

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DÉBORA AVER

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE CORROSÃO EM CHAPAS DE
ALUMÍNIO PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODO COMPUTACIONAL**

CAXIAS DO SUL
2021

DÉBORA AVER

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE CORROSÃO EM CHAPAS DE
ALUMÍNIO PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Engenharia Química, na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Ms. Roberto Itacyr Mandelli

**CAXIAS DO SUL
2021**

DÉBORA AVER

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE CORROSÃO EM CHAPAS DE
ALUMÍNIO PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Engenharia Química, na Universidade de Caxias do Sul.

Aprovada em 02/12/2021

Banca Examinadora

Prof. Ms. Roberto Itacyr Mandelli
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Cesar Aguzzoli
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dra. Eliena Jonko
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ser tão gentil comigo e me abençoar em mais maneiras do que sou capaz de compreender.

Agradeço a meu pai Marcos, por desde que eu me lembro me incentivar e me motivar a estudar, e a me mostrar e me ensinar com exemplos diários, o tipo de pessoa que quero ser, esperando um dia ter ao menos parte de sua sabedoria na vida.

Agradeço a minha mãe Marilene, por todo seu amor incondicional e seu carinho tão precioso durante os momentos difíceis, por sua paciência nas vezes em que meu humor fazia com que eu mesma não quisesse ficar perto de mim.

Agradeço a minha irmã Diana, por acreditar em mim mesmo quando nem eu acreditei, por me mostrar como ter perseverança, sendo meu maior exemplo, tanto na parte profissional quanto pessoal, me mostrando a cada dia como trazer leveza a todo lugar em que estiver presente.

Agradeço a meu cunhado Andreis, por sempre de forma tão generosa dividir comigo seu tempo e seu conhecimento, estando disposto a me ajudar mesmo sendo um final de semana ou sendo de madrugada e tendo que acordar cedo na manhã seguinte.

Agradeço a toda minha família por sua compreensão nas vezes em que os estudos foram minha prioridade e tive de me ausentar.

Agradeço de forma especial ao professor Mandelli, por aceitar esse desafio junto comigo e por toda a sua ajuda durante essa caminhada.

Agradeço também a todos os colegas, professores e amigos com os quais cruzei o caminho ao longo dessa jornada, levarei para sempre comigo os momentos que passamos juntos e as experiências que trocamos, grande parte da profissional que hoje sou devo a vocês.

“Cada um de nós faz o melhor que pode com o que nos é dado. Você não pode deixar de ser quem é ou o que nasceu para ser.”

Christopher Paolini

RESUMO

O estudo da corrosão, de suas formas e os mecanismos pelos quais ocorre, é importante para os mais variados setores da indústria, estando diretamente relacionado com o meio e as condições de exposição nas quais o material se encontra. Visto que o alumínio é um dos materiais mais utilizados em inúmeros segmentos industriais a nível mundial, optou-se por avaliar seu comportamento. Assim, o presente trabalho tem como objetivo verificar se o comportamento de uma liga de alumínio da série 3000, pode ser previsto por meio de uma simulação computacional, ao utilizar-se um programa adequado para tanto. Essa avaliação dos resultados obtidos experimentalmente por ensaios acelerados de corrosão, visa verificar se estes serão condizentes com os resultados obtidos por meio de simulação computacional, utilizando-se de uma modelagem parametrizada para tanto. Dessa forma, esses ensaios experimentais foram conduzidos em equipamentos de névoa salina neutra e equipamentos de névoa salina acética, por períodos de tempo variáveis de no mínimo 1 hora até 1000 horas de exposição. Assim, para a realização desta validação do método computacional, os parâmetros operacionais especificados durante a operação do *software*, foram definidos de acordo com os valores específicos da liga utilizada na fabricação das amostras e de acordo com as condições ambientais encontradas nos equipamentos de *salt spray*, que foram utilizados nos ensaios conduzidos em laboratório. Desta forma, os resultados obtidos para os valores de diferença entre a massa inicial e final e os valores de taxa de corrosão, tanto para as amostras ensaiadas experimentalmente quanto para os resultados da simulação numérica, puderam ser comparados entre si. Por fim, para que ocorra um maior entendimento dos mecanismos de corrosão, apresentada pelas amostras da liga de alumínio utilizada no material testado experimentalmente, análises de MEV/FEG e de EDS foram realizadas, permitindo que a avaliação dos resultados fosse feita de forma mais precisa. Assim, com base nesses ensaios, se conseguiu verificar uma maior perda de massa e uma mais elevada taxa de corrosão para as amostras expostas a névoa salina acética, uma maior divergência de resultados da triplicata para a névoa salina neutra, além de uma dificuldade da simulação em reproduzir tais resultados.

Palavras chave: Corrosão. Ensaio experimental. Simulação. Névoa salina neutra. Névoa salina acética. Análise numérica. Alumínio.

ABSTRACT

The study of corrosion, its forms and the mechanisms by which it occurs, is important for the most varied sectors of the industry, being directly related to the environment and the exposure conditions in which the material is found. Since aluminum is one of the most used materials in countless industrial segments worldwide, it was decided to evaluate its behavior. Thus, the present work aims to verify if the behavior of an aluminum alloy of the 3000 series can be predicted by means of a computer simulation, using a suitable program. This evaluation of the results obtained experimentally by accelerated corrosion tests, aims to verify if these will be consistent with the results obtained through computer simulation, using a parameterized modeling for this purpose. Thus, these experimental tests were carried out in neutral saline fog equipment and acetic salt fog equipment, for variable periods of time ranging from at least 1 hour to 1000 hours of exposure. Thus, to carry out this validation of the computational method, the operating parameters specified during the software operation were defined according to the specific values of the alloy used in the manufacture of the samples and according to the environmental conditions found in the salt spray equipment, that were used in the tests conducted in the laboratory. In this way, the results obtained for the difference values between the initial and final mass and the corrosion rate values, both for the experimentally tested samples and for the results of the numerical simulation, could be compared with each other. Finally, in order for a greater understanding of the corrosion mechanisms to occur, presented by the aluminum alloy samples used in the experimentally tested material, SEM/FEG and EDS analyzes were performed, allowing the evaluation of the results to be made more precisely. Thus, based on these tests, it was possible to verify a greater loss of mass and a higher corrosion rate for the samples exposed to acetic salt spray, a greater divergence of results from the triplicate for the neutral salt spray, in addition to a difficulty in the simulation in reproducing such results.

Keywords: Corrosion. Experimental testing. Simulation. Neutral salt fog. Acetic salt fog. Numerical analysis. Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento da relação entre umidade e formação de óxidos.....	24
Figura 2 – Diagrama de Pourbaix do alumínio para potencial versus pH a 25 °C.....	29
Figura 3 – Micrografia de uma seção transversal do filme de hidróxido de alumínio.....	31
Figura 4 – Representação visual de algumas formas de corrosão metálica.....	32
Figura 5 – Corrosão uniforme sobre uma placa metálica.....	34
Figura 6 – Cavidades causadas pela corrosão por alguns tipos de <i>pitting</i>	35
Figura 7 – Chapas de alumínio que serão utilizadas em ensaio de névoa salina.....	42
Figura 8 – Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho...	43
Figura 9 – Curva 1 de polarização para o Al.....	50
Figura 10 – Curva 2 de polarização para o Al.....	51
Figura 11 – Curva 3 de polarização para o Al.....	52
Figura 12 – Chapas com 1 h, 2 h, 3 h e 4 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	54
Figura 13 – Chapa com 10 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	54
Figura 14 – Chapa com 24 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	54
Figura 15 – Chapa com 48 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	55
Figura 16 – Chapa com 72 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	55
Figura 17 – Chapa com 96 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	55
Figura 18 – Chapa com 120 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	56
Figura 19 – Chapa com 144 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	56
Figura 20 – Chapa com 168 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	56
Figura 21 – Chapa com 336 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	57
Figura 22 – Chapa com 504 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	57

Figura 23 – Chapa com 672 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	57
Figura 24 – Chapa com 840 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	58
Figura 25 – Chapa com 1000 h de ensaio em <i>salt spray</i> neutro.....	58
Figura 26 – Chapas com 1 h, 2 h, 3 h e 4 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	58
Figura 27 – Chapa com 10 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	59
Figura 28– Chapa com 24 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	59
Figura 29 – Chapa com 48 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	59
Figura 30 – Chapa com 72 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	60
Figura 31 – Chapa com 96 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	60
Figura 32 – Chapa com 120 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	60
Figura 33 – Chapa com 144 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	61
Figura 34 – Chapa com 168 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	61
Figura 35 – Chapa com 336 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	61
Figura 36 – Chapa com 504 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	62
Figura 37 – Chapa com 672 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	62
Figura 38 – Chapa com 840 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	62
Figura 39 – Chapa com 1000 h de ensaio em <i>salt spray</i> acético.....	63
Figura 40 – Diferença entre valores de perda de massa para mesmo período de exposição em <i>salt spray</i> neutro.....	67
Figura 41 – Diferença entre valores de perda de massa para mesmo período de exposição em <i>salt spray</i> acético.....	67
Figura 42 - Perda de Massa x Tempo de Exposição <i>Salt spray</i> Neutro.....	70
Figura 43 - Perda de Massa x Tempo de Exposição <i>Salt spray</i> Acético.....	70
Figura 44 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição <i>Salt spray</i> Neutro.....	73
Figura 45 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição <i>Salt spray</i> Acético.....	74

Figura 46 – Modelo 3D dos corpos de prova.....	78
Figura 47 – Execução do processamento do modelo 3D.....	79
Figura 48 – Zonas mais propicias a corrosão no modelo 3D.....	79
Figura 49 – Massa x Tempo de Exposição para simulação de névoa salina neutra.....	80
Figura 50 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição para simulação de névoa salina neutra.....	81
Figura 51 – Massa x Tempo de Exposição para simulação de névoa salina acética.....	81
Figura 52 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição para simulação de névoa salina acética.....	82
Figura 53 – Análise de EDS da chapa virgem.....	84
Figura 54 – Análise de EDS da chapa com 1000 horas de <i>salt spray</i> neutro.....	85
Figura 55 – Análise de EDS da chapa com 1000 horas de <i>salt spray</i> acético.....	86
Figura 56 – Análise de MEV/FEG da chapa virgem.....	87
Figura 57 – Análise de MEV/FEG da chapa com 1000 horas de <i>salt spray</i> neutro...88	
Figura 58 – Análise de MEV/FEG da chapa com 1000 horas de <i>salt spray</i> acético..90	

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação dos principais elementos e sua influência nas propriedades apresentadas pela liga de alumínio.....	21
Quadro 2 – Ligas de Alumínio e seu respectivo comportamento quanto a corrosão.....	22
Quadro 3 – Relação entre meio e agente agressivo.....	25
Quadro 4 – Classificação de meios corrosivos.....	26
Quadro 5 – Parâmetros simulados.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do alumínio puro.....	19
Tabela 2 – Classificação da resistência à corrosão do alumínio e suas ligas pela taxa de corrosão.....	31
Tabela 3 – Comparativo entre curvas de polarização experimentais.....	53
Tabela 4 - Perda de massa para ensaio de névoa salina neutra.....	63
Tabela 5 - Perda de massa para ensaio de névoa salina acética.....	65
Tabela 6 – Perda de massa considerados por tempo em <i>salt spray</i> neutro.....	68
Tabela 7 – Perda de massa considerados por tempo em <i>salt spray</i> acético.....	69
Tabela 8 – Taxa de corrosão <i>salt spray</i> neutro.....	72
Tabela 9 – Taxa de corrosão <i>salt spray</i> acético.....	73
Tabela 10 – Comparativo simulação versus experimental para o tempo de 4 horas.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
SSN	<i>Neutral Salt Spray</i>
SSA	<i>Acetic Acid Salt Spray</i>
Tc	Taxa de corrosão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	18
2.1.1 Principais características do alumínio	18
2.1.2 Principais características das ligas	20
2.2. CORROSÃO E SEUS MECANISMOS	22
2.2.1 Meios corrosivos	23
2.2.2 Diagrama <i>Pourbaix</i>: Estabilidade e corrosão do alumínio	28
2.2.3 Produtos de corrosão para o alumínio	29
2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE CORROSÃO PARA O ALUMÍNIO	32
2.3.1 Corrosão Uniforme	33
2.3.2 Corrosão por <i>Pitting</i>	35
2.4 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO POR NÉVOA SALINA	36
2.4.1 Ensaios de exposição à névoa salina neutra	37
2.4.2 Ensaios de exposição à névoa salina acética	38
2.5 UTILIZAÇÃO DE <i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO	39
2.5.1 <i>Softwares</i> no controle de corrosão	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 MATERIAIS	42
3.2 MÉTODOS	43
3.2.1 Ensaio de névoa salina neutra e acética	44
3.2.2 Decapagem química	45
3.2.3 Perda de massa e Taxa de corrosão	46
3.2.4 Análise de MEV/FEG	46

3.2.5 Curva de polarização.....	47
3.2.6 Parâmetros da análise numérica.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 CURVAS DE POLARIZAÇÃO.....	49
4.2 ENSAIOS ACELERADOS EXPERIMENTAIS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA	53
4.2.1 Decapagem dos corpos de prova experimentais.....	63
4.2.2 Resultados obtidos para perda de massa	63
4.2.3 Resultados obtidos para taxa de corrosão	72
4.3 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO NÚMÉRICA.....	75
4.4 RESULTADOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	78
4.5 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS)	83
4.6 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/FEG)	
86	
5 CONCLUSÃO.....	92
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos processos de corrosão é de vital importância para diversos ramos da indústria, podendo-se citar entre eles os setores automotivos, de construção civil, naval, aeronáutico, aeroespacial, alimentício entre outros. Isso se dá pois o surgimento de corrosão, para qualquer uma destas áreas, afeta de forma direta a produção, a qualidade e o rendimento do produto final.

Desta forma, métodos de controle e monitoramento de taxas de corrosão que caracterizem a agressividade do meio de exposição, passaram a ser cada vez mais empregados por estas indústrias. Assim, para suprir essa demanda, começaram a surgir então os ensaios de corrosão laboratoriais e de campo.

A corrosão está diretamente relacionada com dezenas de variáveis ambientais e que nem sempre podem ser previstas, além de na grande maioria dos casos, demandar um longo período de tempo até que possa ser visualizada. Assim, para os ensaios corrosivos de laboratório, tem-se a vantagem de poder controlar estas variáveis ambientais e com estes parâmetros fixados para simular o meio desejado, há a possibilidade de acelerar a obtenção dos resultados (GENTIL, 2011; RAMANATHAN, 19--).

Para Gentil (2011), alguns dos principais motivos para a utilização dos ensaios de corrosão laboratoriais são: o estudo dos processos corrosivos, a avaliação do metal mais indicado para determinado meio de exposição, averiguar se o material escolhido como protetor é satisfatório para uso e a avaliação dos efeitos decorrentes dos processos de fabricação sobre seu comportamento em contato com o meio corrosivo.

Para estes ensaios, deve-se considerar que eles são destrutivos e que para obter-se confiabilidade quanto aos resultados, a quantidade destes corpos de prova deve ser ao menos suficiente para a reprodutibilidade em triplicata. Com base nisto, cada vez mais se observa o crescimento de pesquisas e estudos envolvendo a utilização de *softwares*, que possibilitem a automatização de processos industriais e a avaliação da corrosão sofrida pelo material de interesse em seu meio de serviço. Assim, tanto no âmbito econômico quanto ambiental, a utilização de programas capazes de simular a corrosão apresentada por determinado material quando exposto a um meio corrosivo e compara-los com os ensaios experimentais é de grande interesse.

Neste contexto, a proposta para esse trabalho é a comparação entre resultados apresentados através da utilização de um software de simulação de corrosão com os apresentados por ensaios acelerados em câmaras de névoa salina neutra e acética. Se validados os resultados gerados por meio de softwares, a realização de ensaios experimentais de corrosão pode ser mitigada, diminuindo a quantidade de rejeitos gerados por tais equipamentos, da mesma forma que acarretaria na redução dos custos envolvidos com a realização destes ensaios.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os resultados de ensaios de corrosão em amostras de ligas de alumínio da série 3000 apresentados por simulação numérica com os apresentados em ensaios em câmara de névoa salina neutra e acética.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a realização e obtenção do descrito para o objetivo geral do presente trabalho, tem-se por intuito:

- a) realizar diferentes ensaios acelerados de corrosão para liga de alumínio da série 3000, com tempos de duração variáveis;
- b) definir valores dos parâmetros de entrada para a análise numérica;
- c) simular numericamente através do software ANSYS FLUENT® os mesmos sistemas ensaiados experimentalmente;
- d) monitorar e avaliar visualmente as alterações sofridas pela liga de alumínio da série 3000 no decorrer dos ensaios de corrosão acelerada;
- e) determinar a variação da massa e a taxa de corrosão dos corpos de prova após os ensaios experimentais;
- f) caracterizar morfológicamente o tipo de corrosão por análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG);
- g) comparar os resultados fornecidos pelos ensaios práticos com o resultado gerado através de simulação, averiguando à similaridade entre estes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio (Al) é um elemento pertencente ao grupo dos metais da tabela periódica. Na natureza, ele é encontrado na forma de minérios, como por exemplo a Bauxita, que é a sua principal fonte, nela o Al está presente na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3), assim, para que a sua captação seja vantajosa em termos econômicos, ao menos uma fração de 30% do minério deve ser constituída de Al_2O_3 . No Brasil, a mineração desse material rende produtos de excelente qualidade, uma vez que as nossas reservas se encontram entre algumas das maiores do mundo (ABAL, 2019).

Conforme Askeland e Phulé (2008), o alumínio ocupa a terceira posição na classificação dos elementos mais abundantes do nosso planeta, perdendo apenas para o silício em segundo lugar e o oxigênio em primeiro. Esse metal e suas ligas possuem uma vasta gama de aplicações, sua resistência relativamente elevada a corrosão, seu bom aspecto decorativo e a facilidade de seu processo de reciclagem, são fatores que contribuem para sua escolha em variadas áreas industriais.

Atualmente, o alumínio é o segundo metal mais utilizado em todo o mundo, graças a sua combinação de propriedades, que conferem a esse material uma enorme versatilidade, principalmente ao combinar duas ou mais características, como por exemplo sua baixa densidade e resistência. Na Europa, por volta de 40% de toda a produção de alumínio é destinada ao setor de transporte, sendo essa a maior área de consumo de produtos feitos com esse material (EUROPEAN, 2021).

2.1.1 Principais características do alumínio

Para que consiga atingir toda essa variedade de aplicações, o Al possui propriedades físicas muito especiais, pode-se citar como exemplo sua condutividade elétrica, que é similar à do cobre, mas que em virtude da baixa densidade do Al o torna um material aproximadamente duas vezes mais barato. Outra propriedade de grande importância é sua característica antimagnética, fazendo dele uma ótima opção

para proteção de materiais eletrônicos, além de poder ser utilizado para o transporte de inflamáveis, uma vez que esse metal inibe a produção de faíscas (ABAL, 2019).

Da mesma forma, seu uso em meios de locomoção é justificado por sua baixa densidade, que reduz os gastos energéticos e a emissão de CO₂ ao aumentar a eficiência do combustível (EUROPEAN, 2021).

Assim, algumas das principais propriedades físicas para o Al em sua forma pura, e que justificam essa sua vasta gama de aplicações, encontram-se resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do alumínio puro

Propriedades Físicas	
Densidade (g/cm ³)	2,70
Temperatura de fusão (°C)	660
Módulo de elasticidade (MPa)	70000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23.10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica a 25 °C (Cal/cm/°C)	0,53
Condutibilidade elétrica (% IACS)	61
Refletividade (%)	> 80

Fonte: Adaptado ABAL (2019).

Quando em contato com o ar, o Al reage com o oxigênio presente e forma uma fina película de Al₂O₃ em sua superfície, conforme a Equação Química 1, esta camada passiva é a responsável pela proteção do Al e sua resistência a corrosão. Porém, essa película protetiva pode ser solubilizada pela ação de atmosferas ácidas, em especial as contendo ácido clorídrico (HCl), deixando assim, o Al exposto e suscetível a

transformação em cloreto de alumínio (AlCl_3) (GENTIL, 2011; ASKELAND; PHULÉ, 2008).



A Equação Química 2 a seguir, demonstra a reação eletroquímica sofrida pelo Al quando em contato com um meio aquoso. Nesta área anódica, o Al metálico se dissolve em forma de íons, onde considera-se que os íons Al^{3+} são produtos de exposição a pH ácido e os íons AlO_2^- de exposição a pH alcalino (FERRARI, 2011).



2.1.2 Principais características das ligas

Os metais em sua forma pura não são utilizados em grande escala, dando espaço para as ligas. Uma liga metálica é a combinação química entre diferentes elementos metálicos com o intuito de alcançar um material superior que apresente um desempenho melhor de propriedades mecânicas (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Os metais puros tendem a apresentar características como boa condutividade, tanto térmica quanto elétrica, à medida que as ligas costumam apresentar propriedades elevadas em características como resistência mecânica e resistência a choques, ductibilidade e rigidez (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Usualmente, no caso do Al e suas ligas, quanto mais puro for o metal melhor será sua resistência contra a corrosão. Desta forma, os elementos de liga adicionados geralmente tendem a não passar de 1% da composição do material, aumentando assim sua durabilidade. Visto que esses elementos, na grande maioria das vezes afetam diretamente a ação causada por mecanismos de corrosão localizada. O acréscimo de certos elementos ao Al puro otimiza características desejadas, alguns dos metais mais comumente encontrados nessas ligas são o cobre, magnésio, zinco, cromo e manganês. O Quadro 1 a seguir, identifica as mais relevantes contribuições desses elementos para as características finais apresentadas pelas ligas de Al (ASM,1995).

Quadro 1 – Relação dos principais elementos e sua influência nas propriedades apresentadas pela liga de alumínio

Elemento	Propriedade
Magnésio / Manganês / Zinco	Aumento da resistência a corrosão e da resistência mecânica.
Cobre	Aumento da resistência mecânica quanto a tração e endurecimento
Cromo	Aumento da resistência mecânica quanto dureza e resistência à corrosão
Silício	Aumento da resistência a corrosão
Lítio	Aumento da resistência mecânica quanto a fadiga e a tenacidade

Fonte: Adaptado de ASM (1995), Callister (2002), Silva (2004) e Moreira (2012).

Além da composição química, o processo de fabricação ao qual a liga de Al foi submetida, relaciona-se diretamente com a taxa de corrosão apresentada pelo material e a forma como essa corrosão irá manifestar-se. Assim, esse processo acaba influenciando o tipo de ataque sofrido e se esse ocorrerá de forma localizada ou generalizada (SCARABOTTO, 2018).

Se o metal receber algum tipo de revestimento ou tratamento superficial, seu nível de resistência a corrosão pode vir a ser ainda mais realçado. Muitas vezes, a camada de óxido superficial, que funciona como forma de proteção, pode ter sua espessura aumentada em decorrência de determinados tipos de tratamentos eletroquímicos ou térmicos (ASM,1995).

Assim, dependendo do elemento de liga e do tratamento a qual essa foi submetida, o metal pode vir a apresentar como característica ser mais suscetível ou não a determinado tipo de corrosão. O Quadro 2 traz essa relação entre série de ligas de Al, seu principal elemento de liga e sua respectiva resistência (CODARO, 2006).

Quadro 2 – Ligas de Alumínio e seu respectivo comportamento quanto a corrosão

Série	Tratamento	Elemento de liga	Resistência à corrosão			
			Geral	<i>Pitting</i>	Esfoliação	Corrosão sob tensão
1XXX	Todos	Impurezas naturais	Excelente	Excelente	Excelente	Imune
2XXX	Endurecido por envelhecimento	Cu	Razoável	Pouco	Pouco	Muito susceptível
	super envelhecimento		Razoável	Pouco	Razoável	Resistente
3XXX	Todos	Mn, Mn + Mg	Excelente	Excelente	Excelente	Imune
4XXX	Todos	Si	Razoável	Bom	Bom	Bom
5XXX	A maioria	Mn, Mg, Cr	Excelente	Bom	Bom	Imune - Resistente
6XXX	Todos	Mg, Si	Excelente	Bom	Excelente	Imune
7XXX	Endurecido por envelhecimento	Zn, Mg, Mn	Razoável	Razoável	Razoável - Pouco	Susceptível -Muito susceptível
	super envelhecimento	Cu	Razoável	Razoável	Bom	Resistente

Fonte: Adaptado de Jones (1996).

