

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA
REDONDA**

**DISSERTAÇÃO
DE MESTRADO**

**ESTUDO COMPARATIVO DA
RESISTÊNCIA À CORROSÃO
DE AÇOS COM POTENCIAL DE
APLICAÇÃO EM AMBIENTES
CORROSIVOS**

Aluna: Juliana Nogueira da Cruz

**Orientadora: Profa. Dra. Letícia
Vitorazi**

**Co-orientador: Prof. Dr. Elivelton
Alves Ferreira**



VOLTA REDONDA

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA
REDONDA

JULIANA NOGUEIRA DA CRUZ

ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS COM
POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM AMBIENTES CORROSIVOS

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal Fluminense,
como requisito para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Metalúrgica.

Área de concentração:
Processamento e Caracterização de
Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Vitorazi

Co-orientador: Prof. Dr. Elivelton Alves Ferreira

**Volta Redonda
2019**

C955

Cruz, Juliana Nogueira da, - ,
Estudo comparativo da resistência à corrosão de aços com
potencial de aplicação em ambientes corrosivos / Juliana
Nogueira da Cruz. – Volta Redonda, RJ: 2019.
98 f. : il.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Letícia Vitorazi.
Co-orientador: Prof^o. Dr^o. Elivelton Alves Ferreira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Fluminense,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica.

1. Corrosão 2. Eletroquímica 3. Telhas de aço I. Título II.
Vitorazi, Letícia III. Ferreira, Elivelton Alves IV. Produção
intelectual

CDD 669.142

Bibliotecária responsável: Roberta Campos - CRB7/6067

JULIANA NOGUEIRA DA CRUZ

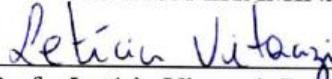
ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS COM
POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM AMBIENTES CORROSIVOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração:
Processamento e Caracterização de materiais.

Aprovada em 29 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Letícia Vitorazi, D. Sc. (Orientadora)
Universidade Federal Fluminense



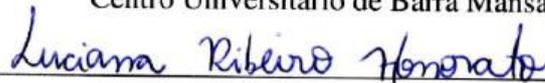
Prof. Elivelton Alves Ferreira, D. Sc. (Coorientador)
Universidade Federal Fluminense



Stanley Endrigo Bilatto Rodrigues, D. Sc.
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



Prof. Tiago Brandão Costa, D. Sc.
Centro Universitário de Barra Mansa



Luciana Ribeiro Honorato, D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

VOLTA REDONDA

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela saúde, sabedoria e principalmente por nas dificuldades me iluminar e me ajudar a seguir adiante.

Aos meus pais, por toda dedicação, amor, carinho e por estarem sempre comigo.

Aos meus irmãos, por todo apoio moral e incentivos.

Ao meu marido Jean, por todo amor, apoio e compreensão nos momentos de dedicação aos estudos.

Aos meus orientadores Profa. Dra. Letícia Vitorazi e Prof. Dr. Elivelton Alves Ferreira pela ajuda com seus conhecimentos, disponibilidade e orientação na realização deste trabalho.

Ao Alexandre Pimentel Sampaio e ao Thiago de Souza Martins pela oportunidade de ingressar no programa de mestrado e por todo apoio, incentivo e suporte dados durante esses anos de estudo.

Aos engenheiros Alberto Nei e Ilana de Araújo por todo conhecimento compartilhado. Minha sincera admiração por vocês.

A todos os envolvidos que de alguma forma contribuíram para que as amostras fossem disponibilizadas.

Aos meus colegas de trabalho por toda ajuda, desde o corte das amostras até as análises de MEV/ EDS. Valeu time! A ajuda de vocês foi imprescindível para a conclusão deste trabalho.

A Geraldine, pós doutoranda do PPGEM, pela imensa ajuda nas análises por MEV/ EDS.

Ao laboratório LMME da Universidade Federal Fluminense pela disponibilidade do MEV/ EDS.

Ao Rafael Martins, que muito ajudou na exposição das amostras em campo.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma me ajudaram a realizar este trabalho.

RESUMO

A utilização de telhas de aço tem representado excelente solução para coberturas das mais variadas edificações. A redução de peso da cobertura, durabilidade, facilidade de manutenção, modernidade e reciclabilidade são algumas das características que tornam seu uso atrativo para a construção civil para aplicação nos mais variados ambientes. Contudo, atenção especial deve ser dada na especificação do aço para aplicação em ambientes corrosivos de forma a evitar perdas precoces dos materiais. Diante disso, torna-se necessária a obtenção de argumentos técnicos através da comparação da resistência à corrosão dos tipos de aço para justificar o (s) tipo (s) mais adequado (s) para aplicação em telhas a serem instaladas em ambientes com atmosfera ácida e rica em cloreto, como a de uma linha de decapagem ácida de uma indústria siderúrgica. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar aços revestidos com zinco ou com liga 55% Al-Zn, pré-pintados e o inoxidável duplex quanto à resistência à corrosão para avaliação da aplicação como materiais a serem usados em ambientes corrosivos. Os ensaios utilizados para a avaliação da resistência à corrosão foram: ensaio acelerado de névoa salina (*salt spray*) e ensaios eletroquímicos de potencial em circuito aberto (OCP) e curva de polarização. Para complementação dos resultados, os materiais foram expostos na área de decapagem de uma usina siderúrgica e as superfícies das amostras foram analisadas, assim como antes e após os ensaios eletroquímicos, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram a superior resistência à corrosão do aço inoxidável duplex SAF 2205 e que a aplicação de pré-pintura nos aços revestidos com zinco e com a liga 55% Al-Zn aumenta consideravelmente a resistência à corrosão destes materiais.

Palavras-chave: Corrosão; Eletroquímica; Telhas de aço.

ABSTRACT

The use of steel shingles has been an excellent solution for roofing of the most varied buildings. Coverage weight reduction, durability, ease of maintenance, modernity, and recyclability are some of the features that make it attractive to civil construction for application in a variety of environments. However, special attention should be given to specifying the steel for application in corrosive environments in order to avoid premature loss of materials. Therefore, it is necessary to obtain technical arguments by comparing the corrosion resistance of the types of steel used in tiles to justify the type (s) most suitable for application in tiles to be installed in environments with an acidic atmosphere and rich in chloride, such as that of an acid pickling line from a steel industry. In this sense, the aim of the present work was to characterize zinc-coated or alloy-coated 55% Al-Zn steels and duplex stainless steel for corrosion resistance to evaluate the application of tiles to be used in corrosive environments. To complement the results, the materials were exposed in the pickling area of a steel mill and the sample surfaces were analyzed, as well as before and after electrochemical assays, by scanning electron microscope (SEM). The results showed the superior corrosion resistance of duplex stainless steel SAF 2205 and that the application of pre-painting in zinc-coated steels and the 55% Al-Zn alloy considerably increases the corrosion resistance of these materials.

Keywords: *Corrosion; Electrochemistry; Steel tiles*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- Sociedade Americana para Testes e Materiais
Ag/AgCl	- Eletrodo de referência prata/cloreto de prata com KCl saturado
A150	- 150g/ m ² de revestimento de liga 55% Al-Zn nas duas faces
AZ275	- 275g/ m ² de revestimento de Zn nas duas faces
CSN	- Companhia Siderúrgica Nacional
EDS	- Espectroscopia por Energia Dispersiva
MET	- Microscópio Eletrônico de Transmissão
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	- Microscópio Ótico
OCP	- Open Circuit Potential
P.A	- Para Análise
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PP	- Pré-pintado
WDS	- Espectroscopia por Comprimento de Onda Dispersivo

LISTA DE SÍMBOLOS

HCl	- Ácido Clorídrico
H ₂ SO ₄	- Ácido Sulfúrico
FeSO ₄	- Sulfato Ferroso
Al	- Alumínio
Zn	- Zinco
Si	- Silício
Fe	- Ferro
NaCl	- Cloreto de Sódio
%	- Percentual
γ	- Fase Austenítica
δ	- Fase Ferrítica
Cr	- Cromo
Ni	- Níquel
Mo	- Molibdênio
N	- Nitrogênio
C	- Carbono
°C	- Grau Celsius
m	- Massa
v	- Volume
mL	- Mililitro
cm	- Centímetro
kg	- Quilograma
cm ²	- Centímetro Quadrado
mV/s	- Milivolts por Segundo
V	- Volts
h	- Hora
Ω	- Ohm
g	- grama

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A) Tipos de bobinas de aço utilizadas em 2017 no segmento de telhas. B) Comercialização de telhas de aço por tipo de acabamento no ano de 2017.....	21
Figura 2: Aço galvanizado aplicado em telhas.	22
Figura 3: Camada de revestimento 55% Al-Zn e camada intermetálica sobre o aço-base.	23
Figura 4: Galvalume aplicado em coberturas.....	24
Figura 5: Camadas típicas de um sistema de pintura coil coating.	26
Figura 6: Telhas em aço pré-pintado.....	26
Figura 7: Corrosão por Pite.	29
Figura 8: Processo autocatalítico que ocorre na corrosão por pites.	31
Figura 9: Esquema de funcionamento da câmara de névoa salina.	34
Figura 10: Curvas de polarização cíclicas do aço inoxidável duplex SAF 2205 em meios contendo água do mar.	36
Figura 11: Desenho esquemático de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	38
Figura 12: Potenciostato/galvanostato VersaStat 3+ da marca Princeton Applied Research utilizado nos ensaios eletroquímicos.	41
Figura 13: Célula Eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.	41
Figura 14: Sistema completo para ensaios eletroquímicos.	42
Figura 15: Amostras de aço expostas em área de decapagem ácida.	44
Figura 16: Material revestido com Zn. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.	47
Figura 17: Material revestido com a liga 55% Al-Zn. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio. ...	48
Figura 18: Aço inoxidável duplex SAF 2205. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.....	48
Figura 19: Material revestido com Zn e pré-pintado. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio. ...	49
Figura 20: Material revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.	49

Figura 21: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço inoxidável duplex SAF 2205, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de NaCl 3,5% m/m.....	51
Figura 22: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de NaCl 3,5% m/m.....	52
Figura 23: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço inoxidável duplex SAF 2205, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de HCl 0,01M.	53
Figura 24: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de HCl 0,01M.....	54
Figura 25: Curvas de polarização dos materiais revestidos e aço inoxidável duplex SAF2205 em solução de NaCl 3,5% m/m.....	55
Figura 26: Curvas de polarização dos materiais revestidos e aço inoxidável duplex SAF 2205 em solução de HCl 0,01M.....	58
Figura 27: Aço revestido com Zn após 75 dias de exposição em campo.	60
Figura 28: Aço revestido com liga 55% Al-Zn após 75 dias de exposição em campo.	61
Figura 29: Aços pré-pintados após 75 dias de exposição em campo. A) Revestido com Zn e pré-pintado. B) Revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado	61
Figura 30: Aço inoxidável duplex SAF 2205 após 75 dias de exposição em campo.	62
Figura 31: Aço inoxidável duplex SAF 2205 após 1 ano de exposição em campo. A) Sem limpeza. B) Após limpeza.	62
Figura 32: MEV da amostra de aço revestido com Zn. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.	64
Figura 33: Composição química por EDS da amostra de aço revestido com Zn..	64
Figura 34: MEV da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x.	

