam. Porém, com relação a edifícios comerciais, teatros, escolas e alguns outros, o autor comenta que eram projetados com estruturas de aço, mas em menor escala. O setor estava muito restrito a segmentos de maior poder aquisitivo no mercado, entretanto, já havia uma percepção de que o aço estaria se popularizando cada vez mais no mercado.

O uso das estruturas metálicas na construção civil vem sendo cada vez maior por possuírem diversas vantagens em uma obra, principalmente quando se trata da agilidade que o processo de instalação oferece a obra. A flexibilidade da aplicação dessas estruturas é um diferencial que a torna muito competitiva no mercado (COPPERMETAL, 2020).

Atualmente no Brasil, o uso de estruturas de aço tem substituído cada vez mais outros materiais como concreto ou madeira. Pois conforme o Caged (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados), o setor da construção civil gerou mais de 40 mil empregos somente no mês de julho de 2020. Acarretando num aumento de 147% em relação ao mês de junho do mesmo ano, demonstrando a força desse segmento, por mais que no Brasil, ainda exista uma cultura estagnada do uso de concreto por profissionais, muito diferente de outros países da Europa, Ásia e Estados Unidos, onde as estruturas de aço são usadas com mais frequência (COPPERMETAL, 2020).

O segmento da construção civil é muito importante para a economia do Brasil, por esse motivo é uma das apostas da indústria na retomada pós-covid. Dessa forma para cumprir a demanda e a grande responsabilidade, é necessária agilidade proporcional nos processos, pois a tendência é o crescimento cada vez maior do setor de estruturas metálicas (COPPERMETAL, 2020).

Através das pesquisas anuais feitas pelo Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) aos fabricantes de estruturas de aço. Os estudos com base no ano de 2020, refletem um período de incertezas geradas pela pandemia de covid-19, porém apresentam números de crescimento. As 325 empresas que participaram desse cenário, mostraram que foram produzidas 1,03 milhões de toneladas de estrutura de aço, tendo um crescimento de 24,9% em relação a 2019. Isso levou um crescimento de 49,3% no faturamento das empresas, onde em 2018 havia um faturamento de 5,1 bilhões, em 2019 de 7,1 bilhões e em 2020 de 10,6 bilhões. Dessa forma mostrando que o faturamento das empresas dobrou. Houve também um aumento nos empregos, com crescimento de 7,3%, ou seja, cerca de 48% dos fabricantes de estruturas de aço aumentaram seus quadros de funcionários devido ao aumento da demanda (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

A grande vantagem das estruturas de aço se dá na agilidade no processo, costumam ser mais caras, por se tratar de um material mais nobre. E muitas vezes faz com que profissionais optem pelos modelos em concreto. Apesar disso, no cálculo em relação a tempo e dinheiro o preço acaba compensando graças à agilidade, dependendo da obra (COPPERMETAL, 2020).

De acordo com Alexandre Queiroz Schmidt, presidente da Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCCEM), em entrevista para o Portal Siderurgia Brasil (2020) o uso de estruturas de aço, embora longe de atingir um estado ideal de utilização no Brasil, possuem perspectivas boas para o futuro próximo, fundamentadas pelos investimentos privados e também pelas expectativas do início de obras em infraestrutura a partir do ano

de 2021. Alexandre ainda comenta que o principal desafio para a utilização de estruturas metálicas no Brasil é a questão da tributação, que sobrecarrega a construção industrializada, principalmente na questão da incidência do ICMS, que em comparação com sistemas que são moldados em obra, é muito mais alta. Há também o fato do Brasil ser um país muito grande e em regiões como o Norte ou Nordeste, existe a grande distância para a aquisição de insumos e a falta de profissionais, tanto para projetar quando para executar as estruturas de aço (PORTAL SIDERURGIA BRASIL, 2020).

Castro (1999) aborda o estudo das patologias na construção civil através de um parecer histórico. Henry Lossier em 1926 aborda o termo “patologia” para delimitar o estudo de danos em estruturas de concreto armado. Em 1951 Caetano Casteli publica um livro acerca dos problemas no concreto armado com o nome de “Patologia del Cemento Armado”. Já em 1976 é implantado o primeiro curso na área de patologia pelo Instituto Eduardo Torroja na Espanha, denominado “Patologia de las Contruccionen”, seu principal foco era para professores e pesquisadores da área da engenharia civil. Todavia, a maioria desses trabalhos teve foco em estruturas de concreto.

Com relação a estruturas de aço, Castro (1999) menciona que os trabalhos sobre patologia desenvolvidos especificamente para engenharia civil são raros e o estudo das patologias encontrados requerem conhecimento prático que somente os profissionais envolvidos com o assunto possuem.

Dentro das patologias do aço, Castro (1999) menciona sobre a corrosão, que dentro das patologias em geral possui um maior conhecimento público, pois é um fenômeno muito comum no dia a dia das pessoas.

Pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, normalmente metálico, através de ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração pode representar alterações prejudiciais no material, como o desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando o material não adequado para uso (GENTIL, 2011).

Ainda para Gentil (2011) por ser um processo espontâneo, a corrosão está continuamente transformando materiais metálicos, afetando sua durabilidade e desempenho, deixando de satisfazer os fins que os mesmos se destinam. Esse fenômeno está presente em diversas outras aplicações suscetíveis a corrosão como:

- a) em estruturas enterradas ou submersas, minerodutos, oleodutos, gasodutos, adutoras, cabos de comunicação e energia elétrica, píeres de atracação ou

embarcações, tanques para armazenagem de combustíveis, emissários submarinos;

b) em meios de transportes, como trens, navios, aviões, automóveis, caminhões e ônibus;

c) em estruturas metálicas sobre o solo ou aéreas, torres de transmissão de energia elétrica, postes de iluminação, linhas telefônicas, tanques de armazenamento, instalações industriais, viadutos, passarelas e pontes;

d) equipamentos eletrônicos, torres de transmissão de estações de rádio, de TV, repetidoras, de radar, antenas etc.;

e) equipamentos como reatores, trocadores de calor e caldeiras.

Todas as instalações citadas possuem um alto investimento, exigem durabilidade e resistência à corrosão que possa justificar o valor investido e evite acidentes com danos materiais ou até mesmo danos pessoais (GENTIL, 2011).

No emprego das estruturas metálicas na construção civil o metal mais usado na confecção desses perfis é o aço carbono, devido as suas propriedades mecânicas. Em suas aplicações, deve ser utilizado com o uso de proteção superficial pois possui grande tendência a apresentar corrosão. O principal meio de ocorrência do fenômeno é através da atmosfera. Mas é comum encontrar corrosão também em casos em que a estrutura metálica está em contato com meios propagadores, como o solo e ou/água (CASTRO, 1999).

Contudo, o presente trabalho buscou realizar uma análise dos efeitos da corrosão nas propriedades de resistência de vigas metálicas passando por um processo de corrosão através de ensaios acelerados considerando tempos de exposição diferentes. Pois de acordo com Gonçalves (1989 apud CASTRO, 1999) a redução da seção transversal de perfis estruturais é o principal problema causado pela corrosão. E esta redução pode aumentar a concentração de tensões aplicadas, através da diminuição da área efetiva do elemento e conseqüentemente reduzindo a última capacidade resistente e, em casos extremos provocando o colapso da estrutura através de insuficiência de seção ou perda de estabilidade.

1.1 DIRETRIZES DE PESQUISA

1.1.1 Questão de pesquisa

Corpos de prova expostos ao processo de corrosão acelerada, em períodos de tempo crescente, apresentarão uma linearidade em relação a diminuição da resistência dos mesmos em função do tempo de exposição?

1.1.2 Objetivos

Os objetivos para a realização do trabalho estão classificados como geral e específicos e estão descritos conforme abaixo.

1.1.2.1 Geral

Analisar os efeitos da corrosão nas propriedades de resistência de vigas metálicas corroídas por meio de ensaios acelerados considerando tempos de exposição diferentes.

1.1.2.2 Específicos

- a) realizar ensaios laboratoriais de corrosão acelerada com câmara de névoa salina, utilizando diferentes tempos de exposição e gerando diferentes graus de corrosão;
- b) analisar a resistência das peças à flexão, com ensaio de três pontos, em comparação com amostras de controle conforme o aumento do grau de corrosão;
- c) analisar o comportamento das vigas corroídas através de operações que expressem, em termos relativos, as diferenças de atributos entre os dados obtidos.

1.1.3 Hipótese

Supõe-se que será apontada uma linearidade no decréscimo da resistência em função do tempo de exposição de cada corpo de prova, ou seja, quanto maior for o tempo de exposição do corpo de prova maior será a redução de resistência.

1.1.4 Delimitações

Análise dos efeitos da corrosão no comportamento de resistência a flexão, por meio de testes laboratoriais com vigas metálicas de perfil U e com diferentes tempos de exposição em ensaio de corrosão acelerada, para uma, quatro e nove semanas.

1.1.5 Delineamento

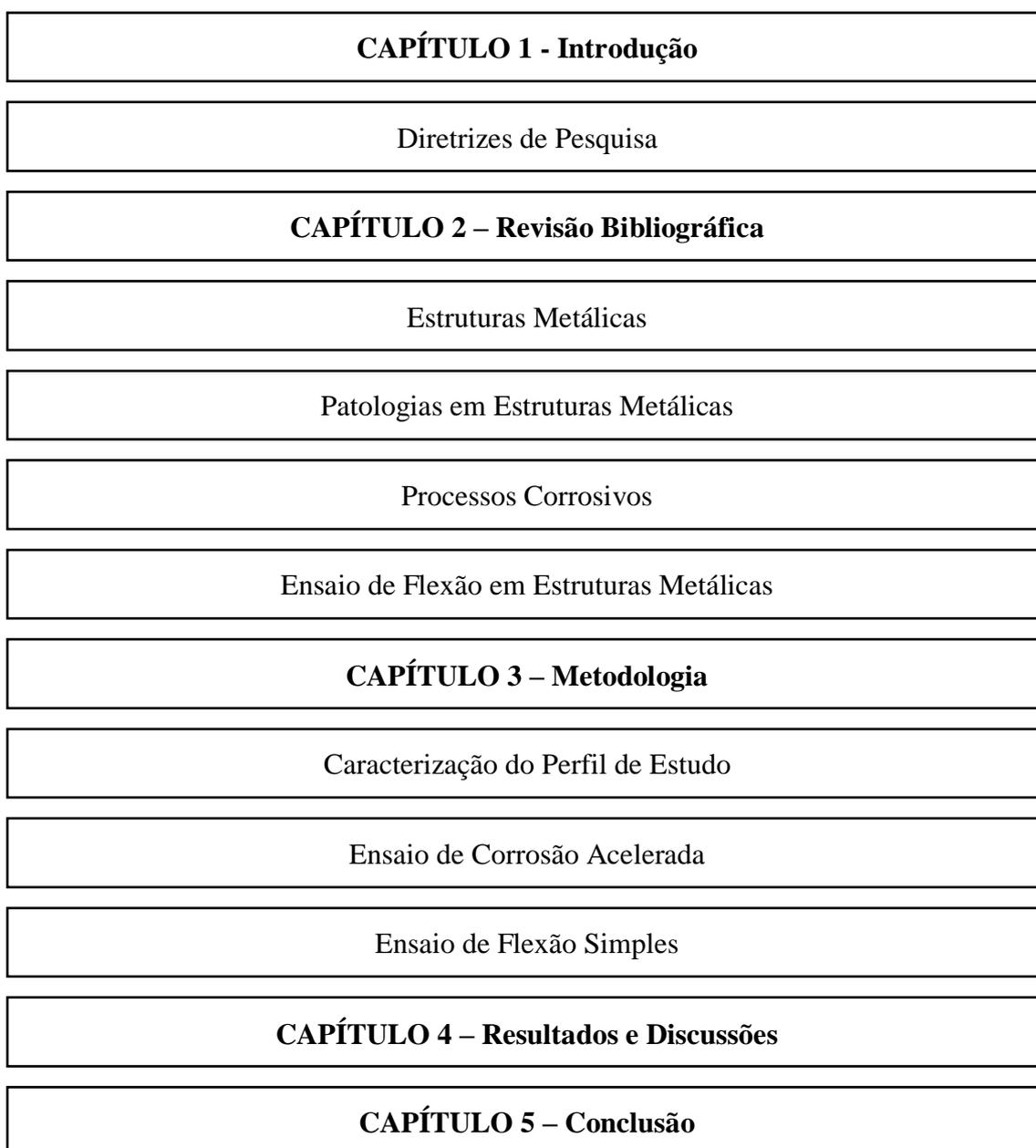
A estruturação do presente trabalho terá cinco macros etapas, conforme representado na Figura 1 abaixo. O primeiro capítulo fará referência a introdução do tema e abordará o plano de trabalho como um todo.

No segundo capítulo estará contemplada a revisão bibliográfica onde representará temas como: o que são estruturas metálicas, a sustentabilidade na construção civil, as vantagens e desvantagens das estruturas metálicas, patologias em estruturas metálicas e pôr fim a análise do processo corrosivo. Servirá para dar embasamento teórico e técnico ao trabalho.

A partir do capítulo 3 inicia-se a metodologia do trabalho, onde foram adquiridos os corpos de prova e começou-se o processo de aceleração da corrosão. E como última etapa foram feitos os testes de resistência mecânica dos corpos de prova após os períodos de exposição.

No capítulo 4 foram analisados os resultados conforme os testes de resistência desenvolvidos no capítulo anterior. E por fim no capítulo 5 a conclusão do trabalho, apresentando a resposta da questão problema.

Figura 1 – Delineamento das Etapas do Trabalho



Fonte: Autor (2022).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DO AÇO

Inicialmente de acordo com Pfeil e Pfeil (2009), na construção moderna, o primeiro material siderúrgico usado foi o ferro fundido. Entre os anos de 1780 e 1820 foram construídas pontes em arco ou treliçadas, com peças em ferro fundido. A primeira ponte feita desse material foi a ponte de Coalbrookdale, que se localizava sobre o rio Severn, na Inglaterra conforme Figura 2.

Figura 2 – Ponte Coalbrookdale



Fonte: PFEIL E PFEIL (2009).

Em meados do século XVIII foi utilizado o ferro forjado em correntes que portavam pontes suspensas. Um exemplo de estrutura utilizando ferro forjado foi a ponte suspensa de Menai, no País de Gales, construída no período de 1819 até 1826, sobre um vão de 175 metros de comprimento (PFEIL; PFEIL, 2009).

No Brasil, foi inaugurada a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro em 1857, onde ela se estende por um vão de 30 metros e é suportada por arcos com tirantes, feitos de ferro fundido e os tirantes em ferro forjado, apresentado na Figura 3 (PFEIL; PFEIL, 2009).

Figura 3 – Ponte sobre o rio Paraíba do Sul



Fonte: PFEIL E PFEIL (2009).

No século XIX o ferro fundido acabou sendo substituído pelo ferro forjado, por causa da maior segurança que ele proporcionava. Muitas obras importantes foram construídas entre os anos de 1850 e 1880, como por exemplo, pontes ferroviárias. Todavia, o número de acidentes relacionados com essas obras acabou acarretando a necessidade de estudos melhores, mais aprofundados e materiais melhores para essas estruturas (PFEIL; PFEIL, 2009).

De acordo com Pinheiro (2005), há indícios do início da utilização em escala industrial de estruturas de aço a partir do ano de 1750. No Brasil deu-se início a fabricação dessas estruturas em 1812, porém, o avanço em grande escala da fabricação dos perfis ocorreu com a implantação de grandes siderúrgicas. Como a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, em Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro, que deu início a suas operações no ano de 1946.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), hoje a indústria siderúrgica brasileira dispõe de diversas fábricas, com capacidade de produzir peças para grandes estruturas. Um bom exemplo histórico é o Edifício Avenida Central, localizado no Rio de Janeiro, o primeiro edifício alto feito em estrutura metálica do Brasil, executado pela FEM – Fábrica de Estruturas Metálicas da CSN em 1961.

2.2 TIPOLOGIAS

Do ponto de vista das aplicações dos aços, eles podem ser classificados em várias categorias, cada uma com suas próprias características (Chiaverini, 1996 apud PFEIL;

PFEIL, 2009). A diferença entre os aços se dá pela forma, tamanho, uniformidade da composição dos grãos e composição química. Dependendo da aplicação final do material sua composição pode ser alterada para o determinado fim, e a partir da alteração na composição, obtém-se aços com diferentes graus de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão etc. Dessa forma, as propriedades dos aços são excelentes para resistir a esforços de tração, compressão, flexão e por ser um material homogêneo, ele pode ser laminado, forjado, estampado, estriado e suas propriedades podem ser alteradas através de procedimentos térmicos ou químicos (FERRAZ, 2005).

No nosso dia a dia o aço está abundantemente presente em diversas ocasiões, sendo utilizado em restaurantes, cozinhas industriais, hospitais, laboratórios, empresas em geral, nas casas das pessoas. Suas características são muito importantes para os mais diversos usos e em forma de utensílios domésticos. Com relação as suas propriedades, se caracterizam a resistência a baixa e altas temperaturas, superfície higiênica que evita o acúmulo de resíduos, a sua composição química que o impede de descascar, sua longa durabilidade e baixo custo de manutenção (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

O aço está presente nos transportes, deslocando a população entre destinos, interligando cidades, conduzindo cargas, distribuindo riquezas e espalhando o progresso. Também é usado pela indústria em geral para embalagens e recipientes, frisando a sua importância na conservação e transporte de alimentos, produtos químicos, agrícolas, tintas, gases de cozinha e industriais. Amplamente aplicado em hidrelétricas, termelétricas e nucleares, torres de transmissão, transformadores, cabos, plataformas, tubulações, equipamentos de prospecção e extração de petróleo, perfuratrizes, esteiras e caçambas de minas de carvão. Bastante usado também no setor agrícola, para equipamentos como arados, colheitadeiras, ceifadeiras, grandes silos e graneleiros, quando se trata de armazenagem (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

2.2.1 Aços na construção civil

Na construção civil a utilização do aço se faz muito importante quando se trata de ações estruturais de média e alta resistência mecânica, o termo se refere a aços que são adequados para a utilização em elementos de construção que estão sujeitos a solicitações, caracterizando suas propriedades devido a resistência, ductilidade e outras (CBCA, 2021).