2.2. CORROSÃO E SEUS MECANISMOS

De forma geral, a corrosão pode ser definida como um termo utilizado para referir-se à deterioração de um material, normalmente metálico, que ocorre por intermédio da reação com os elementos que constituem o ambiente no qual ele se encontra. Dessa forma, o metal perde algumas de suas propriedades, entre elas a resistência mecânica, elasticidade e ductibilidade (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003; RAMANATHAN, 19--).

O processo de corrosão de um metal é a sua tentativa de retornar ao estado em que é encontrado na natureza, visto que o produto da corrosão, em geral é a sua forma oxidada e essa diversas vezes se assemelha ao minério do qual o metal foi retirado (GENTIL, 2011).

Então, a corrosão pode se formar em decorrência de diversos mecanismos diferentes, esses em geral dependem da origem pela qual a diferença de potencial ocorre e são comumente denominados de “pilha”. Quando o processo de corrosão é eletroquímico, ele ocorre por meio de reações entre a oxidação do ânodo e a redução do cátodo, sendo dos fenômenos relacionados a corrosão os mais comuns a corrosão galvânica, por *pitting* e por frestas (ASM,1995; GEMELLI, 2001).

2.2.1 Meios corrosivos

O meio e as condições nas quais o metal está inserido irão influenciar diretamente a corrosão sofrida por esse material. Conforme Wolynech (2003), aproximadamente 90% da incidência de corrosão pode ser classificada como mecanismos que ocorrem em meio aquoso. Esse fenômeno pode ser explicado pela grande incidência de corrosão no meio ambiente, onde há a presença de água, considerada o principal solvente em processos eletroquímicos.

Considerando-se uma situação de imersão do metal em um meio aquoso, uma reação eletroquímica poderá ocorrer, onde o processo corrosivo é desencadeado devido a uma troca de cargas elétricas entre o metal, atuando como eletrodo, e a água como eletrólito (VARGEL, 2020).

Alguns meios não tão usuais também podem acarretar em corrosão por intermédio de agentes nem sempre tão óbvios como a água. A exposição do metal a ambientes que contenham certos fungos, bactérias e leveduras, juntamente com os nutrientes que esses organismos necessitam, pode vir a gerar uma corrosão microbiológica. Esse tipo de corrosão é causado pelo contato com a matéria orgânica gerada pelo metabolismo de microrganismos (GEMELLI, 2001).

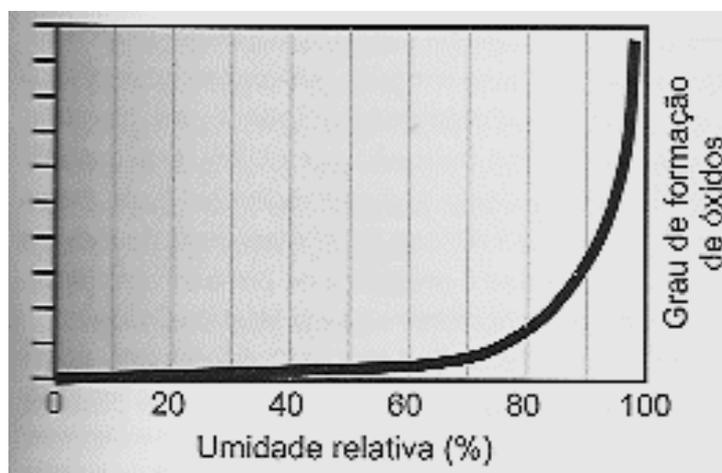
Entretanto, referindo-se aos meios corrosivos, a atmosfera é um dos que possuem maior relevância, sua corrosividade relaciona-se com o oxigênio presente e a umidade relativa do ar. Geralmente o oxigênio é tratado como um valor fixo, pois

apenas variações de altitude alteram sua concentração (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

Porém, a temperatura e a pressão parcial apresentada pelo oxigênio também afetam diretamente o óxido que se formara sobre a superfície do metal, pois esses parâmetros interferem em sua estabilidade. Por essa razão, a estabilidade termodinâmica de diferentes óxidos é comparada com o auxílio das relações estequiométricas, apresentadas pela reação entre o metal analisado e o oxigênio disponível (GEMELLI, 2001).

Para a umidade, quanto mais baixos forem seus níveis, mais seca é a atmosfera e conseqüentemente mais lenta é a oxidação, em contrapartida, quando a umidade relativa se encontra maior que 60%, ocorre condensação sobre a superfície do material. Essa umidade condensada irá absorver poluentes atmosféricos e acelerar a taxa de corrosão, conforme demonstrado na Figura 1, passando a atuar como um eletrólito através da condução de eletricidade via transporte de íons (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

Figura 1 – Comportamento da relação entre umidade e formação de óxidos



Fonte: Gnecco (2003).

Entretanto, em meios úmidos, além da presença de água, alguns fatores devem ser ponderados, a ausência de substâncias contaminantes como os íons de Cl⁻ por exemplo, diminui drasticamente a agressividade demonstrada pelo ambiente de exposição. Desta forma, em ensaios laboratoriais em câmaras úmidas, materiais metálicos, como o Al e suas ligas, tendem a apresentar um desempenho bastante satisfatório quanto a resistência à corrosão (SCARABOTTO, 2018).

Segundo Ramanathan (19--), tem-se três possibilidades de se dividir os principais tipos de atmosferas, há a classificação por teor de umidade, onde a corrosão é separada em Corrosão seca, Corrosão úmida e Corrosão aquosa. A classificação de acordo com a zona geográfica, onde os possíveis tipos de separação são o Tropical, Subtropical, Temperada, Ártica e assim por diante. Por último, há a classificação mais usual, que é feita de acordo com o meio, sendo esse dividido em Marinho, Industrial, Rural e Urbano, os principais agentes agressivos de cada um desses meios são apresentados no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Relação entre meio e agente agressivo

Meio	Agente
Marinho	Sol Chuva Umidade Poeira de areia Névoa salina
Industrial	Sol Chuva Umidade Fuligem e poeira de produtos químicos Gases
Rural	Sol Chuva Umidade Poeira do solo
Urbano	Sol Chuva Umidade Fuligem SO ₂

Fonte: Adaptado Gnecco (2003).

Soluções que contêm cloreto de sódio (NaCl) simulam a água do mar, sendo então responsáveis por um aumento da velocidade da corrosão, em virtude da ocorrência de um aumento de densidade da corrente, uma vez que esse sal eleva a condutividade da água e conseqüentemente a transferência de carga elétrica (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

Desta forma, os meios corrosivos em que os materiais são expostos podem ser classificados e divididos de acordo com o grau de sua agressividade quanto a corrosividade atmosférica. Assim, essa separação é feita de modo a abranger os meios que possuem desde taxas de corrosão consideravelmente baixas, até aqueles cuja a taxa apresentada pode ser descrita como sendo de elevada corrosividade. Com base nisso, o Quadro 4 abaixo traz essa classificação dos meios (ISO, 2012).

Quadro 4 – Classificação de meios corrosivos

Categoria corrosiva	Intensidades
C1	Muito baixa
C2	Baixa
C3	Média
C4	Alta
C5	Muito alta
Cx	Extrema

Fonte: Adaptado ISO (2012).

No Al, a corrosão é visualizada mais facilmente quando esse metal é exposto a atmosferas que simulam a condição encontrada em ambientes marinhos. Esses ambientes são ricos em íons cloreto, que ao entrarem em contato com a superfície do metal, reagem e acarretam na formação de $AlCl_3$, que é então dissociado em $Al(OH)_3$ (MAHMOOD; GALLAGHER; ENGELBERG, 2020; NIŞANCIOĞLU, 2007).

Assim, a corrosão atmosférica é muito comum em metais como o Al, onde, nesse tipo de sistema de corrosão diversos fatores são vitais, entre eles a temperatura, a incidência de chuvas, a exposição solar e a umidade do ambiente, sendo esta última decisiva para a quantidade e velocidade de corrosão apresentada pelo material. Ambientes onde a umidade se aproxima de 100% apresentam a formação de gotículas de água condensada sobre a superfície do material, fazendo com que esse eletrólito promova uma espécie de catálise do processo corrosivo (GENTIL, 2011).

Fatores como pH e temperatura também estão diretamente relacionados com a intensidade da corrosão que o material metálico virá a apresentar, principalmente quando combinados. Para as ligas, os elementos adicionados ao metal principal também são significativos para a inibição ou aceleração do processo corrosivo, elementos passivantes, como por exemplo o Mn e Mg, formam óxidos na presença de pH alcalinos ou se enriquecem com óxido quando submetidos a água do mar. Dessa forma, devido a dissolução seletiva do componente mais ativo, é promovida uma elevada proteção a corrosão (NIŞANCIOĞLU, 2007).

Essa camada de óxido protetora não é estável em meios ácidos ou alcalinos, entretanto, em meios alcalinos a taxa de corrosão é menor. Isto pode ser explicado em virtude da formação de uma película protetora, constituída a partir da deposição de íons Al^{3+} , que devido a sua rápida dissolução no meio alcalino, atingem elevadas concentrações e precipitam. Já meios que possuem um pH ácido, apresentam uma diminuição na formação de precipitados e por consequência uma menor proteção devido à falta desses produtos (HUANG et al., 2016).

Entretanto, segundo Mahmood, Gallagher e Engelberg (2020), a porosidade dos produtos de corrosão pode vir a afetar a sua eficiência quanto a proteção do alumínio. A porosidade apresentada é resultado da hidratação desses produtos, visto que amostras que foram expostas a umidade por um período de tempo eram menos compactas e mais porosas.

Quando nos referimos a temperatura, pode-se dizer que a reação catódica de redução do oxigênio age como um facilitador de corrosão para o Al. Em geral quando esse parâmetro for abaixo de aproximadamente 80 °C, maior é a taxa de corrosão, uma vez que a pouca quantidade de oxigênio dissolvido em temperaturas elevadas

desacelera essa reação de redução e por consequência inibe, mesmo que parcialmente, o efeito da corrosão (HUANG et al., 2016).

A maior evidencia de formação de corrosão em temperaturas mais baixas, conforme estudos de L'haridon-Quaireau et al. (2020), também pode ser justificada pela presença de lacunas na estrutura do hidróxido de alumínio, essas se formam na região entre os microcristais e não são identificadas em temperaturas mais elevadas. Tais lacunas acabam sendo as responsáveis pelo contato direto do meio com a superfície que deveria ser protegida pela película superficial.

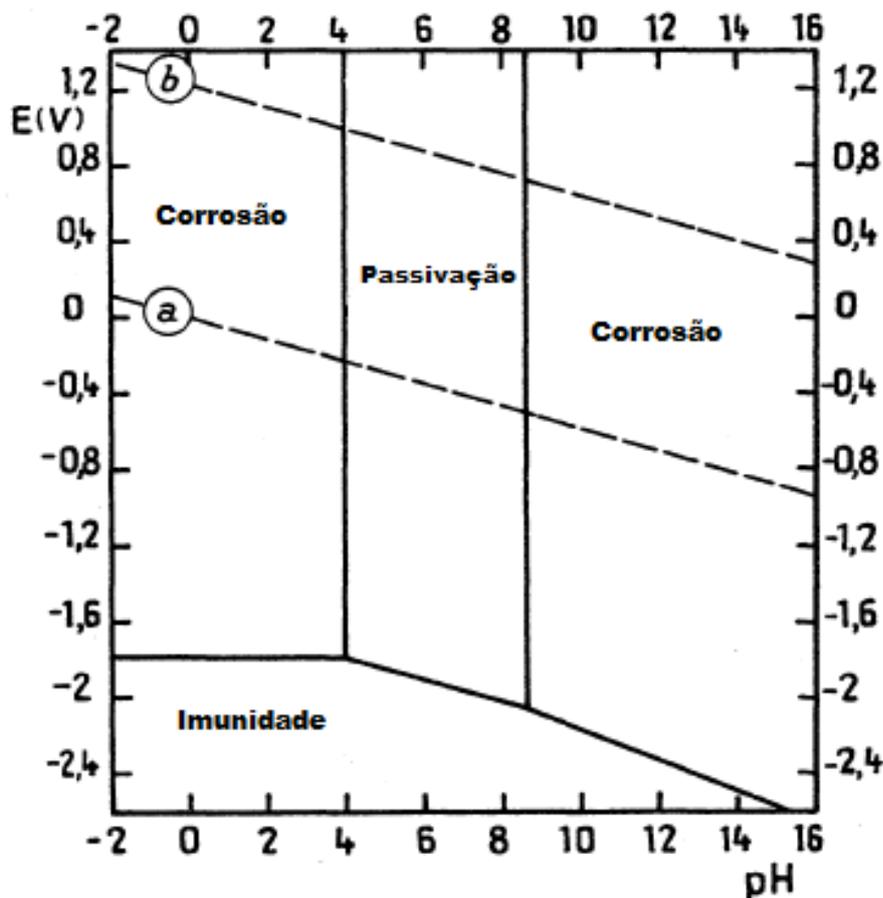
Por fim, outro fator extremamente importante para a avaliação da corrosão apresentada por determinado material é o seu tempo de exposição ao meio agressivo. A tendência geralmente observada, é a relação de que quanto maior é o período de exposição do metal a condições que causem sua degradação, maior será a taxa de corrosão que esse apresentará. Sendo que, as primeiras horas de exposição costumam apresentar uma velocidade maior na visualização de alterações físicas no material (ZUCHRY et al., 2020).

2.2.2 Diagrama de *Pourbaix*: Estabilidade e corrosão do alumínio

O alumínio é um metal que possui como uma de suas principais características, a capacidade de revestir-se superficialmente com uma película de óxido não condutora de natureza complexa. Esta película está diretamente relacionada com a resistência a corrosão apresentada pelo material, uma vez que, o comportamento dessa camada de óxido determina se haverá uma proteção ineficiente, geralmente causada por alterações como a porosidade que esta película apresenta ou o seu grau de hidratação. Quando a película superficial encontrada em metais passivos é de qualidade, a corrosão causada por agentes como os cloretos, pode ser significativamente reduzida (POURBAIX, 1974).

Com base nisso, a Figura 2 trás o diagrama Pourbaix, que demonstra a estabilidade termodinâmica dessa camada de óxido sobre o Al, considerando que ela é composta por $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ e que a estabilidade é alcançada por meio do equilíbrio entre os íons H^+ ou OH^- , a água e o Al. Assim, a espécie sólida considerada, além do próprio Al é o Al_2O_3 (POURBAIX, 1974; FERRARI, 2011).

Figura 2 – Diagrama de Pourbaix do alumínio para potencial versus pH a 25 °C



Fonte: Adaptado Pourbaix (1974).

Com o auxílio de tal diagrama pode-se perceber que o filme de óxido passivo é anfótero, ou seja, se desestabiliza quando submetido a presença de pH ácido ou pH alcalino, alcançando assim a estabilidade eletroquímica em valores de pH compreendidos dentro da faixa de 4 até aproximadamente 8,5. Assim, por se tratar de um equilíbrio químico, o Al pode vir a sofrer corrosão tanto eletroquimicamente quanto quimicamente. Desta forma, quando exposto a um pH suficientemente ácido, esse metal reage e acarreta na formação de íons trivalentes Al^{3+} , processo parecido com o que ocorre ao ser exposto a ambientes com pH suficientemente alcalino, entretanto o produto dessa exposição é o Al_2O_3 (POURBAIX, 1974; FERRARI, 2011).

2.2.3 Produtos de corrosão para o alumínio

No caso do Al, o produto da corrosão é o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), esse material possui uma coloração branca característica que pode variar para um branco

levemente amarelado de acordo com o pH apresentado, o que pode ser um indicativo de mudança de composição para óxido-hidróxido. Assim, por meio de comparações entre micrografias de amostras de hidróxidos com valores de pH variantes, pode-se observar que a morfologia desse composto varia junto com a alteração do pH, pois o tamanho dos aglomerados observados se altera. Dessa forma, a pureza dos reagentes utilizados modifica o produto de corrosão obtido, mudando aspectos visuais e estruturais (HORSTH; DALPASQUALE; ANAISSI, 2020).

Esse hidróxido formado no processo de corrosão também é conhecido pelo nome de baierita, a Equação Química 3 representa seu principal processo reacionário. Esse produto de corrosão e sua quantidade estão diretamente relacionados com a umidade do ambiente de exposição, que promove um ataque a sua película de óxido protetora (GEMELLI, 2001).

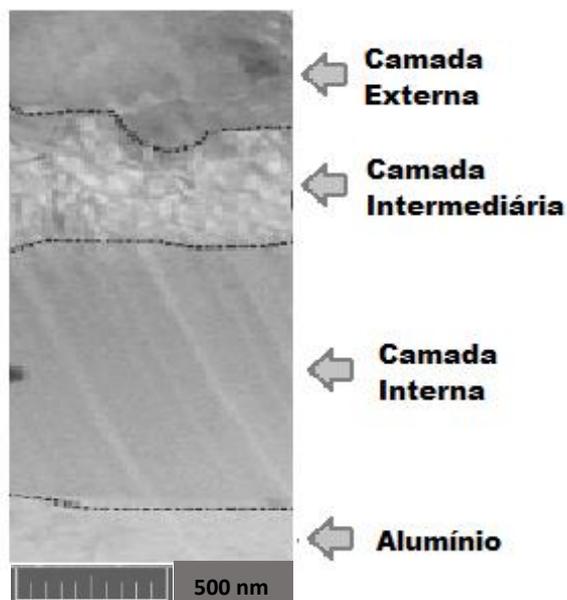


Esta película é formada em grande parte por alumina ($\text{Y-Al}_2\text{O}_3$) na parte interna, ou seja, na área em que está em contato com o metal, e na seção externa, em contato com o ambiente, é formada majoritariamente por boemita (Y-AlOOH), Equação Química 4, além da própria baierita, uma vez que na presença de água a boemita reage, transformando-se em Al(OH)_3 , Equação Química 5 (GEMELLI, 2001).



A Figura 3 ilustra, por meio de uma imagem obtida pela realização de uma análise de microscopia, a morfologia apresentada pelos grãos em cada uma das fases da fina película protetora sobre uma chapa de Al (L'HARIDON-QUAIREAU et al., 2020).

Figura 3 – Micrografia de uma seção transversal do filme de hidróxido de alumínio



Fonte: Adaptado L'haridon-quaireau et al. (2020).

Com base nisso, Rabald (1978 apud GENTIL, 2011, p. 317) avalia a qualidade dessa película protetora do Al ao classificar a resistência à corrosão apresentada por esse material metálico de acordo com a sua taxa de corrosão, de forma a avaliar a aplicação do Al mediante o meio ao qual será exposto. A Tabela 2 a seguir demonstra essa relação entre resistência e taxa de corrosão.

Tabela 2 – Classificação da resistência à corrosão do alumínio e suas ligas pela taxa de corrosão

Resistência relativa	Taxa de corrosão (g/m²/dia)
Resistente	0,8
Razoavelmente resistente	8
Não resistente	24
Não indicado	> 72

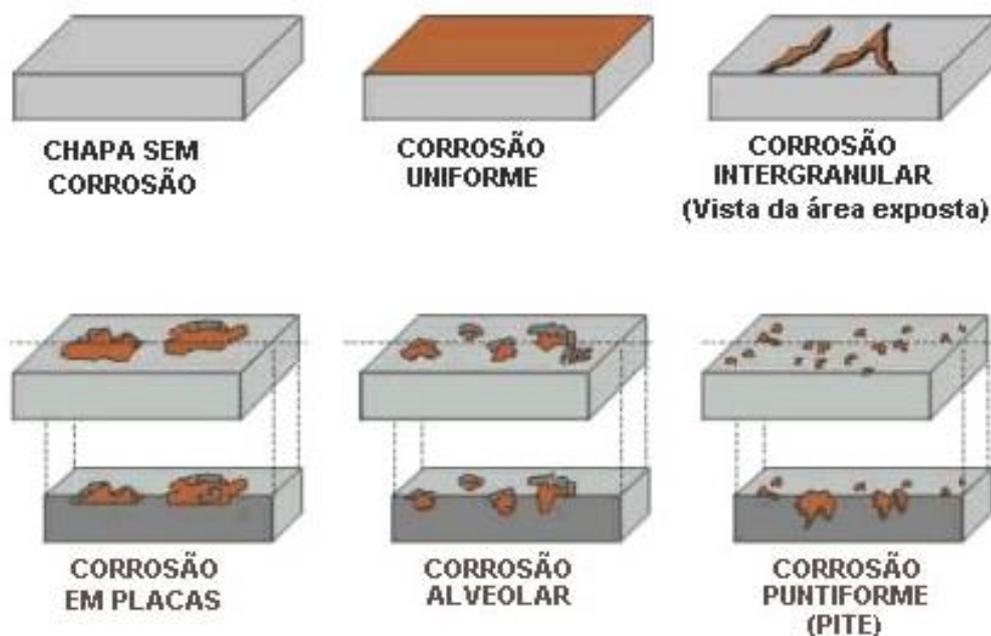
Fonte: Adaptado Rabald (1978 apud GENTIL, 2011, p. 317).

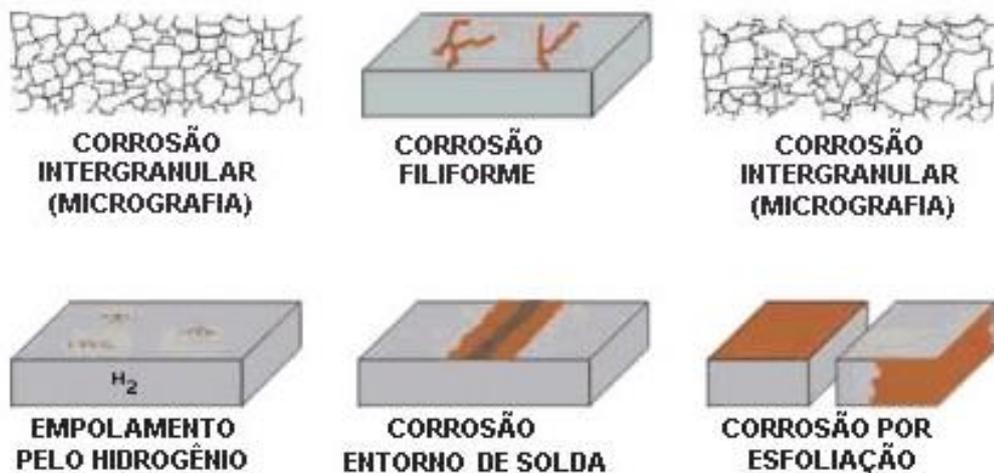
2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE CORROSÃO PARA O ALUMÍNIO

Os processos de corrosão podem acontecer de inúmeras formas, sendo classificados como corrosão generalizada ou corrosão localizada. A corrosão generalizada ocorre por toda a área superficial do corpo de prova, em contrapartida, a corrosão localizada ocorre em determinadas áreas sobre a superfície do material. Esse processo localizado realiza a corrosão por intermédio da seletividade da remoção de metal, atacando apenas uma fração específica da superfície enquanto mantém o restante intacto (RAMANATHAN, 19--).

A principal forma pela qual a corrosão generalizada se manifesta é a corrosão uniforme, mas quando nos referimos a corrosão localizada, há inúmeras formas de manifestação, podendo-se citar como exemplos a corrosão por placas, alveolar, por *pitting* (também conhecida como puntiforme), intergranular, transgranular, filiforme e a corrosão por esfoliação. A Figura 4 a seguir, demonstra os aspectos visuais desses tipos de formas pelas quais a corrosão se faz presente nos materiais metálicos (GENTIL, 2011).

Figura 4 – Representação visual de algumas formas de corrosão metálica





Fonte: Instituto de Metais Não Ferrosos (2021).

A forma pela qual a corrosão irá se manifestar ocorre em virtude de um conjunto de fatores, estresses mecânicos podem vir a ser responsáveis pelo início de um processo corrosivo, assim como mudanças de microestrutura decorrentes de tratamentos térmicos ou o contato entre dois materiais metálicos diferentes (WOLYNEC, 2003).