C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.	65
Figura 35: Composição química por EDS da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn.	66
Figura 36: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.	67
Figura 37: Composição química por EDS do aço inoxidável SAF 2205.....	68
Figura 38: MEV da amostra de aço revestido com Zn após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.	69
Figura 39: Composição química por EDS do material revestido com Zn após ensaio com solução de NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.....	70
Figura 40: MEV/EDS da amostra de aço revestido com Zn após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.	71
Figura 41: Composição química por EDS do material revestido Zn após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.....	72
Figura 42: MEV da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.	73
Figura 43: Composição química por EDS do material revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio com NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.....	74
Figura 44: MEV da amostra de aço revestido com liga 55%Al-Zn após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED - 100 µm. C) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.	75
Figura 45: Composição química por EDS do material revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.....	76

Figura 46: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205 após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.	77
Figura 47: Composição química por EDS do material aço inoxidável SAF 2205 após ensaio com solução de NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.	78
Figura 48: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205 após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.	79
Figura 49: Composição química por EDS do material aço inoxidável SAF 2205 após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.	80
Figura 50: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn.....	81
Figura 51: Composição química por EDS do material revestido com Zn após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2.....	81
Figura 52: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com a liga 55% Al-Zn.	82
Figura 53: Composição química por EDS do material revestido com a liga 55% Al-Zn após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 3.....	82
Figura 54: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn e pré-pintado - com tinta.	83
Figura 55: Composição química por EDS do material revestido com com Zn e pré-pintado - com tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2... ..	84
Figura 56: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn e pré-pintado - sem tinta.....	84
Figura 57: Composição química por EDS do material revestido com com Zn e pré-pintado - sem tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2. ..	85
Figura 58: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - com tinta.....	86
Figura 59: Composição química por EDS do material revestido com com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - com tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 2 e C) ponto 3.	87

Figura 60: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - sem tinta.	88
Figura 61: Composição química por EDS do material revestido com com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - sem tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 3.	89
Figura 62: MEV após exposição em campo por 75 dias do material aço inoxidável duplex SAF 2205.	89
Figura 63: Composição química por EDS do material revestido aço inoxidável duplex SAF 2205 após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 2.	90
Figura 64: MEV após exposição em campo por 1 ano do material aço inoxidável duplex SAF 2205.	91
Figura 65: Composição química por EDS do material aço inoxidável duplex SAF 2205 após exposição em campo por 1 ano. A) ponto 1. B) ponto 2. C) ponto 3.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados do ensaio em câmara de névoa salina.....	46
Tabela 2: Resultados de Potencial de Circuito Aberto.....	50
Tabela 3: Potenciais de corrosão obtidos através do ensaio de curva de polarização em solução de NaCl 3,5% m/m.	56
Tabela 4: Potenciais de corrosão obtidos através do ensaio de curva de polarização em solução de HCl 0,01M.	59

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	OBJETIVOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Telhas de aço	20
3.1.1	Aço Revestido com Zinco	21
3.1.2	Aço Revestido com liga 55% Al-Zn	22
3.1.3	Aço Pré-Pintado	24
3.1.4	Aço Inoxidável Duplex	26
3.2	Corrosão.....	27
3.2.1	Corrosão Atmosférica	27
3.2.2	Corrosão Uniforme.....	28
3.2.3	Corrosão por Pite.....	29
3.2.4	Passivação	32
3.3	Ensaio para Avaliação da Resistência à Corrosão	33
3.3.1	Névoa Salina (<i>Salt Spray</i>)	33
3.3.2	Potencial em Circuito Aberto.....	34
3.3.3	Curva de Polarização Cíclica	35
3.3.4	Ensaio de Exposição em Campo	37
3.3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	37
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Materiais	38
4.2	Métodos	40
4.2.1	Ensaio de névoa salina	40
4.2.2	Ensaio Eletroquímico	40
4.2.2.1	Potencial em Circuito Aberto.....	43
4.2.2.2	Curva de Polarização Cíclica.....	43
4.3	Ensaio de Exposição em Campo.....	43
4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Névoa Salina.....	45
5.2	Potencial em Circuito Aberto	49
5.3	Curva de Polarização Cíclica.....	54
5.4	Teste de Exposição em Campo.....	60

5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	63
6.	CONCLUSÕES	93
7.	REFERÊNCIAS.....	94

1. INTRODUÇÃO

Os aços são ligas de ferro com concentrações de carbono na ordem de 0,002 a 2,00% m/m e elementos residuais que apresentam propriedades mecânicas, físicas e de resistência à corrosão específicas, tais como, dureza, maleabilidade, elasticidade, condutividade térmica e durabilidade. Elementos de liga como manganês, cromo, silício entre vários outros, podem ainda serem adicionados para aprimorar as características mecânicas e a resistência à corrosão (DIAS, 1998; PARANHOS, 2010).

Cada vez mais o ramo da engenharia civil reconhece a importância e os benefícios do emprego do aço (PAIVA, 2016). As telhas fabricadas com este material aplicadas em coberturas de edificações resultam na diminuição do peso da mesma além de proporcionar facilidade de manutenção, modernidade, reciclabilidade e aumento da durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2009).

A durabilidade está relacionada com ambos, a composição do material bem como as características do ambiente ao qual o revestimento é exposto. Uma correta especificação do aço assim como do revestimento em função do tipo de ambiente a ser empregado permite evitar ou minimizar os problemas decorrentes do processo de corrosão do material, especialmente em ambientes industriais agressivos como as linhas de decapagem química de indústrias siderúrgicas.

Na área de decapagem de tais indústrias ocorre a remoção de óxidos da superfície metálica e esse processo é realizado em meio ácido. Atualmente, a maioria das empresas siderúrgicas utilizam soluções de ácido clorídrico (HCl) na decapagem de bobinas de aço, o que acelera o procedimento se comparado a realização do mesmo processo empregando-se ácido sulfúrico (H₂SO₄), que é uma outra opção usada nesse tipo de tratamento de superfície (TANG et al., 2012).

No processo de decapagem, quando se emprega HCl, um problema típico ocorre nas instalações devido aos vapores ácidos presentes na atmosfera que atingem telhados e partes estruturais, induzindo a corrosão dos mesmos. Portanto, faz-se necessário o emprego de materiais mais resistentes, de modo a evitar ou diminuir o comprometimento e durabilidade das telhas de aço e dessa forma é importante se estudar o material a ser empregado nas condições em que o mesmo será aplicado.

O processo de corrosão metálica envolve fenômenos eletroquímicos e medidas eletroquímicas podem ser empregadas para caracterizar materiais revestidos ou não e avaliar o comportamento quando expostos a um meio corrosivo. Dentre as técnicas

eletroquímicas podem ser citadas a de potencial de circuito aberto (OCP) e a curva de polarização, ferramentas empregadas nesse trabalho. Adicionalmente, ensaio acelerado de névoa salina (*salt spray*) e teste de corrosão em campo permitem avaliar a resistência de materiais expostos a uma atmosfera agressiva e contribui na seleção de potenciais materiais para aplicação em ambientes corrosivos como é o caso desses estudos (WOLYNEC, 2003).

Chapas de aço com revestimento a base de zinco e com 7,49% Ti, 5,38% Mn e 3,39% C foram estudadas em quatro meios diferentes: solução de cloreto de sódio 3,5% m/v com pH 2, solução de cloreto de sódio 3,5% m/v com pH 4, solução de sulfato de sódio 1% m/v com pH 2 e solução de sulfato de sódio 1% m/v com pH 4. As análises mostraram menor resistência do material em solução de cloreto de sódio 3,5% m/v com pH 4 e maior resistência em solução de sulfato de sódio 1% m/v, independente do pH. Esse comportamento destacou a influência do íon cloreto na corrosão do aço revestido com a liga de Zn estudada e mostrou que o pH é pouco significativo nas condições estudadas (RUELA; SILVEIRA, 2017). Testes de corrosão acelerados usando fios de aço galvanizado mostraram a influência da umidade e temperatura no processo corrosivo. Os fios de aço galvanizado apresentaram maior taxa de corrosão com a umidade relativa e temperatura mais altas. Quantidades maiores de cloreto de sódio no meio também aumentaram consideravelmente a corrosão (SUZUMURA; NAKAMURA, 2004).

Estudos com aços inoxidáveis (SIOW; SONG; QIU, 2001; ADELI; GOLOZAR; RAEISSI, 2010) mostram uma alta resistência do material SAF 2205 em meio contendo solução de cloreto de sódio 3,5%, à formação de pite. Já no estudo com o aço SAF 2205 realizado por Kahram et al. (2014) em condições reais de trabalho em ambiente com água do mar, verificou-se a ocorrência de corrosão por pite, fissura e dissolução seletiva e concluiu-se que a presença de íons de hipoclorito não tem impacto na corrosão geral dos aços inoxidáveis duplex, porém aumenta o risco de iniciação de ataque localizado.

Essas observações, mostrando que o processo corrosivo é dependente da compatibilidade entre meio e o material, são indicativas de que um conhecimento teórico e também o prático são fundamentais para indicação de um específico material para seu uso seguro em ambientes específicos, principalmente em ambientes agressivos.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

O objetivo deste estudo é comparar a resistência à corrosão de diferentes aços, comumente aplicados em coberturas, para uso em ambientes com atmosfera ácida rica em cloreto.

Objetivos específicos:

- Selecionar dentre materiais como os aços revestido com zinco, revestido com liga 55% Al-Zn, aços pré-pintados e aço inoxidável duplex SAF 2205, através de ensaios eletroquímicos como potencial de circuito aberto e curvas de polarização cíclica, o mais apropriado para uso em ambientes industriais que apresentam atmosfera ácida rica em cloreto.

- Avaliar, através de estudos de névoa salina e teste em campo, o comportamento do material diante de ambientes agressivos e através de microscopia eletrônica de varredura, realizar análises acerca da formação de pite durante o ensaio de curva de polarização e teste em campo, bem como, avaliar a composição química da superfície do material antes e após estes ensaios para juntamente com os estudos eletroquímicos fortalecer a interpretação dos resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Telhas de aço

Existem vários tipos de materiais que podem ser usados para fabricação de telhas como cerâmica, metal, fibrocimento e materiais recicláveis. Entre as telhas metálicas, as fabricadas em aço têm ganhado cada vez mais espaço no mercado de coberturas, principalmente para aplicação em obras industriais, pois além de proporcionar produtos leves, o aço possibilita produtos resistentes e duráveis. Os principais tipos de aço usados na fabricação de telhas são: revestido com zinco, revestido com liga 55% Al-Zn, pré-pintados e aços inoxidáveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2009).

Pesquisa realizada pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) em 2018, tendo como base o ano de 2017, aponta que a produção total de telhas de aço carbono no Brasil foi de 463,1 mil toneladas, um aumento de aproximadamente 6,5% em relação a produção do ano anterior (CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2018).

O aço que teve maior participação na fabricação de telhas foi o revestido com a liga 55% Al-Zn sem pintura que representou 57% do total da produção do ano de 2017, seguido do material revestido com zinco (15%) e do pré-pintado (28%). Segundo a pesquisa do CBCA, 65% das telhas comercializadas correspondem ao material sem pintura. A Figura 1A apresenta o gráfico com os tipos de bobinas mais utilizadas em 2017 em telhas e a Figura 1B mostra os tipos de acabamento mais comercializados (CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2018).

Figura 1: A) Tipos de bobinas de aço utilizadas em 2017 no segmento de telhas. B) Comercialização de telhas de aço por tipo de acabamento no ano de 2017.



Fonte: CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2018 – adaptada.

3.1.1 Aço Revestido com Zinco

Os aços revestidos com zinco ou galvanizados são aços laminados a frio que passam pelo processo de galvanização, no qual há a aplicação de revestimento à base de zinco metálico. No processo de galvanização por imersão a quente, o aço é imerso em um banho de zinco fundido com temperatura em torno de 450 °C e por difusão é formada uma camada de liga em sua superfície (PARANHOS, 2002; SCHWEITZER, 2006).

O revestimento de zinco é um dos tipos mais importantes para proteção contra corrosão de aço devido aos custos relativamente mais baixos do processo, quando comparado com outros tipos de revestimento; grande flexibilidade nos procedimentos de aplicação, resultando em produtos de diferentes qualidades, com espessuras de camada controlada e eficiente proteção catódica. A proteção contra corrosão de produtos siderúrgicos expostos a ambientes corrosivos foi aprimorada a partir do revestimento de zinco (SCHWEITZER, 2006; PERSSON; THIERRY; KARLSSON, 2017).