Na aplicação estrutural são solicitados os principais requisitos: elevada tensão de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em operações tais como corte, furação e dobramento, sem que se originem fissuras ou outros defeitos (CBCA, 2021).

De acordo com Teobaldo (2004) os aços mais comuns, como os que são utilizados em armaduras de concreto armado, são diferentes dos especiais devido a proporção dos elementos e adição de outros com base na finalidade do perfil. Elementos diferentes vão exercer diferentes funções dentro da composição do aço. Alguns deles que estão presentes nos aços, por causa do processo de fabricação, resultam em aços para diversos fins, sendo a classificação e os tipos de aços dependentes de suas composições químicas.

Os aços estruturais que são usados na construção civil, por causa de suas propriedades, são adequados para utilização em soluções que suportam carregamentos. São apresentados em normas de dimensionamentos como NBR 8800, AISC/LRFD e AISI/LRFD, são classificados em diversos tipos. Suas propriedades mecânicas vão definir o comportamento de cada um e a capacidade de resistir e transmitir os esforços aplicados sem que haja ruptura ou deformação excessiva (TEOBALDO, 2004).

Teobaldo (2004) menciona que para peças de aço se transformarem em elementos estruturais, processos de soldagem são utilizados. Por isso a soldabilidade é uma propriedade muito importante para os materiais. Necessitando que o aço seja composto por elementos corretamente adicionados em percentuais ideais. Caso não, precauções devem ser consideradas, aumentando o custo do produto.

2.2.2 Aços em armaduras para concreto

Conforme Pinheiro (2007) o concreto armado é a união do concreto com a armadura, constituída por barras de aço, sendo o material de construção mais utilizado no mundo. É utilizado em estruturas, que é a parte resistente da construção e deve resistir as diversas solicitações e transmiti-las para o solo.

Os principais elementos estruturais da construção civil, de acordo com Pinheiro (2007), são:

- a) lajes: placas que recebem, além das cargas permanentes, ações de uso e as transmite para os apoios, travam os pilares e distribuem as ações horizontais entre os elementos de contraventamento.

- b) vigas: barras horizontais que delimitam a dimensão das lajes, suportam paredes e recebem as ações das lajes, outras vigas e transmitem essas ações para os apoios.
- c) pilares: são barras verticais que recebem as ações das vigas ou lajes e dos andares superiores. Transmite a carga para os elementos inferiores e para as fundações. As fundações são elementos definidos como blocos, radier, sapatas e estacas que transferem as solicitações para o solo.

Conforme Peinado et al. (2013), é possível trabalhar o aço para concreto armado em uma obra de duas maneiras:

- a) adquirindo o aço em barras retas de 12 metros de comprimento e nos diâmetros especificados, é feito o corte, dobra e montagem no canteiro de obras. As desvantagens são a necessidade de mais mão-de-obra.
- b) ao adquirir o aço cortado e dobrado, a função é somente montá-lo em obra. É a maneira ideal para obras grandes, onde consome muita quantidade de aço, dessa forma é mais prático comprar cortado e dobrado de acordo com as especificações do projeto. A desvantagem é que o projeto de armação deve estar perfeito para que erros não ocorram.

A norma NBR 7480:2007 estabelece os requisitos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço que são destinados a armaduras para estruturas de concreto armado. De acordo com ela é possível verificar quais os aços indicados para o tipo de construção. Classificados conforme sua resistência, definida por sua composição e o processo de fabricação.

2.2.3 Aços em estruturas metálicas

Com base nos aços utilizado em estruturas metálicas Pfeil e Pfeil (2009) mencionam que propriedades de boa ductilidade, homogeneidade, soldabilidade, elevada relação entre tensão resistente e de escoamento são necessárias. Além disso, a resistência do material à corrosão também é muito importante, e isso se alcança adicionando pequenas quantidade de cobre na liga do material. Para que esses requisitos sejam atendidos, no uso de estruturas são os aços-carbono e os aços com baixo teor de liga ou micro ligados, os dois tipos possuindo baixo e médio teor de carbono em sua composição (PFEIL; PFEIL, 2009).

Conforme CBCA (2021) para estruturas metálicas, pontes, viadutos ou fundações os aços recomendados para essas utilizações são os de alta resistência e baixa liga. Esses

materiais apresentam grande resistência também à corrosão. Estão adaptados nas normas brasileiras NBR 5008-15, 5920-15, 5921-15, 7007-16 e nas normas norte-americanas ASTM A242-18, A588-19 e A709-21, estas especificam os limites de composição química e as propriedades mecânicas, são aços utilizados por todo o mundo quando se trata de construção de pontes, viadutos, silos, torres de transmissão, etc.

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AÇO ESTRUTURAL

Pinheiro (2005) aborda as vantagens e desvantagens do aço estrutural. Dessa forma, será citado primeiramente as vantagens de acordo com os itens levantados pelo autor. A fabricação de estruturas com precisão milimétrica possibilita um ótimo controle de qualidade em relação ao produto acabado, dessa forma é possível garantir as dimensões e as propriedades dos materiais. É um material resistente a vibração e choques. Possibilita também a execução mais rápida, limpa além disso, possui facilidade na desmontagem, realocação e pode ser reaproveitada como material de estoque ou, até mesmo, sobras de obra. Dispõe também de elevada resistência estrutural que possibilita a execução de estruturas mais leves com o intuito de vencer grandes vãos (PINHEIRO, 2005).

Já como desvantagens, Pinheiro (2005) aborda a limitação de execução em fábrica, devido ao acondicionamento do perfil durante o transporte até sua montagem final. A necessidade de tratamentos superficiais para proteger as peças de oxidação. Mão de obra e equipamentos qualificados para a fabricação e montagem. E, por último a limitação de fornecimento de perfis estruturais.

Além das vantagens e desvantagens citadas por Pinheiro, Pereira (2018) também cita algumas como complemento. As vantagens das estruturas metálicas se dão também devido ao módulo de elasticidade do aço, que permite que seções mais esbeltas sejam desenvolvidas o que melhora o uso do espaço e reduz a carga nas fundações podendo gerar economia no projeto. Possui um padrão de acabamento mais uniforme e isso permite aplicações em locais em que a estrutura fique aparente.

Como desvantagens Pereira (2018) cita a questão da flambagem de perfis com seções muito esbeltas, certamente gerando uma preocupação maior. A vulnerabilidade dessas estruturas quando se trata de ventos fortes. O comportamento destas em relação ao fogo, que em função da dilatação térmica e perda da capacidade de resistência exige maiores cuidados, como a proteção de vigas e pilares por meio de materiais incombustíveis e pinturas intumescentes. Além de que, no Brasil não há cultura de se

construir edifícios residenciais multifamiliares ou até alguns prédios comerciais utilizando estruturas metálicas, devido a isso, pode ser possível existir um certo preconceito dos usuários se essa solução for adotada.

2.4 PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS

O passar do tempo e os longos anos do envolvimento do homem com a construção de estruturas em geral permitiu que ocorresse um grande desenvolvimento tecnológico na área da construção civil, no que diz respeito as concepções estruturais, cálculos, análises, detalhamento e nos materiais e técnicas de construção (WEIMER; THOMAS; DRESCH, 2018). Com a aceleração do crescimento da construção civil em alguns países, se fez necessário a implementação de inovações, que vieram juntamente com maiores riscos. E através disso, as obras precisaram ser executadas de uma forma muito rápida e isso acarretou redução no controle de materiais e serviços. Esse desenvolvimento chegou também de forma a ajudar a expandir o conhecimento em relação as estruturas e os materiais que as compõem, através da investigação de falhas, como em acidentes e deterioração precoce em edificações (WEIMER; THOMAS; DRESCH, 2018).

Com a análise dessas falhas, foi observado que diversas estruturas não estavam se comportando de maneira satisfatória para o propósito que as mesmas foram construídas, pois com base em um conjunto de fatores como, o desgaste natural, acidentes e casos de imprudência, quando utilizados materiais não adequados por questão de economia, há a deterioração das estruturas (WEIMER; THOMAS; DRESCH, 2018). Dessa forma, Weimer, Thomas e Dresch (2018) definem como patologia a área responsável por estudar as origens, manifestações e consequências, e os mecanismos responsáveis pela ocorrência de defeitos em construções civis.

No Brasil construções em geral são diariamente testadas no quesito ação do clima, devido a grandes variações de temperatura, muitas vezes no mesmo dia, além de grandes volumes de chuvas, poluição e ambientes com alta agressividade, contribuem para as manifestações patológicas. Estas manifestações estão associadas com diversas formas de deterioração. As principais origens de manifestações na construção civil estão descritas conforme Tabela 1 abaixo (SACCHI; SOUZA, 2017).

Tabela 1 – Principais origens de manifestações patológicas na construção civil

| Causa | Porcentagem |
|--------------|--------------------|
| Projeto | 42,00% |
| Execução | 28,40% |
| Materiais | 14,50% |
| Uso | 9,50% |
| Vários | 5,60% |

Fonte: SACCHI E SOUZA (2017).

As manifestações patológicas em estruturas metálicas, em sua maioria, também são resultantes de falhas de projetos, erros de fabricação e erros de montagem, que muitas vezes é causado pela negligência, inexistência de controle de qualidade ou até mesmo falta de manutenção (SACCHI; SOUZA, 2017).

Para Pravia e Betinelli (2016 apud SACCHI; SOUZA, 2017) existem as manifestações patológicas mais comuns em estruturas metálicas e podem ser definidas nos seguintes tipos principais:

- a) corrosão localizada, é causada pela deficiência de drenagem das águas pluviais e também deficiências com detalhes construtivos, possibilitando o acúmulo de umidade.
- b) corrosão generalizada, é causada pela falta de proteção contra o processo de corrosão.
- c) deformações excessivas, causada através de sobrecargas ou variações de temperatura não previstas em projeto, podendo também ser causada pela deficiência na disposição de travejamentos.
- d) flambagem local ou global, causada com base no uso de modelos estruturais incorretos na verificação da estabilidade, deficiência no enrijecimento local de chapas, ou até mesmo imperfeições geométricas não consideradas no cálculo e nem em projeto.
- e) fratura e propagação de fraturas, são falhas causadas pela concentração de tensões, por causa de detalhes de projeto não adequados, defeitos de solda ou diferenças de tensão não previstas em projeto.

Dessa forma, Sacchi e Souza (2017) mencionam as principais falhas destas estruturas metálicas em obras de construção civil, são elas: falhas em projetos, falhas na fabricação, falhas durante a montagem e falhas na pintura. Serão abordadas em mais detalhes a seguir.

Quando se trata de falhas em projetos Sacchi e Souza (2017) descreve que em entrevistas com empresas do setor, a tendência dessas estruturas apresentarem problemas patológicos está relacionada a deficiência na concepção do projeto, erros de cálculo, má compatibilidade nos projetos, no sistema de montagem, escolha equivocada de perfis, definição inadequada de chapas e o uso de materiais com resistências diferentes ao especificado em projeto. Ainda conforme o autor, as empresas relataram que as falhas ocorrem também durante as etapas de fabricação e montagem (Figura 4), pela falta de um controle de qualidade durante essas etapas.

Figura 4 – Exemplo de falha de projeto em obra



Fonte: SACCHI E SOUZA (2017).

Ainda neste tema, Ormonde (2013) menciona que existem casos severos de patologias e colapsos de estruturas tendo como principal causa, o mau uso de novas ferramentas de projeto. Conhecer a ferramenta que se trabalha é fundamental para minimizar os riscos de acidentes em um projeto. Quando mal compreendidos os softwares podem produzir erros de resultados. Dessa forma, o autor evidencia a importância de métodos e processos mais simples em conjunto com adequados fundamentos teóricos das análises utilizadas, para que o engenheiro projetista identifique com mais facilidade os erros quando ocorrerem.

Durante a etapa de fabricação dos elementos estruturais de aço são necessários diversos métodos de inspeção. A empresa fabricante deve estabelecer métodos de controle de qualidade, garantindo que o trabalho atinja as exigências. Estas inspeções são executadas por um funcionário especializado para exercer esta função e deve atuar durante todo o processo de fabricação (SACCHI; SOUZA, 2017).

A pintura é uma técnica de proteção contra corrosão, através da sua aplicação possui elementos anticorrosivos. Muito usada para proteção do aço e seus defeitos são

facilmente identificados visualmente (SACCHI; SOUZA, 2017). A falta de pintura pode ocasionar no tipo mais comum de manifestação patológica, que é uma camada visível de óxido de ferro pouco aderente, caracterizado pela perda uniforme de massa e também a perda da seção transversal do perfil. Como causa, tendo a pintura desgastada durante o transporte ou o manuseio da peça durante a instalação, devendo ser reparado imediatamente, antes que o processo de corrosão se inicie (FORMIGONI et al., 2014).

Cada obra possui sua condição particular de acessibilidade, topografia, disponibilidade de canteiro, tipo de estrutura, entre outras. E devido a isso, a etapa de montagem vai possuir desafios particulares para cada obra e local. Desta forma é necessário especificar um plano de montagem contemplando os detalhes, desenhos, programação de embarque, lista de expedição, cronograma e prazo final. Estas etapas possuem o intuito de orientar os procedimentos específicos de montagem da estrutura (RAAD JUNIOR, 1999).

Figura 5 – Exemplo de defeito de montagem em obra



Fonte: SACCHI E SOUZA (2017).

De forma geral para satisfazer todas as atividades citadas que visam prevenir as falhas durante as etapas de projeto, fabricação e montagem (Figura 5) é necessária a realização do controle de qualidade. Pois além da verificação da matéria-prima do elemento durante a fabricação, montagem, nas ferramentas e calibradores, deve-se investigar as causas dos defeitos, escolher os métodos e planos de inspeção e a análise dos dados relacionados às perdas e a determinação do nível de qualidade exigido no mercado (SACCHI; SOUZA, 2017).

2.5 PROCESSOS CORROSIVOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Durante o tempo de vida útil de uma construção em estruturas metálicas, os principais agentes agressivos que afetam a performance das construções estão ligados a ações ambientais como, elevada umidade, respingos de marés. Ainda também com agentes externos agressivos, águas contaminadas, solos contaminados, gases nocivos, produtos químicos ou ainda causas naturais ligadas ao envelhecimento dos materiais, como por exemplo a corrosão (SACCHI; SOUZA, 2017).

A corrosão é um processo que deteriora o material através de uma ação eletroquímica ou química, conseqüentemente produzindo alterações indesejáveis e prejudiciais em elementos estruturais, encontrado geralmente em obras com estruturas de aço. O resultado do processo da corrosão resulta em um elemento diferente do material que compõe a estrutura e a liga do elemento perde suas qualidades essenciais como, resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, estética etc (GENTIL, 2011).

A corrosão eletroquímica se caracteriza basicamente por necessitar da presença de água líquida, temperaturas abaixo do ponto de orvalho, em sua maioria em temperatura ambiente e nascem por causa da formação de pilhas de corrosão ou células eletroquímicas (NUNES; LOBO, 2014).

Já a corrosão química, algumas vezes é denominada por “corrosão ou oxidação em altas temperaturas”. Esse processo não é tão frequente na natureza, justamente porque se apresenta em altas temperaturas, por isso está presente em indústrias onde as o ambiente é propício para a manifestação. É um processo corrosivo que não necessita de água, se manifesta em temperaturas altas, acima do ponto de orvalho e realiza-se por causa da interação entre o elemento e o meio corrosivo, sem haver uma troca de elétrons, de forma oposta ao que acontece na corrosão eletroquímica (NUNES; LOBO, 2014).

Recentemente com o aumento no número de estruturas de aço com longa vida útil, começam a aparecer os danos causados pela corrosão, que se acumulam ao longo do tempo. Estas estruturas deficientes vão futuramente envelhecer, fraturar e reduzir sua capacidade de resistência. A corrosão é uma das maiores causas de deterioração de estruturas de aço, pois em países como os Estados Unidos e Canada onde os saís de degelo são predominantes em meses de inverno, a condição das estruturas se deteriora muito mais. Muitas dessas estruturas que apresentam deficiências necessitam de reabilitação imediata ou até mesmo reforço estrutural, para que possam satisfazer suas demandas estruturais e também mantê-las em funcionamento (MITRA et al., 2020).

Castro (1999) menciona que para a corrosão ocorrer, necessita-se que quatro elementos básicos estejam presentes: ânodo, cátodo, ligação elétrica e eletrólito. O metal da estrutura por si só já é elemento de ocorrência dos três primeiros. Já o quarto elemento aparece em diversas condições. Em edificações, as origens desse eletrólito se dão através de meios como, a atmosfera, água e solo.

Para Gentil (2011) a ação corrosiva relacionada com a atmosfera depende de fatores como a umidade relativa, substâncias poluentes, temperatura, tempo de permanência do eletrólito na superfície do material metálico. Além de fatores climáticos, como ventos, variações de temperatura e umidade, chuvas e sol. Com a atmosfera sem nenhuma umidade, ocorre uma lenta oxidação do metal, o mecanismo pode ser considerado puramente químico, através de, por exemplo, escurecimento de prata ou cobre, devido a presença de gás sulfúrico no meio. Quando considerada a umidade relativa próxima de 100% ocorre a condensação na superfície do material metálico, essa condensação fica molhada com o eletrólito, como por exemplo, chuva e névoa salina depositada na superfície do material.

2.5.1 Formas de corrosão

De acordo com Castro (1999) a corrosão em estruturas metálicas se manifesta basicamente em duas formas: corrosão em frestas (Figura 6) e corrosão uniforme (Figura 7), e entender o processo de corrosão ajuda muito na identificação e aplicação de medidas adequadas para a recuperação dessas estruturas. Estas manifestações são consequência de fatores como a falta de manutenção, erros de projeto, mudança de ambiente etc.