Esse contato entre ao menos dois metais que apresentam potenciais eletroquímicos diferentes, em contato com um meio líquido que atua como eletrólito, é chamado de corrosão galvânica. Dessa maneira, entre os metais envolvidos, aquele que possui uma carga mais eletronegativa irá liberar íons e se corroer, sendo assim chamado de ânodo. Por outro lado, o metal que possui uma carga eletropositiva e que permanece sem sofrer danos ao liberar elétrons, recebe a denominação de cátodo (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

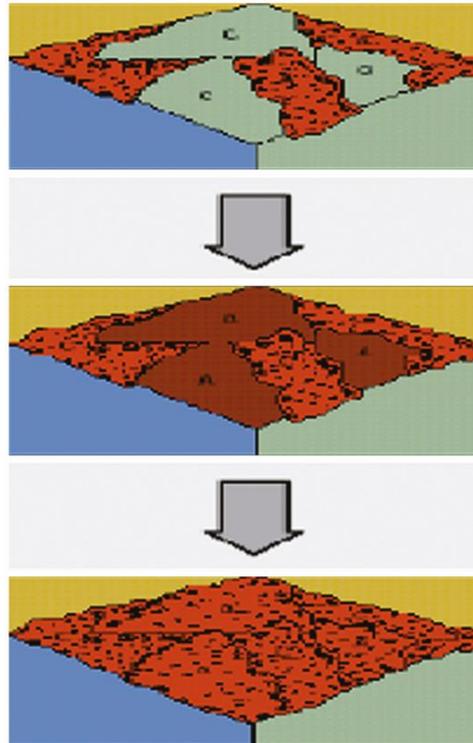
Ao nos referirmos ao Alumínio, devido a sua rápida formação de uma película de óxido protetora, as formas de corrosão mais usualmente encontradas são a corrosão por formação de *pitting* e a corrosão uniforme pela deposição dos produtos de corrosão sobre a superfície do material (ŠEKULARAC; MILOŠEV, 2018).

2.3.1 Corrosão Uniforme

A corrosão uniforme ocorre em decorrência de um desgaste uniforme da superfície do material metálico, sendo encontrada por toda a extensão da área superficial, conforme mostrado na Figura 5. Neste processo corrosivo, a perda de

massa tem uma ocorrência uniforme por todo o corpo de prova (ASM,1995; GENTIL, 2011).

Figura 5 – Corrosão uniforme sobre uma placa metálica



Fonte: Adaptado Oliveira (2012).

Esse tipo de processo corrosivo tem início por meio da ação reacional iniciada pela exposição a atmosfera e em consequência, pelo contato com a umidade e o oxigênio presentes no ambiente. O metal que apresentar essa forma de corrosão pode vir a desenvolver outros tipos de mecanismos de corrosão, como a corrosão por formação de *pitting*. Justamente pelo fato de poder apresentar outros processos corrosivos, esse mecanismo de corrosão não deve ser confundido com a corrosão generalizada, uma vez que esta não representa apenas o tipo de corrosão uniforme (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003; GENTIL, 2011).

Além disto, deve-se considerar que a taxa de corrosão gerada por intermédio do mecanismo de corrosão uniforme é relativamente significativa quando comparada com a taxa apresentada por outros mecanismos de corrosão localizada. Esse tipo de corrosão também é bastante influenciado por variáveis ambientais como por exemplo o pH e a temperatura do meio de exposição no qual o material metálico se encontra (HUANG et al., 2016).

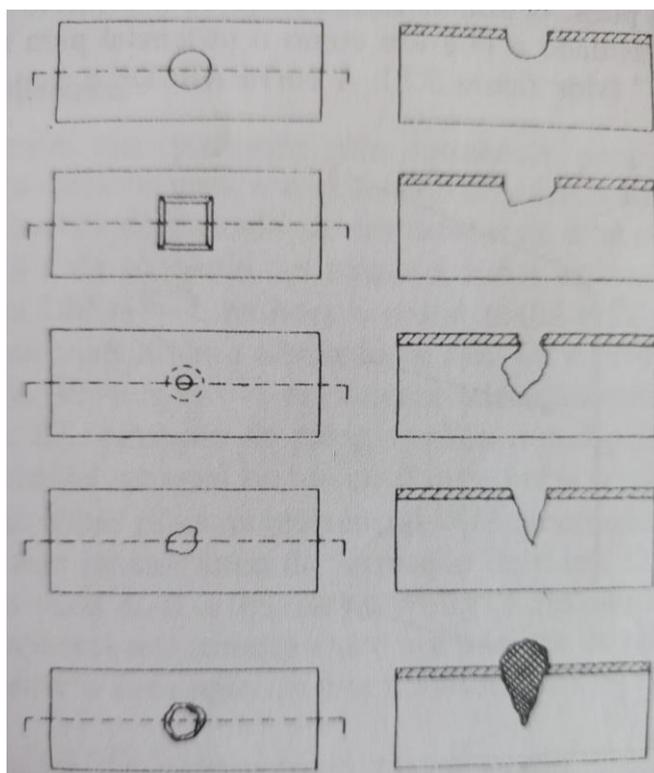
2.3.2 Corrosão por *Pitting*

Um dos mecanismos de corrosão mais comumente encontrado no alumínio, a corrosão por *pitting* consiste em um ataque localizado em áreas pequenas da superfície do material que tende a apresentar um crescimento contínuo. A presença de *pitting* pode ser a causa raiz da perda de propriedades mecânicas, como por exemplo a resistência, em decorrência da formação de trincas (RAMANATHAN, 19--).

Esse tipo de corrosão produz cavidades com um diâmetro menor do que a profundidade apresentada, podendo vir a perfurar de um lado a outro o corpo do material de acordo com a espessura que esse apresentar (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

Usualmente encontrada em materiais metálicos que possuem uma película protetora, como é o caso do Al e do aço inoxidável, os *pitting* podem vir a apresentar diferentes formas, distintas entre si pelo formato apresentado pela cavidade gerada, sendo alguns desses tipos o hemisférico, cristalográfico, fechado, irregular e irregular preenchido com produtos de corrosão, respectivamente representados conforme a Figura 6 apresenta (RAMANATHAN, 19--).

Figura 6 – Cavidades causadas pela corrosão por alguns tipos de *pitting*



Fonte: Ramanathan (19--).

Quando há o surgimento desse tipo de corrosão, alguns fatores devem ser considerados na análise, sendo eles a profundidade e diâmetro das cavidades e o número dessas apresentado em determinado perímetro do material. Além de que, a corrosão por *pitting* pode se distribuir superficialmente de forma escassa ou de forma intensa (GENTIL, 2011).

Dessa forma, a corrosão por *pitting* é uma corrosão localizada que ocorre em decorrência da formação de uma pilha que tem origem na depassivação de uma determinada região do material, causada pela ação de ânions agressivos, resultando na heterogeneidade do material (GEMELLI, 2001).

2.4 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO POR NÉVOA SALINA

Ensaio acelerados são ensaios laboratoriais, cuja principal intenção é a verificação comportamental dos materiais expostos a diferentes meios agressivos. Ensaio de campo costumam demorar anos até sua conclusão, fazendo com que os ensaios acelerados passem a ser cada vez mais utilizados na avaliação das características corrosivas dos materiais (GEMELLI, 2001).

Entretanto, a utilização dos resultados de tais ensaios acelerados como análogos aos resultados obtidos a longo prazo pelo material do corpo de prova ensaiado, não é recomendada, uma vez que em termos práticos, inúmeros fatores interferem no processo de corrosão, podendo-se citar como exemplo a formação de películas de proteção, as condições climáticas, temperatura, pressão, entre outros. A utilização desses ensaios de maneira a comparar a resistência de diferentes materiais também não deve ser realizada, mas esses ensaios podem vir a fornecer informações de um mesmo revestimento, porém aplicado sobre diferentes substratos, contanto que a natureza apresentada por essas superfícies possua uma similaridade significativa (ISO, 2017).

Além disto, as câmaras de *salt spray*, utilizadas para os ensaios de exposição a névoa salina, possuem uma porcentagem de CO₂ menor quando comparada com a porcentagem desse composto encontrada em campo. A redução da presença desse material influencia, por exemplo, na formação de alguns hidróxidos, como o de magnésio, o que resulta na ausência da passivação que esse composto daria a superfície do alumínio. Esse fato pode ser justificado pela baixa solubilidade do CO₂

em água na presença de cloreto de sódio (NaCl), visto que, conforme o estudo de Pathak et al. (2010), a concentração de NaCl na água do mar é em torno de 3,5% em peso, à medida que a concentração de NaCl na solução a ser atomizada dentro da câmara é de 5%.

Dessa forma, os ensaios acelerados de exposição a névoa salina têm como principal finalidade realizar esse estudo de desempenho em termos de resistência a corrosão, com os materiais ensaiados podendo variar entre metais, revestimentos metálicos ou revestimentos orgânicos. Esses ensaios tem elevada eficiência na identificação de certos defeitos e descontinuidades microestruturais (ISO, 2017).

Tais ensaios de pulverização de sal podem variar de acordo com a solução a ser atomizada sobre a superfície dos corpos de prova, sendo os tipos mais amplamente empregados o *salt spray* neutro (NSS), *salt spray* de ácido acético (AASS) e *salt spray* de ácido acético acelerado por cobre (CASS). Esses testes tem a capacidade de avaliar a qualidade de revestimentos de proteção, tanto de forma permanente como de forma temporária, uma vez que evidenciam falhas dos mesmos (ISO, 2017).

2.4.1 Ensaios de exposição à névoa salina neutra

O ensaio de névoa salina neutra ou *Neutral Salt Spray*, abreviado por SSN, é regido principalmente pelas normas ASTM B-117 e ISO 9227 e é majoritariamente utilizado no processo de avaliação da qualidade. Esses ensaios são realizados em equipamentos cujo principal intuito é simular atmosferas marinhas, com um resultado mais rápido em virtude de alterações em parâmetros como temperatura e umidade, variando de formas distintas ou em conjunto (ASTM, 2019).

Esses ensaios são comumente utilizados para testes de verificação de corrosão em revestimentos orgânicos em materiais metálicos, revestimentos metálicos anódicos e catódicos, revestimentos de óxido anódico, revestimento de conversão e para a avaliação de metais e suas respectivas ligas (ISO, 2017).

Assim, esse tipo de avaliação é utilizado para a classificação quanto ao desempenho do material de acordo com o número de horas de resistência até o surgimento do primeiro ponto de corrosão ou de acordo com o número de horas até

que determinada porcentagem da área superficial apresente corrosão (PIMENTA; GOULART-SANTOS, 2016).

Por fim, é extremamente recomendável que a realização de um comparativo entre o ensaio acelerado e o ensaio em campo seja realizado, de forma a se conseguir correlacionar os resultados obtidos. Essa necessidade surge por meio da variação das reações químicas para os processos de corrosão, encontradas entre ensaios realizados em equipamentos de névoa salina e outros meios, afetando inclusive a formação da película superficial e sua capacidade protetiva (ASTM, 2019).

2.4.2 Ensaio de exposição à névoa salina acética

O ensaio de névoa salina de ácido acético ou *Acetic Acid Salt Spray*, abreviado por SSA, segue as mesmas diretrizes básicas utilizadas quando se trata de um ensaio de névoa salina neutra, sendo também realizado principalmente de acordo com o que orientam as normas ASTM B-117, ISO 9227 e NBR 14905.

Esse tipo de ensaio é particularmente adequado para a avaliação de revestimentos decorativos de cobre, níquel e cromo ou apenas níquel e cromo, mas é considerado igualmente útil para a verificação de revestimentos anódicos e orgânicos que possuem o Al como substrato. Com base nisso, o ensaio de névoa salina acética é utilizado para a avaliação de chapas e perfis de Al e suas ligas, de alguns tipos de pré-tratamentos e para revestimentos orgânicos, sendo esses tanto na forma de pó quanto na forma líquida (ISO, 2017; ABNT, 2020).

Esse ensaio realiza a simulação de uma atmosfera marítima acética e, portanto, ainda mais agressiva, baseando-se nos resultados obtidos através dos dois tipos de névoa. Dessa forma, é possível observa-se com clareza a maior agressividade do meio que apresenta o pH mais ácido, por intermédio da degradação mais intensa dos corpos de prova submetidos a este tipo de ambiente. Portanto, há a percepção de que os íons Cl^- apresentam um efeito inegavelmente importante para o estudo dos processos de corrosão em ensaios acelerados de névoa salina. Apesar disso, a relação do pH do meio de exposição com o ataque ao material é de inegável relevância para a compreensão dos resultados que serão obtidos ao término desse tipo de ensaio (SCARABOTTO, 2018).

2.5 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

No mercado atual, podemos encontrar muitos *softwares* diferentes para a realização das mais variadas simulações numéricas, que posteriormente podem ser comparadas com certos ensaios experimentais. Alguns dos principais *softwares* utilizados hoje em dia na engenharia são o SolidWorks, ANSYS, NX, FLOW, entre outros. Entretanto, ao se realizar uma comparação de resultados obtidos por intermédio de uma simulação numérica com os obtidos por um ensaio experimental, não há garantia de que os valores obtidos irão ser igualitários, mas ambas as respostas podem estar dentro da faixa aceitável para o objetivo do ensaio (RECH, 2016).

Dessa forma, para que haja uma escolha adequada de *software*, diversos fatores devem ser considerados e ponderados. Entre esses, além da compatibilidade dos recursos oferecidos pelo *software* com os resultados de interesse, pode-se citar o tempo computacional que o programa irá consumir, o valor para adquirir sua licença de operação e a facilidade de sua utilização (RECH, 2016).

Outro fator importante a ser levado em conta é a alimentação correta do programa com as informações precisas, devendo-se ter uma boa análise crítica a respeito de quais os principais parâmetros para a obtenção do resultado desejado (PHATE et al., 2020).

A definição desses parâmetros deve ser feita atendendo a critérios qualitativos e quantitativos a respeito dos resultados que serão obtidos, desse jeito, os dados devem ter como origem fontes seguras. Com base nisso, a aquisição de tais informações, deve ser coletada de literatura sobre o assunto ou de simulações preliminares (MICHELI, 2008).

Assim, a confiança dos valores inseridos como dados de entrada deve ser de aproximadamente 95%, para que os resultados obtidos por intermédio de simulações também apresentem um elevado grau de assertividade com os resultados obtidos de forma experimental, podendo assim garantir-se a eficácia do método computacional (PHATE et al., 2020).

Dessa forma, no decorrer do desenvolvimento do modelo matemático para cada objetivo de interesse, a definição de uma simulação que seja similar a realidade encontrada diariamente de forma experimental, é imprescindível para a obtenção de

bons resultados. Portanto, ao iniciar-se uma análise comparativa entre sistemas numéricos versus sistemas experimentais, as limitações de operação do *software* escolhido para a utilização devem ser sempre levadas em consideração, visto que podem vir a comprometer os resultados finais obtidos (MICHELI, 2008).

2.5.1 Softwares no controle de corrosão

Ao se considerar as vantagens e desvantagens da utilização de recursos como *softwares*, um fator importante a ser ponderado é que durante o desenvolvimento de um novo projeto, torna-se necessário a execução de testes experimentais cujo o objetivo é conhecer e avaliar o comportamento dos materiais. Com base nisso, é nesta fase que análises numéricas são cada vez mais exploradas, pois a utilização de métodos computacionais, se empregados com os modelos matemáticos e as caracterizações corretas, permitem por meio da visualização de resultados, adiar testes experimentais para quando o desenvolvimento do projeto estiver mais avançado (MICHELI, 2008).

Neste contexto, sabe-se que a corrosão de um material metálico está diretamente relacionada com, além da própria constituição deste material, o meio no qual ele se encontra e o processo ao qual ele é submetido. De maneira que, análises de modelagens matemáticas que possibilitam o uso de modelos preditivos para a corrosão ou auxiliam no controle de processos em desenvolvimento ou que sofreram modificações, podem vir a reduzir gastos através da predição de pontos críticos e da análise de comportamento. Dessa forma, a simulação possibilita que um maior controle da corrosão seja realizado, otimizando e garantido uma maior segurança ao processo. Com base nisso, a utilização desse tipo de método de operação, onde a parte experimental é mesclada e relacionada com simulações computacionais, abre caminho para o desenvolvimento de diversas novas tecnologias na área de análise, controle e gerenciamento de processos de corrosão. Dessa maneira, a acelerada evolução tecnológica passa a ser envolvida em aspectos tradicionais da indústria, agregando valor e eficiência aos processos em que se insere (FERREIRA; MARTINS, 2018).

Assim, alguns dos caminhos abertos, conforme Ferreira e Martins (2018), são por exemplo o desenvolvimento de sensores capazes de realizar o monitoramento

desses processos corrosivos ou de determinados parâmetros, a capacidade de se correlacionar os dados provenientes da análise de corrosão com equipamentos de gerenciamento dessa, a criação de *softwares* capazes de promover um gerenciamento dos processos corrosivos, sendo dessa forma capazes de prever o comportamento do sistema analisado e por fim, cita-se a validação dos resultados sugeridos por *softwares* por meio da comparação com estudos laboratoriais.

As simulações envolvendo corrosões, em especial as do tipo *pitting*, ainda são muito relacionadas com experimentos práticos, em decorrência de seu comportamento não linear, muito embora o uso de modelos matemáticos continue sendo uma ferramenta útil no estudo da corrosão. Esse fato ocorre justamente pela complexidade do comportamento apresentado por este processo corrosivo, entretanto os resultados apresentados por diversas simulações de corrosão são promissores quanto a sua utilização de forma mais amplificada (MALKI; BAROUX, 2005).

Assim, ainda considerando sistemas de corrosão como a por *pitting*, onde se tem a formação de zonas de ocorrência da corrosão, quanto maior a área superficial, mais elevada será a taxa de corrosão sobre ela. Com base nesse processo, se alimentadas com as condições de contorno corretas, simulações utilizando elementos finitos, quando comparadas com ensaios laboratoriais, podem ser utilizadas como um meio de se validar equações ou como estudo de variáveis físicas (ORMELLESE et al., 2019).

Outros casos de simulações utilizadas para estimar valores de campo elétrico em processos de corrosão por pilha podem ser citados, uma vez que as condições eletroquímicas podem ser definidas em determinados programas. Dessa forma, os resultados podem ser obtidos por variações de certos parâmetros, como o teor de oxigênio presente ou a resistividade apresentada pela água (ORMELLESE et al., 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

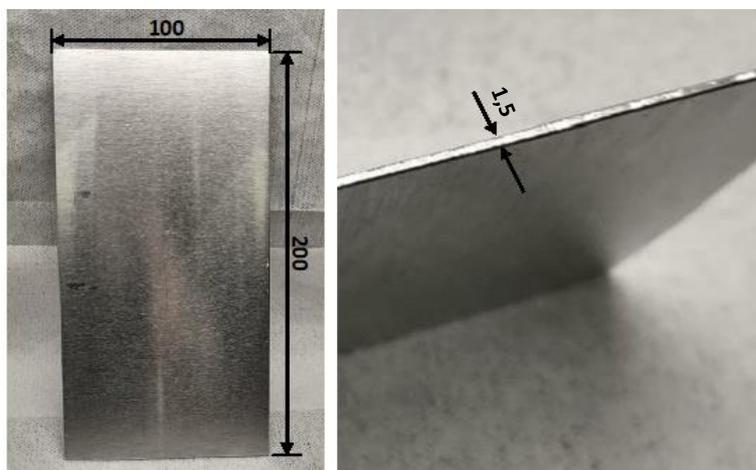
3.1 MATERIAIS

Os corpos de prova que foram utilizados para a realização dos ensaios experimentais deste trabalho, foram confeccionados a partir de uma liga de alumínio 3XXX, a composição e a classificação dessa liga, em virtude de um segredo industrial, não serão reveladas.

Entretanto, sabe-se que ligas do grupo 3XXX são compostas a base de alumínio e manganês, o que fornece resistência mecânica, principalmente quanto a dureza, e formabilidade, fazendo com que essas ligas sejam amplamente utilizadas em carrocerias de ônibus e em outros equipamentos industriais como trocadores de calor, silos e tanques (METALTHAGA, 2021).

Esses corpos de prova foram confeccionados a partir de um mesmo lote, com dimensões de 100 mm x 200 mm x 1,5 mm, conforme ilustrado pela Figura 7. Os corpos de prova que serão utilizados para a realização da curva de polarização possuem dimensões de 3 cm x 6 cm x 1,5 mm, porém a parte testada será uma área de 1 cm x 1 cm, com o restante do material isolado com a utilização de cera de abelha. Por fim, os corpos de prova que serão usados para as análises de microscopia eletrônica (MEV/FEG) foram fabricados com dimensões de 15 mm x 15 mm x 1,5 mm.

Figura 7 – Chapas de alumínio que serão utilizadas em ensaio de névoa salina

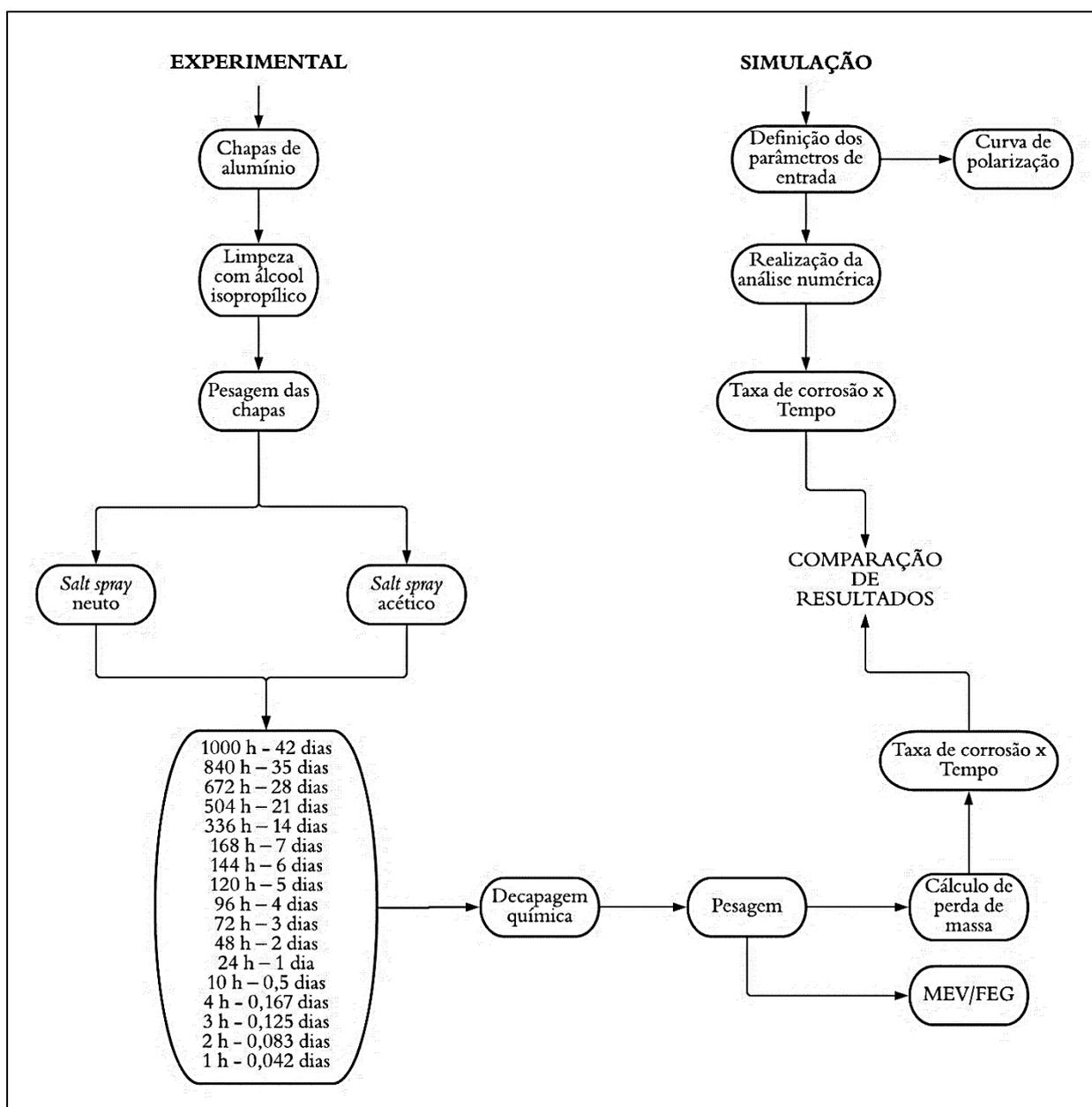


Fonte: A autora (2021).

3.2 MÉTODOS

Neste trabalho, os resultados obtidos por intermédio de ensaios experimentais serão comparados com os resultados obtidos através de simulações numéricas, com essas considerando as mesmas condições de operação dos ensaios laboratoriais. A Figura 8 ilustra o fluxo de processos necessário para a realização de tal comparação.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho



Fonte: A autora (2021).