O aço revestido com zinco apresenta uma satisfatória vida útil sendo muito empregado em telhados de edifícios em ambientes urbanos (PERSSON; THIERRY; KARLSSON, 2017).

O revestimento de zinco protege o aço-base contra corrosão atmosférica através de dois mecanismos: i) proteção por barreira exercida pela camada de revestimento, que dificulta o contato do meio corrosivo com o aço e ii) proteção galvânica ou sacrificial, em

que o zinco é oxidado preferencialmente nos casos de exposição do aço e do zinco em arranhões, cortes e bordas. Neste caso, a corrosão preferencial do zinco gera uma proteção adicional ao aço, uma vez que os produtos de corrosão do zinco preenchem suas áreas expostas (GENTIL, 1996). A Figura 2 mostra a aplicação de aço revestido com zinco em cobertura.

Figura 2: Aço galvanizado aplicado em telhas.



Fonte: COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2016b.

3.1.2 Aço Revestido com liga 55% Al-Zn

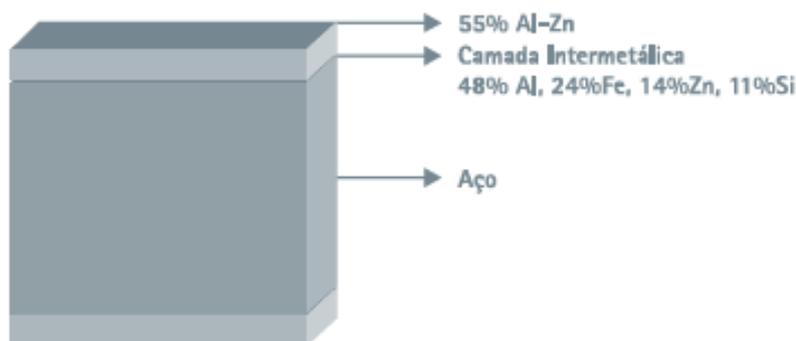
Com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão de aços galvanizados foi desenvolvido o revestimento com a liga 55% Al-Zn, denominado comercialmente como Galvalume®, o qual é depositado sobre a chapa de aço por imersão à quente numa faixa de espessura de 75 a 90 g.m⁻² por face da chapa (PANOSSIAN, 2001). Este revestimento é composto de 55% Al, 43,5% Zn e 1,5% Si e combina a resistência por barreira e a proteção galvânica, exercidas pelo alumínio e pelo zinco, respectivamente. A pequena adição de silício à liga permite o controle da reação entre a liga Al-Zn e a chapa de aço durante a imersão da tira no banho, possibilitando a formação de uma camada intermetálica constituída por Al, Fe, Zn e Si, a qual favorece a aderência entre a camada de revestimento e o aço-base (SCHWEITZER, 2006; ELSNER; SERÉ; DI SARLI, 2012).

Durante o processo de corrosão do revestimento Al-Zn, a fase de zinco corrói preferencialmente até que a formação de produtos de corrosão reduza outras atividades nessas áreas, ou seja, durante o estágio inicial de corrosão, o revestimento se comporta

como o revestimento de zinco. No final dos estágios de corrosão, quando o revestimento é essencialmente de produtos de corrosão de zinco, a corrosão torna-se mais característica da fase rica em alumínio, resultando em uma menor taxa de corrosão típica do alumínio (ELSNER; SERÉ; DI SARLI, 2012).

A liga 55% Al-Zn exibe superior resistência à corrosão sobre revestimentos galvanizados em áreas rurais, industriais, marinhas e ambientes marinhos severos. No entanto, esta liga tem limitada proteção catódica e menor resistência em algumas condições alcalinas e está sujeita a descoloração por intempéries e manchas de armazenamento em ambientes úmidos, o que pode ser melhorado com a cromatização, que também possibilita a melhora de sua resistência à corrosão atmosférica (SCHWEITZER, 2006). A Figura 3 mostra as camadas de revestimento e intermetálica formadas sobre o aço-base.

Figura 3: Camada de revestimento 55% Al-Zn e camada intermetálica sobre o aço-base.



Fonte: COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2016a.

A Figura 4 mostra um exemplo de aplicação de aço revestido com a liga 55% Al-Zn em coberturas.

Figura 4: Galvalume aplicado em coberturas.



Fonte: COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2016a.

3.1.3 Aço Pré-Pintado

Quando um grau mais alto de proteção das superfícies metálicas é requerido, sistemas de pintura apropriados podem fornecer uma barreira inibidora de corrosão mais eficaz e uma melhor aparência estética. Algumas condições de exposição são tão agressivas que revestimentos metálicos e orgânicos devem ser aplicados em conjunto para obter uma eficácia mais longa. Tal combinação, referida como um sistema duplex, demonstrou um efeito sinérgico quando comparado com os sistemas de revestimento individuais. Esta melhor proteção contra corrosão é atribuída à dupla ação proporcionada pela camada de zinco ou 55% Al-Zn e pelo sistema de pintura pigmentada que geram um efeito barreira e inibição da corrosão do aço. Além disso, este sistema duplex requer menos condicionamento e reparos de sistemas de revestimento após o transporte e montagem no local (ELSNER; SERÉ; DI SARLI, 2012).

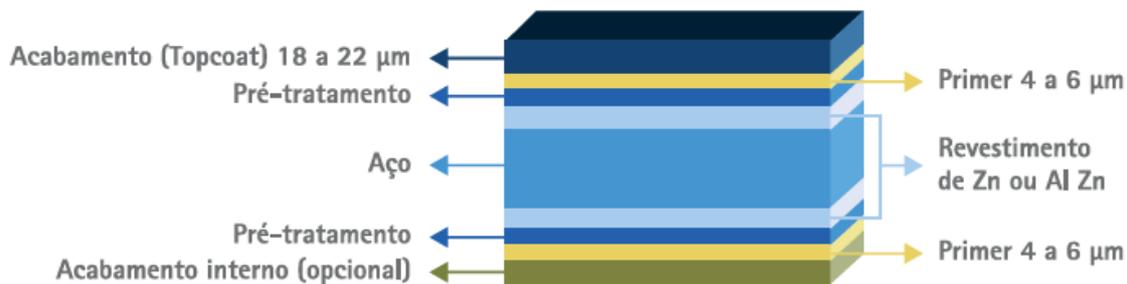
A eficácia dos revestimentos orgânicos não depende apenas das propriedades dos revestimentos, que estão relacionados à rede polimérica e possíveis falhas nesta rede, mas também sobre o caráter do substrato de metal, o pré-tratamento da superfície e os procedimentos de aplicação. Portanto, ao considerar a aplicação de um revestimento, é necessário considerar as propriedades de todo o sistema. Os revestimentos orgânicos fornecem proteção pela formação de uma barreira física e/ou pela inibição ativa da corrosão fornecida por pigmentos presentes no revestimento. Na prática atual, as propriedades de barreira podem ser limitadas porque os revestimentos orgânicos são permeáveis à água e oxigênio, o que proporciona, com o passar do tempo, uma saturação com água no revestimento comparável com uma atmosfera de alta umidade (SCHWEITZER, 2006).

O aço pré-pintado é produzido utilizando a tecnologia de *coil coating*, que consiste na aplicação de revestimento orgânico na bobina de aço utilizando controle rigoroso nos processos envolvidos de pré-tratamento, em que a chapa de aço passa por uma sequência de limpeza que inclui desengraxe, escovamento e enxágue, aplicação de *primer*, que garante a aderência da tinta ao aço e proteção contra a corrosão, e aplicação de acabamentos, que inclui a aplicação de tintas e filmes decorativos e protetivos, que possuem as funções de contribuir para a durabilidade do material e proporcionar estética ao aço (AHMAD, 2006; WICKS; JONES; PAPPAS, 2007; GUPTA; PATHAK; KHANNA, 2012).

A aplicação de revestimento orgânico pela técnica de *coil coating* produz um produto de qualidade, economicamente viável e com baixo impacto ambiental, quando comparado com outras técnicas de aplicação de revestimento, porém este tipo de produto pode apresentar restrição quanto à conformação.

Estudos realizados por Deflorian et. al, 2000 mostraram que o material conformado após revestido pode apresentar defeitos ou induzir tensões internas, o que pode comprometer as propriedades de proteção da tinta. No estudo de Deflorian, 2000 três amostras diferentes, uma revestida com zinco e duas revestidas com zinco e alumínio com diferentes espessuras de revestimento metálico e de *primer* foram pintadas e submetidas à deformação. A amostra revestida somente com zinco mantém propriedades de proteção apenas com tensão para deformação de 5%, acima deste valor surge trincas no revestimento do substrato; já os materiais revestidos com zinco e alumínio apresentam boas propriedades de proteção com até 25% de deformação, devido à baixa tendência do revestimento metálico formar fissuras e à maior espessura da camada de primer aplicada nessas amostras, favorecendo a adesão do polímero. Estes resultados confirmam a importância de se escolher o material adequado a ser pré-pintado para determinada aplicação, assim como, de se manter um sistema de alto controle para aplicação de *primers* e tintas. As camadas típicas de um sistema de pintura *coil coating* estão esquematizadas na Figura 5.

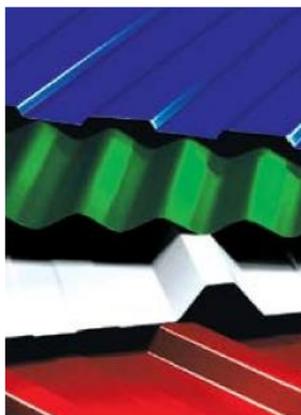
Figura 5: Camadas típicas de um sistema de pintura coil coating.



Fonte: COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2017.

A Figura 6 mostra telhas confeccionadas em diferentes cores com aço pré-pintado.

Figura 6: Telhas em aço pré-pintado.



Fonte: COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2017.

3.1.4 Aço Inoxidável Duplex

Aço inoxidável duplex é definido como a liga que apresenta microestrutura bifásica, composta por ferrita (δ) e austenita (γ). As proporções equilibradas dessas fases promovem propriedades mecânicas e de resistência à corrosão elevadas ao aço inoxidável (GUNN, 1997; SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

O aço inoxidável duplex mais conhecido é o SAF 2205, amplamente utilizado industrialmente em condições que requeiram propriedades adicionais de resistência à corrosão, como em tanques de condução e armazenamento de material corrosivo. Esse material é caracterizado por apresentar aproximadamente 22% Cr, 5% Ni, 3% Mo, 0,15% N e 0,02% C. A presença de Cr, Ni e Mo na composição deste aço garante uma eficiente

resistência à corrosão por pite em meio contendo íons cloreto (GUNN, 1997). Ao Mo também é atribuído o aumento da estabilidade do filme passivo formado na superfície de aço inoxidável (KAHRAM et al., 2014).

3.2 Corrosão

A corrosão é definida como a interação química ou eletroquímica de um material, geralmente metálico, com o ambiente no qual este está exposto. Essa interação, aliada ou não a esforços mecânicos, transforma o material de modo a comprometer suas propriedades e afetar seu desempenho (SHREIR; JARMAN; BURSTEIN, 2000; LANDOLT, 2007; REVIE, 2008).

No processo de corrosão química há o ataque de um agente químico diretamente no material sem a ocorrência de transferência de cargas e elétrons, ou seja, sem a formação de corrente elétrica. Enquanto que o processo de corrosão eletroquímica está associado à passagem de corrente elétrica e envolve o movimento de partículas carregadas – íons, elétrons ou ambos. Dessa forma, na maioria das reações que se manifestam na presença de uma superfície metálica, ocorre a passagem de corrente através do metal, e a reação é eletroquímica (STANSBURY; BUCHANAN, 2000).

No estudo dos processos corrosivos, o conhecimento das diferentes formas (ou tipos) de corrosão é muito importante. Estas formas de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos (GENTIL, 1996). Dentre as várias formas ou tipos de corrosão existentes, podem-se citar as elencadas a seguir.