Normalmente, corrosão localizada e corrosão uniforme são considerados os dois principais tipos de corrosão e são discutidos separadamente. Entretanto, ambas são observadas ao mesmo tempo em testes realizados por Wang, Cheng e Li (2016) em amostras expostas em soluções de NaCl. Para o autor, aços de alta resistência expostos em soluções de NaCl, a corrosão localizada pode se desenvolver em uma corrosão uniforme.

Figura 6 – Exemplo de corrosão em fresta de uma ligação parafusada



Fonte: SSINA – Speciality Steel Industry of North America (2021).

Figura 7 – Exemplo de corrosão uniforme em coluna de aço



Fonte: CASTRO (1999).

2.5.1.1 Corrosão uniforme

A corrosão uniforme é a manifestação mais comum de corrosão em estruturas de aço e a menos perigosa delas pelo fato de ser facilmente observável e detectada. Apresenta no material uma superfície tomada por uma camada de óxido de ferro (ferrugem) que não possui muita aderência com o elemento. Se define pela perda uniforme de massa em toda extensão do perfil e resulta na diminuição da espessura do material (CASTRO, 1999).

A velocidade de corrosão uniforme é medida em termos de perda de massa por unidade de superfície e por unidade de tempo, ou então pela perda de material corroído em função do tempo. Em alguns casos, a corrosão uniforme é muito acelerada por causa de agentes externos, conhecidos como “corrosão por correntes de fuga” (PANNONI, 2007).

2.5.1.1.1 Causas

A corrosão uniforme é uma forma de manifestação eletroquímica que ocorre ao longo de uma superfície metálica exposta sem proteção e, com frequência, gera incrustações e depósitos. De uma forma microscópica, as reações de oxidação e redução ocorrem de forma aleatória na superfície. Provavelmente é a forma de corrosão mais comum e pode ser prevista e levada em conta em projetos previamente (CALLISTER, 2020).

É causada pela exposição do aço carbono em um ambiente agressivo. Com materiais sem proteção, com proteção deficiente, ou com falta de manutenção na pintura conseqüentemente gera este tipo de manifestação. Ocorre devido ao acondicionamento não adequado dos perfis em ambientes onde se pode acumular água ou poeira, a não existência de furos de drenagem, insuficiência desses furos, e perfis em contato com o solo ou água. Além de problemas de transporte e armazenagem, pode ocorrer o rompimento do revestimento que protege o perfil durante carregamentos, transporte e descarregamentos. Perfis armazenados de forma inadequada em locais onde permita o acúmulo de água ou o contato com o solo também estão sujeitos a esse problema (CASTRO, 1999).

Ahmad (2006) ao levar em conta os mecanismos da corrosão uniforme, menciona que além da corrosão em ambientes aquosos, há também a corrosão em meio atmosférico. Onde uma pequena camada de eletrólito está presente na estrutura. É muito bem exemplificado quando se coloca uma gota de água do mar em um pedaço de metal. Na superfície do metal exposta na atmosfera somete uma limitada quantidade de água e íons dissolvidos estão presentes, enquanto o acesso ao oxigênio presente no ar é ilimitado. Produtos de corrosão são formados perto da superfície do metal, diferente do caso em meio aquoso, e esses produtos podem prever corrosão futura no material, agindo como uma barreira física entre a superfície do metal e o ambiente.

Em decorrência deste tipo de corrosão existem dois mecanismos que se manifestam, são a pilha de ação local, onde as partes de natureza diferente presentes no elemento formam pequenas áreas anódicas e catódicas na superfície exposta do perfil, e a pilha de aeração diferencial, que se dá por causa da formação de gotículas na superfície do aço. Dessa forma a camada de ferrugem que é formada na superfície não protege o material e então há um processo contínuo de corrosão enquanto o eletrólito estiver presente (CASTRO, 1999).

2.5.1.1.2 *Terapia e controle*

Primeiramente deve-se avaliar o grau de corrosão que o perfil está submetido. Se for apenas com ferrugem superficial, pode-se apenas limpar a estrutura e então refazer a pintura. Para uma limpeza adequada utiliza-se jateamento de areia para eliminar todos os resquícios de ferrugem (FORMIGONI et al., 2014). Já em corrosão avançada Formigoni et al. (2014) descreve que existem duas opções a serem tomadas, que são um reforço ou substituição da estrutura, e em ambas as soluções deve-se realizar a limpeza correta. Esse tipo de manifestação é bem visível e permite que se façam manutenções preventivas a fim de evitar problemas (FORMIGONI et al., 2014).

Para um reforço é analisado se a corrosão está acontecendo somente um trecho da superfície do elemento, e se o trecho não estiver comprometido, então se soldam chapas de espessura igual ou superior no local a ser reforçado, garantindo a conservação da estrutura e as propriedades geométricas sendo iguais ou maiores que as do perfil original (CASTRO, 1999). Já se for necessária uma substituição, analisa-se primeiramente se um reforço não é uma solução tão confiável em termos de segurança para a situação específica (CASTRO, 1999). Assim sendo, de acordo com Pinheiro (2005) as estruturas metálicas possuem facilidade na desmontagem e realocação, e em virtude disso Castro (1999) menciona que esta característica reduz o custo de substituição de uma estrutura comprometida e muitas vezes pode ser mais econômico em comparação com os reforços.

2.5.1.2 Corrosão em frestas

A corrosão eletroquímica pode se manifestar também como consequência de diferenças na concentração de íons ou gases que estão dissolvidos em uma solução eletrolítica e entre duas regiões de uma mesma peça metálica. Esse tipo de corrosão acontece em locais que apresentam menor concentração. Em frestas e reentrâncias ou até mesmo sob depósitos de sujeiras ou de produtos de corrosão, onde a solução fica presa e existe uma troca de oxigênio dissolvido. Para que a corrosão ocorra, a fresta deve ter uma abertura suficiente para que a solução penetre, mas ao mesmo tempo, estreita o suficiente para que haja estagnação (CALLISTER, 2020).

Ocorre em lugares do perfil onde existem duas superfícies em contato ou muito próximas entre si. Se forma devido a geometria de um sistema, em contatos com outros elementos não metálicos como, vedações, madeiras, plásticos, borrachas etc. Se formam

em virtude acúmulos de sujeira ou produtos de corrosão no perfil. Estas manifestações são muito mais preocupantes do que a corrosão uniforme devido a atuarem apenas em uma área pequena do perfil. Por isso, são mais difíceis de serem percebidas e atuam diretamente na seção transversal, dessa forma, mantendo o resto da estrutura sem qualquer indício da manifestação (CASTRO, 1999).

2.5.1.2.1 Causas

A causa deste tipo de corrosão está relacionada a exposição da estrutura, continuamente ou intermitentemente a um eletrólito, por exemplo, na atmosfera. Estas duas condições são propícias para o acúmulo de água nas aberturas dos sistemas estruturais. Ocasionalmente a formação de corrosão conhecido como pilha de aeração diferencial (CASTRO, 1999).

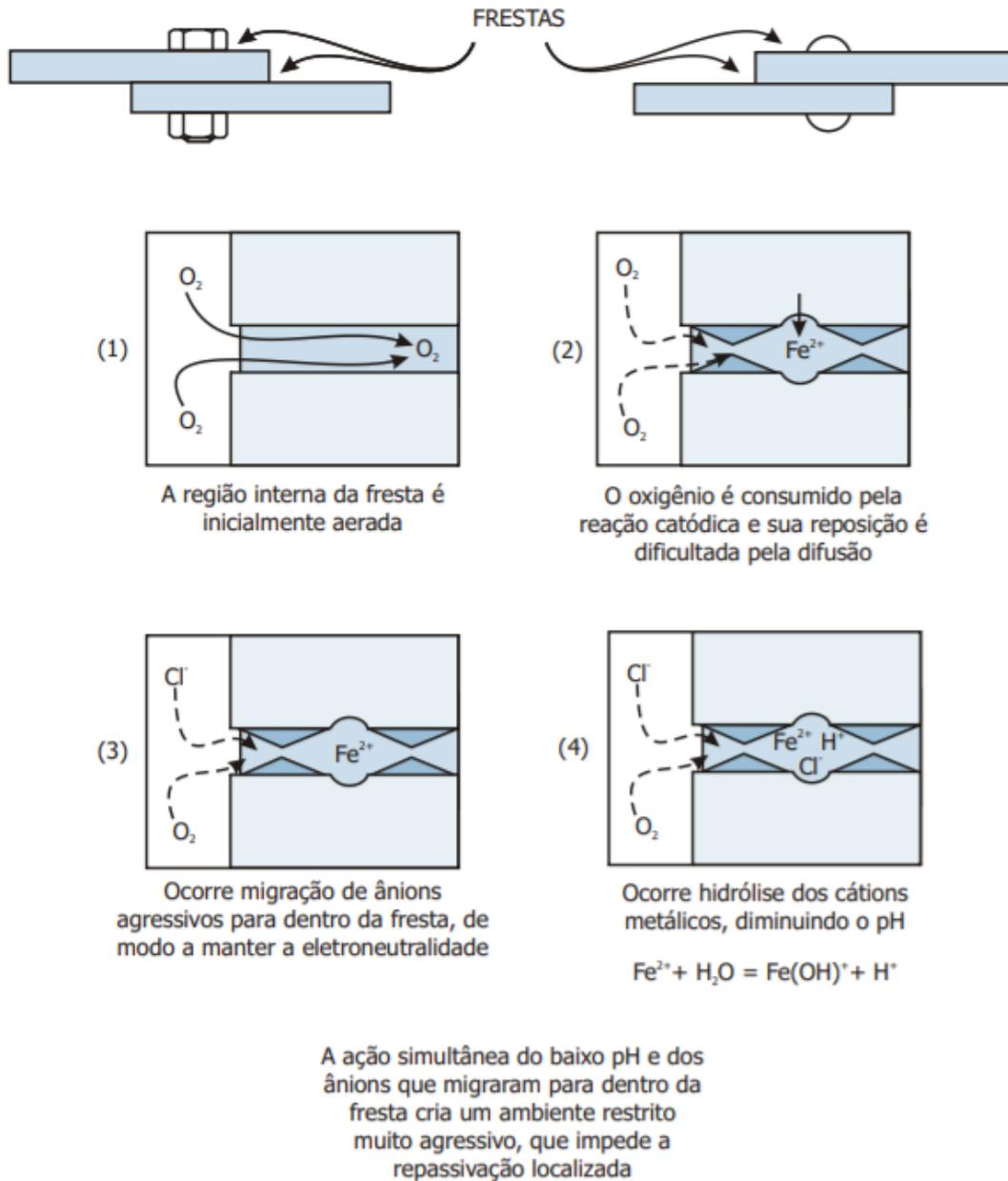
Geralmente o eletrólito se comporta como uma solução neutra, permitindo que o oxigênio atue como um reagente catódico. E nas bordas das aberturas dos perfis há regiões com uma grande concentração deste oxigênio, e no interior há uma baixa concentração. Ou seja, nesta região de baixa concentração de oxigênio é onde a corrosão passa a se manifestar, por mais que haja revestimento de proteção, o mesmo vai se deteriorar em função do tempo, e então permitir que as reações químicas de corrosão comecem a acontecer (CASTRO, 1999).

Pannoni (2007) descreve que, na primeira etapa, que se chama incubação, é quando ocorre na fresta através de reação catódica, o consumo do agente oxidante (ar). A renovação desse agente vai depender da dispersão do mesmo em um meio confinado, tornando a sua renovação limitada. Enquanto a reação anódica continua, devido aos elétrons que são gerados nessa região serem consumidos através do processo catódico que acontece no lado externo da fresta. Desse modo, um acúmulo de corrosão se forma dentro da região da fresta e durante essa etapa os danos não são visíveis (Figura 8).

Após um certo período há a entrada de ânions para dentro da fresta para que seja mantida a neutralidade elétrica. Durante essa etapa ocorre a ruptura na passividade (PANNONI, 2007). A ocorrência da hidrólise dos cátions metálicos acarreta a redução localizada do pH do material, dessa forma, aumentando a acidez dentro da fresta e conseqüentemente aumentando a corrosão (PANNONI, 2007). A corrosão pode, ainda, formar uma ferrugem volumosa, muito maior do que a da região de onde foi originada.

Essa formação pode provocar uma ruptura local com uma deformação plástica (PANNONI, 2007).

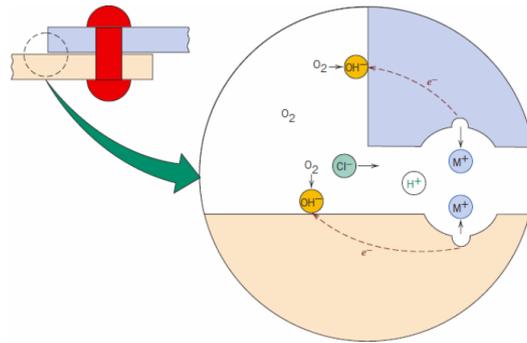
Figura 8 – Exemplo do mecanismo de corrosão por frestas



Fonte: PANNONI (2007).

Para Callister (2020) o mecanismo para a ocorrência de corrosão em frestas está demonstrado conforme a Figura 9 abaixo. Onde após o oxigênio ter sido removido da fresta, ocorre a oxidação do material. Os elétrons da reação eletroquímica são dirigidos para as regiões externas adjacentes, onde são consumidos em reações de redução.

Figura 9 – Mecanismo de corrosão em frestas



Fonte: CALLISTER (2020).

2.5.1.2.2 Terapia e controle

Para diagnosticar esse tipo de manifestação vai depender muito da experiência do inspetor para também determinar o estado de deterioração que a estrutura está submetida. As regiões onde a manifestação acontece são de difícil acesso para manutenção por se localizarem geralmente em ligações, bases de colunas, vedações etc (CASTRO, 1999).

Caso a corrosão esteja em estado inicial deve-se, como sempre, realizar a limpeza total da região, remover toda e qualquer umidade presente no interior da fresta e então aplicar um selante, posteriormente aplica-se também um revestimento de proteção. Dessa forma extinguindo o contato do interior da estrutura com o eletrólito (CASTRO, 1999).

Caso a corrosão esteja em estado avanço de deterioração opta-se então por reforço e/ou substituição do elemento submetido a manifestação. Pelo fato de ser uma área pequena, não se deve levar o reforço como solução definitiva para o problema. Sendo ideal uma ação conjunta de reforço e substituição de peças afetadas, pois o ataque ocorre normalmente em peças de ligação que são facilmente substituíveis e com baixo custo. Para o perfil, dependendo do estado de deterioração que está apresentando, pode ser simplesmente limpo ou reforçado, não necessitando de substituição (CASTRO, 1999). Quando um sistema estrutural está localizado em algum ambiente agressivo o ideal também é utilizar ligações soldadas para prevenir esse tipo de corrosão (CALLISTER, 2020; CASTRO, 1999).

2.5.1.3 Corrosão galvânica

A corrosão galvânica ocorre quando dois metais diferentes com diferenças de potencial são dispostos em contato elétrico em um eletrólito. A diferença de potencial elétrico entre os dois elementos age como uma força de propulsão fazendo com que a corrente elétrica circule pelo eletrólito. E esta corrente conseqüentemente resulta na corrosão de um dos materiais. O metal menos resistente se torna o alvo da corrosão enquanto o mais forte e inerte fica protegido. Dessa forma, quanto maior a diferença de potencial maior será a probabilidade de ocorrer uma corrosão galvânica (GALVINFO CENTER, 2013).

Adiciona-se zinco na composição do perfil estrutural como revestimento metálico para que ele funcione como ânodo, e o aço funciona como cátodo. O zinco não possui função estrutural, sua função principal é criar uma barreira de proteção contra agentes agressivos que possam entrar em contato com o aço estrutural. Pelo fato de a área exposta de zinco ser maior que a área de aço cria-se uma zona anódica maior que a zona catódica e isso resulta na corrosão do zinco, pois faz com que uma eventual falha na proteção de zinco seja completamente obstruída pelos próprios produtos oriundos da corrosão (CASTRO, 1999).

Para Pannoni (2007) a prevenção da corrosão galvânica é realizada de forma a intercalar entre metais ou ligas, um isolante elétrico. Esse material não deve ser poroso pois pode proporcionar a absorção de água e formar corrosão por frestas. Além disso, a utilização de juntas coladas ajuda muito na prevenção da corrosão galvânica não permitindo a entrada dos eletrólitos. É interessante também colocar uma peça intermediária que pode ser substituída facilmente, como por exemplo arruelas de zinco entre parafusos de aço conectando chapas de alumínio.

O zinco também proporciona outro processo corrosivo, chamado de ferrugem branca, é um processo resultante da reação do zinco com o oxigênio e formando óxido de zinco e hidróxido de zinco. Possui coloração cinza a branco e se forma na superfície da chapa de aço. Pode aparecer na parte inferior dos perfis metálicos devido a uma condensação repetitiva. A ferrugem branca em pequena quantidade não apresenta nenhum risco para a estrutura e pode ser removida facilmente através de escovação. Entretanto, sua manifestação indica que poderá ocorrer corrosão posteriormente. Pode ser prevenida evitando a umidade (CASTRO, 1999).

2.5.2 Ensaio de corrosão atmosférica

De acordo com Wolyneec (1992 apud BELLEI, 2006) os ensaios de corrosão atmosférica podem ser definidos em dois tipos:

- a) ensaios realizados em campo;
- b) ensaios realizados em laboratório.

Segundo Bellei (2006) os ensaios de campo consistem em expor os corpos de prova em ambientes naturais onde os mesmos ficam à mercê dos efeitos do clima, influências geográficas e também aos poluentes atmosféricos, esses fatores não podem ser duplicados realisticamente em laboratório, ou seja, a exposição dos corpos de prova em ambiente natural agrega de uma forma mais realística o processo de degradação do material. Dessa forma, a duração destes ensaios é longa, demorando cerca de 5 a 10 anos, ou até mesmo em alguns casos, de 30 a 40 anos.