Nessa etapa inicial, cada uma das chapas de Al foi limpa com um pano macio umedecido em álcool isopropílico, onde o manuseio desses corpos e prova foi sempre realizado com luvas, de forma a mitigar possíveis interferências causadas pela gordura natural presente na pele. Após o processo de limpeza das chapas metálicas, elas foram pesadas com uma balança da marca Marte, identificadas com uma numeração progressiva e guardadas com um pano descartável separando uma chapa da outra, evitando que o contato entre elas interfira nos resultados experimentais.

3.2.1 Ensaio de névoa salina neutra e acética

Os ensaios de névoa salina foram realizados no laboratório da uma empresa fabricante de carrocerias de ônibus, em equipamentos de *salt spray* da marca Equilam, modelo SSE – 1000, um operando em modo neutro e outro em acético. O desenvolvimento desses ensaios seguiu os métodos de ensaio internos da empresa, ME 0015 e ME 0212 para o equipamento operando com névoa neutra e névoa acética, respectivamente.

Em ambos os métodos, a normativa ASTM B117 foi utilizada como principal fonte para as diretrizes de operação. Assim sendo, os corpos de prova foram dispostos em suportes com angulatura entre 15° e 30° graus com a vertical, em uma câmara com uma solução de cloreto de sódio (NaCl) 5% em m/v, sendo pulverizada sobre as chapas de Al. Essa solução é feita a partir cloreto de sódio P.A. da marca Cinética e água destilada em filtros de resina, com o pH compreendido entre a faixa de 6,5 a 7,2 para o ensaio com névoa neutra e 3,1 a 3,3 para o ensaio com névoa acética, nesse último, o pH é ajustado com o auxílio de ácido acético glacial da marca Química Moderna. Dentro da câmara, coletores de névoa utilizados para controle da produção da mesma, devem marcar um volume em torno de 1,0 a 2,0 ml de solução produzidos por hora de operação.

Quanto a câmara, os principais parâmetros de operação são a sua temperatura interna, ajustada em 35 °C com uma variação aceitável de ± 2 °C, a temperatura do saturador em 47 °C, que igualmente pode variar ± 2 °C e a pressão, que embora opere com 1 kgf/cm², possui uma alteração admissível quando compreendida entre 0,7 a 1,7 kgf/cm².

Dessa forma, para que houvessem dados de comparação com a simulação numérica de corrosão por tempo, triplicatas de ensaios conduzidos em *salt spray* neutro e *salt spray* acético foram realizadas com as seguintes variações de tempo: 1000 h (42 dias), 840 h (35 dias), 672 h (28 dias), 504 h (21 dias), 336 h (14 dias), 168 h (7 dias), 144 h (6 dias), 120 h (5 dias), 96 h (4 dias), 72 h (3 dias), 48 h (2 dias), 24 h (1 dia), 10 h ($\pm 0,5$ dia), 4 h (0,167 dia), 3 h (0,125 dia), 2 h (0,083 dia) e 1 h (0,042 dia).

3.2.2 Decapagem química

Para uma correta avaliação das formas de corrosão presentes na superfície dos corpos de prova e para a remoção dos produtos de corrosão presentes, foi realizado um processo de decapagem química de cada uma das chapas de Al ensaiadas.

Ao término dos ensaios de névoa salina, os corpos de prova foram lavados com água destilada, com intensão de se realizar uma lavagem da solução condensada em sua superfície e para uma primeira remoção dos produtos sólidos de corrosão. Após esse processo de limpeza, as chapas de Al foram decapadas com um decapante ácido para alumínio da marca Atotech, composto por Peroximonossulfato de potássio, esse processo foi realizado a temperatura ambiente por aproximadamente 15 minutos.

Entretanto, durante a realização da pesagem dos corpos de prova ensaiados após decapagem, percebeu-se que o decapante não havia retirado todo o produto de corrosão, em virtude do peso ainda elevado das chapas e de sua aparência física, que ainda apresentava uma textura arenosa ao toque. Assim, seguiu-se com uma cuidadosa etapa de lavagem com a parte macia de uma esponja da marca Scotch Brite, antes da pesagem final de cada um dos corpos de prova.

Depois de decapados, esses corpos de prova foram novamente lavados, para que haja a remoção do produto sobressalente depositado sobre a superfície metálica. Depois de secas, essas chapas foram então novamente pesadas, para que a perda de massa, calculada por meio da diferença de seu peso inicial e seu peso final, possa ser utilizada nos cálculos de taxa de corrosão.

3.2.3 Perda de massa e Taxa de corrosão

Com o intuito de obter-se a quantidade corrosão sofrida pelo material em virtude do tempo de exposição aos ensaios acelerados de névoa salina, será calculada a perda de massa apresentada por cada corpo de prova.

Os cálculos de taxa de corrosão foram realizados de acordo com a normativa NACE RP 0775-2005. Para isso a Equação Matemática 1 foi utilizada para calcular a taxa de cada um dos corpos de prova ensaiados, sendo feita depois uma média aritmética simples dos valores obtidos pela triplicada de cada período de tempo de exposição.

$$T_c = \frac{F \times \Delta m}{A \times t \times \rho} \quad (1)$$

Onde:

T_c = Taxa de corrosão (mm/ano)

F = Fator de conversão ($3,65 \cdot 10^5$)

Δm = Diferença entre massa inicial e massa final do corpo de prova (g)

A = Área do corpo de prova (20.000 mm^2)

t = Tempo de exposição do corpo de prova (dias)

ρ = Massa específica do material ($2,70 \text{ g/cm}^3$)

3.2.4 Análise de MEV/FEG

Visando identificar e caracterizar as formas de corrosão apresentadas por essa liga de Al quando submetida a névoa salina neutra e acética, foram conduzidas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG) e de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). Essas análises foram realizadas com um corpo de prova sem ser submetido a ensaio acelerado e com os corpos de prova com maior exposição a estes tipos de teste, ou seja, 42 dias (1000 h).

Essas análises foram conduzidas na Universidade de Caxias do Sul, no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC), onde o equipamento utilizado para obter as imagens é um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV/FEG) da marca Tescan. As microanálises de raios X por dispersão em energia

(EDS), por sua vez, serão realizadas com detector da marca Oxford *Instruments*, do modelo SDD X-max 50.

Essas análises são feitas com corpos de prova limpos com acetona comercial, que quando secos, são presos em um suporte com a ajuda de uma fita de carbono condutor dupla face, em seguida, um filme de ouro é depositado por plasma sobre esse corpo de prova, por meio da técnica chamada de *Magnetron Sputtering*.

3.2.5 Curva de polarização

Os ensaios para a obtenção da curva de polarização foram conduzidos no laboratório de corrosão e proteção superficial (LCOR) da Universidade de Caxias do Sul. A análise foi feita em triplicata, com corpos de prova adequadamente isolados com cera de abelha e imersos em uma solução de cloreto de sódio 5%, igual a utilizada nos equipamentos de névoa salina neutra, com pH 7,47. O potenciostato utilizado é da marca IVIUM *Technologies*, onde foram utilizados em uma célula de vidro três eletrodos: um eletrodo de trabalho, que será um corpo de prova de alumínio, um eletrodo de referência de calomelano saturado, marca Analyser com a sonda do modelo 3A41 – NJ, acoplado a um capilar de Lugguin e como contra eletrodo foi utilizado um fio de platina. Os parâmetros de ensaio foram: potencial de partida de -2200 mV (ECS) até alcançar o potencial de 1000 mV (ECS), com uma velocidade de varredura de 25 mV/s e passo do potencial de 10 mV.

Essa curva é obtida experimentalmente por meio da aplicação de sobrepotenciais partindo do potencial de equilíbrio do material, cujas respostas foram curvas, uma anódica e a outra catódica. Dessa forma, tais dados experimentais são obtidos por reações de oxirredução entre íons de hidrogênio (CARDOSO; PANOSSIAN, 2012).

3.2.6 Parâmetros da análise numérica

Para a realização da simulação, o programa utilizado será o *software* ANSYS FLUENT, disponível na empresa onde os testes experimentais também ocorreram, tendo-se assim há a oportunidade de se realizar análises numéricas quanto a taxa de corrosão apresentada por determinado material.

Para realizar essa simulação, foi necessário preencher os campos abaixo listados:

- a) equação eletroquímica do material e do meio;
- b) coeficiente estequiométrico;
- c) carga das espécies químicas;
- d) número de equações eletroquímicas;
- e) inclinação anódica de Tafel;
- f) inclinação catódica de Tafel;
- g) densidade de corrente;
- h) potencial de equilíbrio;
- i) fração molar;
- j) temperatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que a validação do *software* ANSYS FLUENT para a simulação de ensaios acelerados de corrosão pudesse ser realizada, os resultados obtidos pela análise experimental e pela simulação numérica para o comportamento da liga de Al utilizada foram comparados. A corrosão apresentada por esse material também foi caracterizada.

4.1 CURVAS DE POLARIZAÇÃO

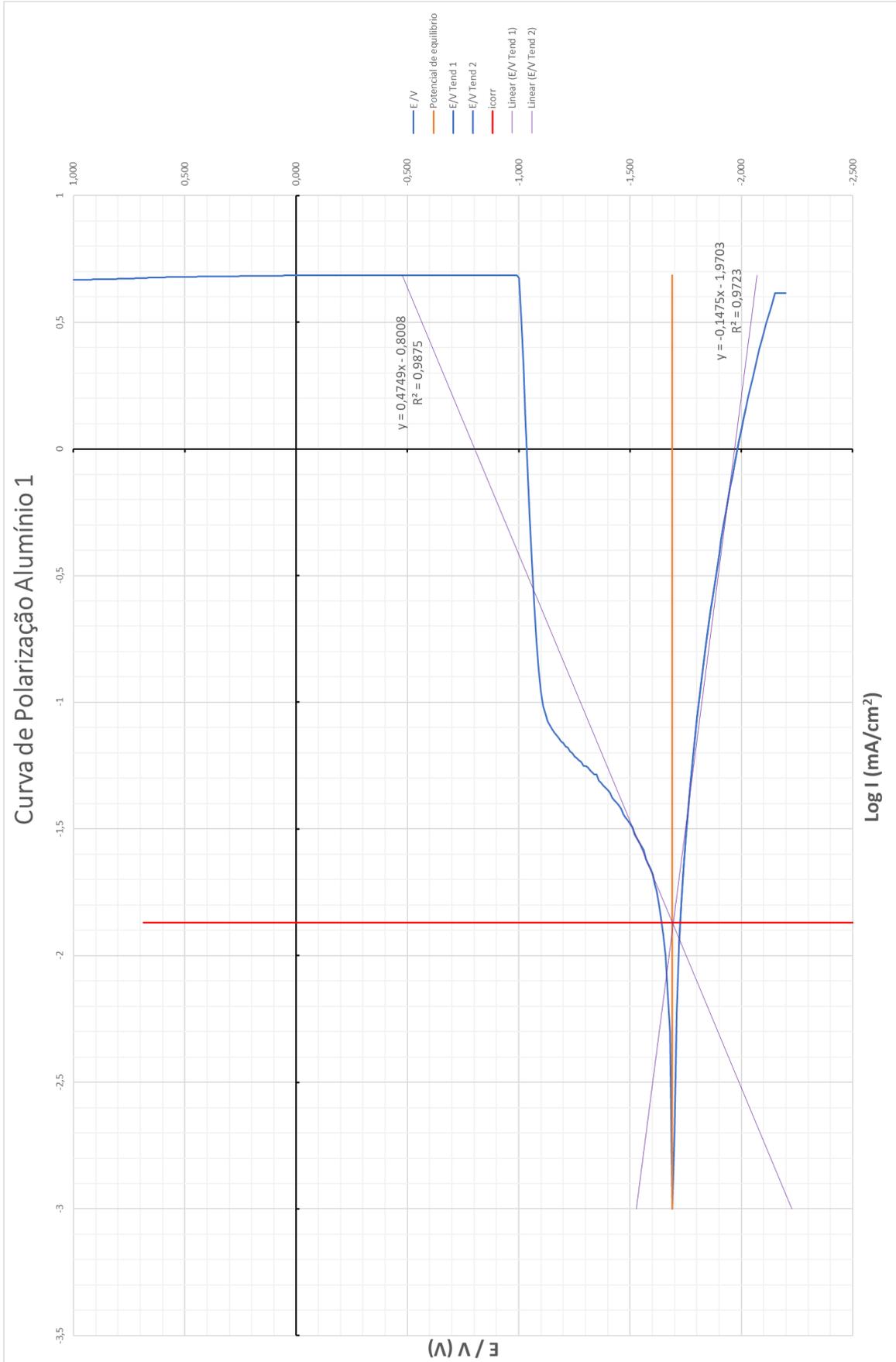
Para modelar a simulação, um dos parâmetros de alimentação necessários foi a definição das inclinações catódicas e anódicas de Tafel, assim como a corrente e o potencial de equilíbrio para o material a ser utilizado.

Para a obtenção desses resultados, três análises foram realizadas de forma a se obter três curvas de polarização demonstradas na Figura 9, Figura 10 e Figura 11. Nestes gráficos, as curvas azuis representam a curva de polarização obtida experimentalmente. O ajuste linear para a curva de polarização anódica e para a catódica são representados pelas retas roxas superior e inferior, respectivamente, a partir das quais se obteve a equação da reta, conforme a Equação Matemática 2, onde o valor de “a” representa a inclinação de Tafel (SANTOS, 2014).

$$y = ax + b \quad (2)$$

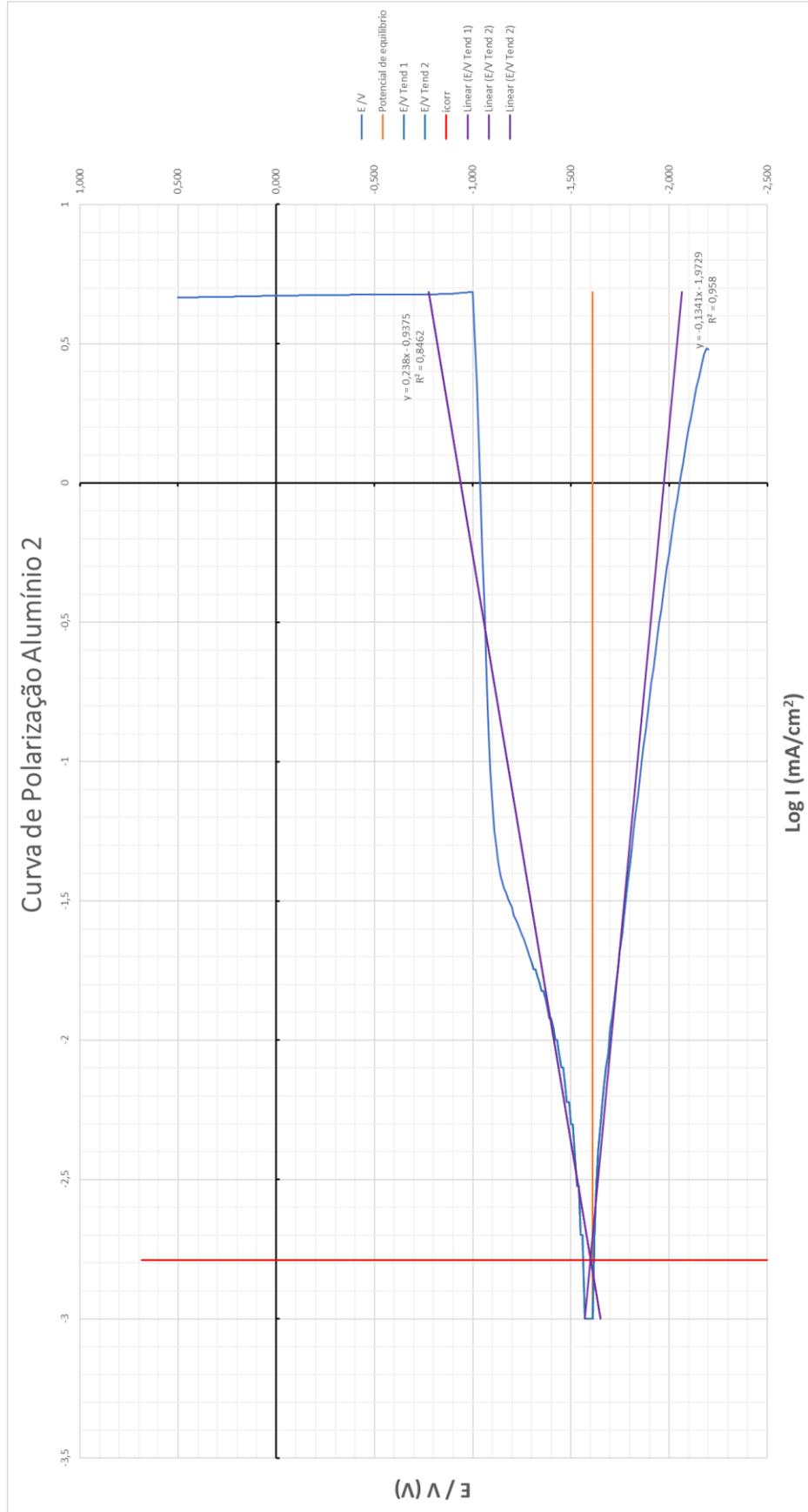
Por fim, a reta laranja traçada no centro da bifurcação das curvas representa o valor obtido de forma experimental para o potencial de equilíbrio (E) e serve de guia para a obtenção da densidade de corrente. Esta densidade, no gráfico representada pela reta vermelha, é obtida a partir do ponto de intersecção entre o ajuste linear das curvas de polarização e a reta do potencial de equilíbrio (SANTOS, 2014).

Figura 9 – Curva 1 de polarização para o Al



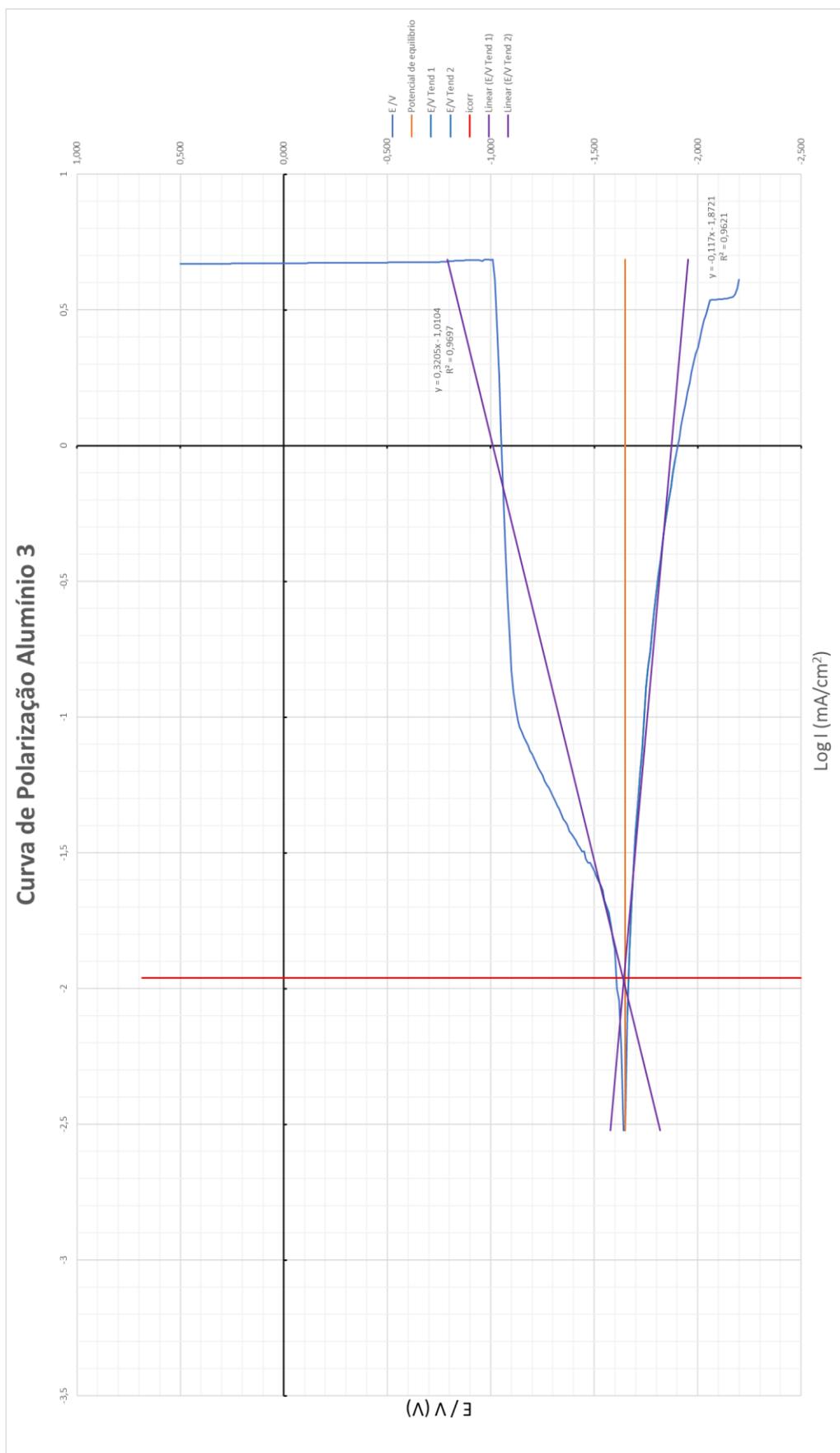
Fonte: A autora (2021).

Figura 10 – Curva 2 de polarização para o Al



Fonte: A autora (2021).

Figura 11 – Curva 3 de polarização para o Al



Fonte: A autora (2021).

Os resultados obtidos por meio dessas curvas de polarização, para os valores de interesse, estão descritos na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Comparativo entre curvas de polarização experimentais

Parâmetro	Resultado Experimental		
	Curva 1	Curva 2	Curva 3
Inclinação anódica de Tafel	0,4749	0,2380	0,3205
Inclinação catódica de Tafel	-0,1475	-0,1341	-0,1170
Potencial de equilíbrio (V)	-1,69	-1,61	-1,65
Densidade de corrente (mA/cm ²)	-1,87	-2,79	-1,96

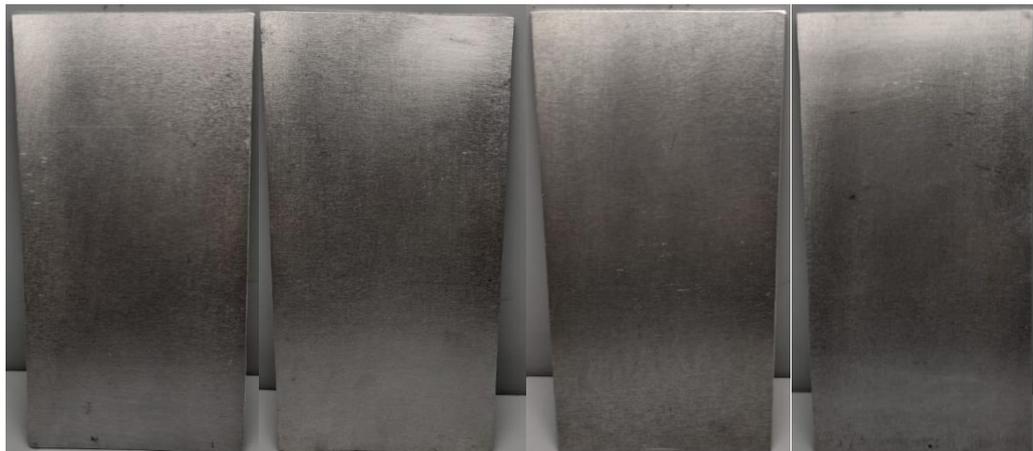
Fonte: A autora (2021).

Para a realização da simulação, os parâmetros utilizados foram os resultados provenientes da curva de polarização 1, visto que esta apresentou os mais elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), alcançando 0,9875 para a reta anódica e 0,9723 para a catódica. Este coeficiente é uma medida estatística que se refere ao quão aproximados estão os dados experimentais em relação ao ajuste feito por meio de regressão linear.

4.2 ENSAIOS ACELERADOS EXPERIMENTAIS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA

As chapas de Al submetidas a testes em *salt spray* operando tanto em modo neutro como em modo acético foram analisadas de maneira similar, passando pelos mesmos procedimentos após o término dos ensaios e pelos mesmos cálculos. As Figuras 12 a 25 são referentes aos corpos de prova logo após o ensaio de névoa salina neutra, da mesma forma que as Figuras 26 a 39 representam os corpos de prova ensaiados na modalidade acética.