3.2.1 Corrosão Atmosférica

A corrosão atmosférica é um dos tipos de corrosão de maior incidência e ocorre pela exposição do material à atmosfera, levando a deterioração do mesmo e a elevados gastos com reparos (GENTIL, 1996; WOLYNEC, 2003).

O metal quando exposto ao ambiente geralmente sofre corrosão atmosférica devido à presença de umidade relativa, particulados e gases constituintes da atmosfera oriundos de atividades industriais, temperatura e tempo de permanência do eletrólito na superfície do material. Outros fatores climáticos como chuvas, ventos, radiação

ultravioleta e variações climáticas de temperatura e umidade podem influenciar a ação corrosiva da atmosfera, aumentando ou diminuindo a taxa de corrosão do material exposto (GENTIL, 1996; ROBERGE, 2000; AHMAD, 2006).

Fuente et. al, 2007 avaliou que um pré-requisito para a corrosão atmosférica ocorrer em materiais zincados é que uma camada de umidade esteja presente na superfície. Esta camada age como um solvente para constituintes atmosféricos e um meio para reações eletroquímicas. A corrosão atmosférica do zinco é influenciada principalmente pelo tempo de umidade e pela presença de constituintes atmosféricos como CO_2 , SO_x e Cl^- . Quando a camada de umidade evapora, uma película de produtos de corrosão se precipita. A natureza dos precipitados depende das características ambientais da atmosfera.

Pesquisas realizadas em diferentes tipos de atmosfera na Espanha, Brasil e Portugal mostraram que o revestimento galvanizado sofre um ataque generalizado de sua superfície enquanto que o revestimento de 55% Al-Zn sofre ataque localizado que começa nas regiões interdendríticas do material (PALMA; PUENTE; MORCILLO, 1998).

Guo et al., 2019 estudou o efeito da umidade na corrosão do aço inoxidável 304L sob gotas de solução de MgCl_2 e foi observado que variações de umidade relativa tendem a formar vários pequenos pontos de corrosão enquanto que a exposição à umidade contínua e constante resulta na formação de um único pite grande e profundo. Isso ocorre porque a variação de umidade gera um ambiente favorável para a repassivação dos pites formados e outros novos tendem a se formar em outros locais. Enquanto que, a umidade constante favorece a continuidade do processo corrosivo dentro do pite formado inicialmente, aumentando seu tamanho, o que pode levar o material ao rompimento.

3.2.2 Corrosão Uniforme

Na corrosão uniforme ocorre a perda de espessura da superfície do material de forma uniforme, podendo gerar ruptura. Sua progressão é medida através de medições de perda de massa por unidade de superfície e por unidade de tempo, ou pela perda de espessura do metal corroído em função do tempo (ROBERGE, 2000; AHMAD, 2006; SCHWEITZER, 2009).

A corrosão uniforme pode ocorrer em atmosfera seca, atmosfera úmida, ambientes ácidos (contendo HCl , HClO_4 , H_3PO_4), contaminantes atmosféricos, água de processo

contendo sulfeto de hidrogênio, salmouras, atmosfera industrial, hidrocarboneto contendo hidrogênio e sulfeto (AHMAD, 2006).

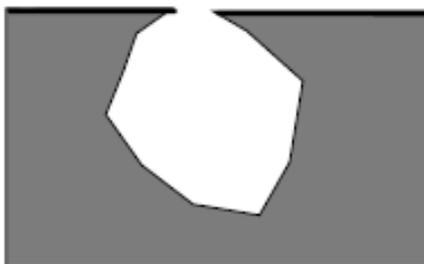
O menor ataque uniforme de materiais metálicos está associado ao caráter do filme protetor formado em suas superfícies. Um filme denso e compacto originado dos produtos de corrosão inibe a progressão deste tipo de corrosão (HUANG et al., 2016; WANG et al., 2018).

Em aços inoxidáveis austeníticos, a maior resistência à corrosão uniforme se dá pela maior composição de níquel na liga. Para uma melhor resistência à corrosão, as ligas austeníticas devem ser resfriadas rapidamente por água ou por um sopro de ar de cerca de 1050 a 1100 °C. A presença de molibdênio nas ligas melhoram a resistência a ambientes contendo cloretos e corrosão em fresta (REVIE, 2008).

3.2.3 Corrosão por Pite

A corrosão puntiforme ou por pites é a corrosão localizada que ocorre em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo cavidades denominadas pites (Figura 7). Essas cavidades apresentam o fundo em formato anguloso e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro. Apesar de afetar pequenas partes da região metálica, a corrosão por pites é muito prejudicial, pois causa rápida perda de espessura do material metálico originando perfurações e pontos de tensões, o que leva a diminuição da resistência mecânica do material e a possibilidade de fratura (AHMAD, 2006; LANDOLT, 2007; SCHWEITZER, 2009).

Figura 7: Corrosão por Pite.



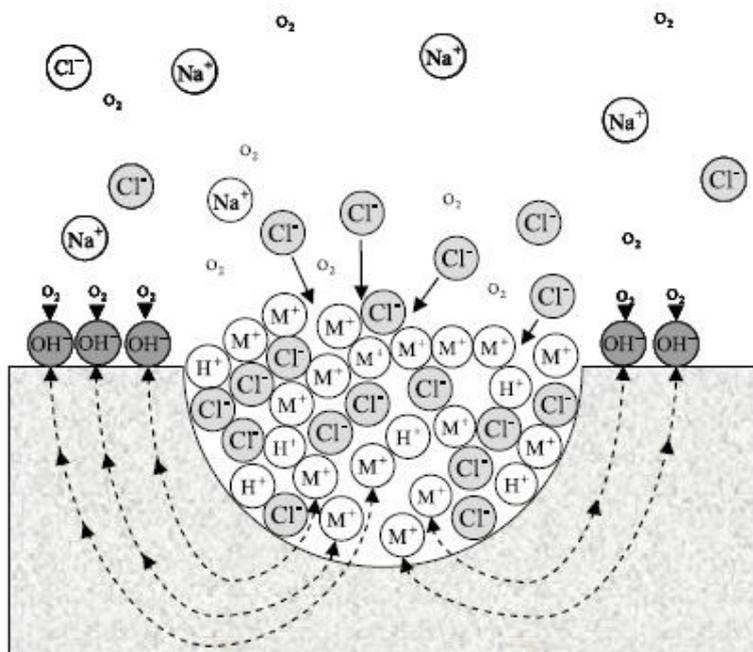
Fonte: LANDOLT, 2007

A corrosão por pite é um tipo de corrosão muito característica de materiais metálicos formadores de películas passivas. Existem vários mecanismos propostos para

explicar o início da formação do pite e que estão relacionados com a quebra da passividade do metal, além de condições associadas como a presença de íons halogênios, principalmente o cloreto, e estagnação do material em meios corrosivos (FRANKEL, 1998; AHMAD, 2006).

A ruptura da camada passiva presente na superfície metálica leva a formação de um ânodo, local onde ocorre a dissolução do metal. Os produtos de corrosão formados no ânodo não podem se espalhar, pois a região ao redor do ânodo não sofre corrosão, por formar o cátodo, região onde ocorre a redução de oxigênio, e então, a corrosão penetra no metal iniciando o pite. Este processo é lento, porém uma vez iniciado, ocorre um processo autocatalítico que favorece sua propagação devido à contínua dissolução do metal que promove um excesso de íons positivos como Fe^{2+} , Cr^{2+} e Ni^{2+} , por exemplo. Para manter o equilíbrio de cargas, íons de cargas negativas, como o Cl^- , por exemplo, migram do eletrólito para o interior do pite. Íons OH^- também migram para o interior do pite, porém mais lentamente, devido a menor mobilidade destes íons. O sal formado com esta migração sofre hidrólise, resultando na formação de ácido livre, HCl ($\text{H}^+ + \text{Cl}^-$), por exemplo. Em função disso, o pH no interior do pite diminui e acelera o processo corrosivo, pois se tem o ataque do HCl no material metálico e com conseqüente formação do sal, que por sua vez, sofre hidrólise mantendo o processo corrosivo até a perfuração do material (FRANKEL, 1998; ROBERGE, 2000; AHMAD, 2006). A Figura 8 ilustra esse processo autocatalítico.

Figura 8: Processo autocatalítico que ocorre na corrosão por pites.



Fonte: GENTIL, 1996.

Alguns elementos quando adicionados ao aço possuem a propriedade de aumentar a resistência à corrosão por pite, principalmente aqueles que contribuem para formação de camada de óxido protetora. Ha et al., 2018 estudou a influência de Mo na resistência à corrosão por pite em aço inoxidável austenítico 18Cr10Mn0,4N0,5C(0-2,17)Mo (em massa %) e verificou que as ligas de Mo estudadas apresentaram superior resistência à corrosão por pite quando comparado com os aços inoxidáveis austeníticos convencionais FeCrNi (UNS S30400 e S31603) em soluções contendo íons cloreto. No estudo foi observado que o aumento do teor de Mo diminui a diferença entre o potencial de formação de pite e o potencial em que o metal repassiva. O aumento da proteção do filme passivo foi atribuído à formação de filme com menos defeitos pontuais, atribuída ao aumento de Mo na liga, diminuindo desta forma, a taxa de propagação de pite. Ha et al., 2018 observou ainda que o Mo reduziu a taxa de dissolução das ligas em soluções ácidas de cloreto e que a liga com maior teor de Mo foi capaz de resistir à dissolução ativa em ácido forte.

Outros elementos quando adicionados ao aço podem causar um efeito contrário. Estudo sobre o efeito da adição de Nb na resistência à corrosão por pite de um aço inoxidável duplex contendo 0,2 e 0,5% de Nb em solução de NaCl 3,5% após recozimento e envelhecimento mostra que o maior teor de Nb contribui negativamente para a

resistência à corrosão por pite, pois favorece a formação de fase sigma e fase Laves. Estas fases reduzem o teor de Cr na matriz o que acaba reduzindo a resistência à corrosão por pite, por este ser um elemento importante para a resistência ao pite com a propriedade de formar uma camada passiva estável na superfície metálica (ITMAN FILHO et al., 2014; YU et al., 2018).

3.2.4 Passivação

A passividade pode ser definida de várias maneiras, porém dois conceitos se tornaram geralmente aceitos: um metal é passivo se resiste substancialmente à corrosão em um ambiente onde há uma grande força motriz termodinâmica para a sua oxidação, ou, um metal é passivo se, aumentando seu potencial para valores mais positivos, a taxa de dissolução diminui, exibindo baixas taxas em altos potenciais (KELLY et al., 2003). A passividade se dá pela presença de um filme sólido interfacial com cerca de 1-10 nm de espessura, geralmente um óxido muito resistente, contínuo e estável que apresenta a função de inibir ou impedir um processo corrosivo (SHREIR; JARMAN; BURSTEIN, 2000; KELLY et al., 2003; AHMAD, 2006).

Muitas estruturas e componentes metálicos dependem da estabilidade no estado de passividade. Sem o filme de óxido passivo, muitas estruturas metálicas corroeriam a uma taxa muito rápida, este fato é evidenciado pelas taxas muito rápidas nas quais a corrosão localizada pode se propagar quando a passividade é rompida e a regeneração do filme de óxido passivo não pode ocorrer. Este filme de óxido fino é a barreira de estabilização que separa o metal potencialmente ativo do ambiente (SHREIR; JARMAN; BURSTEIN, 2000).

A película passiva é geralmente formada pela combinação do oxigênio do ar com metais como cromo, ferro, níquel, titânio e muitas das ligas desses metais. Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão em meio a uma grande variedade de atmosferas como resultado desse processo de interação. Eles contêm altos teores de cromo, o qual, minimiza a formação de ferrugem e forma uma película protetora sobre a superfície em atmosferas oxidantes. O alumínio também apresenta alta resistência à corrosão em diversos ambientes por se passivar (CALLISTER, 2008).