Já para os ensaios em laboratório os corpos de prova são submetidos a meios de degradação artificiais, com características específicas que tornam estes ensaios mais agressivos do que os meios naturais, desse modo acelerando o processo de corrosão (BELLEI, 2006). Um teste acelerado de corrosão é definido usualmente como qualquer método de teste onde os resultados são obtidos em um período mais curto de tempo em relação a exposição natural (ANTUNES, 2002).

2.5.2.1 Ensaio de corrosão em laboratório

Para ensaios em laboratório Wolyneec (1992 apud BELLEI, 2006) menciona que os mais conhecidos são os que utilizam uma câmara ou gabinete fechado onde os corpos de prova são expostos à ação de uma atmosfera artificial específica. Os ensaios mais comuns são os:

- a) ensaio de névoa salina;
- b) ensaio de névoa salina acética;
- c) ensaio de névoa salina cuproacética;
- d) ensaio em atmosfera contendo dióxido de enxofre;
- e) ensaio em atmosfera úmida saturada.

Bellei (2006) apresenta um quadro descrevendo as normas que possuem referência com ensaios acelerados de corrosão em laboratório, dentre elas estão ABNT, ISO e ASTM. Conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Normas referentes aos ensaios acelerados de corrosão

| | |
|-------------------------|---|
| NBR8094 (1983) | Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à névoa salina. |
| NBR8095 (1983) | Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada. Método de ensaio. |
| NBR8096 (1983) | Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição a dióxido de enxofre. Método de ensaio. |
| NBR8823 (1985) | Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à névoa salina acética. Método de ensaio. |
| NBR8824 (1985) | Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à névoa salina cuproacética. Método de ensaio. |
| ISO7384 (1986) | Corrosion tests in atmosphere - general requirements |
| ISO3768 (1998) | Metallic coatings – neutral salt spray test (NSS test). |
| ISO3769 (1998) | Metallic coating – acetic acid salt spray test (ASS test). |
| ISO37709 (1992) | Metallic coating – copper accelerated acetic acid salt spray test (CASS test). |
| ISO/TC 156 N 95E (1992) | Metals and alloys – accelerated test relating to atmospheric corrosion – general requirements. |
| ISO/DIS 10062 (2003) | Corrosion test in artificial atmosphere at very low concentrations of polluting gas (es). |
| ASTM B 117 (1998) | Salt spray (fog) testing. |
| ASTM G85 (1998) | Modified salt spray (fog) testing. |
| ASTM B368 (2002) | Copper - accelerated acetic acid – salt spray (fog) testing (CASS test). |
| ASTM G87 (1998) | Conducting moist SO ₂ tests. |
| ASTM G 60 (1995) | Conducting cyclic humidity tests. |

Fonte: BELLEI (2006).

Segundo Wolyneć (1992 apud BELLEI, 2006) o ensaio de névoa salina é o ensaio mais útil e simula os efeitos de atmosferas marítimas sobre os corpos de prova com ou sem proteção de revestimento. Esse ensaio é realizado através das normas NBR8094 (1983), ISO3768 (1998) e ASTM B 117 (1997), onde é utilizada uma névoa que é produzida com base em uma solução de 5% de NaCl com pH na faixa de 6,5 a 7,2 e temperatura de 35°C. Esse ensaio é o mais comum e sua duração pode variar de 8 horas a 3000 horas.

De acordo com Gentil (2011) após os ensaios de corrosão deve ser feita a medição da taxa de corrosão presente no material ensaiado, verificando a perda de peso a partir da subtração do peso original do corpo de prova pelo peso após a realização do ensaio. Essa perda de peso é influenciada pela área do corpo de prova exposta e devido ao tempo de exposição. Normalmente para determinar essa taxa há uma unidade relacionada com a perda de massa que é o mdd (miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia). Já a ABNT (2008) determina que para calcular a taxa de corrosão deve-se levar em consideração a Equação (1).

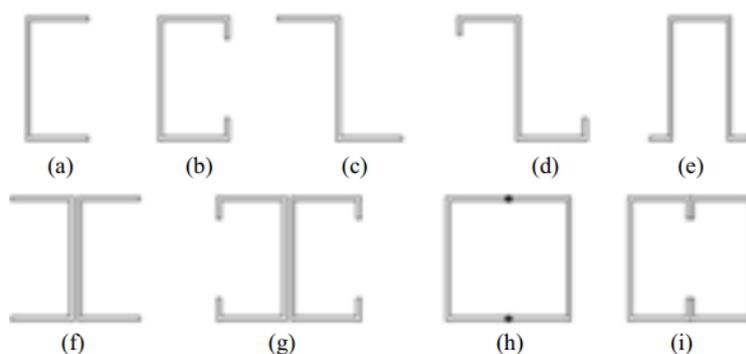
$$r_{corr} = \frac{k.W}{A.t.d} \quad (1)$$

Onde r_{corr} é a taxa de corrosão expressa na unidade desejada, k é a constante que depende da unidade desejada, W é a perda de massa em gramas, $(g) = m_i - m_f$, A é a área do corpo-de-prova expresso em centímetros quadrados, t é o tempo de exposição em horas e d é a densidade do material de estudo. Dependendo do tipo de corrosão que é observado após o ensaio deve-se seguir as definições para taxa de corrosão de cada norma específica. Em corrosão uniforme a taxa deve estar em conformidade com a NBR 8278-12, e quando a corrosão for localizada, a profundidade do ataque deve estar em conformidade com a NBR 8397-12.

2.6 ENSAIO DE FLEXÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Almeida (2009) comenta que os perfis metálicos estão sujeitos a dois tipos de flexão, a flexão simples e a flexão normal composta. Neste trabalho será abordada somente a análise da flexão simples. Almeida (2009) ainda mostra através da Figura 10 as seções mais utilizadas quando se trata de elementos fletidos.

Figura 10 – Seções transversais mais usadas em elementos fletidos



Fonte: ALMEIDA (2009).

Na ordem de (a) até (i), constata-se respectivamente: (a) U simples, (b) U enrijecido, (c) Z simples, (d) Z enrijecido, (e) cartola, (f) duplo U opostos, (g) duplo U enrijecidos opostos, (h) duplo U frontais e (i) duplo U enrijecidos frontais (ALMEIDA, 2009).

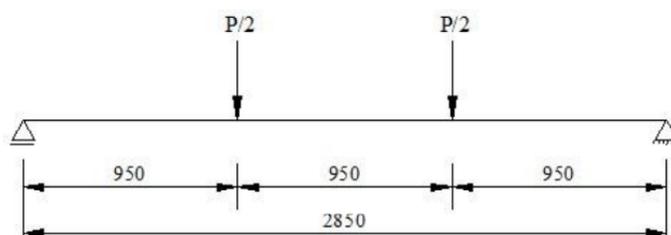
De acordo com Vellasco (2014), as dimensões das estruturas para ensaios devem estar em conformidade com o espaço disponível em laboratório, o que levanta questionamentos em relação a qual a melhor estratégia para realizar o experimento, reduzir as dimensões de forma a adequá-la no espaço disponível em laboratório ou realizar o experimento com as dimensões reais em um campo experimental externo ou até mesmo no local onde serão realizados e utilizados. A tendência normalmente é, devido a facilidade de execução dos experimentos, optar pela adequação das dimensões do elemento de forma a adaptá-lo ao espaço do laboratório. Considerando também outras razões como, comodidade, facilidade de acesso e aparato ferramental mais próximo, além de proporcionar a possibilidade de repetição do ensaio, viabilizando a importância de garantir que não haja dúvidas em relação aos resultados obtidos ou até mesmo para a conferência de algum parâmetro ou instrumentação que possa ter afetado o resultado final (VELLASCO, 2014).

Primeiramente para o correto planejamento de um ensaio, considera-se a especificação dos sistemas de aplicação de carga no elemento a ser ensaiado. O sistema mais usual é aquele que aplica cargas estáticas em pontos fixos da estrutura através de atuadores hidráulicos. E para garantir que o carregamento esteja realmente aplicado na estrutura se considera a aplicação de mais de um ponto de carregamento, feito de forma direta ou indireta. A forma direta consiste em usar um atuador em cada ponto onde a carga é aplicada, gerando uma necessidade de controle durante a realização do experimento,

que é feito com o uso de transdutores de pressão nas saídas do sistema hidráulico e com células de carga posicionadas em pontos de aplicação do carregamento. Esse método permite que os desbalanços dos carregamentos sejam identificados em fases iniciais do ensaio e garantindo que o desenvolvimento do experimento siga como o planejado inicialmente. Já a forma indireta consiste em usar vigas de distribuição que dividem o carregamento inicial, aplicado também pelo atuador hidráulico, em somente um ponto ou em mais de um ponto ao longo do elemento ensaiado (VELLASCO, 2014).

De acordo com Almeida (2009) para o ensaio de vigas constituídas de perfis formados a frio e com emendas soldadas submetidas a flexão simples, as mesmas devem estar bi apoiadas e no caso do ensaio realizado pelo autor, considerou-se uma viga de 3 metros de comprimento, os apoios foram deixados 75 milímetros entre o eixo de apoio e o limite da viga em ambas as extremidades, caracterizando um vão livre de 2,85 metros entre os eixos dos apoios. Desta forma, Vieira (2010) comenta que para a aplicação do carregamento deve ser disposta uma viga de transmissão de carga, para que a viga a ser ensaiada seja submetida a dois pontos de carregamento igualmente distantes do centro do corpo de prova. Sujeitando o trecho central, entre os dois carregamentos, a flexão pura. O autor considera também uma viga com o mesmo comprimento e a mesma distância de entre apoios em comparação com Almeida (2009). Os dois pontos de solicitação ficam a 475 milímetros do centro da viga e dessa forma igualando as distancias entre os apoios, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Esquema de aplicação de cargas em viga submetida a flexão simples



Fonte: VIEIRA (2010).

As vigas de estudo devem receber enrijecedores transversais (Figura 12 e 63) nos pontos de aplicação de carga e nos pontos de apoio, para que não ocorra o esmagamento das mesas na região onde haverá contato com os apoios e as aplicações de carga (VIEIRA, 2010). Almeida (2009) menciona que para estes enrijecedores deve-se soldar uma chapa com 6,3 milímetros de espessura.

Figura 12 – Enrijecedor transversal em apoio de primeiro gênero



Fonte: VIEIRA (2010).

Figura 13 – Enrijecedor transversal em apoio de segundo gênero



Fonte: VIEIRA (2010).

Para os apoios considera-se um sistema composto de um apoio de primeiro gênero, que permite o deslocamento horizontal e rotação no eixo longitudinal do cilindro de apoio, e um apoio de segundo gênero, que bloqueia os deslocamentos horizontais e verticais e permite rotação no eixo longitudinal no cilindro de apoio, com o objetivo de proporcionar, tanto para as vigas que serão ensaiadas quanto para a viga de transmissão de carga, o estado de simplesmente apoiadas. Os apoios foram formados com chapas metálicas e cilindros de aço para simular a situação, de acordo com a Figura 14 (VIEIRA, 2010).

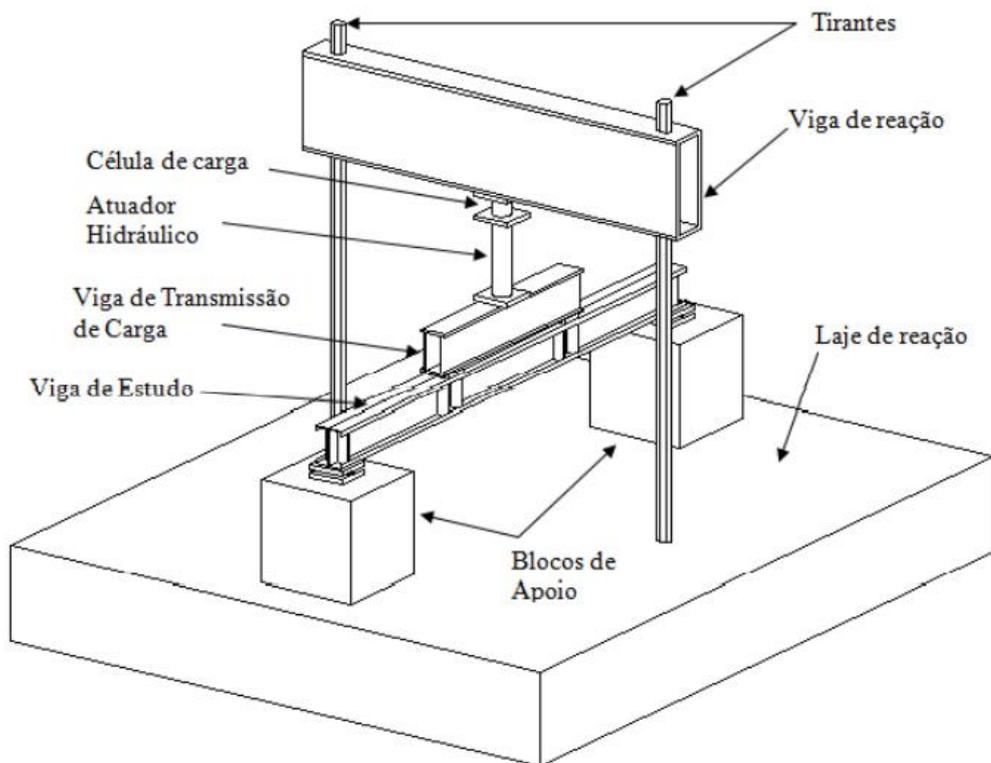
Figura 14 – Esquema dos apoios de primeira e segundo gênero respectivamente



Fonte: ALMEIDA (2009).

Para a aplicação do carregamento nas vigas, Vieira (2010) utilizou um atuador hidráulico com acionamento manual através de uma bomba hidráulica. Onde esse atuador foi posicionado acima de uma viga de distribuição sobre chapas metálicas para se ter uma melhor distribuição dos carregamentos. Para nivelar os apoios, o autor aplicou gesso estrutural. E para medir a carga aplicada nas vigas foi disposta uma célula de carga entre o atuador hidráulico e a viga de distribuição situação (Figura 15 e 16).

Figura 15 – Esquema de ensaio de flexão



Fonte: VIEIRA (2010).

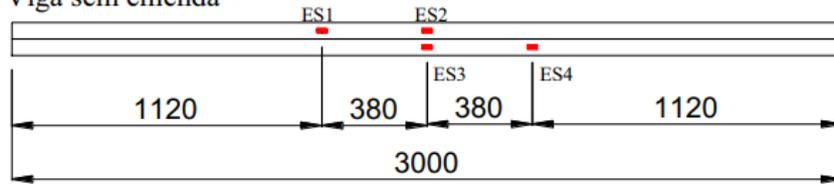
Figura 16 – Esquema montado para ensaio



Fonte: VIEIRA (2010).

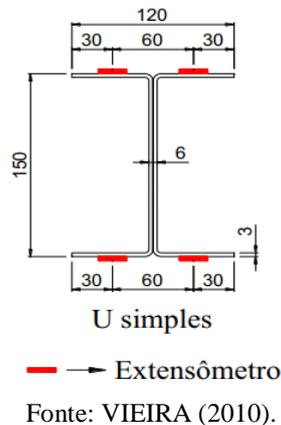
Para medir as deformações ocorridas na viga de estudo, Vieira (2010) instalou oito extensômetros elétricos unidirecionais (Figura 77, 88 e 99). Posicionados 4 unidades na mesa superior da viga e 4 unidades na mesa inferior. O autor considera vigas sem emendas, vigas com emendas no centro do vão e vigas com emenda em trespasse. Considerando uma viga sem emenda o correto posicionamento dos extensômetros é descrito conforme a imagem abaixo, de acordo com o autor. Para a recepção dos dados fornecidos pelos extensômetros usa-se uma mesa comutadora.

Figura 17 – Posicionamento dos extensômetros ao longo da viga
Viga sem emenda



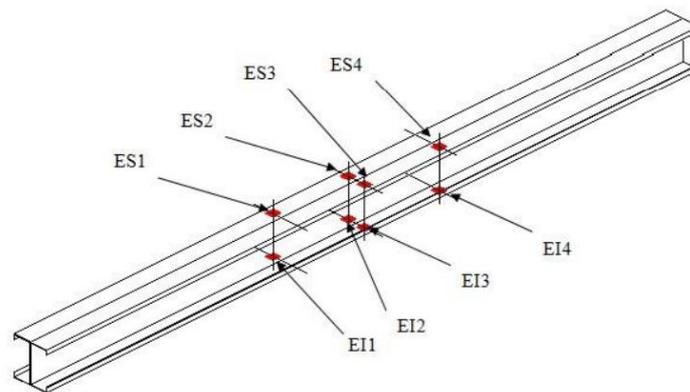
Fonte: VIEIRA (2010).

Figura 18 – Posicionamento dos extensômetros em seção transversal



Fonte: VIEIRA (2010).

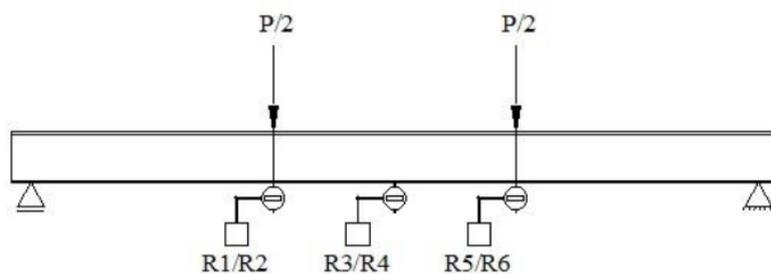
Figura 19 – Posicionamento dos extensômetros



Fonte: VIEIRA (2010).

Já para a medição da deflexão da viga, se posiciona deflectômetros nos pontos de aplicação de carga e no centro do vão da viga de estudo (Figura 10). Onde nos pontos de aplicação de carga se consideraram dois relógios cada e no centro da viga também (VIEIRA, 2010).

Figura 20 – Posicionamento dos deflectômetros



Fonte: VIEIRA (2010).