Figura 12 – Chapas com 1 h, 2 h, 3 h e 4 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 13 – Chapa com 10 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 14 – Chapa com 24 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 15 – Chapa com 48 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 16 – Chapa com 72 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 17 – Chapa com 96 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 18 – Chapa com 120 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 19 – Chapa com 144 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 20 – Chapa com 168 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 21 – Chapa com 336 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 22 – Chapa com 504 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 23 – Chapa com 672 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 24 – Chapa com 840 h de ensaio em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 25 – Chapa com 1000 h de ensaio em *salt spray* neutro



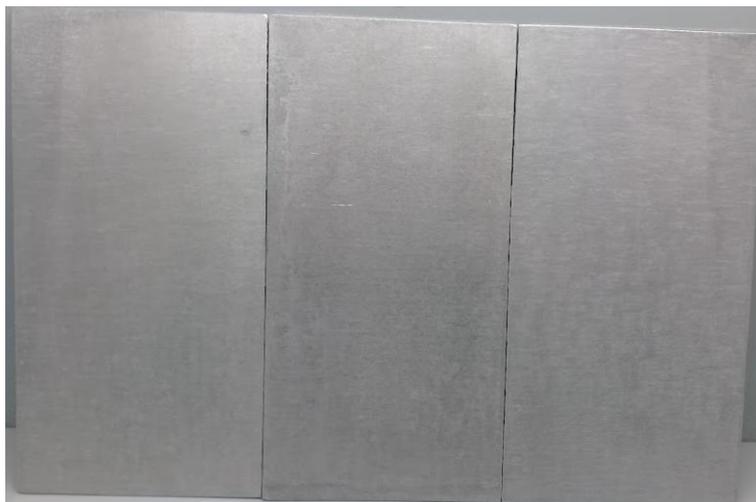
Fonte: A autora (2021).

Figura 26 – Chapas com 1 h, 2 h, 3 h e 4 h de ensaio em *salt spray* acético



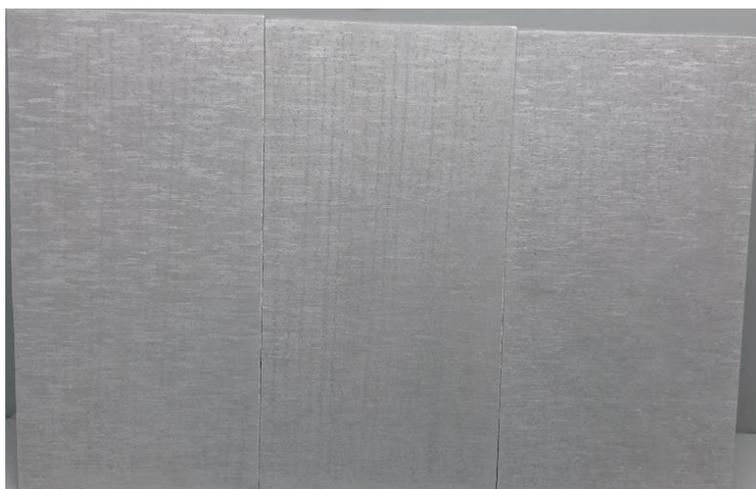
Fonte: A autora (2021).

Figura 27 – Chapa com 10 h de ensaio em *salt spray* acético



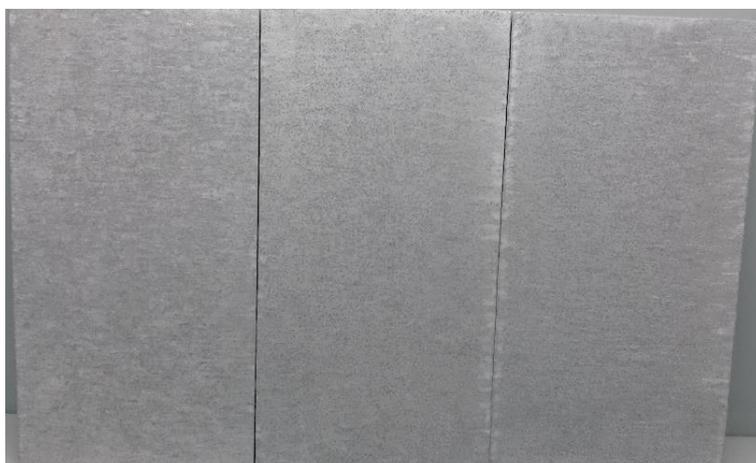
Fonte: A autora (2021).

Figura 28 – Chapa com 24 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 29 – Chapa com 48 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 30 – Chapa com 72 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 31 – Chapa com 96 h de ensaio em *salt spray* acético



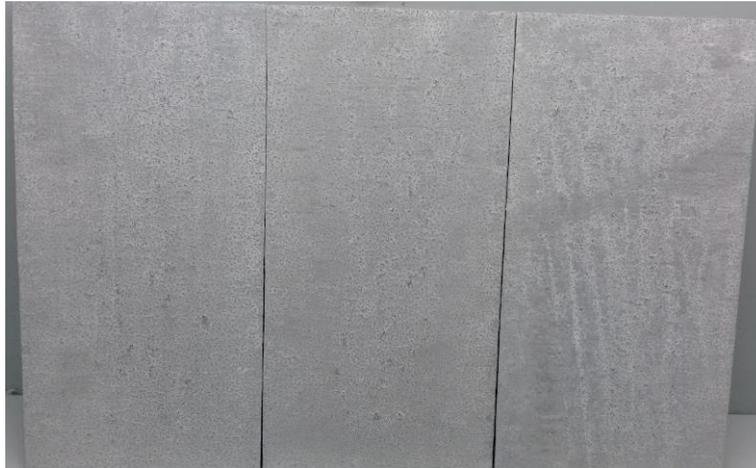
Fonte: A autora (2021).

Figura 32 – Chapa com 120 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 33 – Chapa com 144 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 34 – Chapa com 168 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 35 – Chapa com 336 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 36 – Chapa com 504 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 37 – Chapa com 672 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 38 – Chapa com 840 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Figura 39 – Chapa com 1000 h de ensaio em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

4.2.1 Decapagem dos corpos de prova experimentais

Para garantir que o decapante não iria interferir nos resultados de perda de massa, uma chapa virgem de Al da mesma liga e mesmo lote daquelas que foram ensaiadas, foi pesada, decapada nas mesmas condições que as demais seriam e por fim novamente pesada. Seu peso inicial e seu peso final foram os mesmos, indicando que o produto empregado para a realização da decapagem não ataca o substrato metálico e não causará variações indesejadas nos cálculos futuros.

4.2.2 Resultados obtidos para perda de massa

Após a realização dos ensaios e da decapagem das chapas, cada um dos corpos de prova foi novamente pesado. As horas de exposição e a perda de massa obtida por intermédio da diferença entre os valores do peso inicial e final de cada um deles, está descrita na Tabela 4 para os testes conduzidos em equipamento operando na modalidade neutra e na Tabela 5 para a modalidade acética.

Tabela 4 - Perda de massa para ensaio de névoa salina neutra

(continua)			
Horas ensaiadas	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Perda de Massa (g)
1	84,923	84,922	0,001
2	84,912	84,909	0,003

			(continuação)
3	84,068	84,063	0,005
4	84,532	84,526	0,006
10	84,576	84,562	0,014
10	84,816	84,806	0,010
10	84,022	84,017	0,005
24	84,766	84,764	0,002
24	84,268	84,267	0,001
24	84,954	84,944	0,010
48	85,059	85,049	0,010
48	84,614	84,594	0,020
48	84,642	84,639	0,003
72	84,275	84,262	0,013
72	84,458	84,416	0,042
72	84,704	84,691	0,013
96	84,935	84,931	0,004
96	85,114	85,07	0,044
96	85,329	85,291	0,038
120	84,828	84,789	0,039
120	84,865	84,864	0,001
120	84,485	84,485	0
144	84,377	84,337	0,040
144	84,644	84,642	0,002
144	84,85	84,85	0
168	85,192	85,156	0,036
168	85,042	85,042	0
168	84,939	84,934	0,005
336	84,993	84,96	0,033
336	84,693	84,683	0,010
336	85,43	85,419	0,011
504	84,766	84,731	0,035
504	84,488	84,473	0,015
504	84,162	84,148	0,014
672	84,406	84,358	0,048
672	83,77	83,748	0,022

			(conclusão)
672	84,603	84,585	0,018
840	84,475	84,458	0,017
840	84,005	84,002	0,003
840	84,743	84,69	0,053
1000	84,851	84,83	0,021
1000	84,484	84,422	0,062
1000	84,731	84,724	0,007

Fonte: A autora (2021).

Tabela 5 - Perda de massa para ensaio de névoa salina acética

(continua)

Horas ensaiadas	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Perda de massa (g)
1	84,274	84,266	0,008
2	84,93	84,922	0,008
3	85,121	85,112	0,009
4	84,781	84,771	0,010
10	84,875	84,838	0,037
10	84,184	84,142	0,042
10	84,572	84,521	0,051
24	83,95	83,824	0,126
24	84,402	84,272	0,130
24	84,51	84,37	0,140
48	85,525	85,34	0,185
48	84,97	84,819	0,151
48	85,04	84,897	0,143
72	84,952	84,714	0,238
72	83,607	83,306	0,301
72	84,756	84,472	0,284
96	84,603	84,148	0,455
96	84,575	84,136	0,439
96	84,981	84,557	0,424
120	84,731	84,22	0,511
120	84,698	84,262	0,436
120	85,05	84,608	0,442

			(conclusão)
144	85,15	84,722	0,428
144	84,505	84,105	0,400
144	84,515	84,092	0,423
168	84,479	84,013	0,466
168	84,316	83,822	0,494
168	84,714	84,25	0,464
336	84,797	84,206	0,591
336	84,449	83,848	0,601
336	83,796	83,136	0,660
504	85,114	84,275	0,839
504	84,722	84,016	0,706
504	85,035	84,254	0,781
672	84,447	83,473	0,974
672	84,882	83,953	0,929
672	84,303	83,271	1,032
840	84,635	83,368	1,267
840	84,28	83,025	1,255
840	83,664	82,428	1,236
1000	84,374	82,789	1,585
1000	85,627	84,004	1,623
1000	84,971	83,317	1,654

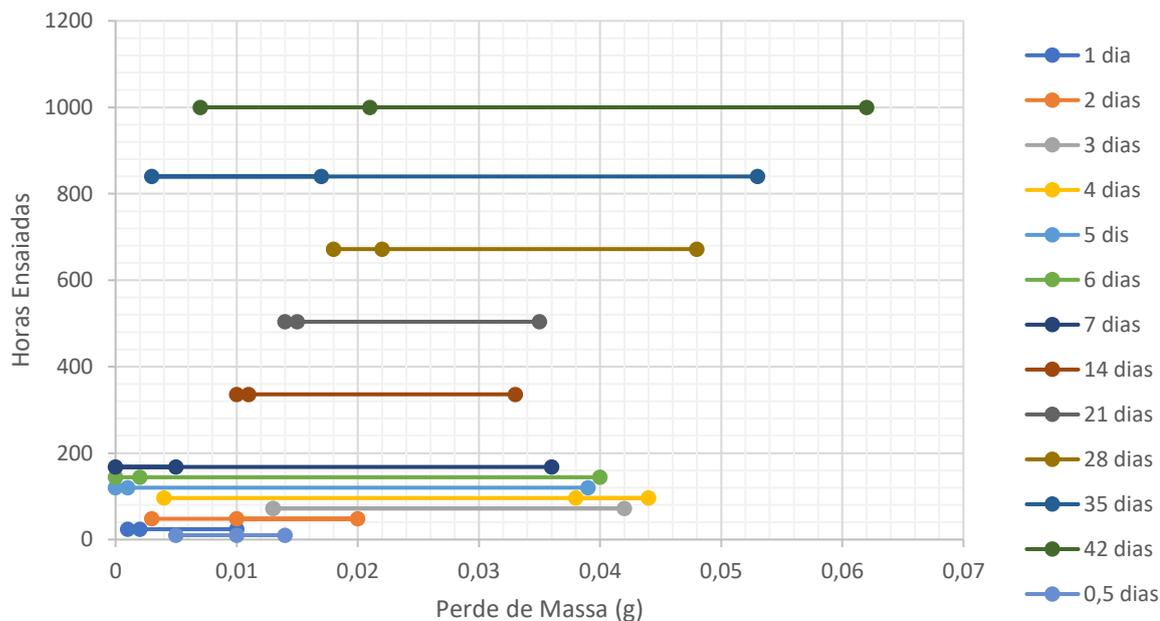
Fonte: A autora (2021).

De posse destes resultados, pode-se perceber que a divergência entre os valores da triplicata para cada um dos tempos era significativamente alta, principalmente para os resultados obtidos em testes de *salt spray* neutro, como a Figura 40 demonstra. Por sua vez, os resultados dos testes conduzidos com névoa salina acética, embora apresentassem certa diferença entre si, não alcançaram alterações tão significativas entre as triplicatas expostas pelo mesmo período de tempo, como os resultados obtidos pelos testes operados em névoa salina neutra, de acordo com o comportamento visto no gráfico apresentado na Figura 41.

Segundo Bolzoni e Babub (2019), um dos principais fatores a afetar a eficiência de uma liga é a distribuição e o tamanho das partículas presentes na composição da

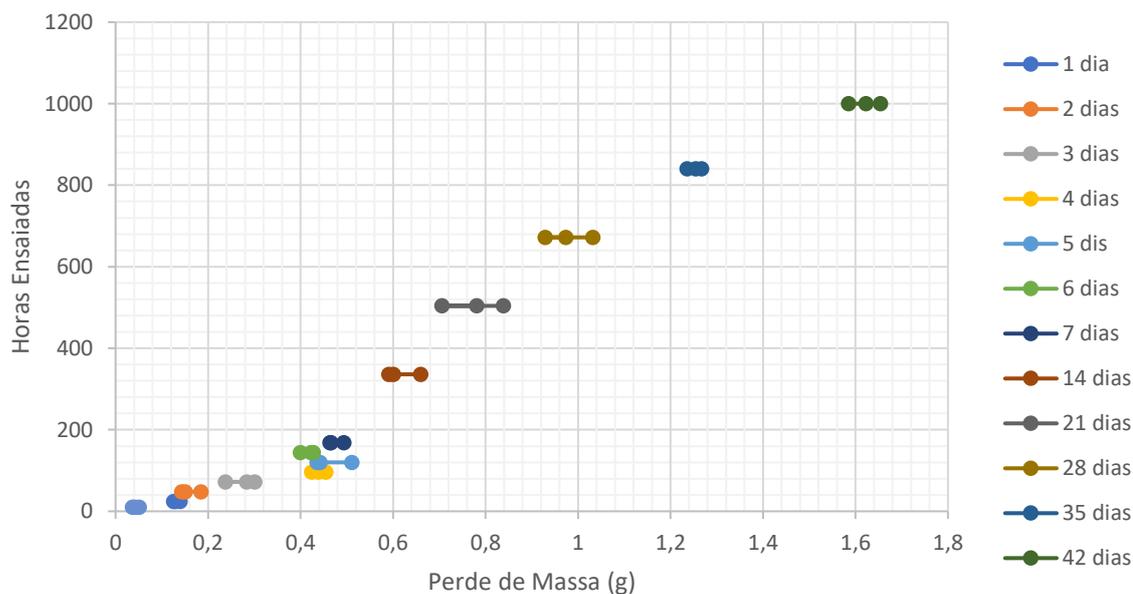
liga, de modo que a fabricação e o processamento de um material heterogêneo afetam a natureza apresentada pelo mesmo.

Figura 40 – Diferença entre valores de perda de massa para mesmo período de exposição em *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 41 – Diferença entre valores de perda de massa para mesmo período de exposição em *salt spray* acético



Fonte: A autora (2021).

Dessa forma, em decorrência de tal divergência entre os corpos de prova testados por um mesmo período de tempo e em um mesmo equipamento, optou-se por utilizar apenas os melhores valores de cada período de exposição, para a construção do gráfico de perda de massa, com o objetivo de reduzir o erro no resultado final, causado pela média entre números tão distintos entre si.

Assim, os valores utilizados foram selecionados de forma crescente e o mais linear possível, conforme estão descritos respectivamente, na Tabela 6 para o equipamento operando com névoa salina neutra e na Tabela 7 para o equipamento de névoa salina acética.

Tabela 6 – Perda de massa considerados por tempo em *salt spray* neutro

Tempo de ensaio (h)	Perda de Massa (kg)
1	0,000001
2	0,000003
3	0,000005
4	0,000006
10	0,000014
24	0,00001
48	0,00002
72	0,000042
96	0,000044
120	0,000039
144	0,00004
168	0,000036
336	0,000033
504	0,000035
672	0,000048
840	0,000053
1000	0,000062

Fonte: A autora (2021).

Tabela 7 – Perda de massa considerados por tempo em *salt spray* acético

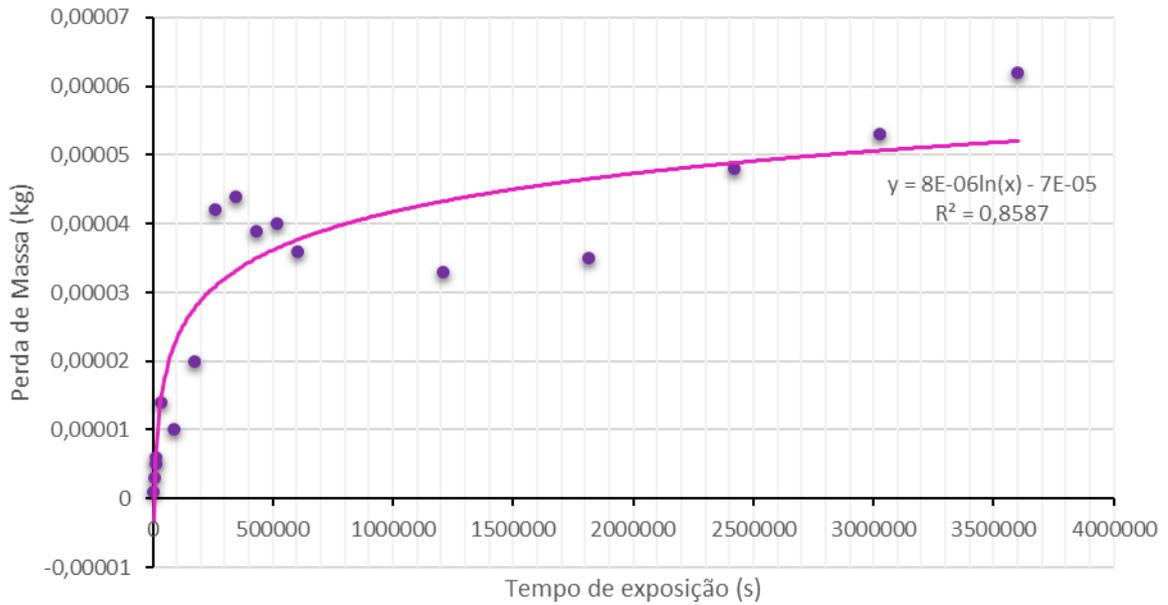
Tempo de ensaio (h)	Perda de Massa (kg)
1	0,000008
2	0,000008
3	0,000009
4	0,00001
10	0,000051
24	0,00014
48	0,000185
72	0,000274
96	0,000301
120	0,000436
144	0,000428
168	0,000494
336	0,00066
504	0,000839
672	0,001032
840	0,001267
1000	0,001654

Fonte: A autora (2021).

Plotando em gráficos os valores obtidos para a perda de massa em cada um dos equipamentos, obtemos a Figura 42 para os resultados de exposição a névoa salina neutra e a Figura 43 para os de exposição a névoa salina acética.

O comportamento observado para a perda de massa que a liga de alumínio 3XXX apresentou mediante a exposição a névoa neutra foi um comportamento logarítmico, onde se observou os elevados valores de diferença entre o peso inicial dos corpos de prova quando comparados com os pesos finais, para os tempos iniciais. Entretanto, com o passar do tempo essa diferença passou a diminuir e assim apresentar uma tendencia em se estabilizar.

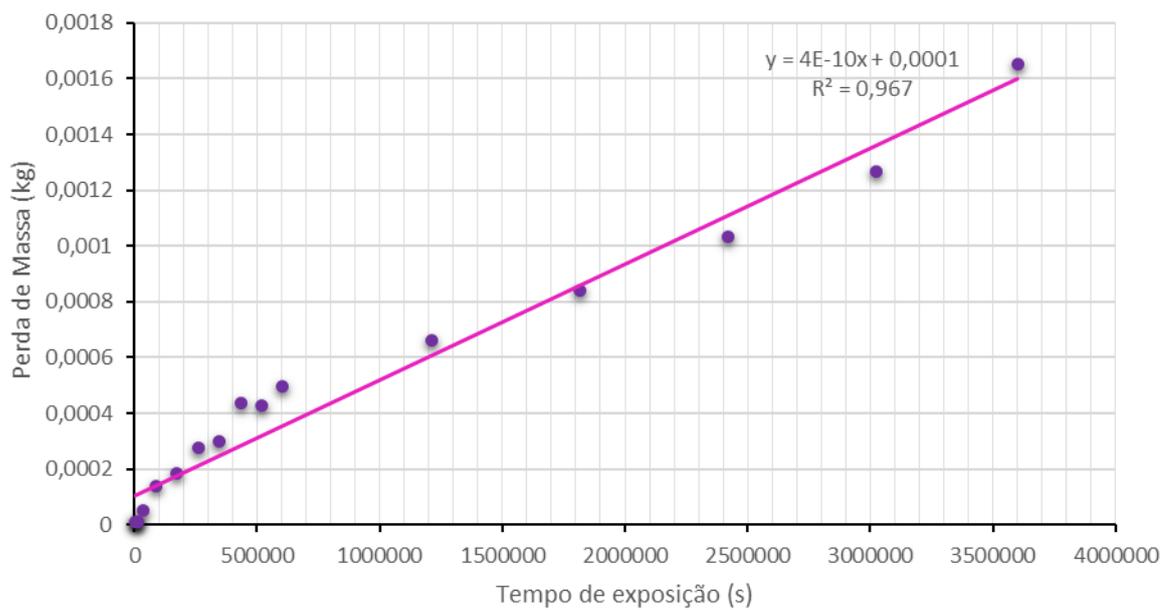
Figura 42 - Perda de Massa x Tempo de Exposição *Salt spray* Neutro



Fonte: A autora (2021).

Os resultados obtidos para a exposição dos corpos de prova a névoa salina acética, por sua vez, demonstraram um comportamento claramente linear, com a diferença entre os pesos iniciais e finais de cada chapa aumentando com o aumento do tempo de ensaio.

Figura 43 - Perda de Massa x Tempo de Exposição *Salt spray* Acético



Fonte: A autora (2021).

Essa diferença entre o comportamento visto nos corpos de prova expostos a névoa neutra, em relação ao apresentado nos corpos de prova expostos a névoa acética, pode ser explicada com a ajuda do diagrama de Pourbaix demonstrado na Figura 2.

Segundo esse diagrama, o alumínio passa por um processo de passivação mediante exposição a pH's mais neutros, compreendidos entre 4 e 8,5 mais precisamente. Dessa forma, os corpos de prova que foram ensaiados em equipamento de névoa neutra, com pH controlado entre 6,5 e 7,2, passaram por esse processo de passivação, que criou um filme protetor sobre a superfície do material e o protegeu do processo corrosivo, diminuindo a perda de massa que esse processo causaria à medida que a camada de filme de óxido ia se constituindo (POURBAIX, 1974).

Por outro lado, o equipamento de névoa acética expôs os corpos de prova a um ambiente com pH controlado entre 3,1 a 3,3, estando segundo o diagrama de Pourbaix, em uma zona de favorecimento do processo corrosivo para materiais constituídos de alumínio. Assim, conforme o diagrama mostra, as chapas submetidas a esse tipo de ambiente têm sua proteção reduzida em decorrência da formação do filme de óxido sobre a superfície ser prejudicada (POURBAIX, 1974).

Essa variação de comportamento mediante a ambientes com pH distintos descrita pelo diagrama de Pourbaix, também pode ser utilizada para justificar o porquê da diferença entre os resultados das triplicatas para um mesmo período de exposição a névoa salina neutra, terem sido mais discrepantes entre si quando comparados com aqueles apresentados pela exposição a névoa salina acética.

Com base nisso, percebe-se que no equipamento de névoa salina acética, os corpos de prova tinham a formação de sua camada de óxido protetor reduzida, o que resultava em uma corrosão mais uniforme. Enquanto que por outro lado, os corpos de prova colocados no equipamento de névoa salina neutra possuíam condições mais favoráveis para a formação desse filme passivo protetor, que era produzido de maneira distinta por cada uma das chapas de alumínio, fazendo com que corpos de prova ensaiados durante um mesmo período de tempo de exposição formassem espessuras de camada, e conseqüentemente apresentassem resistência a corrosão, diferentes entre si.