Estudos revelam que os filmes passivos de cromo em aços inoxidáveis apresentam uma estrutura de bicamada composta internamente por óxido e externamente por

hidróxidos. A camada interna de óxido apresenta concentração de Cr^{+3} muito superior ao teor nominal de cromo da liga, esta barreira aumenta durante o envelhecimento do filme em solução aquosa, porém o filme passivo não apresenta óxido de cromo puro somente, ele apresenta também cátions Fe^{+2} e Fe^{+3} (MARCUS; MANSFELD, 2005).

Em metais a base de ferro, a camada passiva também apresenta duas partes: uma parte interna composta de Fe^{+2} e uma camada externa composta por Fe^{+3} , sendo que a composição destas camadas muda de acordo com o potencial devido às transformações anódicas e catódicas que ocorrem na camada (MARCUS; MANSFELD, 2005).

3.3 Ensaios para Avaliação da Resistência à Corrosão

3.3.1 Névoa Salina (*Salt Spray*)

Os ensaios em câmaras de névoa salina são amplamente utilizados pela indústria para avaliação do processo de corrosão dos materiais. Este ensaio é um método padronizado em que as amostras são colocadas em uma câmara fechada que simula um ambiente corrosivo rico em cloreto através da pulverização de solução de cloreto de sódio, de modo que a durabilidade dos materiais é reduzida (TOMIELLO, 2012).

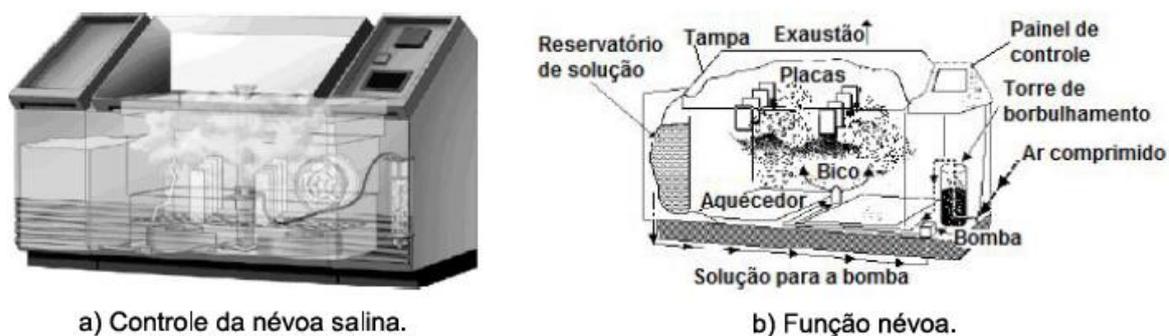
O ensaio de névoa salina é geralmente realizado em condições mais agressivas do que àquelas encontradas em ambientes reais ou de serviço, com isso, este ensaio acelera os mecanismos de corrosão e permite o estudo do material num curto intervalo de tempo (BEDOYA et al., 2011).

O aparecimento de pontos de corrosão no material é avaliado ao longo do tempo de ensaio e quanto mais tempo de ensaio um material resiste sem o surgimento de pontos de corrosão, maior sua resistência à corrosão (TOMIELLO, 2012).

A aparelhagem para o ensaio de névoa salina é constituída de câmara de ensaio, reservatório de solução, fonte de ar comprimido, bico (s) pulverizador (es), suportes de corpos de prova, dispositivo para aquecimento da câmara e painel de controle para controlar as condições de operação durante o ensaio (ABNT, 1983).

A Figura 9 mostra um modelo de câmara de névoa salina e as partes que a compõe.

Figura 9: Esquema de funcionamento da câmara de névoa salina.



Fonte: ROBERGE, 2000.

Palm & Krieg, 2012 estudaram ligas de Fe-Al e Fe-Al-X usando testes de névoa salina e os resultados mostraram que a resistência à corrosão das ligas binárias Fe-Al melhora quando a concentração de Al é aumentada de 5 para 30%, concluindo-se que o aumento do teor de Al melhora o comportamento do material frente à corrosão. A resistência à corrosão pode ser melhorada com a adição de elementos indutores de passividade, entre os quais Mo se mostra ser um dos mais eficazes.

Névoa salina também foi empregada em estudos de materiais com revestimento *self healing* (auto cura) e foi observado que o desempenho anticorrosivo deste revestimento composto por microcápsulas contendo diisocianato de hexametileno (HDI) foi influenciado pelo diâmetro médio das microcápsulas presentes no revestimento, pela fração mássica dessas microcápsulas e pela espessura do revestimento (HUANG; YANG, 2014).

3.3.2 Potencial em Circuito Aberto

O potencial em circuito aberto, do inglês *Open Circuit Potential* – OCP, é a medida direta do potencial assumido pelo metal, com relação a um eletrodo de referência, sem aplicação de potencial ou corrente a partir de fontes externas, na presença de uma solução de baixa resistividade elétrica e é dado pela interseção da curva de polarização anódica com a curva de polarização catódica (WOLYNEC, 2003).

Em muitas aplicações o valor do potencial de corrosão é acompanhado ao longo do tempo, sendo conveniente fazer um registro contínuo da variação do potencial, sobretudo nos estágios iniciais do ensaio (WOLYNEC, 2003).

Os metais que apresentam uma camada de óxido em sua superfície, quando imersos em solução corrosiva apresentam uma queda do potencial de corrosão devido à dissolução desta película passiva. A dissolução da película diminui a proteção da superfície do material e a torna mais vulnerável ao ataque corrosivo. Em alguns casos pode-se acontecer o inverso, dependendo do meio, o potencial de corrosão pode aumentar consideravelmente devido à formação na superfície do metal de uma película passiva ou pseudo-passiva pelo mecanismo de precipitação (WOLYNEC, 2003).

3.3.3 Curva de Polarização Cíclica

Os ensaios de curva de polarização cíclica fornecem informações importantes sobre os mecanismos de corrosão e a influência de determinadas condições ambientais sobre os materiais estudados. Essa técnica envolve a imposição de um potencial, através de um potenciostato, ao eletrodo de trabalho e o monitoramento da corrente produzida em função do tempo ou do potencial (WOLYNEC, 2003; SANTOS, 2016).

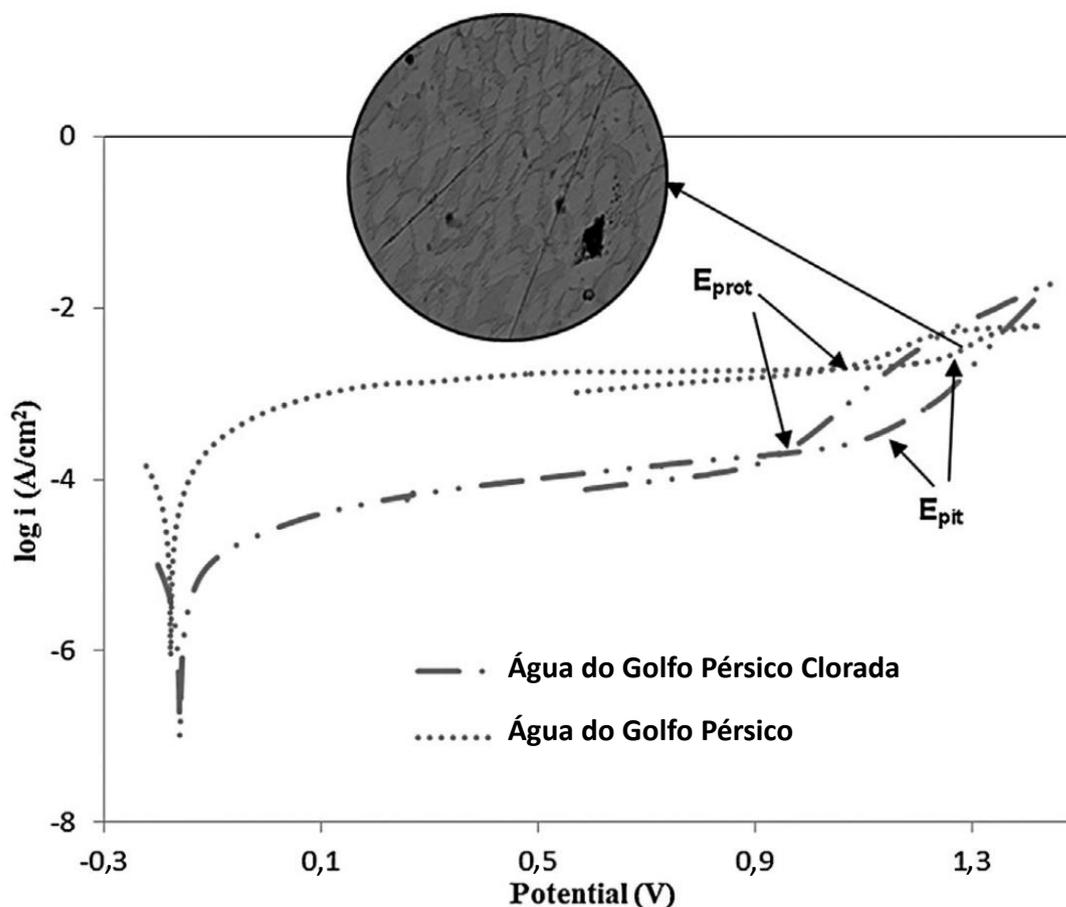
Estes ensaios são frequentemente utilizados para avaliar a suscetibilidade a pites e consiste na varredura do potencial em um único ciclo ou até um pouco menos de um ciclo contemplando a polarização anódica e catódica. A polarização é considerada anódica com a imposição de valores positivos à interface metal/eletrólito em relação ao potencial de corrosão e considerada catódica, quando os valores impostos à interface são mais negativos em relação ao potencial de corrosão. A parte anódica da curva de polarização evidencia o comportamento do metal nos estudos frente à corrosão e o tamanho da histerese é examinado junto com as diferenças entre os valores do potencial de corrosão do circuito aberto de partida e o potencial de passivação de retorno. A existência da histerese é geralmente indicativa de ocorrência de pite, enquanto o tamanho do loop é frequentemente relacionado à quantidade (SANTOS, 2016).

Ensaio de curva de polarização cíclica foram usados para avaliar a resistência à corrosão de aços inoxidáveis em uma mistura ácida contendo solução saturada de $C_4H_6O_6$ (ácido tartárico), H_2SO_4 e HCl , em função da temperatura e possibilitaram concluir que os elementos Cr e Mo desempenham um importante papel na transição ativo-passiva das ligas testadas (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018). Em seu estudo, Ferreira et al., 2018 realizou ensaios de curva de polarização cíclica que se mostraram uma importante ferramenta no estudo frente à corrosão. Com as curvas foram obtidos o

potencial de corrosão (E_{corr}), potencial de corrosão transpassivo (E_t) e o potencial de corrosão por pitting (E_p) para os aços inoxidáveis 316L e duplex em solução aquosa de H_2SO_4 0,05 M contendo 250 e 3500 ppm de cloreto a 120 °C e foi possível avaliar e comparar os materiais com relação a resistência à corrosão por pite (FERREIRA et al., 2018).

No estudo de Kahram et al. (2014) com o aço inoxidável duplex SAF 2205 em meios contendo água do mar e água do mar clorada, as curvas de polarização mostraram a formação de camada passiva na superfície das amostras em ambas soluções. As curvas de polarização indicam que o potencial de corrosão das amostras na água do mar clorada é mais positivo quando comparado com a água do mar sem adição de cloro, enquanto que a corrente de corrosão na água do mar normal é maior. A Figura 10 ilustra as curvas de polarização obtidas por Kahram et al. (2014) em seu estudo sobre a resistência à corrosão do aço inoxidável duplex SAF 2205.

Figura 10: Curvas de polarização cíclicas do aço inoxidável duplex SAF 2205 em meios contendo água do mar.



Fonte: KAHRAM et al., 2014.