Antes da realização do ensaio propriamente dito, é aplicada uma força de valor igual a 10% da força última prevista, onde se pode verificar todo o funcionamento do sistema de ensaio e de aquisição de dados, e dessa forma promovendo uma acomodação da viga de estudo. A forma de aplicação de forças é igual para todas as vigas ensaiadas, onde é feita a leitura de dados a cada 2,5 kN para as vigas com perfil U simples e a cada 5 kN para vigas com perfil U enrijecido, e a cada acréscimo de carga é feita a leitura dos dados de deformação e deslocamento. Esses valores foram adotados em função da carga de ruptura que é esperada do perfil, dessa forma montando um número adequado de pontos nos gráficos de deformação e deslocamento (VIEIRA, 2010).

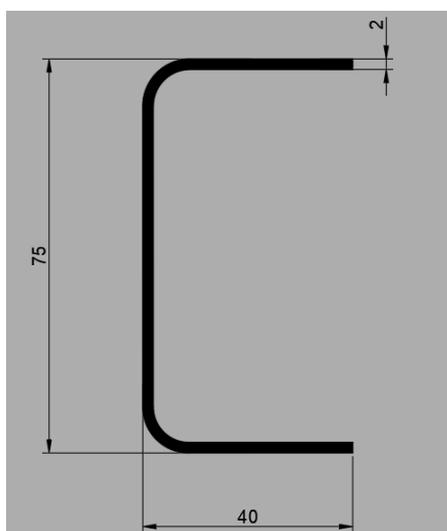
3 METODOLOGIA

Serão abordados nesse capítulo os métodos que serão utilizados para realizar os ensaios de corrosão acelerada e flexão para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. Para isso, deverá ser definido quais os tipos de perfis metálicos a serem usados nos ensaios, assim como suas dimensões, tipo de aço, quantidade de corpos de prova e tempo de exposição. Será apresentada também a definição do tipo de ensaio que será empregado tanto para a corrosão acelerada dos perfis, quanto para o ensaio de flexão simples dos mesmos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL

Para a definição dos perfis metálicos que serão utilizados no modelo experimental, foi considerado um perfil comumente aplicado em estruturas metálicas variadas, onde também pode ser aplicado em escoramentos, implementos agrícolas e rodoviários, equipamentos em geral e vigamentos. Considerou-se então um perfil U de tipo de aço ASTM A-36, sem revestimento, com comprimento de 300 milímetros, altura de 75 milímetros, largura de 40 milímetros e espessura de 2 milímetros, observando-se a Figura 21. O comprimento do perfil foi determinado de modo a permitir tanto o ensaio de corrosão acelerada, devido a limitação do equipamento, quanto o ensaio de flexão, que necessita que o elemento tenha um comprimento adequado que possibilite o ensaio de flexão.

Figura 21 - Perfil das peças ensaiadas



Fonte: Autor (2022).

Com relação a quantidade de corpos de prova a serem testados, foi levado em conta o que foi mencionado por Vellasco (2014) onde a condição de repetibilidade muitas vezes é fundamental para garantir que não haja dúvidas com relação à casualidade dos resultados obtidos ou mesmo para conferir se algum parâmetro ou tipo de instrumentação não afetou os resultados dos ensaios. Contudo, foi considerando uma quantidade de 8 corpos de prova, onde serão divididos em 4 grupos, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Quantidade e tempo de exposição dos corpos de prova

| Nomenclatura | Tempo Exposição |
|---------------------|------------------------|
| V1A | 1 Semana |
| V1B | |
| | |
| V2A | 4 Semanas |
| V2B | |
| | |
| V3A | 9 Semanas |
| V3B | |
| | |
| V4A | Grupo Controle |
| V4B | |

Fonte: Autor (2022).

Considerou-se então uma quantidade de 8 corpos de prova, onde serão divididos em 4 grupos. O primeiro grupo (V1A e V1B) ficará uma semana em ensaio de corrosão acelerada, o segundo grupo (V2A e V2B) ficará quatro semanas em ensaio, o terceiro grupo (V3A e V3B) ficará nove semanas, o último grupo (V4A e V4B) será o grupo de controle e não será ensaiado com corrosão acelerada, porém será o primeiro grupo a ser ensaiado na resistência a flexão, pois ao postergar o ensaio de flexão dos corpos de controle para nove semanas após o ensaio do restante das peças, se estaria submetendo esse grupo a exposição do ambiente podendo afetar os resultados finais.

Figura 22 – Corpos de prova



Fonte: Autor (2022).

Figura 23 – Corpos de prova identificados



Fonte: Autor (2022).

3.2 ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA

O ensaio de corrosão acelerada foi conduzido no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) do Campus Sede da Universidade de Caxias do Sul, por uma equipe capacitada seguindo o mesmo método especificado em norma, com acompanhando do desenvolvimento e emissão de relatório de ensaio ao final de cada ensaio. Realizado em uma câmara fechada de névoa salina da marca Bass, modelo USX-6000/2012, identificada como NS, conforme a norma ASTM B117-19, vide Figura 24, observando as seguintes condições consideradas críticas:

- a) tempo de ensaio, dependendo de cada grupo;
- b) pressão (constante) do ejetor: 0,7 kgf/cm² a 1,7 kgf/cm²;
- c) temperatura da câmara: 35°C ± 2°C;
- d) solução de cloreto de sódio: 5% ± 1%;
- e) faixa de pH: 6,5 a 7,2;
- f) volume névoa coletada: 1 mL/h a 2 mL/h;
- g) massa específica névoa coletada: 1,0243 a 1,0373 g/cm³;
- h) posição da amostra: apoiada em ângulos entre 15° e 30° em relação à vertical;
- i) preparação da amostra: a limpeza foi realizada com água deionizada e a proteção de bordas foi procedida com cera de abelha.

Figura 24 – Câmara de névoa salina modelo USX-6000/2012 utilizada no ensaio



Fonte: Autor (2022).

As avaliações de corrosão foram feitas a olho nu. As condições iniciais das amostras e quaisquer alterações visuais apresentadas em relação às condições iniciais, como o aparecimento e evolução de corrosão branca, corrosão vermelha, corrosão verde, manchas, empolamento, entre outros, estarão descritas nos resultados.

3.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios das peças submetidas à flexão foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Caixas do Sul no Campus de Bento Gonçalves. O ensaio será realizado seguindo a ordem de tempo de exposição dos corpos de prova, a partir do grupo de controle V4A e V4B até o grupo de maior exposição V3A e V3B. Serão realizados no total oito ensaios de flexão considerando os dois corpos de prova para cada grupo de exposição e de acordo com o tipo de perfil detalhado no capítulo anterior. Para esse ensaio foi utilizada a prensa hidráulica de 200 kN, modelo Emic DL2000.

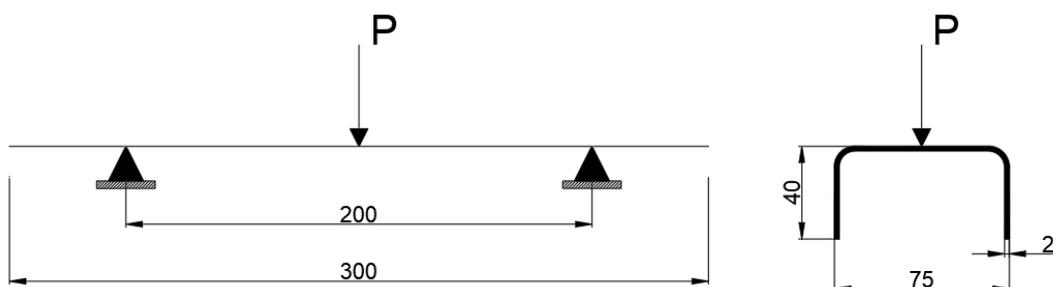
Figura 25 - Prensa hidráulica de 200 kN, modelo Emic DL2000



Fonte: Autor (2022).

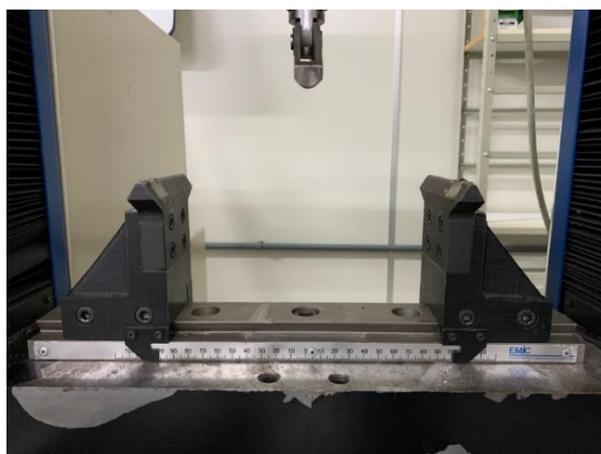
Para realizar o ensaio de flexão, devido a limitação dos equipamentos no laboratório, não foi possível determinar a flexão pura do elemento estudado através de esquema de ensaio proposto por Vieira (2010), onde as vigas com perfis formados a frio, devem estar bi apoiadas e deve ser disposta uma viga de transmissão de carga, para que o elemento de estudo seja submetido a dois pontos de carregamento igualmente distantes do centro, sujeitando o trecho central a flexão pura. Ao invés disso, foi levado em conta a força necessária até o elemento entrar em zona plástica. As peças foram testadas considerando um deslocamento constante da prensa de 3 milímetros por minuto na aplicação da força até um máximo de 20 milímetros, esse deslocamento máximo foi estipulado durante os ensaios para determinar um limite, tanto de tempo como de deslocamento para todos os grupos. Além disso, as peças foram ensaiadas dispostas em dois apoios distantes 200 milímetros e a aplicação da força foi feita no centro, considerando a peça disposta com a alma da viga perpendicular à força de aplicação, de acordo com o esquema de ensaio montado na Figura 26 e a Figura 27.

Figura 26 – Esquema de ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 27 - Distancia dos apoios



Fonte: Autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados acerca dos ensaios de corrosão acelerada em névoa salina e flexão de todos os grupos serão apresentados neste capítulo, primeiramente explanando os resultados referentes ao ensaio de flexão dos corpos de prova de controle (V4A e V4B), para se ter o parâmetro de resistência das peças não afetadas pela corrosão, e posteriormente abordando os resultados de corrosão e flexão de cada grupo, seguindo a ordem de V1, V2 e V3, para manter a linearidade dos tempos de exposição de acordo com cada grupo.

4.1 ENSAIO DE FLEXÃO PEÇAS V4A E V4B CORPOS DE CONTROLE

O ensaio de flexão para as peças de controle consistiu em primeiramente definir os parâmetros necessários para realizar os testes e para gerar os gráficos de força x deslocamento que serão apresentados ao final. Considerando que não foi encontrada norma para ensaios de flexão, foi definido em adotar esses parâmetros no *script* da prensa hidráulica para que se tenha uma padronização em todos os ensaios que serão realizados, conforme mencionado no capítulo anterior. Antes do início do ensaio as peças foram pesadas para se ter mais um dado de comparação com as outras que foram expostas. A viga V4A possui aproximadamente 0,694 kg e a viga V4B 0,703 kg.

Figura 28 - Corpos de prova de controle



Fonte: Autor (2022).

Os corpos de prova foram posicionados nos apoios da máquina para dar início ao ensaio, começando pela peça V4A temos o resultado de acordo com o gráfico na Figura 32. Em seguida foi feito o ensaio na peça V4B onde o resultado está apresentado no gráfico da Figura 33.

Figura 29 – Peça V4A posicionada para início do ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 30 – Peça V4A após ensaio de flexão



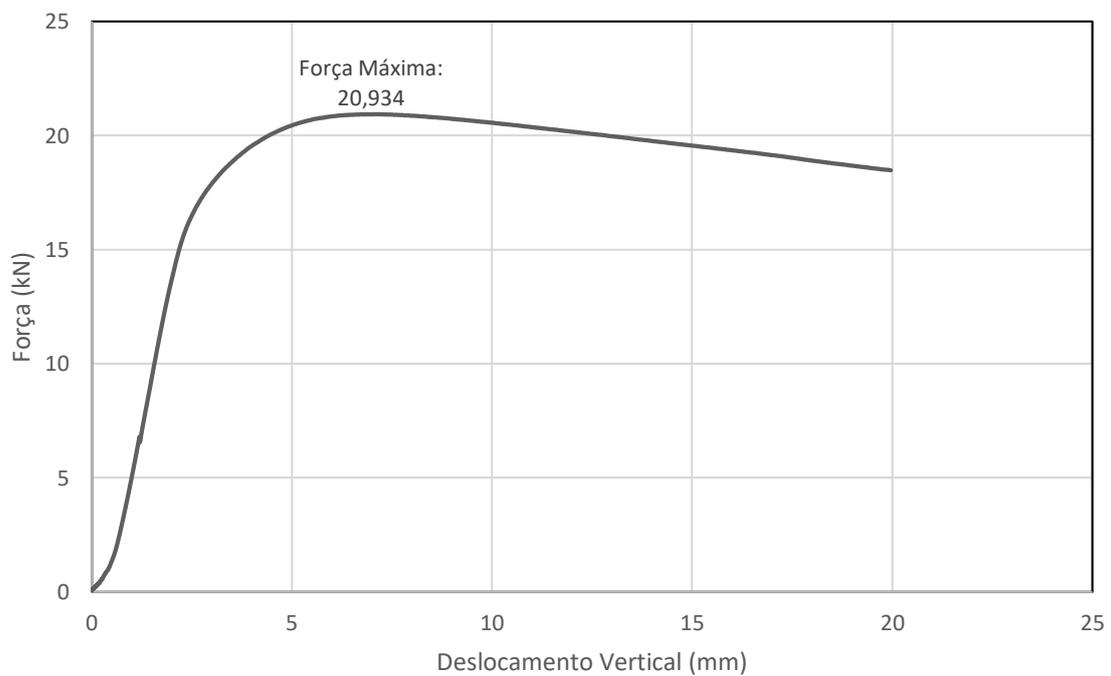
Fonte: Autor (2022).

Figura 31 - Peças V4A e V4B após ensaio de flexão



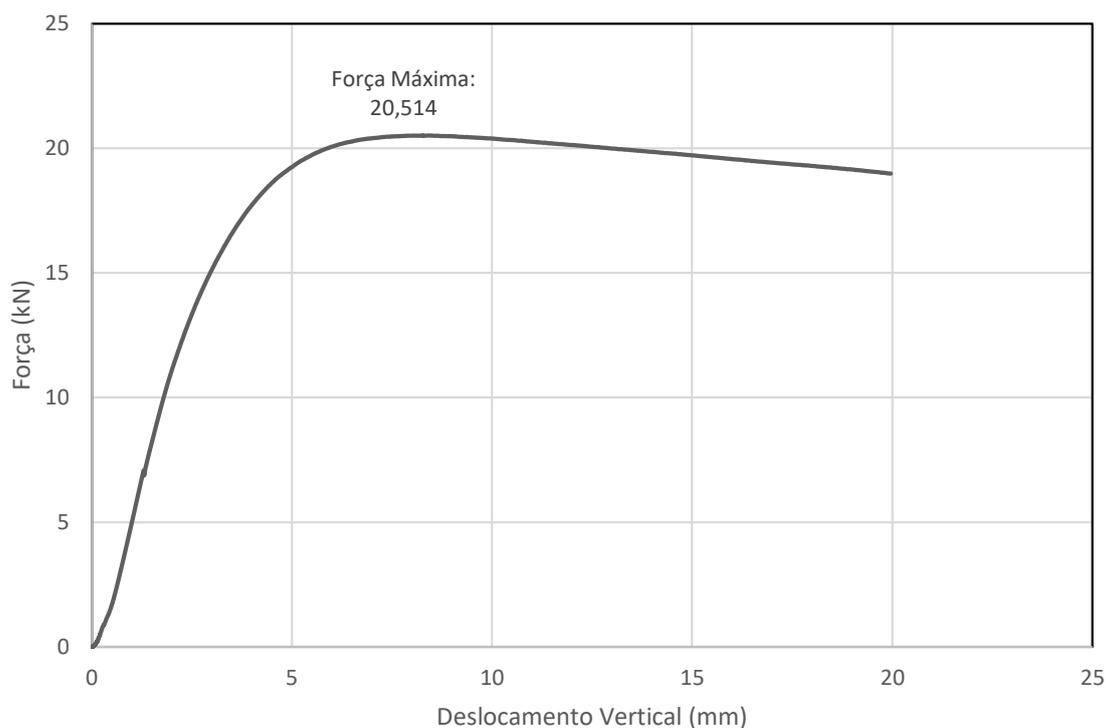
Fonte: Autor (2022).

Figura 32 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V4A



Fonte: Autor (2022).

Figura 33 - Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V4B



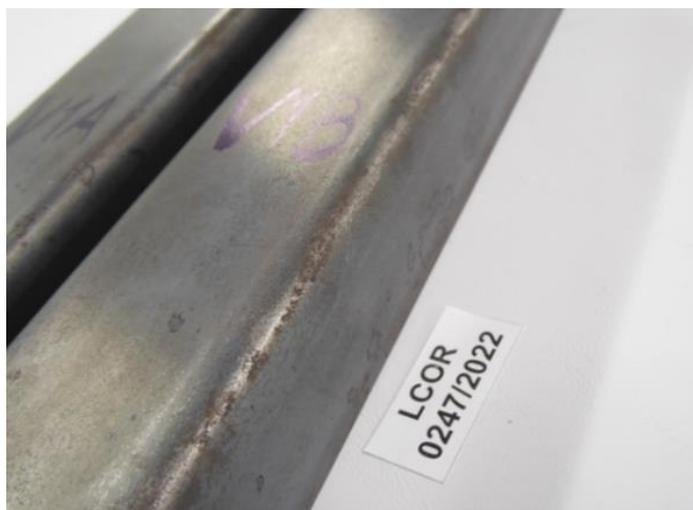
Fonte: Autor (2022).

De acordo com os gráficos apresentados observa-se que a peça V4A entra em regime plástico após atingir seu carregamento máximo de 20,934 kN, já a peça V4B entra em regime plástico após atingir um carregamento máximo de 20,514 kN. Ambas as peças começam a apresentar o comportamento plástico no trecho entre os carregamentos de 15 kN e 20 kN, próximas do deslocamento de 5 milímetros. Pode-se observar também uma redução de 0,42 kN no corpo de prova V4B, essa diferença provavelmente tem relação com a dobra do perfil, onde foi observado que havia diferenças no ângulo da dobra em comparação com a peça V4A.