4.2.3 Resultados obtidos para taxa de corrosão

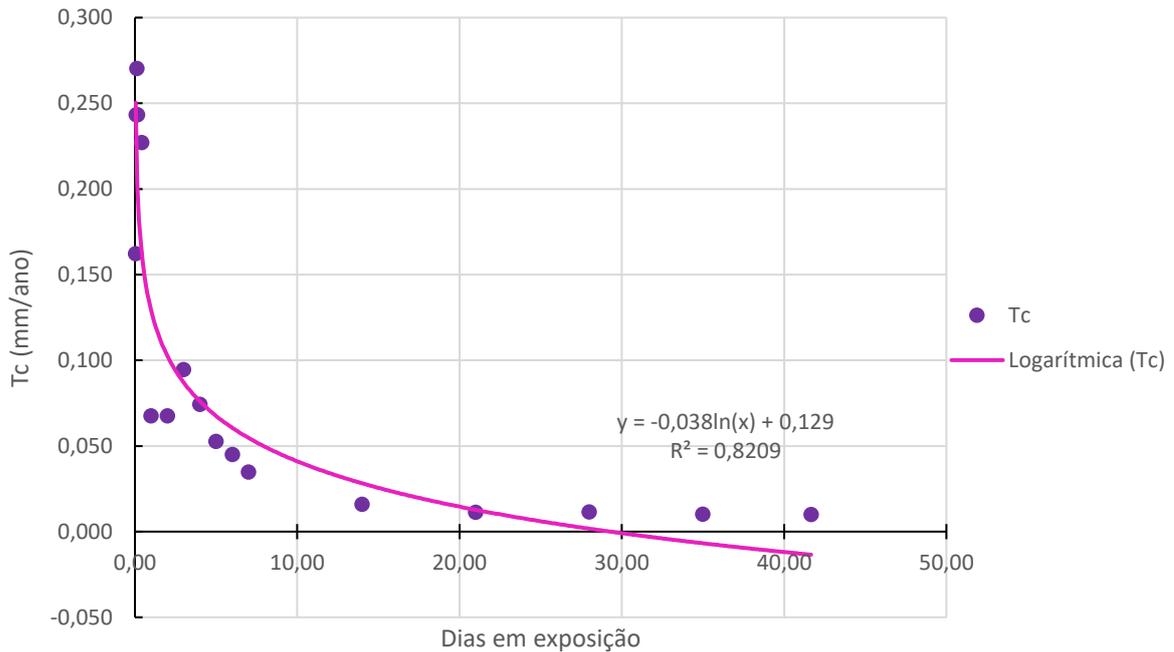
De posse dos valores para a perda de massa para cada quantidade de horas ensaiadas e utilizando a Equação Matemática 1, que demonstra como calcular a taxa de corrosão (T_c), pode-se obter os valores de T_c por quantidade de dias em exposição a nevoa salina neutra, conforme a Tabela 8. Esses valores foram utilizados para a plotagem do gráfico demonstrado pela Figura 44.

Tabela 8 – Taxa de corrosão *salt spray* neutro

Horas ensaiadas	Dias ensaiados	Perda de Massa (g)	T_c
1	0,042	0,001	0,162
2	0,083	0,003	0,243
3	0,125	0,005	0,270
4	0,167	0,006	0,243
10	0,417	0,0140	0,227
24	1	0,0100	0,068
48	2	0,0200	0,068
72	3	0,0420	0,095
96	4	0,0440	0,074
120	5	0,0390	0,053
144	6	0,0400	0,045
168	7	0,0360	0,035
336	14	0,0330	0,016
504	21	0,0350	0,011
672	28	0,0480	0,012
840	35	0,0530	0,010
1000	41,667	0,0620	0,010

Fonte: A autora (2021).

Figura 44 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição *Salt spray* Neutro



Fonte: A autora (2021).

Da mesma forma foram obtidos os valores demonstrados na Tabela 9, esses resultados correspondem aos encontrados para os ensaios conduzidos na modalidade de exposição a névoa salina acética e foram os utilizados na plotagem do gráfico de Tc mostrado na Figura 45.

Tabela 9 – Taxa de corrosão *salt spray* acético

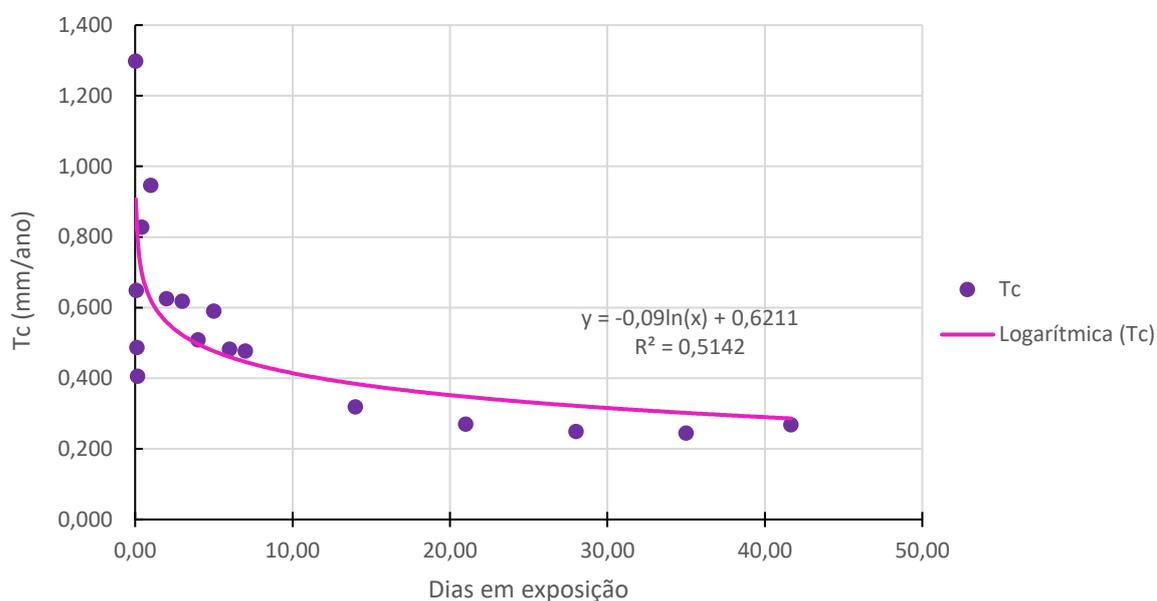
(continua)

Horas ensaiadas	Dias ensaiados	Perda de Massa (g)	Tc
1	0,042	0,0080	1,298
2	0,083	0,0080	0,649
3	0,125	0,0090	0,487
4	0,167	0,0100	0,406
10	0,417	0,0510	0,827
24	1	0,1400	0,946
48	2	0,1850	0,625
72	3	0,2743	0,618
96	4	0,3010	0,509
120	5	0,4360	0,589
144	6	0,4280	0,482

			(conclusão)
168	7	0,4940	0,477
336	14	0,6600	0,319
504	21	0,8390	0,270
672	28	1,0320	0,249
840	35	1,2670	0,245
1000	41,667	1,6540	0,268

Fonte: A autora (2021).

Figura 45 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição *Salt spray* Acético



Fonte: A autora (2021).

Assim, ao se comparar os resultados para taxa de corrosão em ambas as modalidades de névoa salina, percebe-se que os corpos de prova ensaiados em *salt spray* acético apresentaram maiores valores de Tc, indicando que de fato há uma maior velocidade de corrosão do alumínio nesse tipo de ambiente.

Sabe-se que o alumínio é um material que devido a seu filme passivo, apresenta um bom desempenho quanto a resistência a corrosão. Sabendo o maior valor de Tc para cada modalidade de névoa, ou seja, o momento em que a corrosão foi mais acelerada durante todos os períodos de exposição das chapas, se pode classificar a resistência desse filme protetor, conforme a Tabela 2.

Desta forma, para os corpos de prova ensaiados em névoa salina neutra, a maior taxa de corrosão ocorreu em 3 horas de teste, assim, os seguintes valores foram utilizados no cálculo de resistência do filme:

- 3 horas de ensaio = 0,125 dias de ensaio
- 0,005 g de perda de massa
- 20.000 mm² de área = 0,02 m² de área

$$\frac{0,005 \text{ g}}{0,02 \text{ m}^2 \times 0,125 \text{ dias}} = 2 \text{ g/m}^2.\text{dia} \rightarrow \underline{\text{O filme é resistente}}$$

O mesmo princípio pode ser utilizado para a avaliação do filme passivo produzido nos corpos de prova colocados no equipamento de névoa acética, onde a maior taxa de corrosão ocorreu em 1 hora de ensaio e a resistência do filme foi então calcula conforme os valores abaixo:

- 1 hora de ensaio = 0,042 dias de ensaio
- 0,0080 g de perda de massa
- 20.000 mm² de área = 0,02 m² de área

$$\frac{0,0080 \text{ g}}{0,02 \text{ m}^2 \times 0,042 \text{ dias}} = 9,52 \text{ g/m}^2.\text{dia} \rightarrow \underline{\text{O filme é razoavelmente resistente}}$$

Percebe-se então que muito embora o alumínio seja um metal com bom desempenho em ambos os ambientes, o comportamento já previsto pelo diagrama de Pourbaix na Figura 2 se confirma, com o ambiente de névoa neutra sendo menos agressivo ao filme passivo de óxido de alumínio.

4.3 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO NÚMERICA

Para que a simulação pudesse ser rodada, o desenvolvimento da modelagem química do *software* precisou ser realizado, para tanto, os seguintes parâmetros, descritos na Tabela10 foram inseridos na programação do sistema:

Quadro 5 – Parâmetros simulados

(continua)

Propriedade Requerida	Referência Informada
Materiais	<p>Al Al^{3+} NaOH Cl^- HCl H_2 OH^- H^+</p> <p>Acrescentado para a simulação acética: CH_3COOH CH_3COO^-</p>
Equações eletroquímicas	<p>$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ $2HCl + 3e^- \rightarrow H_2 + 2Cl^-$ $3NaOH + 3e^- \rightarrow 3OH^- + 3Na^+$</p> <p>Acrescentado para a simulação acética: $CH_3COOH + 1e^- \rightarrow CH_3COO^- + H^+$</p>
Coeficiente estequiométrico	<p>Al = 1 Al^{3+} = 1 NaOH = 3 Cl^- = 2 HCl = 2 H_2 = 1 OH^- = 3 H^+ = 2</p> <p>Acrescentado para a simulação acética: CH_3COOH = 1 CH_3COO^- = 1</p>

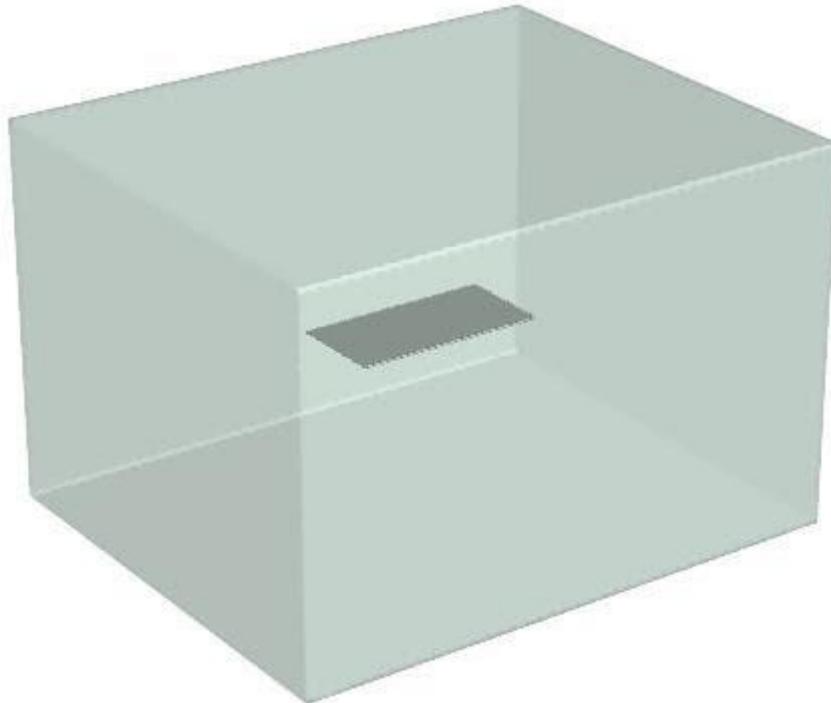
(conclusão)

Carga das espécies químicas	Al = 0 Al ³⁺ = +3 NaOH = 0 Cl ⁻ = -1 HCl = 0 H ₂ = 0 OH ⁻ = -1 H ⁺ = +1 Acrescentado para a simulação acética: CH ₃ COOH = 0 CH ₃ COO ⁻ = -1
Número de equações eletroquímicas	4 (névoa salina neutra) 5 (névoa salina acética)
Inclinação anódica de Tafel	0,4749
Inclinação catódica de Tafel	-0,1475
Densidade de corrente	-1,69 V
Potencial de equilíbrio	-1,87 mA/cm ²
Fração molar	97,99 % de Al
Temperatura	308 K

Fonte: A autora (2021).

Com os parâmetros definidos, o desenho 3D do material e sua malha puderam ser construídos, a Figura 46 demonstra o resultado desta modelagem, feita nas mesmas dimensões dos corpos de prova ensaiados experimentalmente.

Figura 46 – Modelo 3D dos corpos de prova

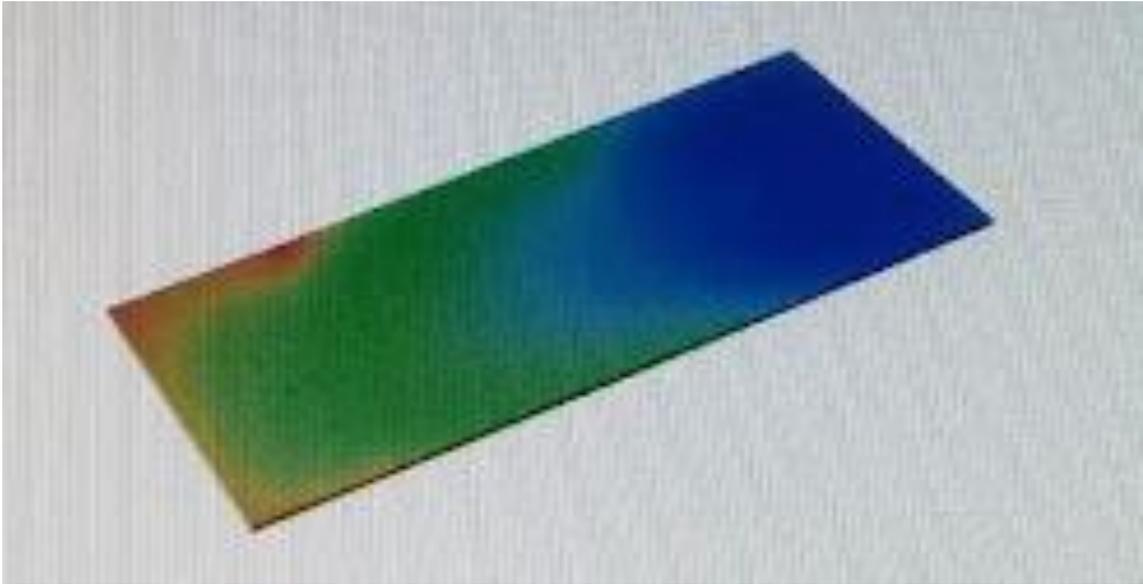


Fonte: A autora (2021).

4.4 RESULTADOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

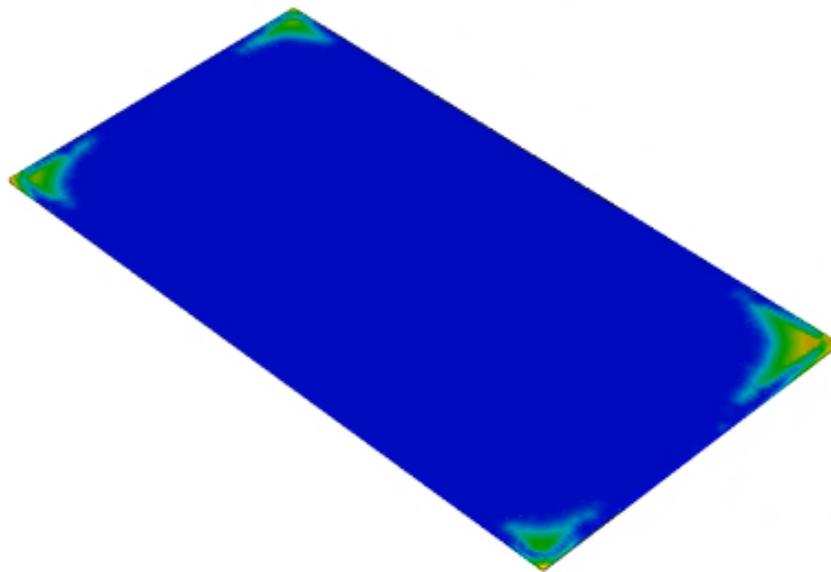
Com os parâmetros definidos e a chapa modelada, além dos resultados experimentais para fins comparativos, pode-se realizar os testes computacionais. Dessa forma, ao rodar o programa o processamento, com o passar do tempo, gera uma imagem, onde as zonas mais suscetíveis à corrosão, são demarcadas em cores quentes com o vermelho sendo o extremo e as regiões de menor probabilidade em serem atacadas são marcadas em cores frias, com o azul sendo o extremo. Assim, a Figura 47 mostra o modelo 3D durante o processamento e a Figura 48 mostra o resultado final dessa análise de corrosão regional.

Figura 47 – Execução do processamento do modelo 3D



Fonte: A autora (2021).

Figura 48 – Zonas mais propícias a corrosão no modelo 3D



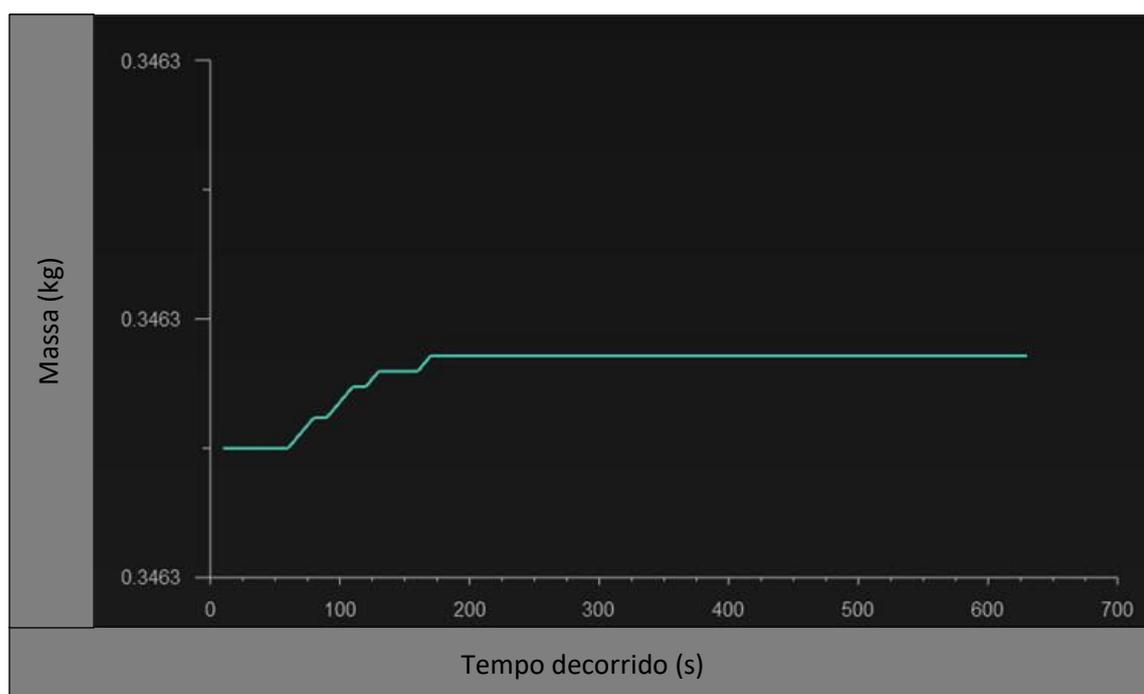
Fonte: A autora (2021).

Esse comportamento apresentado pela simulação condiz com o encontrado experimentalmente, em virtude de a corrosão geralmente ter início e ser mais intensa em regiões de borda. Visto que essas áreas são mais suscetíveis a formação de produtos de corrosão por uma série de fatores, como defeitos provenientes da hora da realização do corte do material, dificuldade de formação do filme passivo, entre outros. Estudos como o de Poelman et al. (2012) já demonstram que a corrosão para

essas regiões de borda possui relação com a espessura do revestimento e o pré tratamento do material, sendo que essas regiões geralmente possuem uma microestrutura diferente das demais áreas do material.

À medida que a análise computacional ocorria, os resultados gráficos para a perda de massa e para a taxa de corrosão eram gerados. A Figura 49 mostra o gráfico de perda de massa para a simulação de névoa salina neutra. O eixo vertical representa a diferença de massa ao longo do tempo comparando com o valor inicial do peso da chapa modelada em 3D, dessa forma percebe-se que a simulação não foi sensível o suficiente a ponto de conseguir analisar a diferença de massa causada pela degradação do Al ao longo do tempo, por essa razão o eixo correspondente a massa não sofre variação.

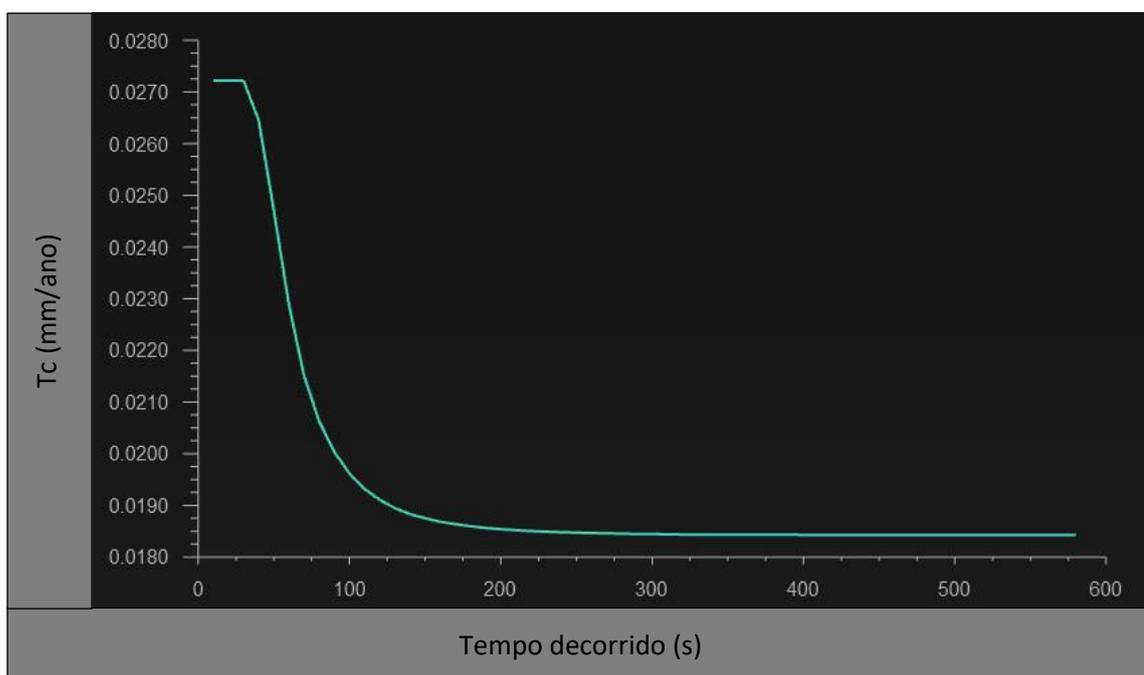
Figura 49 – Massa x Tempo de Exposição para simulação de névoa salina neutra



Fonte: A autora (2021).

Por sua vez, a Figura 50 abaixo traz o gráfico de taxa de corrosão, onde também pode-se ver que em pouco mais de 2 minutos a simulação estabiliza e não é capaz de interpretar os milímetros de corrosão da chapa de alumínio por ano.