3.3.4 Ensaio de Exposição em Campo

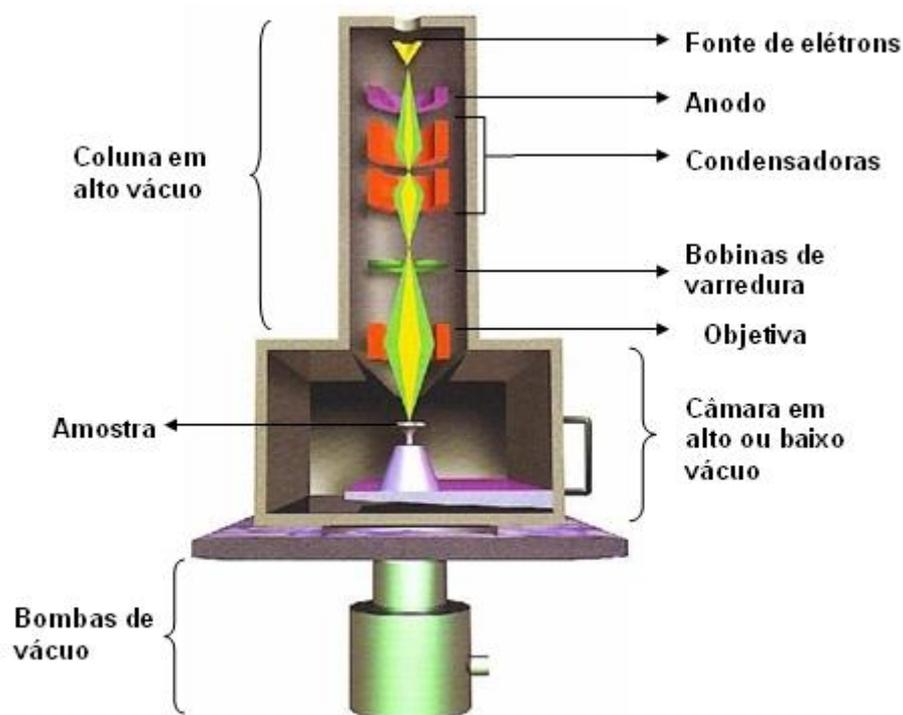
Quando o aço é aplicado a uma estrutura é importante determinar se ela é adequada ao meio ambiente e isso pode ser determinado com base em resultados de testes de exposição. Os ensaios de corrosão em campo além de possibilitar a avaliação do comportamento dos materiais nas condições reais de aplicação, ele possibilita estimar a sua durabilidade (KAGE et al., 2006).

Vera et al., 2013 usou os ensaios de exposição em campo para avaliar o comportamento de aço galvanizado em ambientes marinhos. A avaliação visual da superfície de Zn do aço galvanizado mostrou que os produtos de corrosão branca aderem à superfície do metal durante a exposição às condições do teste. Depois de três meses de exposição, o aço galvanizado apresentou uma superfície com produtos de corrosão identificados como zincite (ZnO) e *simonkolleite* ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$) por meio de difração de raios-X e micrografia. Após 6 meses de exposição, a aparência da superfície do aço mostrou que os produtos de corrosão solúveis formados por depósitos de sal foram lixiviados pela chuva.

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica não destrutiva utilizada para análise microestrutural de materiais, principalmente sólidos e é realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) com a irradiação de uma área da amostra por um feixe de elétrons capaz de explorar toda a superfície a ser analisada. A interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra gera a emissão de radiações tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos e fótons. Os elétrons secundários e os retroespalhados são os sinais de maior interesse para a formação da imagem, pois os elétrons secundários fornecem imagem da topografia da superfície da amostra, e os retroespalhados fornecem imagem que permite verificar a variação de composição (MALISKA, [s.d.]; SKOOG; CROUCH; HOLLER, 2009; TOMIELLO, 2012). A Figura 11 mostra um desenho esquemático de um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 11: Desenho esquemático de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: <http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As amostras utilizadas neste estudo foram fornecidas por uma empresa parceira situada na região sul fluminense e estão descritas a seguir.

- Aço revestido com zinco: aço carbono baixa liga apresentando 0,044% de C e revestimento de zinco obtido por imersão à quente do tipo AZ275, em que em ambas as faces da chapa de aço há aproximadamente 275 g/m² de revestimento.
- Aço revestido com liga 55% Al-Zn: aço carbono baixa liga apresentando 0,040% de C e revestimento obtido por imersão à quente do tipo A150, em que em ambas as faces há aproximadamente 150 g/m² de revestimento, além de uma camada de resina de carbono sobre o revestimento metálico.
- Aço revestido com zinco e pré-pintado: aço carbono baixa liga apresentando 0,030% de C com revestimento de zinco do tipo AZ275 e revestimento orgânico

composto de camada de primer de 5 μm e camada de tinta de 20 μm , ambos de base poliéster.

- Aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado: aço carbono baixa liga apresentando 0,036% de C com revestimento de zinco do tipo A150 e revestimento orgânico composto de camada de primer de 5 μm e camada de tinta de 20 μm , ambos de base poliéster.
- Aço inoxidável duplex SAF 2205: aço inoxidável com microestrutura bifásica composto de 28,04% Cr, 4,39% Ni, 2,53% Mo, 0,41% Si, 0,14% N e 0,02% C.

Os ensaios foram conduzidos utilizando reagentes de grau analítico listados a seguir.

- Cloreto de sódio P.A – Dinâmica, Brasil.
- Ácido clorídrico P.A – Anidrol, Brasil.
- Álcool isopropílico P.A ACS– Anidrol, Brasil.
- Água deionizada (17,3 M Ω -cm).

Os equipamentos e recursos utilizados na realização os ensaios estão relacionados abaixo.

- Câmara de *salt spray* modelo SS 1300EXP - série 00170307 - Equilam.
- Potenciostato/galvanostato VersaStat 3+ - Princeton Applied Research.
- Fita adesiva 3M.
- Suportes de madeira com ângulo de 45°.
- Célula eletroquímica confeccionada em acrílico.
- Eletrodo de referência de Ag| AgCl saturado com KCl ligado à solução através de um capilar de Luggin.
- Contra eletrodo de platina.
- Gaiola de Faraday.
- Lixa de granulometria 320.
- MEV FEI Quanta.
- MEV EVO MA10 - LMME da Universidade Federal Fluminense – Volta Redonda.

4.2 Métodos

4.2.1 Ensaio de névoa salina

As amostras de aço revestido com Zn, revestido com a liga 55% Al-Zn, pré-pintados e aço inoxidável duplex SAF 2205, com suas superfícies sem pré-tratamentos, no formato de chapas com dimensões de 20×15 cm e com as bordas protegidas com fita adesiva, para evitar o início do processo corrosivo através das bordas, foram colocadas em suportes dentro da câmara de *salt spray*, seguindo como referência as normas ASTM B117 e ABNT NBR 8094.

No interior da câmara a temperatura foi mantida a 35 ± 2 °C e as amostras foram pulverizadas com solução de cloreto de sódio à 5% m/v, de modo que a coleta de névoa ficasse em torno de 1,125 a 1,250 mL por hora. A pressão do saturador foi de 1 kg/cm² e a temperatura do saturador, de 47 °C. As amostras foram avaliadas durante os tempos de 48 h, 240 h e 500 h.

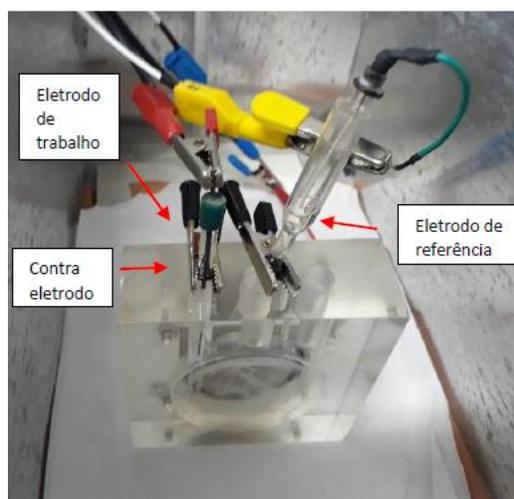
4.2.2 Ensaios Eletroquímicos

Para os ensaios eletroquímicos de potencial em circuito aberto (OCP) e curva de polarização cíclica foi utilizado um potenciostato/galvanostato VersaStat 3+ da marca Princeton Applied Research (Figura 12) e célula eletroquímica confeccionada em acrílico composta com eletrodo de trabalho (amostra do material estudado), um eletrodo de referência de Ag| AgCl saturado com KCl ligado à solução através de um capilar de Luggin e um contra eletrodo de platina, conforme Figura 13. O potenciostato foi conectado a um microcomputador que captou os dados do ensaio através do software “VersaStudio”.

Figura 12: Potenciostato/galvanostato VersaStat 3+ da marca Princeton Applied Research utilizado nos ensaios eletroquímicos.

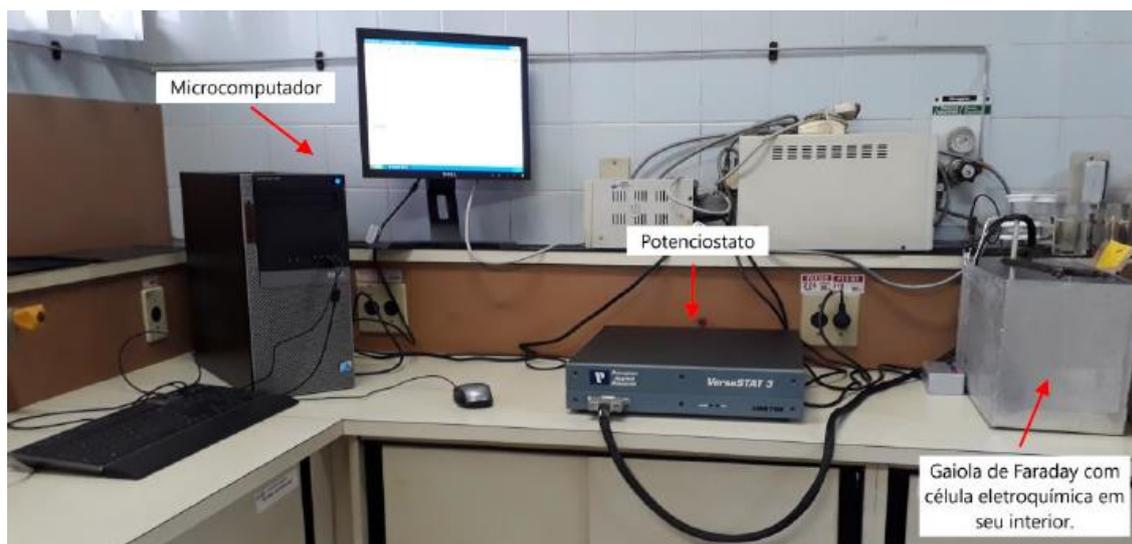


Figura 13: Célula Eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.



A Figura 14 mostra o sistema completo para a determinação do OCP composto de microcomputador equipado com o software “VersaStudio”, potenciostato VersaStat 3+ da marca Princeton Applied Research e célula eletroquímica dentro de uma gaiola de Faraday.

Figura 14: Sistema completo para ensaios eletroquímicos.



Para os ensaios eletroquímicos, as amostras de aço revestido com Zn, revestido com a liga 55% Al-Zn, pré-pintados e aço inoxidável foram cortadas com dimensões de 6×6 cm, lavadas com álcool isopropílico P.A, para remoção de interferentes como particulados e gorduras aderidas à superfície, e secas em atmosfera ambiente antes de serem acopladas na parte lateral da célula eletroquímica, destinada ao eletrodo de trabalho. As amostras não passaram por pré-tratamentos, somente pela limpeza superficial, para permitir a avaliação das condições reais dos materiais perante o meio corrosivo.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados a temperatura ambiente, com aeração, utilizando como eletrólitos solução de cloreto de sódio (NaCl) 3,5% m/m de pH 6,9, para simular um ambiente agressivo com alta concentração de cloreto, e solução de ácido clorídrico (HCl) 0,01M de pH 2,2, para simular um ambiente ácido contendo baixa concentração de cloreto, preparadas com reagente com grau analítico e água deionizada (17,3 MΩ-cm), que foi inserida na célula eletroquímica de modo que o eletrodo de referência e o contra eletrodo, inseridos na parte superior da célula eletroquímica, pudessem permanecer em contato com a solução. As amostras permaneceram em contato com o eletrólito em uma área de 8,6 cm², delimitada pelo o'ring da célula.