4.2 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE UMA SEMANA - PEÇAS V1A E V1B

Os corpos de prova V1A e V1B foram levados até o laboratório LCOR no dia 14/04/2022 para dar início aos ensaios juntamente com o restante das peças que necessitavam de ensaio de corrosão acelerada, as avaliações visuais das peças foram feitas através de pessoal capacitado e inicialmente foi constatado a presença de pequenas imperfeições e manchas na superfície das peças, antes da inserção das mesmas na câmara de névoa salina, conforme as Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Imperfeições e manchas V1A e V1B



Fonte: LCOR (2022).

Figura 35 – Imperfeições e manchas V1A e V1B



Fonte: LCOR (2022).

O início do ensaio em câmara dos corpos de prova V1A e V1B foi no dia 03/05/2022, onde foram avaliados nos periodicamente nos intervalos de 24, 48, 72, 144 e 168 horas, como pode-se observar nas Figuras 36 a 41, com 48 e 144 horas não foi apresentada alterações visuais, portanto não houve registro do laboratório. Também foi feita a renomeação das peças para um código provido pelo laboratório 0247/2022. Essa alteração foi necessária pois as identificações feitas previamente não ficam mais visíveis após o ensaio.

Figura 36 - Peças V1 com 24 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 37 - Peças V1 com 24 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Após 24 horas de ensaio foi possível avaliar a presença de corrosão vermelha abundante com acúmulo e escoamento evidente de produto de corrosão vermelha em grande parte das peças. Entretanto, com 48 horas de exposição, as peças não sofreram alteração visual, dessa forma, não foram registradas pelo laboratório. Somente começaram a apresentar mudanças a partir de 72 horas, vide abaixo.

Figura 38 - Peças V1 com 72 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 39 – Peças V1 com 72 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Com 72 horas de exposição foi averiguado a presença de corrosão vermelha abundante com acúmulo e escoamento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das peças. Com 144 horas de exposição as peças não sofreram alteração visual, portanto não houve registro, somente sofreram alteração visual com 168 horas.

Figura 40 – Peças V1 com 168 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 41 - Peças V1 com 168 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Ao fim das 168 horas de exposição no dia 10/05/2022, mantiveram-se as características quanto a presença de corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das peças. O resumo do ensaio das peças V1 está apresentado no Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 – Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V1

| Tempo Exposição | Avaliação Visual Características |
|------------------------|--|
| 24 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de produto de corrosão vermelha em grande parte da superfície das duas peças. |
| 48 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 24 horas de ensaio. |
| 72 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 144 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 72 horas de ensaio. |
| 168 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |

Fonte: Autor (2022).

4.2.1 Ensaio de flexão peças V1A e V1B

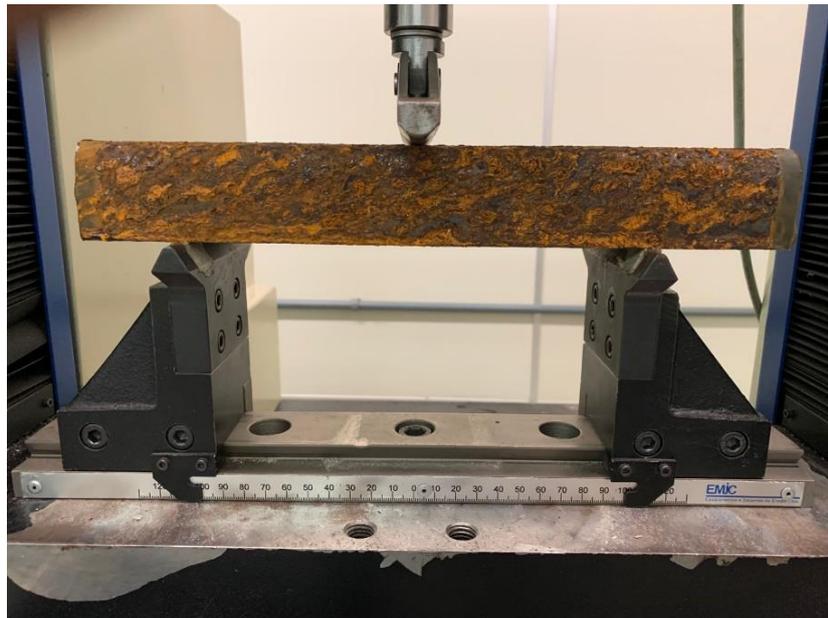
Para as peças com uma semana de exposição, foi considerado, para o ensaio de flexão, os mesmos parâmetros utilizados nos corpos de prova de controle. Como a identificação das peças ficou obstruída devido ao acúmulo de corrosão na superfície, ficaram definidas como V1A a primeira peça a ser ensaiada e V2B a segunda peça a ser ensaiada, de acordo com as Figuras 42 a 47. Os gráficos de força x deformação serão apresentados ao final. E em relação ao peso de cada peça, ambas foram pesadas antes do ensaio de flexão, a viga V1A possui aproximadamente 0,721 kg e a viga V1B 0,725 kg.

Figura 42 - Peças V1A e V1B preparadas para ensaio de flexão



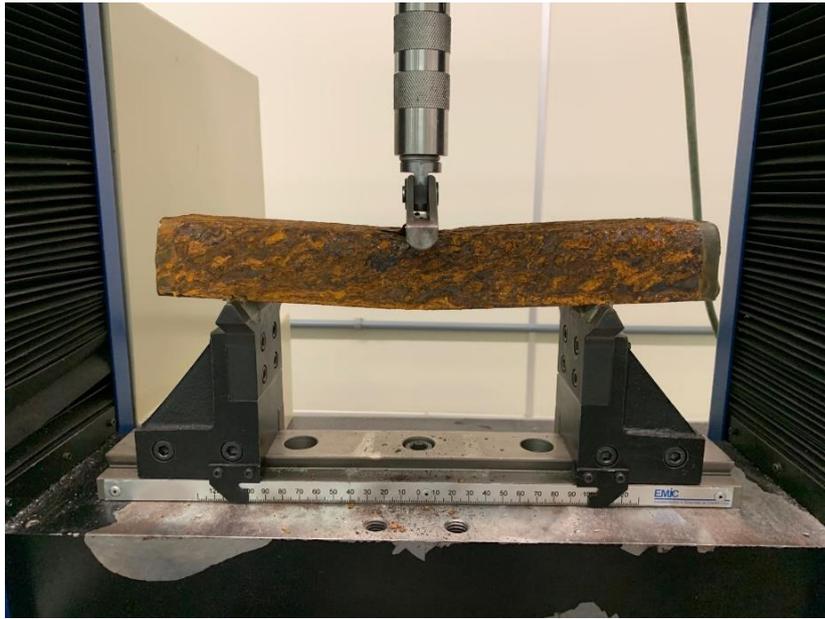
Fonte: Autor (2022).

Figura 43 - V1A posicionada nos apoios



Fonte: Autor (2022).

Figura 44 - V1A Submetida a flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 45 - V1A Após ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 46 - V1B posicionada nos apoios



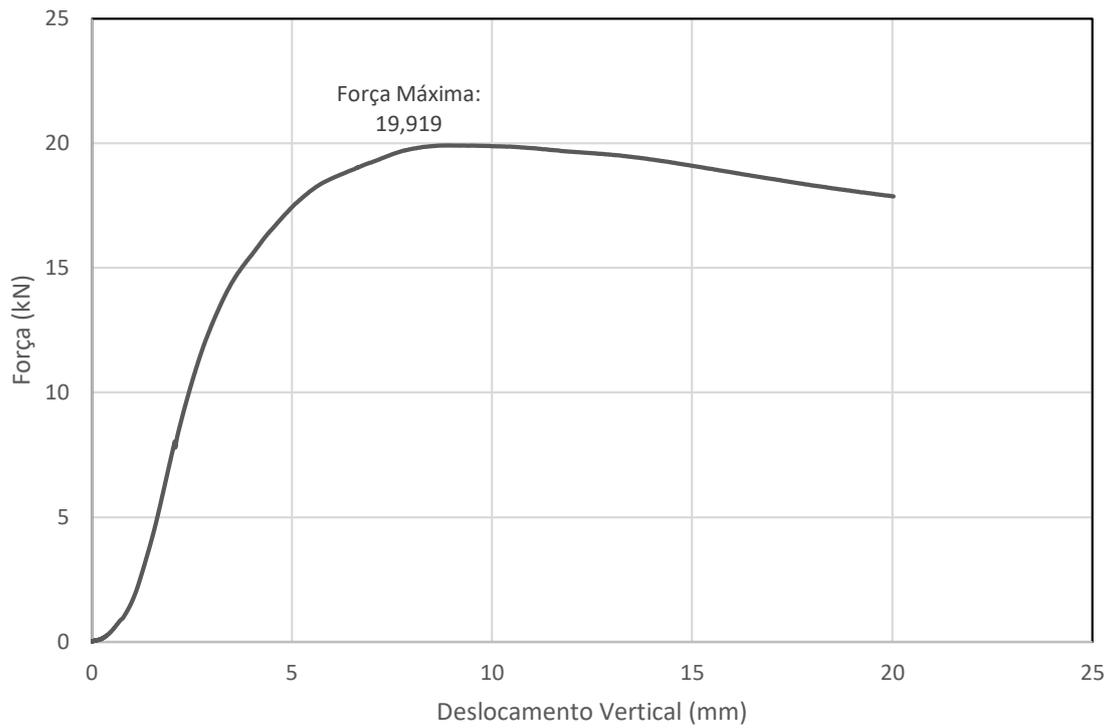
Fonte: Autor (2022).

Figura 47 - V1B Após ensaio de flexão



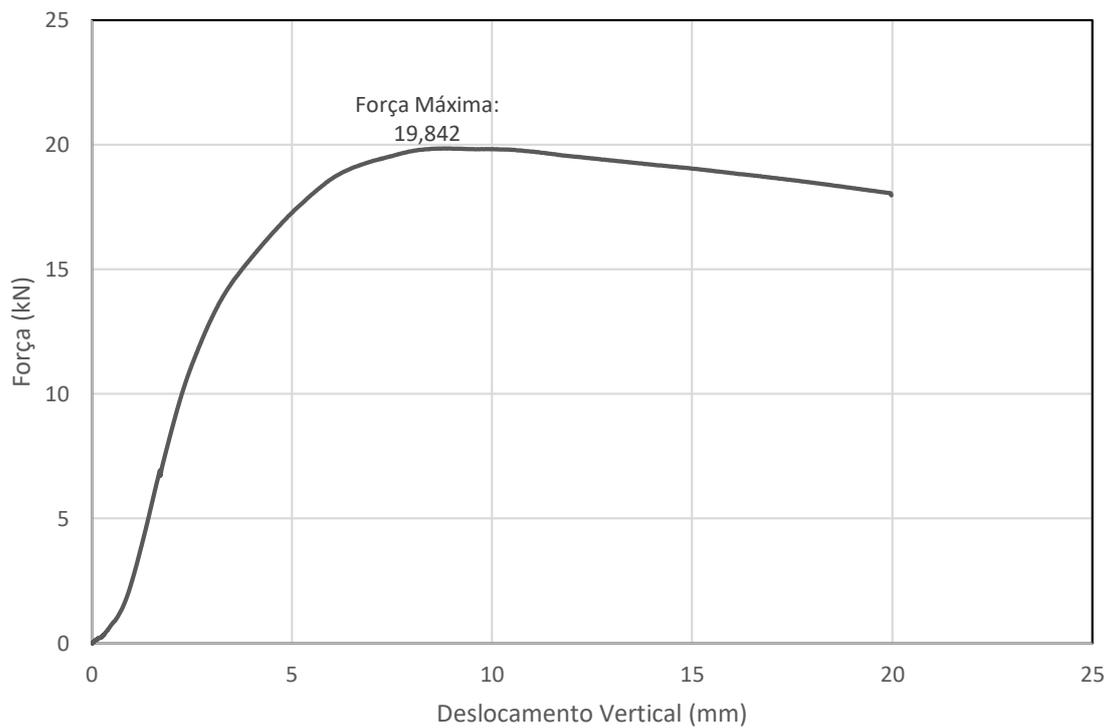
Fonte: Autor (2022).

Figura 48 - Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V1A



Fonte: Autor (2022).

Figura 49 - Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V1B



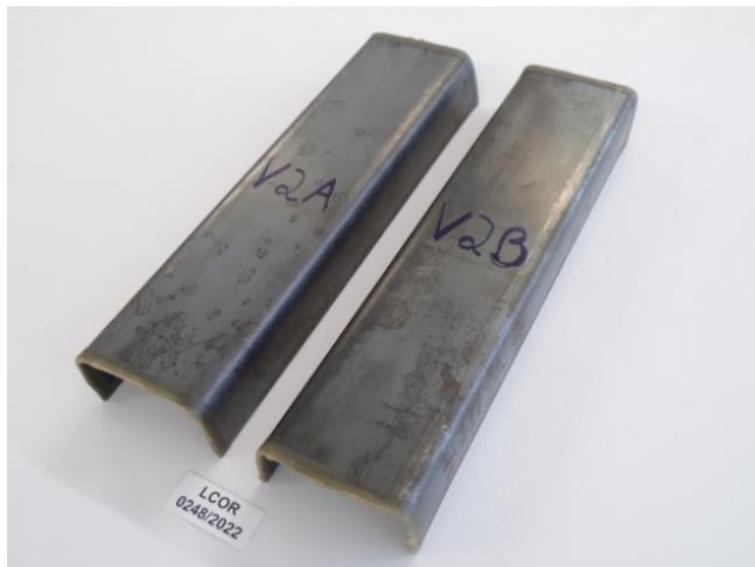
Fonte: Autor (2022)

Os gráficos acima apresentam a peça V1A entrando em regime plástico após atingir seu carregamento máximo de 19,919 kN, e a peça V1B em regime plástico após o carregamento de 19,842 kN.

4.3 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE QUATRO SEMANAS - PEÇAS V2A E V2B

Para os corpos de prova V2A e V2B, ambos também foram enviados até o laboratório LCOR no dia 14/04/2022, assim como as peças V1 as avaliações visuais foram feitas através de pessoal capacitado e inicialmente foi constatado a presença de pequenas imperfeições e manchas na superfície das peças, conforme as Figuras 50 e 51.

Figura 50 - Imperfeições e manchas V2A e V2B



Fonte: LCOR (2022).

Figura 51 - Imperfeições e manchas V2A e V2B



Fonte: LCOR (2022).

No dia 19/04/2022 foi dado início ao ensaio peças V2A e V2B, onde foram avaliados nos periodicamente nos intervalos de 24, 144, 168, 192, 216, 336, 504 e 672 horas, como pode-se observar nas Figuras 52 a 56, com 144, 192, 216 horas não foi apresentada alterações visuais, portanto não houve registro do laboratório. As peças foram renomeadas de acordo com o código do laboratório 0248/2022.

Figura 52 - Peças V2 com 24 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

As peças apresentam com 24 horas de ensaio, corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de produto de corrosão vermelha em grande parte da superfície das peças. Após 144 horas de ensaio não foi destacada nenhuma alteração visual em relação à avaliação realizada com 24 horas, portanto não houve registro.

Figura 53 - Peças V2 com 168 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Com 168 horas destacam-se ainda a corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. Após 192 horas, não foi destacada nenhuma alteração visual nas peças em comparação com a avaliação de 168 horas. E após 216 horas também não se destacaram nenhuma alteração visual, portanto para essas duas avaliações não houve registros.

Figura 54 - Peças V2 com 336 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 55 - Peças V2 com 504 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 56 - Peças V2 com 672 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Com 504 horas de exposição, observou-se corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. No final das 672 horas de ensaio no dia 17/05/2022, houve um maior volume de escorrimento nas peças em relação as 504 horas, as características restantes não apresentaram diferenças visuais.

Quadro 4 - Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V2

| Tempo Exposição | Avaliação Visual Características |
|------------------------|--|
| 24 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de produto de corrosão vermelha em grande parte da superfície das duas peças. |
| 144 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 24 horas de ensaio. |
| 168 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 192 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 168 horas de ensaio. |
| 216 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 168 horas de ensaio. |
| 336 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 504 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 672 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |

Fonte: Autor (2022).

4.3.1 Ensaio de flexão peças V2A e V2B

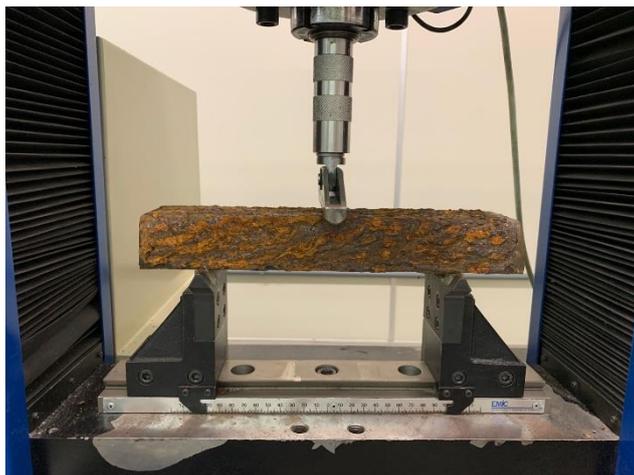
Para o ensaio de flexão das peças com quatro semanas de exposição, foram aplicados os mesmos parâmetros do ensaio das peças V1. Novamente o acúmulo de corrosão na superfície das peças obstruiu a identificação das mesmas, portanto a primeira peça no ensaio será a V2A e a segunda será V2B. Para o peso de cada peça, ambas foram pesadas antes do ensaio de flexão, a viga V2A possui aproximadamente 0,732 kg e a viga V2B 0,745 kg.