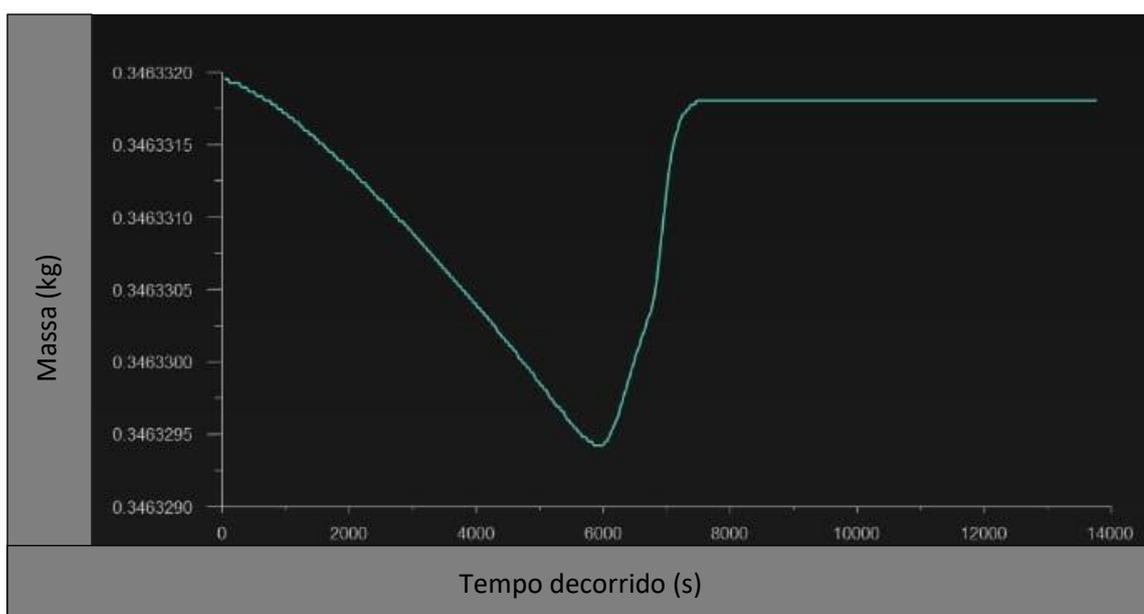
Figura 50 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição para simulação de névoa salina neutra



Fonte: A autora (2021).

Quanto a simulação para a névoa salina acética, o gráfico de diferença de massa gerado, demonstrado pela Figura 51, mostra a perda de massa comparada ao referencial de peso inicial da chapa e decrescendo deste valor.

Figura 51 – Massa x Tempo de Exposição para simulação de névoa salina acética

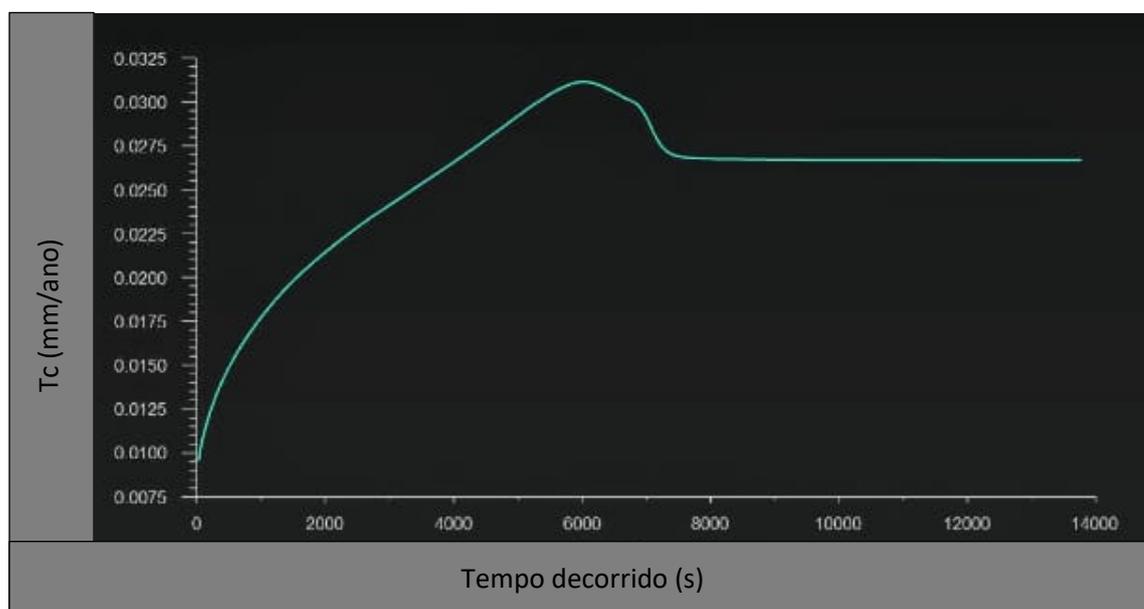


Fonte: A autora (2021).

Entretanto ao atingir 6000 segundos, ou seja, 1,66 horas, a simulação passa a considerar o peso dos produtos de corrosão, estabilizando ao retornar ao peso inicial, com aproximadamente 8000 segundos, ou 2,22 horas, de simulação do ensaio experimental realizado em câmara de *salt spray*.

Para a simulação da taxa de corrosão na simulação para as condições acéticas de operação, o gráfico obtido por método computacional está representado pela Figura 52. Avaliando esse resultado, percebe-se que a taxa de corrosão nessa simulação parte de um valor próximo ao zero, diferente do comportamento apresentado pela Tc para a névoa neutra. Dessa forma, a Tc aumenta até alcançar o seu pico em 6000 segundos, o mesmo ponto onde o gráfico anterior começa a demonstrar formação de produto de corrosão, após tal valor, a taxa de corrosão passa a decair até atingir a estabilidade, também por volta de 8000 segundos.

Figura 52 - Taxa de corrosão X Tempo de exposição para simulação de névoa salina acética



Fonte: A autora (2021).

Comparando-se os resultados obtidos pelos dois métodos, experimental e simulação, para um dos valores, percebe-se que a ordem de grandeza entre os métodos é consideravelmente diferente, muito embora a simulação de fato demonstre os padrões esperados, como valores mais acentuados para a taxa de corrosão em *salt spray* acético. A Tabela 10 abaixo demonstra esse comparativo de resultados para o tempo de 4 horas.

Tabela 10 – Comparativo simulação versus experimental para o tempo de 4 horas

PARÂMETRO	MÉTODO			
	Experimental Névoa Neutra	Simulação Névoa Neutra	Experimental Névoa Acética	Simulação Névoa Acética
Perda de massa (kg)	6.10^{-6}	0,3463	1.10^{-5}	0,3463
Taxa de corrosão (mm/ano)	0,243	0,0185	0,406	0,0275

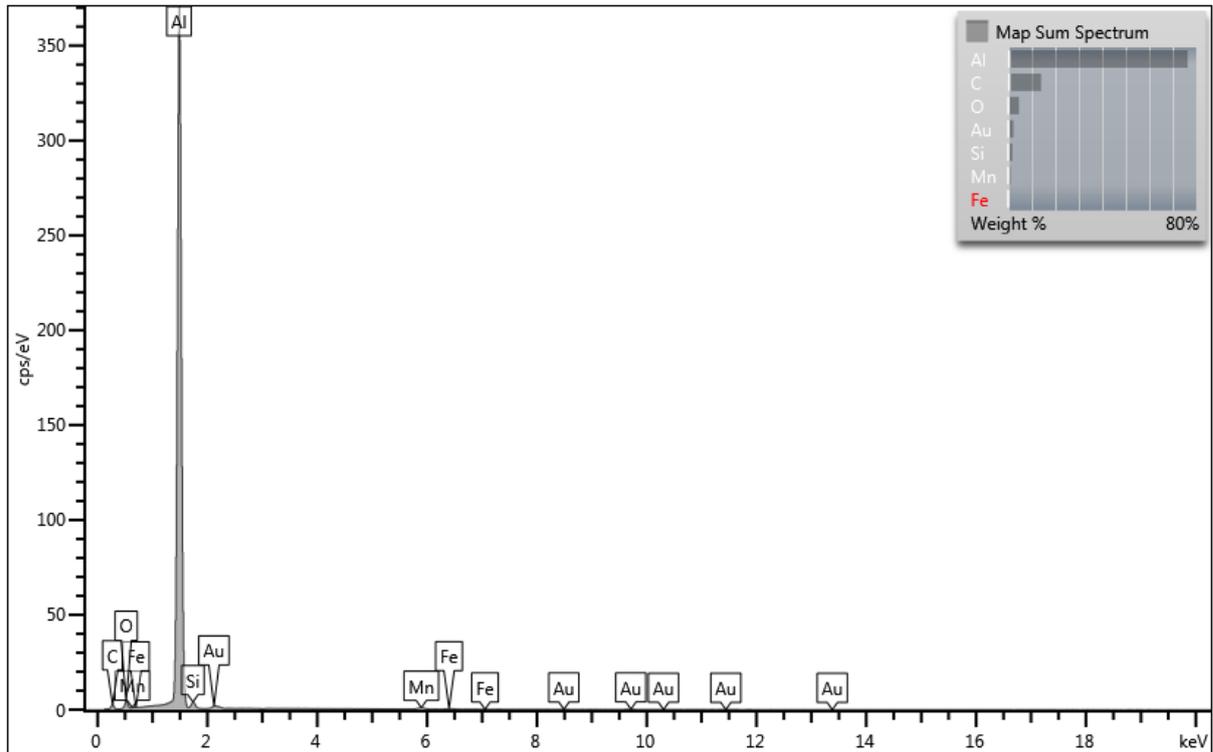
Fonte: A autora (2021).

4.5 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS)

Com a finalidade de caracterizar-se os compostos presentes na liga de Al ensaiada, análises de espectroscopia de raios X por dispersão em energia foram realizadas para um corpo de prova virgem, ou seja, sem ser submetido a nenhum ensaio, e para os corpos de prova com 1000 horas de exposição a névoa salina neutra e a névoa salina acética.

A Figura 53 é referente ao resultado obtido para a chapa virgem, esse resultado pode ser utilizado como comparativo com os resultados apresentados pelos corpos de prova submetidos aos ensaios.

Figura 53 – Análise de EDS da chapa virgem



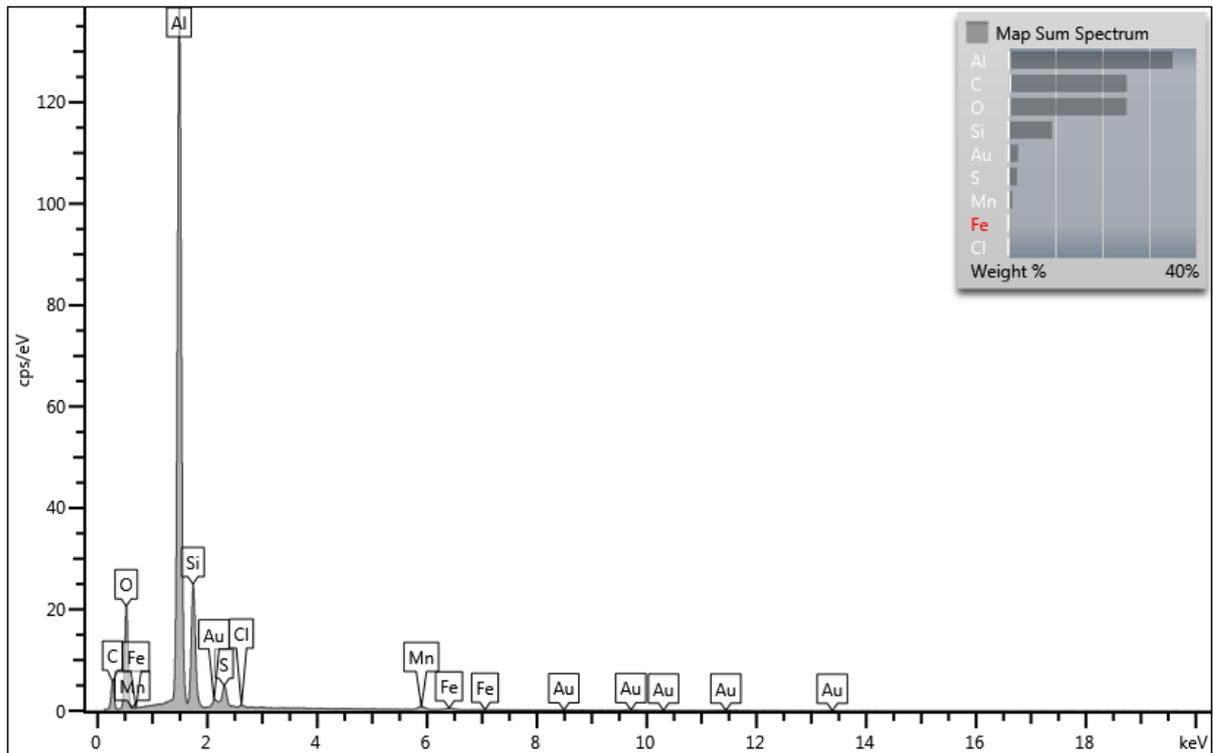
Fonte: A autora (2021).

Para os corpos de prova ensaiados em equipamento de névoa salina neutra e névoa salina acética, a Figura 54 e Figura 55 respectivamente, demonstram seus resultados para a análise de EDS, onde a presença de enxofre é indicada. A acusação de tal elemento na análise é causada em decorrência da decapagem química a qual tais corpos de prova foram submetidos, fazendo com que o resíduo desse material decapante, composto por Peroximonossulfato de potássio ($2\text{KHSO}_5 \cdot \text{KHSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$), fosse detectado.

Pode-se perceber também, ao analisar os resultados para a chapa ensaiada em *salt spray* neutro, uma presença elevada de Si. Muito embora a análise de EDS seja qualitativa e não quantitativa e se trate de uma avaliação pontual, pode-se perceber um pico superior para esse elemento quando comparado com os resultados da chapa ensaiada em *salt spray* acético. Conforme o Quadro 1, uma maior presença de Si indica um aumento de resistência à corrosão, entretanto como todos os corpos de prova testados foram provenientes de um mesmo lote, essa falta de homogeneidade dos componentes de liga indica um possível problema de mistura de materiais durante a fabricação. Esse fator também pode ter sido responsável pela amplitude de resultados entre as triplicatas ensaiadas.

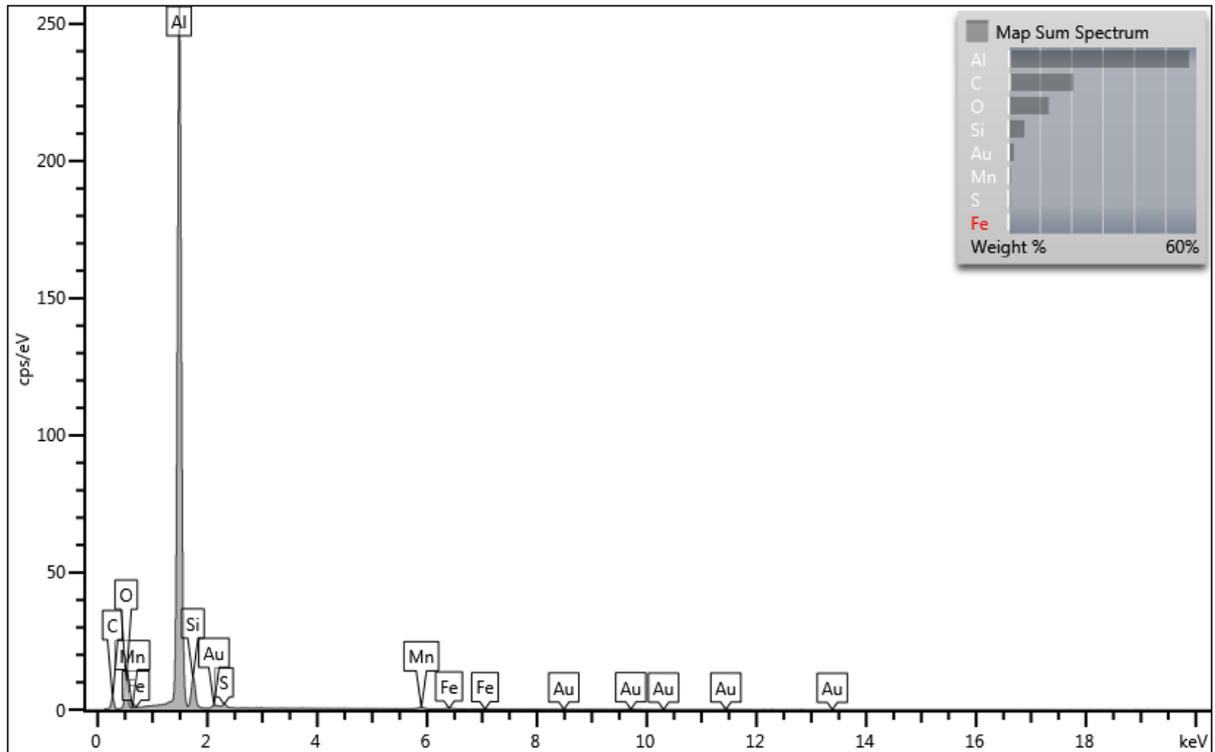
Estudos anteriores como o de Codaro (2006), em que o esperado era que o número de precipitados nas ligas de Al elevasse a perda de massa, mas o obtido foi que o valor desse parâmetro diminuiu para determinadas ligas, já trouxeram essa percepção de alterações de resultados decorrentes da distribuição dos elementos na matriz de Al, acarretando em uma descontinuidade do filme.

Figura 54 – Análise de EDS da chapa com 1000 horas de *salt spray* neutro



Fonte: A autora (2021).

Figura 55 – Análise de EDS da chapa com 1000 horas de *salt spray* acético



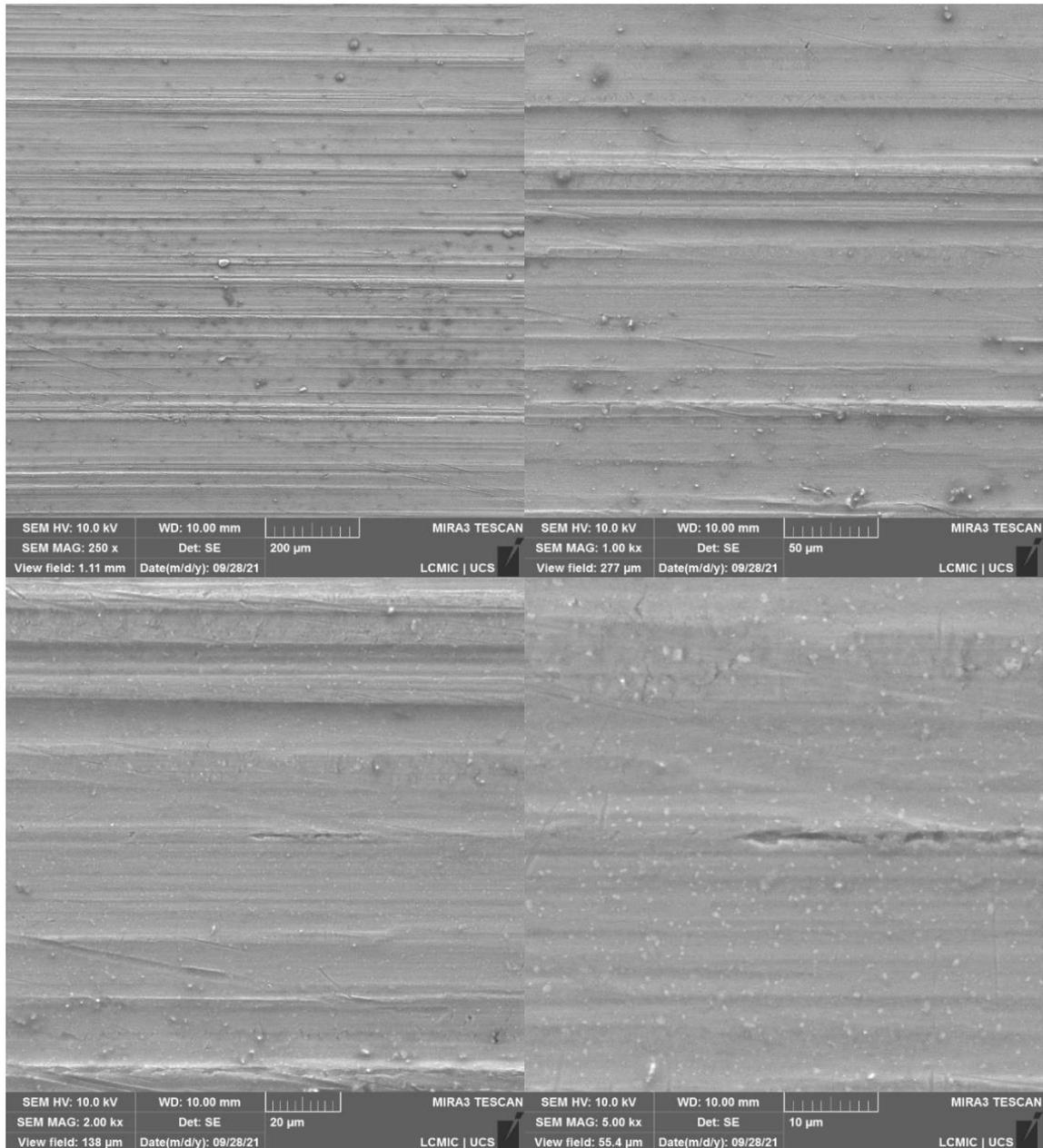
Fonte: A autora (2021).

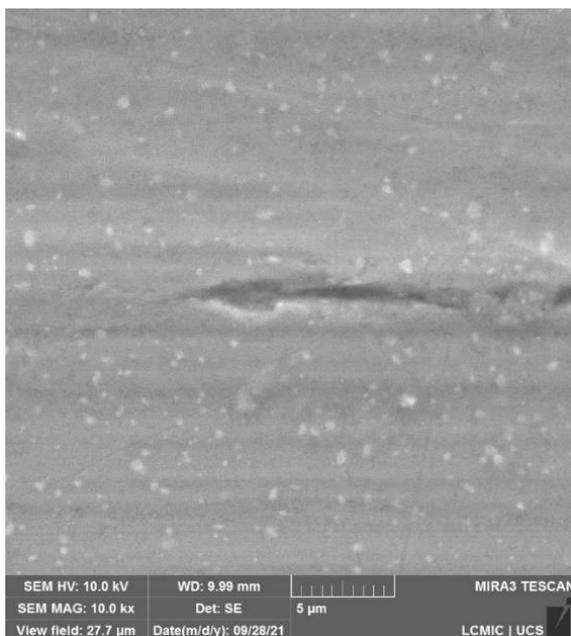
4.6 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/FEG)

Com o objetivo de caracterizar-se a corrosão apresentada por essa liga de alumínio, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura para as mesmas amostras em que foram analisados os resultados do ensaio de EDS. Conforme o Quadro 2 mostra, Ligas da série 3XXX tendem a apresentar uma resistência elevada a corrosão por *pitting* e corrosão uniforme.

Para a chapa virgem, a análise de MEV/FEG foi realizada com o intuito de visualizar a superfície original da liga, antes que as alterações causadas por corrosão modificassem sua estrutura. A Figura 56 mostra as linhas residuais características do processo de laminação do material, assim como alguns pontos de contaminação, com escalas de 200 μm , 50 μm , 20 μm , 10 μm e 5 μm .