As amostras de aços pré-pintados foram lixadas, até remoção do revestimento orgânico da superfície, e acopladas à célula eletroquímica, na área destinada ao eletrodo de trabalho, com a extremidade lixada voltada para o exterior da célula. Essa remoção da tinta foi necessária para que a mesma não interferisse no contato do eletrodo de trabalho.

4.2.2.1 Potencial em Circuito Aberto

As medidas de potencial de circuito aberto foram realizadas durante uma hora e o software registrou os valores a cada segundo. Esse tempo foi aplicado a todas as amostras, pois verificou-se que após esse tempo o potencial não apresentava grandes variações.

Para que os eletrólitos pudessem permear o revestimento orgânico, antes de iniciar os ensaios com os aços pré-pintados, estes foram deixados imersos em solução eletrolítica de NaCl 3,5% m/m por 5 dias e para o ensaio em solução de HCl 0,01M, os materiais foram deixados imersos por 6 dias.

4.2.2.2 Curva de Polarização Cíclica

Para realização da curva de polarização foram mantidas as condições do ensaio anterior de cada amostra e então, realizou-se a varredura do potencial anódico com uma taxa de varredura de 1 mV/s, partindo de 0,150 V abaixo do potencial de circuito aberto e revertendo o sentido da varredura após a densidade de corrente anódica atingir 10^{-3} A/cm². A varredura foi concluída quando se observou o potencial decrescente.

A inversão do potencial foi usada como procedimento padrão neste trabalho para avaliar o tipo de corrosão sofrida pela amostra, ou seja, a inversão do potencial pode fornecer informações sobre o tipo de corrosão que pode ocorrer na superfície do eletrodo. Se, após a inversão, as densidades de corrente forem menores que as antes da inversão da varredura de potencial, o processo corrosivo pode ser caracterizado como sendo generalizado, por outro lado, se as densidades de corrente forem maiores que as da varredura direta, o processo corrosivo pode ser considerado localizado (SANTOS, 2016).

Após os ensaios, as amostras foram guardadas para posterior análise da superfície por MEV para avaliação da ocorrência de pites.

A curva de polarização não foi obtida para os materiais pré-pintados devido à alta resistência das amostras à transferência de cargas.

4.3 Ensaio de Exposição em Campo

Nesta investigação, placas das amostras estudadas foram cortadas nas dimensões de 15×10 cm e expostas em um suporte com uma inclinação de 45°, conforme Figura 15,

em uma área da linha de decapagem de uma indústria siderúrgica próxima ao tanque de ácido. Os materiais foram examinados após setenta e cinco dias e para o material aço inoxidável SAF foi feita uma avaliação após um ano de exposição.

Após a retirada das amostras da área, estas foram lavadas com álcool isopropílico para remoção de sujeiras depositas na superfície durante o tempo de exposição e guardadas para caracterização da superfície por MEV/ EDS.

As amostras de aços pré-pintados foram analisadas por MEV/EDS, com tinta e sem tinta, para avaliar a possibilidade do meio corrosivo ter atingido o substrato. A remoção de tinta foi realizada utilizando solução de peróxido de hidrogênio e solução contendo hidróxido de amônio, anilina, álcool e água.

Figura 15: Amostras de aço expostas em área de decapagem ácida.



4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise da superfície da amostra, antes e após o ensaio eletroquímico de curva de polarização e após exposição das amostras em campo, foi realizada utilizando um microscópio eletrônico de varredura - MEV FEI Quanta equipado com a técnica de microanálise elementar por Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-X (EDS). Nas análises foram utilizados os detectores de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados ETD (*Everhart-Thornley Detector*) e BSED (*Backscattered Electrons Detector*), respectivamente, com os softwares XT Microscope Control para tratamento de imagens e EDAX Genesis para determinação da composição química superficial. A tensão de aceleração do feixe de elétrons foi de 15 kV.

Para a análise da superfície das amostras após teste de exposição em campo foi utilizado o MEV EVO MA10 do laboratório LMME da Universidade Federal Fluminense – Volta Redonda, utilizando detector de elétron secundário, ETD, para as imagens microscópicas e EDS para determinação da composição química.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a condução deste trabalho, amostras de diferentes aços expostos a névoa salina e ambientes aquosos ácidos e/ou salinos foram avaliados por inspeção visual e empregando-se técnicas eletroquímicas como potencial de circuito aberto e curva de polarização cíclica, bem como, através de análise por microscopia eletrônica de varredura. Desta forma, inicialmente serão introduzidos os resultados de névoa salina, e posteriormente serão apresentados os resultados da caracterização eletroquímica, teste em campo e aqueles obtidos por microscopia eletrônica de varredura de maneira a se identificar o comportamento dos diferentes aços avaliados quando expostos a essas condições de ambientes agressivos.

5.1 Névoa Salina

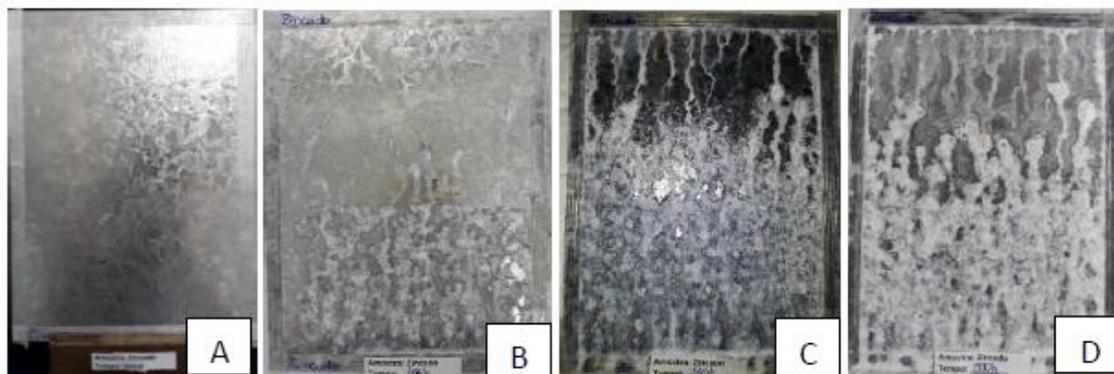
Os diferentes aços avaliados nesse estudo, revestidos com zinco; revestidos com a liga 55% Al-Zn; inox duplex SAF 2205; revestido com Zn e pré-pintado e revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado foram condicionados em atmosfera rica em cloreto através dos ensaios de névoa salina. Após cada intervalo de tempo de 48, 240 e 500 h as amostras foram avaliadas visualmente com o objetivo de identificar possíveis manifestações de processo corrosivo. Os resultados da inspeção visual para cada um dos intervalos de tempo analisados podem ser observados na Tabela 1, sendo que o maior tempo de exposição analisado foi o de 500 h.

Tabela 1: Resultados do ensaio em câmara de névoa salina.

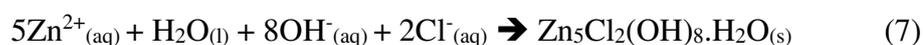
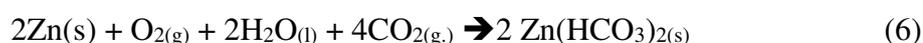
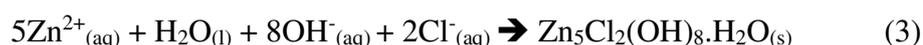
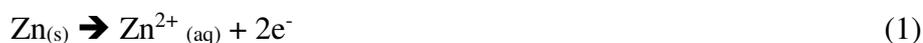
Tempo de ensaio	48 horas	240 horas	500 horas
Material			
Revestido com Zn	+/- 35% de corrosão branca	+/- 60% de corrosão branca	+/- 90% corrosão branca com pontos de corrosão vermelha
Revestido com a liga 55% Al-Zn	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão	Pontos escurecidos no revestimento, sem evidências de corrosão vermelha
Inox duplex SAF 2205	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão
Revestido com Zn e pré-pintado	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão
Revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão	Sem vestígio aparente de corrosão

Na avaliação dos materiais verificou-se que o material revestido com Zn com 48 horas de ensaio já apresentava aproximadamente 35% de corrosão branca, com 240 horas, 60% de corrosão branca e com 500 horas verificou-se o surgimento de corrosão vermelha, indicando que o aço-base já estava sofrendo ataque do meio corrosivo. A Figura 16 mostra o material revestido com Zn em cada tempo avaliado.

Figura 16: Material revestido com Zn. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.



O tempo de exposição à umidade, a temperatura e a presença de cloreto favorecem a formação da corrosão branca, ou ferrugem branca, em aços galvanizados como produto da corrosão do revestimento de zinco. Geralmente os produtos formados nas condições citadas podem ser hidróxidos, óxidos e sais de zinco (RUELA; SILVEIRA, 2017). Os principais processos que podem ocorrer na superfície zincada para formação dos produtos de corrosão são representados pelas equações de 1 a 7 (ROSA, 2009; VERA et al., 2013).



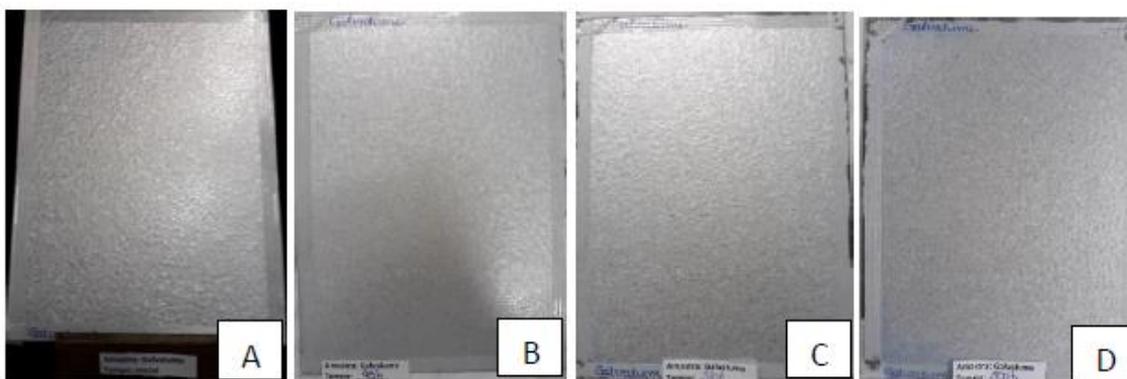
A progressão da corrosão do zinco diminui a espessura do revestimento até atingir o aço-base, iniciando o processo corrosivo deste, identificado pela presença de produtos de corrosão vermelha, que é o resultado da interação do meio corrosivo com o ferro presente no aço.

O material revestido com a liga 55% Al-Zn apresentou escurecimento em pequenos pontos do revestimento após 500 h de exposição à névoa salina, resultado do processo de

oxidação do alumínio devido à degradação da camada de resina de carbono que este tipo de material apresenta sobre seu revestimento. Contudo, corrosão vermelha não foi observada no aço-base.

A Figura 17 mostra o material revestido com a liga 55% Al-Zn em cada tempo avaliado.

Figura 17: Material revestido com a liga 55% Al-Zn. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.



Os demais materiais estudados não apresentaram pontos de corrosão até 500 h, conforme Figuras 18, 19 e 20. Com isso, já se observa a superior resistência a corrosão dos materiais pré-pintados e aço inoxidável duplex SAF 2205 em ambientes contendo cloreto.

Figura 18: Aço inoxidável duplex SAF 2205. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.