Figura 57 - Peças V2A e V2B preparadas para ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 58 - V2A posicionada nos apoios



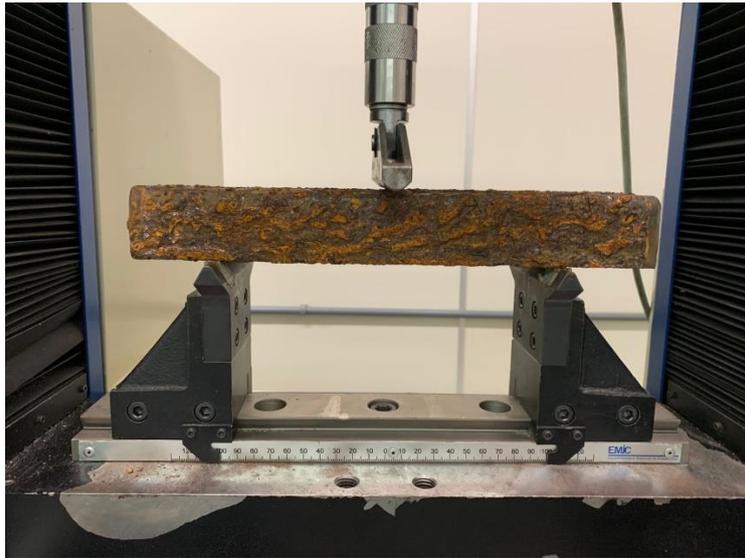
Fonte: Autor (2022).

Figura 59 - V2A Após ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 60 - V2B posicionada nos apoios



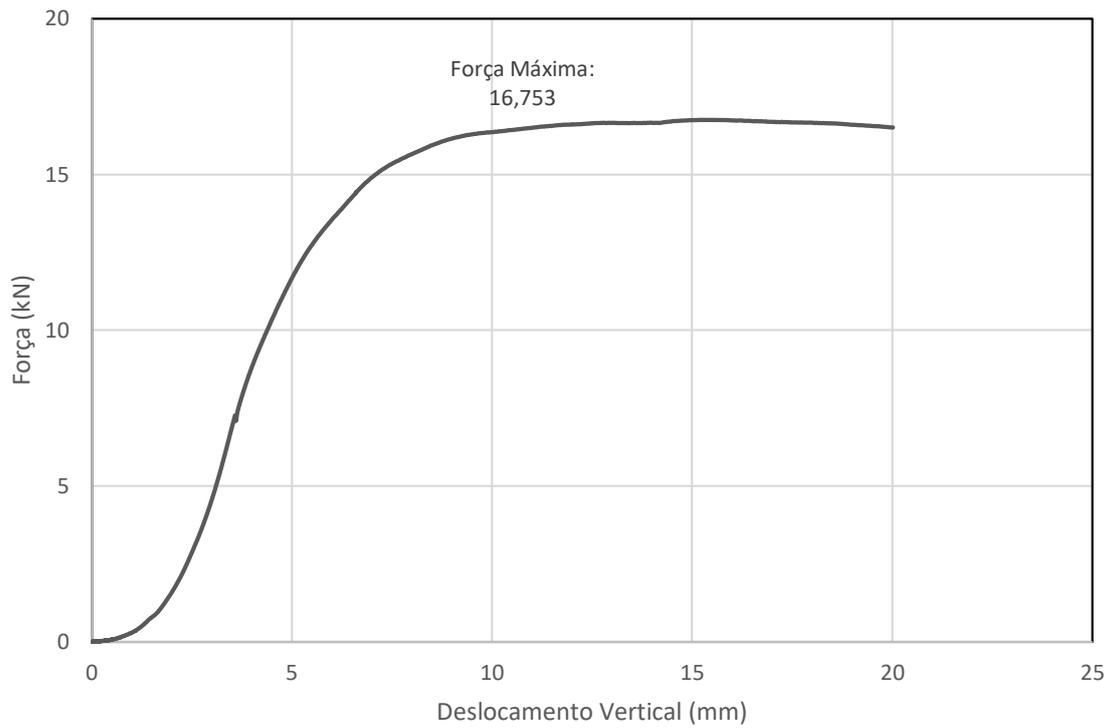
Fonte: Autor (2022).

Figura 61 - V2B Após ensaio de flexão



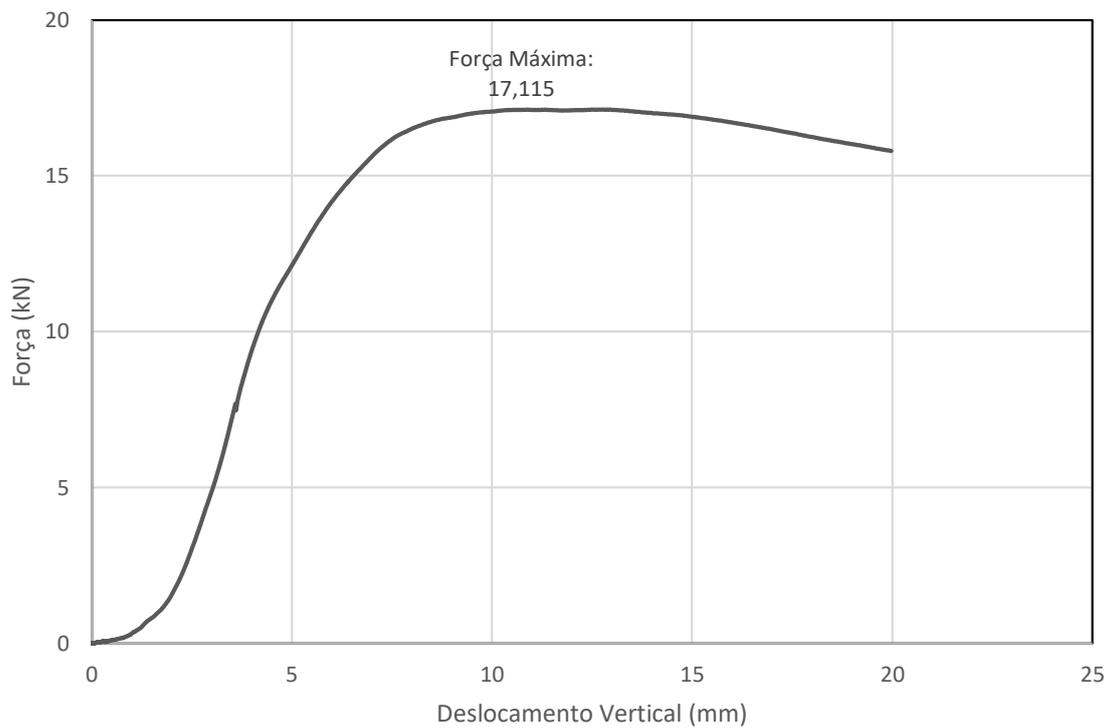
Fonte: Autor (2022).

Figura 62 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V2A



Fonte: Autor (2022).

Figura 63 – Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V2B



Fonte: Autor (2022).

Os dados dos graficos nas Figuras 62 e 63 acima mostram que a peça V2A adentra em regime plástico após o carregamento máximo de 16,753 kN, já a peça V2B inicia em regime plástico após o carregamento de 17,115 kN.

4.4 ENSAIO DE NÉVOA SALINA COM EXPOSIÇÃO DE NOVE SEMANAS - PEÇAS V3A E V3B

O ensaio de névoa salina para as peças V3A e V3B inicialmente constatou, assim como as outras peças submetidas, imperfeições e manchas na superfície de ambas, conforme as Figuras 64 e 65. Foram entregues ao laboratório no dia 14/04/2022.

Figura 64 - Imperfeições e manchas V3A e V3B



Fonte: LCOR (2022).

Figura 65 - Imperfeições e manchas V3A e V3B



Fonte: LCOR (2022).

O início do ensaio se deu no dia 19/04/2022, as peças foram avaliadas nos intervalos de 24, 144, 168, 192, 216, 336, 504, 672, 840, 1008, 1176, 1344 e 1512 horas, as Figuras 64 e 65, com 144, 192, 216, 672, 840 e 1176 horas não foram apresentadas alterações visuais, portanto não houve registro do laboratório. Também mostram a mudança na identificação, renomeadas para 0249/2022. As avaliações estão descritas conforme as Figuras 66 a 72 na sequência, somente para as peças que tiveram registro.

Figura 66 - Peças V3 com 24 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Após 24 horas de ensaio os corpos de prova apresentaram corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de corrosão vermelha, em grande parte da superfície. E com 144 horas de ensaio não foi registrada nenhuma mudança visual das peças em relação a avaliação de 24 horas de ensaio.

Figura 67 – Peças V3 com 168 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Com 168 horas de ensaio continuou sendo registrada a presença de corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento também abundantes, produto de corrosão vermelha. Já após 192 e 216 horas, as peças não apresentaram nenhuma mudança visual em relação à avaliação feita com 168 horas.

Figura 68 - Peças V3 com 336 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 69 - Peças V3 com 504 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Da avaliação de 336 horas há a corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de corrosão vermelha. Para a avaliação de 504 também há corrosão vermelha abundante, mas também volumosa, com acúmulo e escorrimento abundante de corrosão vermelha. Com 672 e 804 horas não houve alteração visual em relação as 504 horas de ensaio.

Figura 70 - Peças V3 com 1008 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Após 1008 horas de ensaio, corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha. Após 1176 horas não houve alteração visual.

Figura 71 - Peças V3 com 1344 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Figura 72 - Peças V3 com 1512 horas de exposição



Fonte: LCOR (2022).

Por fim com 1512 horas de ensaio, as peças mostram corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. Abaixo segue o resumo do ensaio para as peças V3.

Quadro 5 - Resumo do ensaio de corrosão acelerada para as peças V3

| Tempo Exposição | Avaliação Visual Características |
|------------------------|---|
| 24 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento evidente de produto de corrosão vermelha em grande parte da superfície das duas peças. |
| 144 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 24 horas de ensaio. |
| 168 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 192 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 168 horas de ensaio. |
| 216 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 168 horas de ensaio. |
| 336 Horas | Corrosão vermelha abundante com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 504 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |

| | |
|-------------------|--|
| 672 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 504 horas de ensaio. |
| 840 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 504 horas de ensaio. |
| 1008 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 1176 Horas | Sem alteração visual em relação à avaliação realizada após 1008 horas de ensaio. |
| 1344 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |
| 1512 Horas | Corrosão vermelha abundante e volumosa com acúmulo e escorrimento abundante e volumoso de produto de corrosão vermelha em praticamente toda a superfície das duas peças. |

Fonte: Autor (2022).

4.4.1 Ensaio de flexão peças V3A e V3B

Para o ensaio de flexão das peças com nove semanas, mantiveram-se os mesmos parâmetros. A primeira peça a ser ensaiada será a V3A e a segunda será V3B. Ambas peças foram pesadas antes do ensaio de flexão, a viga V3A possui aproximadamente 0,781 kg e a viga V3B 0,785 kg.

Figura 73 - Peças V3A e V3B preparadas para ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 74 - V3A posicionada nos apoios



Fonte: Autor (2022).

Figura 75 - V3A após ensaio de flexão



Fonte: Autor (2022).

Figura 76 - V3B posicionada nos apoios



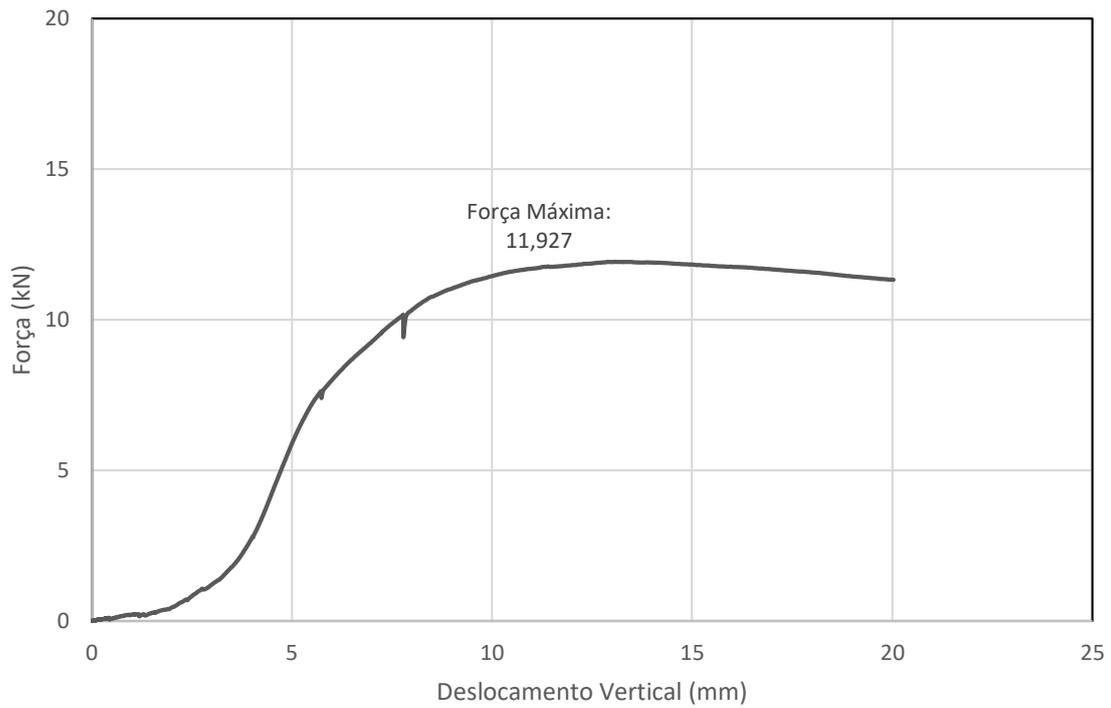
Fonte: Autor (2022).

Figura 77 – V3B após ensaio de flexão



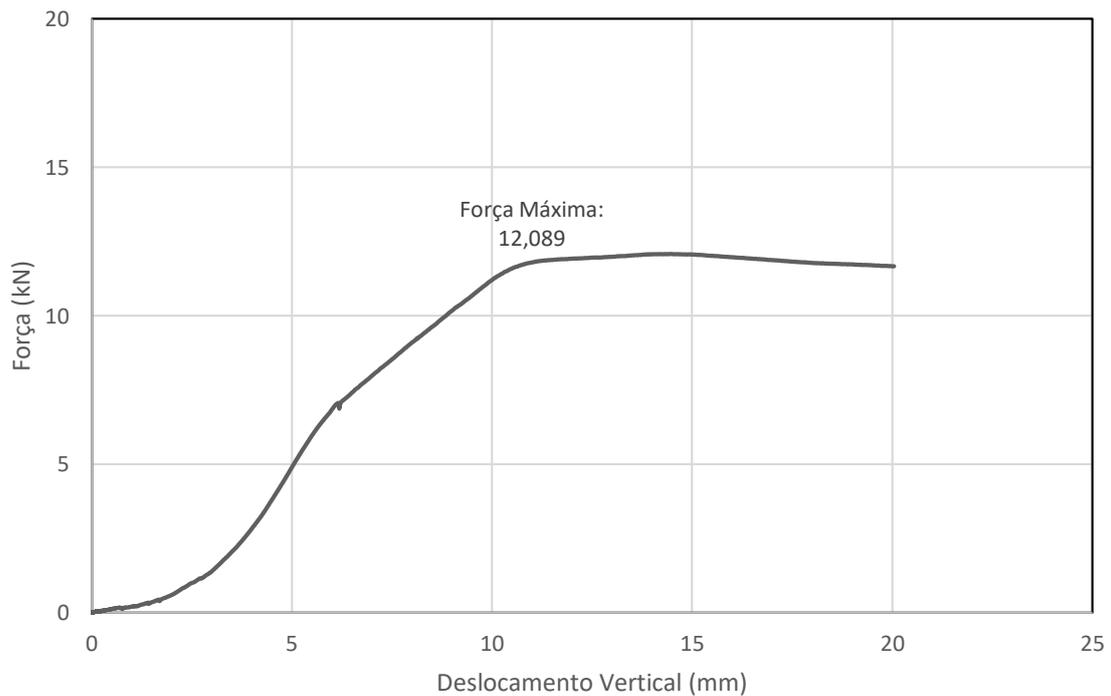
Fonte: Autor (2022).

Figura 78 - Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V3A



Fonte: Autor (2022).

Figura 79 - Gráfico Força x Deslocamento Vertical Peça V3B



Fonte: Autor (2022).

Os respectivos corpos de prova V3A e V3B entram em regime plástico após atingirem o carregamento máximo de 11,927 kN e 12,089 kN. Apresentando uma grande redução em relação aos corpos e prova de controle.

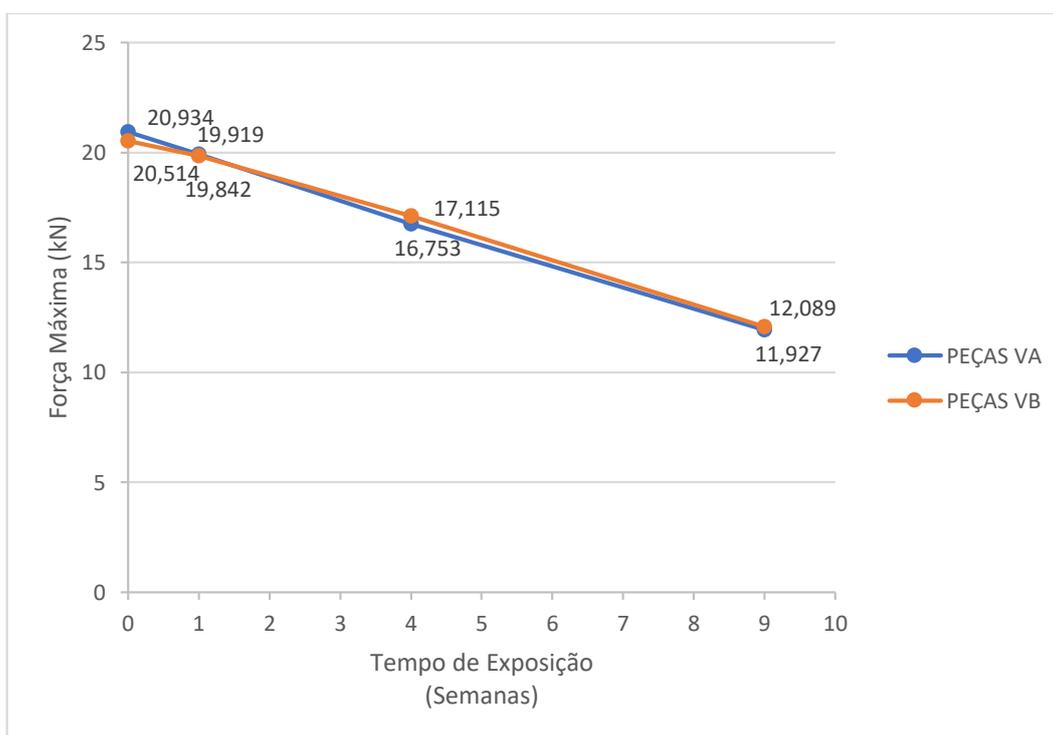
Para melhor visualização dos resultados dos ensaios de flexão, de um modo geral, em relação ao tempo de exposição para as peças V1, V2, V3 e V4, está apresentada a Tabela 2 e em seguida o gráfico da relação Tempo de Exposição em semanas x Força Máxima aplicada nas peças em kN. Também está apresentada a Tabela 3 e a Figura 81 para a análise do peso das peças em comparação com o tempo de exposição.