Figura 56 – Análise de MEV/FEG da chapa virgem

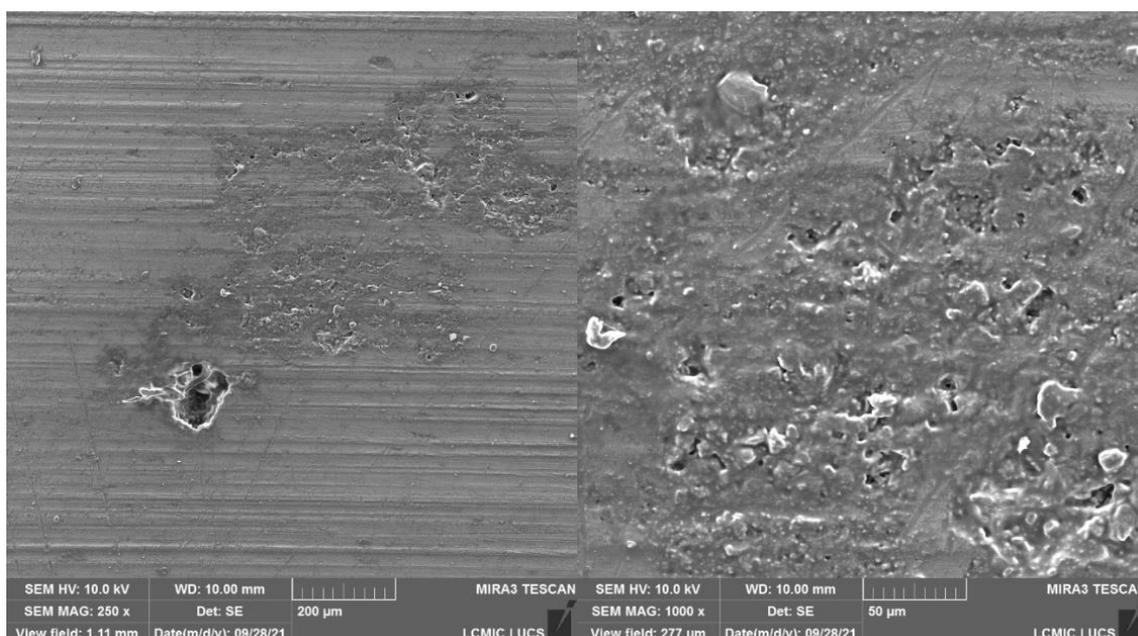


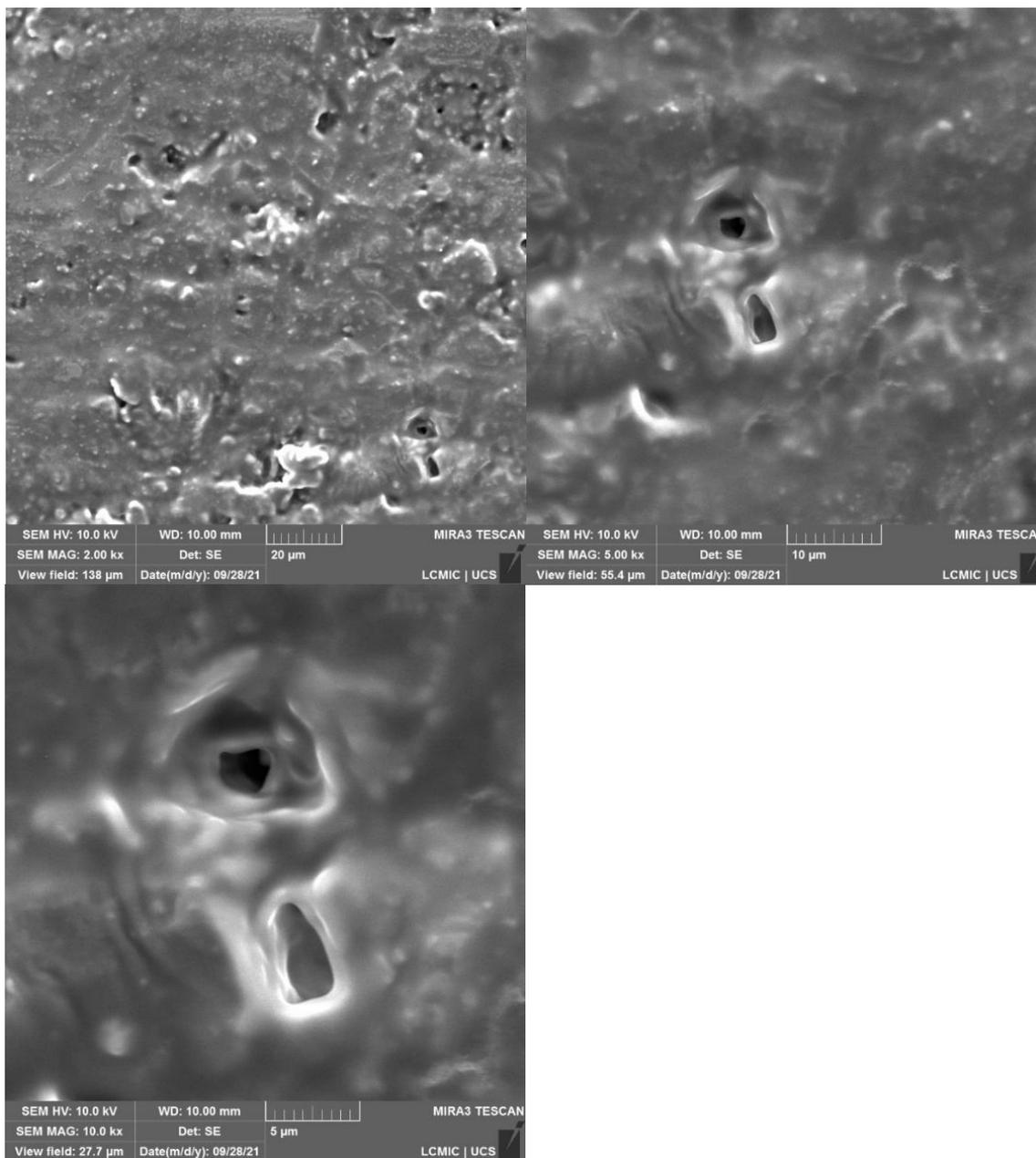


Fonte: A autora (2021).

Para a chapa ensaiada por um período de 1000 horas em equipamento de névoa salina neutra, na análise com escalas de 200 µm, 50 µm, 20 µm, 10 µm e 5 µm, pode-se visualizar, conforme Figura 57, a presença de corrosão uniforme pela superfície da chapa de alumínio, assim como a presença de *pittings*. Esse tipo de corrosão é característico do Al, embora esse apresente elevada resistência para os mecanismos de corrosão em geral.

Figura 57 – Análise de MEV/FEG da chapa com 1000 horas de *salt spray* neutro

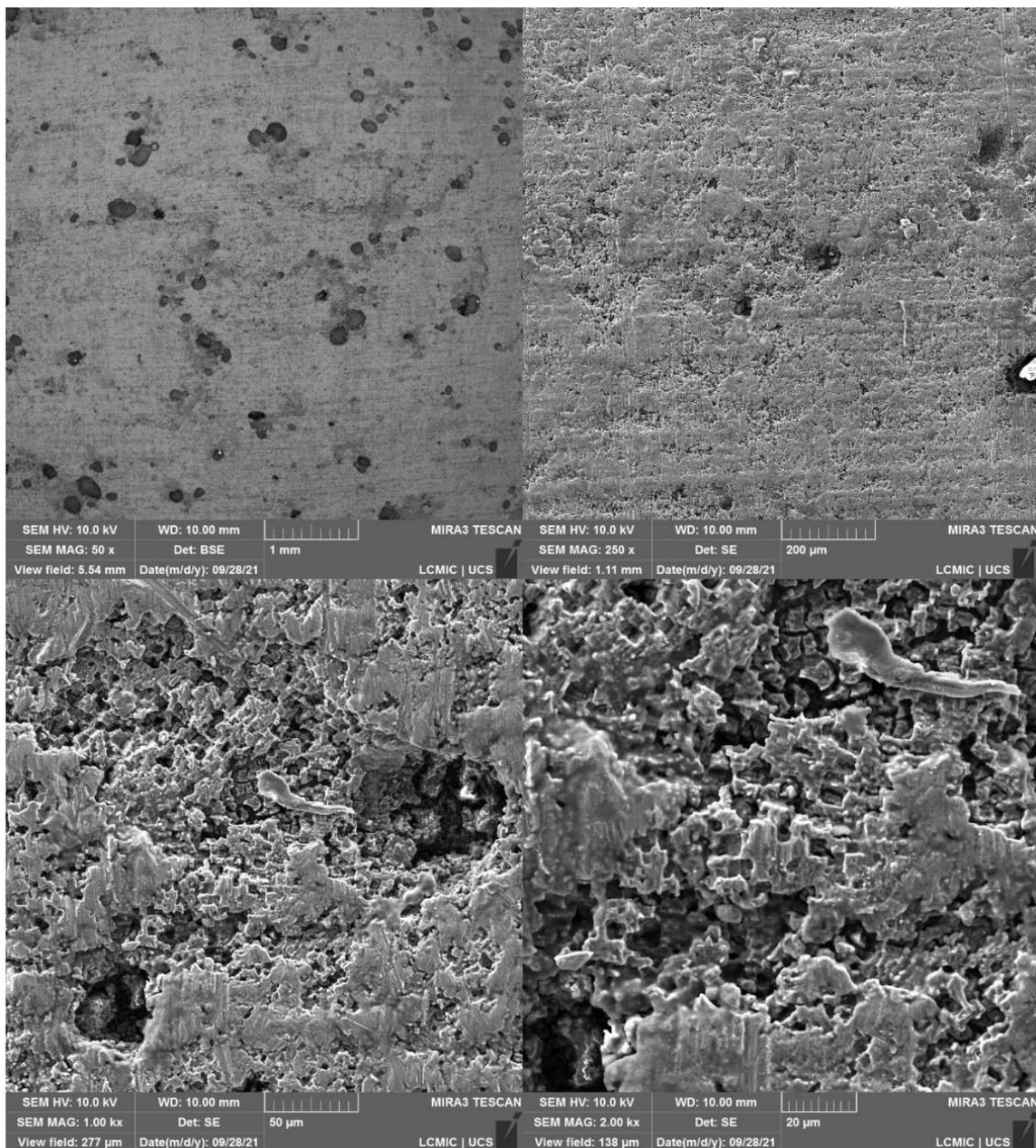


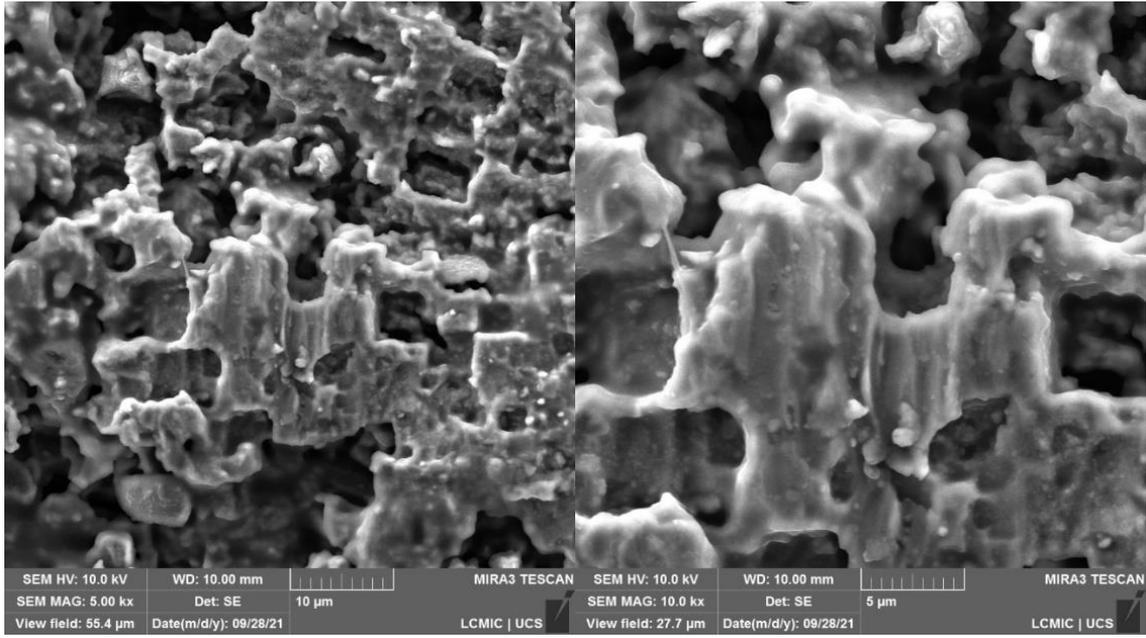


Fonte: A autora (2021).

Por fim, os resultados da análise de MEV/FEG para os corpos de prova expostos durante 1000 horas a névoa salina acética, demonstrados na Figura 58, com escalas de 1 mm, 200 µm, 50 µm, 20 µm, 10 µm e 5 µm, comprovam que ambientes mais ácidos são propícios para os maiores índices de corrosão do Al, com a formação de *pittings* sendo acentuada, aumentando a porosidade do material e sua consecutiva perda de massa para esse tipo de teste.

Figura 58 – Análise de MEV/FEG da chapa com 1000 horas de *salt spray* acético





Fonte: A autora (2021).

5 CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos durante o decorrer do trabalho, pode-se observar que os corpos de prova, embora pertencessem a um mesmo lote, possuíam significativa heterogeneidade de componentes, como pode ser constatado durante as análises de EDS. Tal diferença entre a quantidade de elementos de liga inibidores de corrosão, acarretou em uma igualmente significativa diferença entre os resultados da triplicata para cada um dos períodos.

Essa diferença entre os corpos de prova com a mesma quantidade de horas de exposição em um mesmo equipamento, foi mais acentuada para as chapas ensaiadas no equipamento de *salt spray* neutro, esse fato é justificado pela agressividade de meios ácidos sobre o filme passivo. No ensaio de névoa salina neutra, o filme de óxido responsável pela passivação do material e sua consecutiva proteção, foi formado de forma distinta entre os corpos de prova, causando divergência entre os resultados. Por outro lado, ao falar-se de névoa salina acética, o meio ácido evitou a correta passivação do alumínio, corroendo de forma mais homogênea todas as chapas expostas por um mesmo período de tempo.

Os ensaios de MEV/FEG ajudam a corroborar essa ideia, uma vez que a irregularidade superficial e o número de *pittings* apresentados pelo corpo de prova ensaiado em equipamento de *salt spray* acético, foi superior aos encontrados para o corpo de prova ensaiado em *salt spray* neutro. Assim, percebe-se que ambientes cujas condições dificultam a passivação por formação de um filme de óxido protetor são responsáveis pela degradação mais acentuada do material.

Quanto ao *software*, a parametrização eletroquímica foi feita de acordo com as condições encontradas dentro das câmaras de *salt spray*, onde ocorreram os ensaios experimentais, além da modelagem do desenho 3D da chapa de alumínio ter sido igualmente realizada segundo as informações do corpo de prova padrão a ser ensaiado.

No modelo 3D as zonas de maior probabilidade em serem primeiramente afetadas pela corrosão, estavam condizentes com os resultados visualizados ao longo do decorrer do ensaio experimental. Da mesma forma, a curva característica dos gráficos simulados para os resultados parametrizados também condizia com o esperado.

Entretanto os resultados para a simulação computacional e os ensaios experimentais foram divergentes quando comparados entre si, em aproximadamente 15 vezes para a análise de taxa de corrosão. Ou seja, a simulação apresentou um comportamento semelhante, mas com escala diferente, do obtido experimentalmente.

Assim, embora as características comportamentais dos modelos estudados para a variação de massa e para a taxa de corrosão fornecidos pela simulação fossem corretas, a capacidade de leitura dos resultados do programa utilizado possuía um erro significativo quando comparado aos resultados dos materiais ensaiados em laboratório.

A análise numérica com as condições setadas e os parâmetros utilizados não apresentou precisão suficiente de resultados, estabilizando em valores iniciais de análise que não condiziam com o encontrado na prática. Desta forma, a simulação utilizando o *software* estudado não foi condizente com a realidade.

A corrosão em si é um parâmetro com muitas variáveis e em decorrência de possuir tantos fatores cuja alteração afeta diretamente o resultado obtido, sua simulação por meios computacionais ainda é um desafio. Essa afirmação é comprovada pela própria análise das triplicatas dos ensaios dos corpos de prova de alumínio, que apresentaram discrepância de valores, mesmo com os testes sendo conduzidos nas mesmas condições e ao mesmo tempo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos por este trabalho, sugere-se:

- Utilizar outros programas que disponibilizem pacotes para a simulação de corrosão, como por exemplo o COMSOL;
- utilizar outros materiais que não forme um filme passivo para a verificação do modelo computacional, como por exemplo ferro ou zinco;
- utilizar outras geometrias para a realização da simulação numérica;
- simular condições encontradas em outros ensaios acelerados, como por exemplo câmaras de umidade ou imersões em variadas soluções.

REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Características Químicas e Físicas**. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117-19**: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- ASM INTERNATIONAL. **Handbook of corrosion data**. United States of America: ASM International, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14905**: Alumínio e suas ligas - Tratamento de superfície - Revestimento orgânico de tintas e vernizes - Determinação da resistência a corrosão por exposição à névoa salina acética. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 15 p.
- BOLZONI, L.; BABUB, N. Hari. Towards industrial Al-Nb-B master alloys for grain refining Al-Si alloys. **Journal Of Materials Research And Technology**, Hamilton, v. 6, n. 8, p. 5631-5638, 2019.
- CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CARDOSO, Juliana Lopes; PANOSSIAN, Zehbour. Cinética eletroquímica: comparação de curvas de polarização teóricas com as curvas experimentais. In: INTERCORR, 32. **Anais [...]**. Salvador: Abraco, 2012. p. 1-13.
- CODARO, Eduardo Norberto. **ESTUDO DA CORROSÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO UTILIZADAS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA**. 2006. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica., Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.
- EUROPEAN ALUMINIUM. **Automotive and transport**. 2021. Disponível em: <https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/aluminium-in-use/automotive-and-transport/>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- FERRARI, Jean Vicente. **Estudo da corrosão localizada da liga de alumínio 7475-T761 por espectroscopia de impedância eletroquímica global e local em meio de sulfato de sódio**. 2011. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FERREIRA, Pedro Altoé; MARTINS, Carlos Alexandre. Corrosão Interna: tendências da monitoração e controle com a revolução digital para o gerenciamento seguro e rentável dos ativos. **Corrosão & Proteção**, [S.L.], n. 63, p. 7-12, jul. 2018. Bimestral.

Disponível em: <https://abraco.org.br/revistas/ano-15-no-63-jul-ago-2018/>. Acesso em: 19 mar. 2021.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, Vicente. **CORROSÃO**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GNECCO, Celso; MARIANO, Roberto; FERNANDES, Fernando. **Manual de construção em aço**: tratamento de superfície e pintura. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2003.

HORSTH, Dienifer Fernanda Lopes; DALPASQUALE, Mariane; ANAISSI, Fauze Jacó. Ransformação de alumínio metálico em hidróxido de alumínio (Al(OH)₃): Uma ação para o desenvolvimento sustentável. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, p. 34178-34190. jun. 2020.

HUANG, I-Wen; HURLEY, Belinda L.; YANG, Fan; BUCHHEIT, Rudolph G.. Dependence on Temperature, pH, and Cl⁻ in the Uniform Corrosion of Aluminum Alloys 2024-T3, 6061-T6, and 7075-T6. **Electrochimica Acta**, [S.L.], v. 199, p. 242-253, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.125>.

ICZ, Instituto de Metais Não Ferrosos. **Corrosão**: conceito de corrosão. Conceito de corrosão. 2021. Disponível em: <http://www.icz.org.br/corrosao.php>. Acesso em: 10 abr. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9223**: Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres -- Classification, determination and estimation, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9227**: Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests, 2017.

JONES, Denny A.. **Principles and Prevention of CORROSION**. 2. ed. Reno: Upper Saddle River, 1996.

L'HARIDON-QUAIREAU, Sarah; LAOT, Mathilde; COLAS, Kimberly; KAPUSTA, Bénédicte; DELPECH, Sylvie; GOSSET, Dominique. Effects of temperature and pH on uniform and pitting corrosion of aluminium alloy 6061-T6 and characterisation of the hydroxide layers. **Journal of Alloys and Compounds**, [S.L.], v. 833, p. 155146, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155146>.

MAHMOOD, S.; GALLAGHER, C.; ENGELBERG, D.L.. Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloy 6063 Beneath Ferric Chloride Corrosion Product Droplets. **Corrosion**, [S.L.], v. 76, n. 10, p. 985-994, 29 jul. 2020. NACE International. <http://dx.doi.org/10.5006/3558>.

MALKI, B.; BAROUX, B.. Computer simulation of the corrosion pit growth. **Corrosion Science**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 171-182, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.004>.

METALTHAGA. **LIGAS DE ALUMÍNIO**: saiba diferenciar os grupos presentes na família de ligas de alumínio. SAIBA DIFERENCIAR OS GRUPOS PRESENTES NA FAMÍLIA DE LIGAS DE ALUMÍNIO. 2021. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>. Acesso em: 09 maio 2021.

MICHELI, Giancarlo Barbosa. **Análise numérico-experimental do impacto em chapas de alumínio aeronáutico**. 2008. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MOREIRA, Edna Fernandes. **Influência do pré-tratamento na ação anticorrosiva de revestimentos híbridos de sol-gel aplicados na liga EN AW-6063**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Tecnológica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **RP 0775**: Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. Houston: NACE International, 2005. 15 p.

NIŞANCIOĞLU, Kemal. Corrosion and Protection of Aluminum Alloys in Seawater. In: **Corrosion Behaviour and Protection of Copper and Aluminium Alloys in Seawater**: European Federation of Corrosion Publications. 50. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. p. 145-155. Edited by D. Féron.

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. **Corrosão e Tratamento de Superfície**. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém do Pará, 2012.

ORMELLESE, Marco; ATTARCHI, Mehdi; BRENNNA, Andrea; BOLZONI, Fabio. Use of FEM simulation to study corrosion phenomena under macrocell mechanism. In: THE EUROPEAN CORROSION CONGRESS, 445., 2019, Seville. **Proceedings [...]**. [S.L.]: Eurocorr, 2019. p. 1-9. Disponível em: <http://eurocorr.efcweb.org/2019/abstracts/6+8/185043.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2021

PATHAK, Shashi S.; BLANTON, Michael D.; MENDON, Sharathkumar K.; RAWLINS, James W.. Investigation on dual corrosion performance of magnesium-rich primer for aluminum alloys under salt spray test (ASTM B117) and natural exposure. **Corrosion Science**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 1453-1463, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.032>.

PHATE, Mangesh; BENDALE, Aditya; TONEY, Shraddha; PHATE, Vikas. Prediction and optimization of tool wear rate during electric discharge machining of Al/Cu/Ni alloy using adaptive neuro-fuzzy inference system. **Heliyon**, [S.L.], v. 6, n. 10, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05308>.

PIMENTA, Egnalda Pereira da Silva; GOULART-SANTOS, Sandra. Resistência à corrosão de aços revestidos com zinco submetidos ao teste em câmara de névoa salina. In: INTERCORR, 36. **Anais [...]**. Búzios: ABRACO, 2016.

POELMAN, M.; RECLOUX, I.; CORNIL, N.; BLANDIN, N.; DERONNE, L.; LEDISERT, Y.; OLIVIER, M.-G.. Electrochemical study of the corrosion behaviour at

the edges of electrocoated steel. **Progress In Organic Coatings**, Bélgica, v. 74, n. 3, p. 453-460, jul. 2012.

POURBAIX, Marcel. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

RABALD, E.. **Corrosion guide**, Amsterdam: Elsevier, 1978.

RAMANATHAN, Lalgudi V.. **Corrosão e seu controle**. São Paulo: Hemus, 19--.

RECH, Giovanni Matheus. **Análise numérica e experimental do comportamento aerodinâmico da carroceria de um ônibus rodoviário**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

SANTOS, Célia, A., L.; PANOSSIAN, Zehbour; CARDOSO, Juliana, L.. Interpretação de curvas de polarização. In: INTERCORR, 34. **Anais [...]**. Fortaleza: Abraco, 2014. p. 1-28.

SCARABOTTO, Mônica. **Estudo da corrosão nas ligas de alumínio 3105 e 5052**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ŠEKULARAC, Gavriilo; MILOŠEV, Ingrid. Corrosion of aluminium alloy AlSi7Mg0.3 in artificial sea water with added sodium sulphide. **Corrosion Science**, [S.L.], v. 144, p. 54-73, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.038>.

SILVA, Julyana Gomes da; WANDERLEY, Henderson Silva; OLIVEIRA, Ednaldo dos Santos; LYRA, Gustavo Bastos. Avaliação e correção das simulações do modelo Eta/CPTEC – HADCM3 para o estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 350-363, 01 mar. 2020.

SILVA, Leandro Freitas. **Avaliação da resistência a corrosão de ligas a base de níquelcromo e níquel-cromo-titânio obtidas em diferentes processos de fundição**. 2004. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

VARGEL, Christian. **Corrosion of Aluminium**. 2. ed. [S. L.]: Elsevier Science, 2020.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Edusp, 2003.

ZUCHRY, Muhammad; ASMARA, Anjar; NAHARUDDIN, Naharuddin; YANDI, Yandi. Study Comparative of Corrosion Rate Scrap Aluminium in Chloride Acid (HCl) and Natrium Chloride (NaCl) Solutions. **Matec Web of Conferences**, [S.L.], v. 331, p. 05004-05011, 2020. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/202033105004>.