Tabela 2 - Resumo força máxima em relação ao tempo de exposição

| Nomenclatura | Tempo de Exposição (semanas) | Força Máxima (kN) |
|--------------|------------------------------|-------------------|
| V4A | 0 | 20,934 |
| V4B | | 20,514 |
| V1A | 1 | 19,919 |
| V1B | | 19,842 |
| V2A | 4 | 16,753 |
| V2B | | 17,115 |
| V3A | 9 | 11,927 |
| V3B | | 12,089 |

Fonte: Autor (2022).

Figura 80 – Gráfico Força Máxima x Tempo de Exposição



Fonte: Autor (2022).

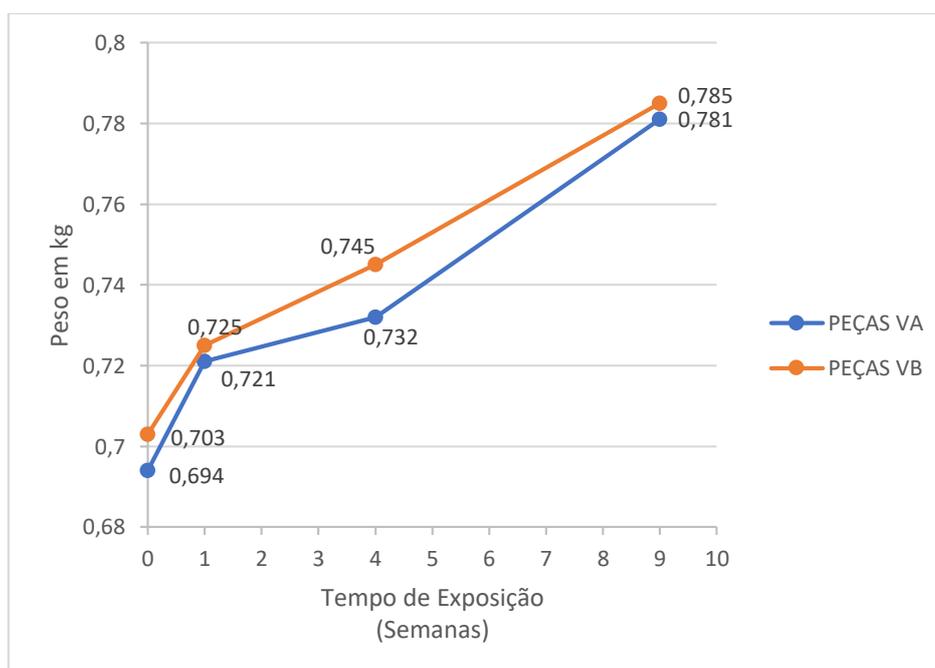
Percebe-se uma tendência decrescente da força máxima nas peças conforme o tempo de exposição aumenta. Ambas as peças com uma semana de exposição demonstram uma leve redução na força máxima para atingir o limite plástico em relação aos corpos de controle, sendo: 1,014 kN para a peça V1A e 0,672 kN para a V1B. Considerando as de quatro semanas, em comparação com os corpos de prova de controle, há uma redução considerável, onde na V2A foi de 4,181 Kn e na V2B de 3,399 kN. E analisando as peças mais expostas, com nove semanas, a V3A apresentou redução de 9,007 kN e a V3B 8,425 kN.

Tabela 3 - Resumo peso em relação ao tempo de exposição

| Nomenclatura | Tempo de Exposição (semanas) | Peso (kg) |
|--------------|------------------------------|-----------|
| V4A | 0 | 0,694 |
| V4B | | 0,703 |
| V1A | 1 | 0,721 |
| V1B | | 0,725 |
| V2A | 4 | 0,732 |
| V2B | | 0,745 |
| V3A | 9 | 0,781 |
| V3B | | 0,785 |

Fonte: Autor (2022).

Figura 81 - Gráfico Peso dos Corpos de Prova x Tempo de Exposição



Fonte: Autor (2022)

Através da Tabela 3 e da Figura 81 pode-se observar um ganho no peso das peças conforme o tempo de exposição aumenta. Caracterizando um aumento, em porcentagem em relação aos corpos de prova de controle, de: 3,5% para as peças V1, 5,7% para as peças V2 e 12,1% para as peças V3.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou experimentalmente o comportamento de vigas perfil U, com seção de 75x40x2 mm com 300 mm de comprimento, submetidas a flexão após ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina, considerando tempos crescentes de exposição.

Com o intuito de alcançar o estudo, foi determinado através de um ensaio de flexão dos corpos de prova de controle, e das medidas de peso, valores base. Esses valores serviram tanto para a análise dos resultados obtidos, como para explicar os questionamentos que motivaram este trabalho. Portanto, foi feita a comparação desses resultados em relação aos outros grupos com tempos de exposição e isso possibilitou as conclusões listadas abaixo.

Quanto aos ensaios de corrosão acelerada em câmara de névoa salina, todos eles apresentaram para cada peça a abundância na formação de corrosão vermelha. Esse tipo de corrosão é observado através da formação de óxido cor laranja na superfície do material, significando o comprometimento da camada de zinco do elemento. Com isso, esse resultado demonstra a importância das medidas protetivas, em relação ao revestimento superficial das peças, para minimizar e evitar uma manifestação patológica ou falha dessas estruturas em ambientes agressivos.

Considerando o aumento de peso dos corpos de prova, é comprovado o que foi mencionado por Gentil (2011), onde em condições atmosféricas molhadas, ou seja, onde a umidade relativa está perto de 100%, ocorre a condensação na superfície da peça, dessa forma pode-se observar que no ensaio de névoa salina ocorre o acúmulo na superfície e conseqüentemente o aumento no peso da peça, através do acúmulo de partículas de cloreto de sódio nas superfícies.

Em relação aos resultados apresentados ao final do ensaio de flexão, através do gráfico da Figura 80, fica evidente uma tendência decrescente da força máxima com base nos tempos de exposição. Quanto maior é o tempo, menor é a resistência que a peça oferece para impedir a entrada do elemento em regime plástico, ou seja, comprovando a tese inicial. Entretanto, não é possível determinar um padrão de comportamento da resistência em relação aos tempos de exposição. São necessários mais estudos com uma maior quantidade de elementos e um intervalo menor de tempo para que se tenha mais dados a fim de comprovar esse padrão de redução na resistência.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho foi desenvolvido com o intuito de fortalecer os estudos em relação a estruturas metálicas dentro da Engenharia Civil na Universidade de Caxias do Sul. Portanto, observa-se abaixo algumas sugestões de trabalhos a serem desenvolvidos na mesma linha de pesquisa.

- a) considerar a análise feita por Vieira (2010) onde se expõe as vigas a flexão pura, ou seja, realizar a análise das peças com corrosão quando submetidas a flexão pura.
- b) fazer análise considerando a resistência a tração, com corpos de prova padronizados de acordo com a norma e submetidos a ensaio de corrosão.
- c) estudar o comportamento a flexão considerando outros tipos de perfis estruturais, como perfil I, L por exemplo.
- d) realizar os ensaios de corrosão e flexão com corpos de prova revestidos com diferentes tipos de tintas.
- e) analisar o padrão de perda de resistência considerando intervalos menores entre os tempos de exposição com uma maior quantidade de elementos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOPLANO (Caxias do Sul). **Aplicações e características do Perfil U para estruturas metálicas**. 2021. Disponível em: <https://www.acoplano.com.br/blog/aplicacoes-e-caracteristicas-do-perfil-u-para-estruturas-metalicas/>. Acesso em: 06 nov. 2021.

AHMAD, Zaki. **Corrosion Engineering and Corrosion Control**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

ALMEIDA, Ariovaldo Fernandes de. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS CONSTITUÍDAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/649/1/Dissertacao%20ariovaldo%20ecivil%202009.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021

ANTUNES, Renato Altobelli. **CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS ACELERADOS E ENSAIOS DE CAMPO EM CORPOS-DE-PROVAS DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL, SEM E COM REVESTIMENTO**. 2002. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Autarquia Associada À Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/065/38065073.pdf?r=1&r=1. Acesso em: 06 nov. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 237 p. Disponível em: https://engcivil20142.files.wordpress.com/2018/03/nbr8800_2008_1.pdf. Acesso em: 07 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro: Abnt, 2010. 87 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6210: Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão**. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - especificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2007. 13 p. Disponível em: <http://ferramar.com.br/wp-content/uploads/2016/10/NBR7480.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à névoa salina**. Rio de Janeiro: Abnt, 1983. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8754**: Corpos-de-prova revestidos e expostos a ambientes corrosivos - Método de avaliação. Rio de Janeiro: Abnt, 1985. 3 p.

BELLEI, Humberto Napoli. **DESEMPENHO FRENTE À CORROSÃO DE PERFIS ESTRUTURAIS METÁLICOS "I" SOLDADOS POR ALTA FREQUÊNCIA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2006. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

CASTRO, Eduardo Mariano Cavalcante de. **Patologia dos Edifícios em Estrutura Metálica**. 1999. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6247>. Acesso em: 12 out. 2021.

CBCA. **Aços Estruturais**. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/acos-estruturais/>. Acesso em: 12 out. 2021.

CHIAVERINI, Vicente. **Aço e Ferros Fundidos**. 1982. Disponível em: https://www.academia.edu/37125289/_A%C3%A7os_Ferros_Fundidos_Vicente_Chiaverini. Acesso em: 12 out. 2021.

COPPERMETAL (São Paulo). **Uso de estruturas metálicas para construção civil: Vale a pena?** 2020. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/aco-carbono/estruturas-metalicas-para-construcao-civil/>. Acesso em: 20 out. 2021.

D., CALLISTER, Jr., W. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro. Grupo GEN, 2020. 9788521637325. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 21 out. 2021.

FELÍCIO, Eduardo Alves. **ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE CONCEITO DA PRODUÇÃO ENXUTA PARA REDUÇÃO DE RESÍDUOS EM UMA MANUFATURA DO RAMO SIDERÚRGICO**. 2012. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012. Disponível em: https://www.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2014/09/2012_1_Eduardo.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.

FERRAZ, Henrique. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos, v. 1, n. 22, p. 1-16, 06 mar. 2005. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%2520A%25C7O%2520NA%2520CONSTRU%25C7%25C3O%2520CIVIL.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

FORMIGONI, Alexandre *et al.* **A SUSTENTABILIDADE DO AÇO E DAS ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2014. INOVAE - Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/382>. Acesso em: 14 out. 2021.

GALVINFO CENTER. **Corrosão Eletrolítica/Galvânica em Chapas Galvanizadas (incluindo Aresta de Corte)**. 2013. Disponível em: http://www.icz.org.br/site/pdf/galvanizacao/GalvInfoNote_3_6.pdf. Acesso em: 16 out. 2021.

IMIANOWSKY, Guilherme Wanka; WALENDOWSKY, Marcus Alberto. **OS PRINCIPAIS AÇOS CARBONO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/portal/arquivosSGC/a%C3%A7os%20carbono%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aplicações do Aço**: conheça as diferentes formas que o aço está presente no nosso cotidiano. Conheça as diferentes formas que o aço está presente no nosso cotidiano. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/aplicacoes-do-aco/>. Acesso em: 12 out. 2021.

MITRA, Soham *et al.* **Corroded steel beams with various corrosion aspect ratios - A rehabilitation technique using basalt fibre fabric**. Ontario: Elsevier, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620301917?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2021.

NUNES, Laerce de Paula; LOBO, Alfredo Carlos O.. **PINTURA INDUSTRIAL NA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014. 425 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/42054/pdf/0?code=mDb6ETNpqNcGwJPlsT+LyFIMOKmz7tgALGPidbzAO9IWZAJsTbEK4j0gLVf3QNKRD80xB8eLtpwIDrDt2HHdg==>. Acesso em: 16 out. 2021.

ORMONDE, Paulo Cavalcante. **Software Educacional Livre para análise não linear de pórticos planos em estruturas metálicas**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4687/5600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 out. 2021.

PANNONI, Fábio Domingos. **PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE CORROSÃO E INCÊNDIO**. 2007. 4ª Edição. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62242308/manual_corrosao20200301-66210-bnrl8p-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1634416903&Signature=NkECwWEv58waITGgXREgmSFx5f-j7mIYIuB8DIiZQYcPew2qbUhT69YvHO6w7TFL9kjs8V3m4gBRdW0~CN0BDHXfA1OAhIpPJtVNSx61TLCcKIfH8PLx~vCeagmqmS2hMcba4X3J5-CyPtv5pWrph5Uq-ACfWB8fsdFZlpLKiFgd3kBxfut9ucqjKNLwMrbrCzAz11OZRz22WAO374ZHP-QFCE2RgJdFFQVRbz8XKWNQ-cj56LfyCCYBeB~nQ3B3CrnYOF6MCY7SXDJzJpeADiZq0HmyjhSK92UnoSQnsNRAPtWckj9o0iD82j70ZscjZ7HLenOfOnWpFJDkrp~Nsg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 16 out. 2021.

PEINADO, Hugo Sefrian; MORI, Luci Mercedes de; MIOTTO, José Luiz. **Aço cortado e dobrado de fábrica para estruturas de concreto armado**. *Téchne* (online), ed. 195, jun. 2013.

PEREIRA, Caio. **Estrutura Metálica: Processo executivo, vantagens e desvantagens**. Escola Engenharia, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/estrutura-metalica/>. Acesso em: 12 de outubro de 2021.

PEREIRA, Caio. **Estrutura Metálica: Processo executivo, vantagens e desvantagens**. Escola Engenharia, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/estrutura-metalica/>. Acesso em: 29 de setembro de 2021.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **ESTRUTURAS DE AÇO: dimensionamento prático de acordo com a nbr 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009. 353 p. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2818-7/epubcfi/6/10\[%3Bvnd.vst.idref%3Dcopyright\]!/4/16/1:131\[or%20%2Cqua\]](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2818-7/epubcfi/6/10[%3Bvnd.vst.idref%3Dcopyright]!/4/16/1:131[or%20%2Cqua]). Acesso em: 12 out. 2021.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **ESTRUTURAS METÁLICAS: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005. 302 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/177930/pdf/0?code=snQg/q00mmk0JbJmDwKt34odIDYv2gyaM4cxoh3Nm2MU8yeSOh0jwVY/iQ8kU8C+ED4eR4gCxWTYU7b10X3/jQ==>. Acesso em: 12 out. 2021.

PINHEIRO, Libânio M.. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. 2007. Disponível em: http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf. Acesso em: 02 out. 2021.

PORTAL SIDERURGIA BRASIL (São Paulo). **O Grande Universo de possibilidades**. 2020. Disponível em: <https://siderurgiabrasil.com.br/2020/12/20/o-grande-universo-de-possibilidades/>. Acesso em: 20 out. 2021.

RAAD JÚNIOR, Antoine Aziz. **DIRETRIZES PARA FABRICAÇÃO E MONTAGEM DAS ESTRUTURAS METÁLICAS**. 1999. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6285/1/DISSERTA%3%87%3%83O_DiretrizesFabrica%3%a7%3%a3oMontagem.pdf. Acesso em: 14 out. 2021.

SACCHI, Caio César; SOUZA, Alex Sander Clemente de. **MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E CONTROLE DE QUALIDADE NA MONTAGEM E FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2017. REEC – Revista Eletrônica

de Engenharia Civil Vol 13 - nº 1. 2017. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/41214/pdf>. Acesso em: 14 out. 2021.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **ESTUDO DO AÇO COMO OBJETO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM EDIFICAÇÕES ANTIGAS**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <http://pos.dees.ufmg.br/defesas/179M.PDF>. Acesso em: 12 out. 2021.

VELLASCO, Pedro.Colmar. G. *Modelagem de Estrutura de Aço e Mistas*. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. 9788595153592. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153592/>. Acesso em: 27 out. 2021.

VICENTE, GENTIL. *Corrosão, 6ª edição*. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2011. 978-85-216-1944-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1944-4/>. Acesso em: 10 out. 2021.

VIEIRA, Gregório Sandro. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS DE SEÇÃO "I" COMPOSTAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS, SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/648/1/Gregorio%20Sandro%20Vieira.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021.

WANG, Yafei; CHENG, Guangxu; LI, Yun. **Observation of the pitting corrosion and uniform corrosion for X80 steel in 3.5 wt.% NaCl solutions using in-situ and 3-D measuring microscope**. Xi'An: Elsevier, 2016. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez314.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0010938X16302505?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2021.

WEIMER, Bianca Funk; THOMAS, Mauricio; DRESCH, Fernanda. **Patologia das Estruturas**. Porto Alegre: Sagah Educação S.A, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595023970/pageid/3>. Acesso em: 14 out. 2021.