Figura 19: Material revestido com Zn e pré-pintado. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.

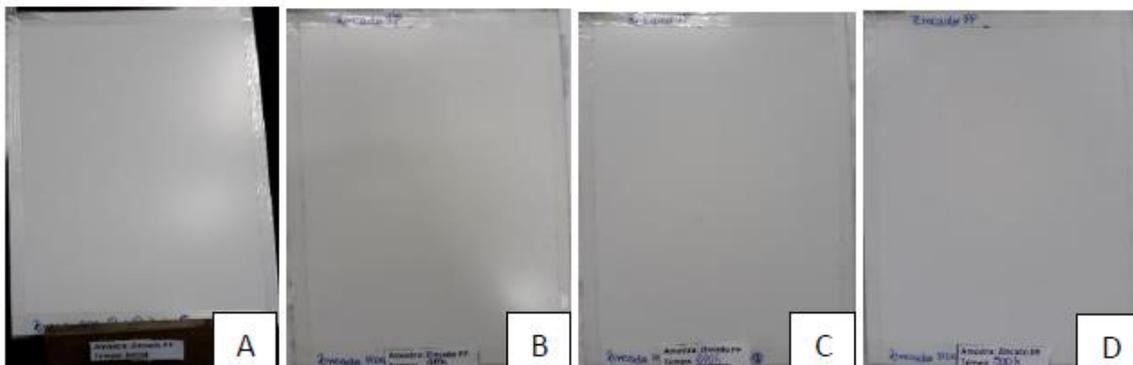
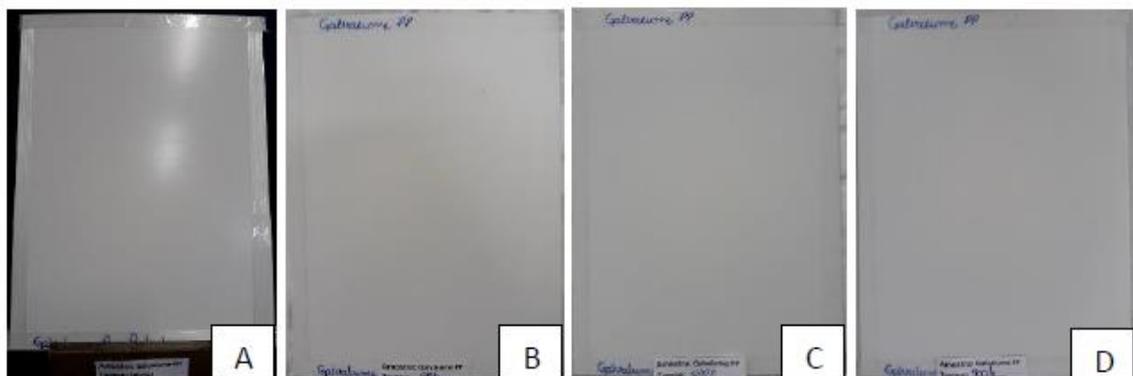


Figura 20: Material revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado. A) Antes do ensaio de névoa salina. B) Após 48 h de ensaio. C) Após 240 h de ensaio. D) Após 500 h de ensaio.



5.2 Potencial em Circuito Aberto

As medidas eletroquímicas de potencial em circuito aberto foram realizadas nas amostras para se avaliar o potencial de corrosão, bem como, seu comportamento em função do tempo. Na tabela 2 estão os valores de OCP obtidos após uma hora de medição para cada material estudado nas soluções de NaCl 3,5% m/m e HCl 0,01M.

Tabela 2: Resultados de Potencial de Circuito Aberto

Material	OCP (V)	
	Eletrólito	
	NaCl 3,5% m/m	HCl 0,01M
Revestido com Zn	-1,004	-1,007
Revestido com a liga 55% Al-Zn	-0,980	-0,934
Inox duplex SAF 2205	0,120	0,410
Revestido com Zn e pré-pintado	-0,952	-0,981
Revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado	-0,981	-0,888

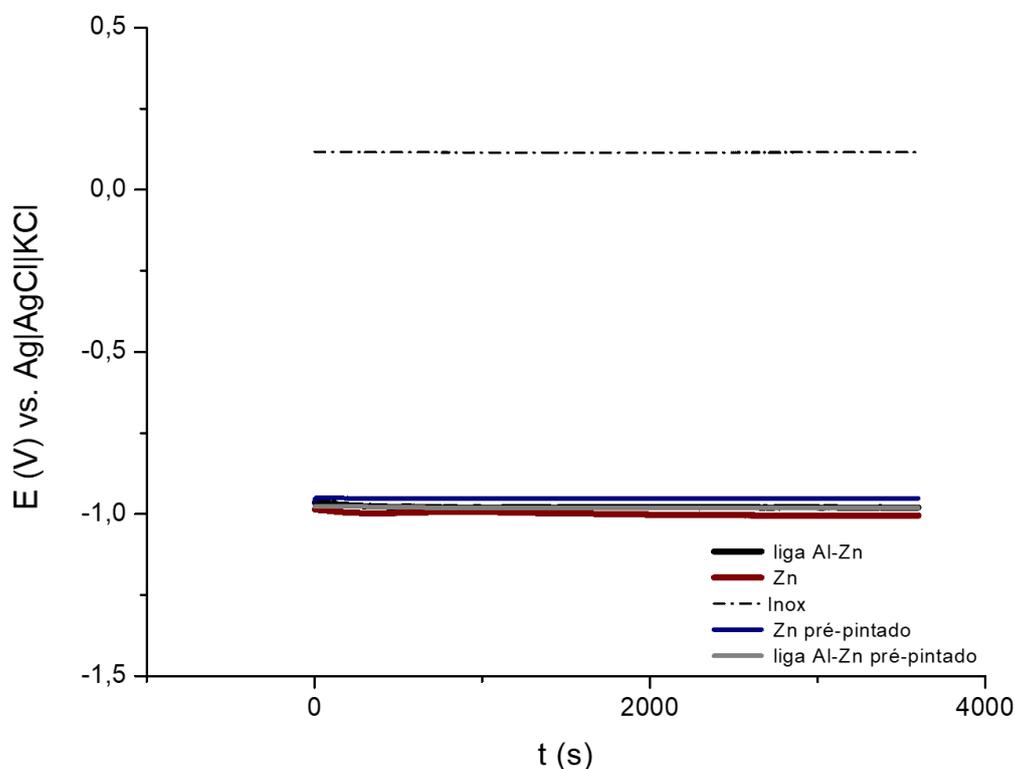
Entre os materiais estudados, o aço inoxidável SAF 2205 apresentou valores de OCP mais nobre nos dois meios aplicados, mostrando sua superior resistência à corrosão.

Entre os aços revestidos sem pintura, o material revestido com a liga 55% Al-Zn apresenta maior potencial do que o material revestido com Zn, indicando que a presença de Al no revestimento colabora significativamente para o aumento do potencial de corrosão do material, visto que promove uma eficiente proteção por barreira associada à proteção galvânica.

O material revestido com Zn apresenta OCP aproximados nos dois meios estudados com uma pequena superioridade do OCP em solução de NaCl, já os materiais aço inoxidável SAF 2205 e aço revestido com a liga 55% Al-Zn apresentaram OCP maior na solução de HCl 0,01M, indicando serem mais resistentes no meio ácido com baixa concentração de cloretos do que em meio com alta concentração destes íons.

As Figuras de 21 a 24 mostram o comportamento do potencial de circuito aberto de cada amostra estudada em função do tempo nas soluções de NaCl 3,5% m/m e HCl 0,01M.

Figura 21: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço inoxidável duplex SAF 2205, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de NaCl 3,5% m/m.



A variação do potencial de circuito aberto pode ser associada à formação e à dissolução de camada passiva. Conforme literatura já mencionada (WOLYNEC, 2003), o aumento do potencial de circuito aberto pode ser atribuído à formação de uma película protetora de espécies adsorvidas resultantes de processo corrosivo, enquanto que a diminuição do potencial, pode ser associada à dissolução desta película.

Durante as medidas de potenciais em solução de NaCl, verificou-se que o material revestido com Zn apresentou, inicialmente, diminuição do potencial que com o tempo manteve-se com um curto período de estabilidade e posteriormente, apresentou um leve aumento, vindo a diminuir novamente até manter um período estável. O material revestido com a liga 55% Al-Zn apresentou, inicialmente, pequeno aumento de potencial que com o tempo foi decrescendo até manter-se sem grandes variações. Estes materiais, assim como, o material revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado, apresentaram potencial, após o tempo de acompanhamento, menor do que o potencial inicial, indicando a possibilidade de dissolução de camada protetora.

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos para os materiais aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de NaCl 3,5% m/m, estes foram colocados em um gráfico na Figura 22.

Nakazato (NAKAZATO, 1997) em seu estudo citou o potencial mais positivo de materiais zincados no início do ensaio como sendo resultado do recobrimento da superfície com óxido de zinco devido à reação espontânea do zinco com o oxigênio que em seguida, forma $Zn(OH)_2$ e Zn^{+2} em solução.

O material revestido com Zn e pré-pintado apresentou uma pequena queda de potencial após um curto período de aumento de potencial, no início das medições. Já o potencial do aço inoxidável duplex SAF 2205 apresentou queda nos primeiros 15 minutos de medição. Após este tempo, o potencial manteve-se sem grandes variações.

Figura 22: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de NaCl 3,5% m/m.

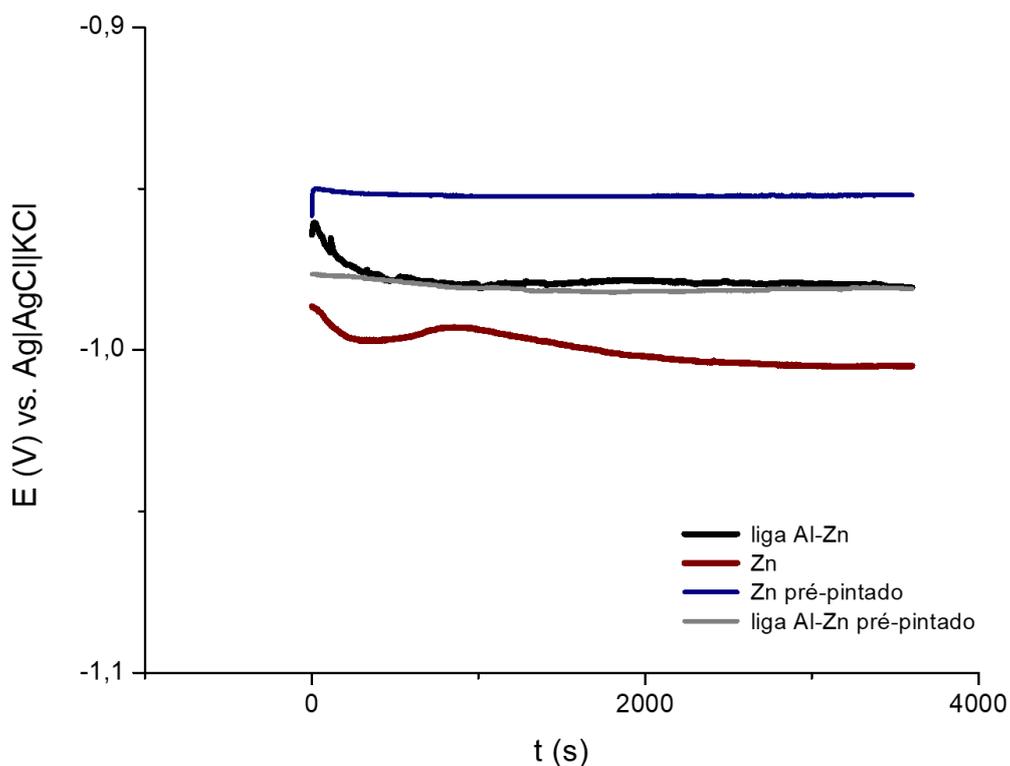
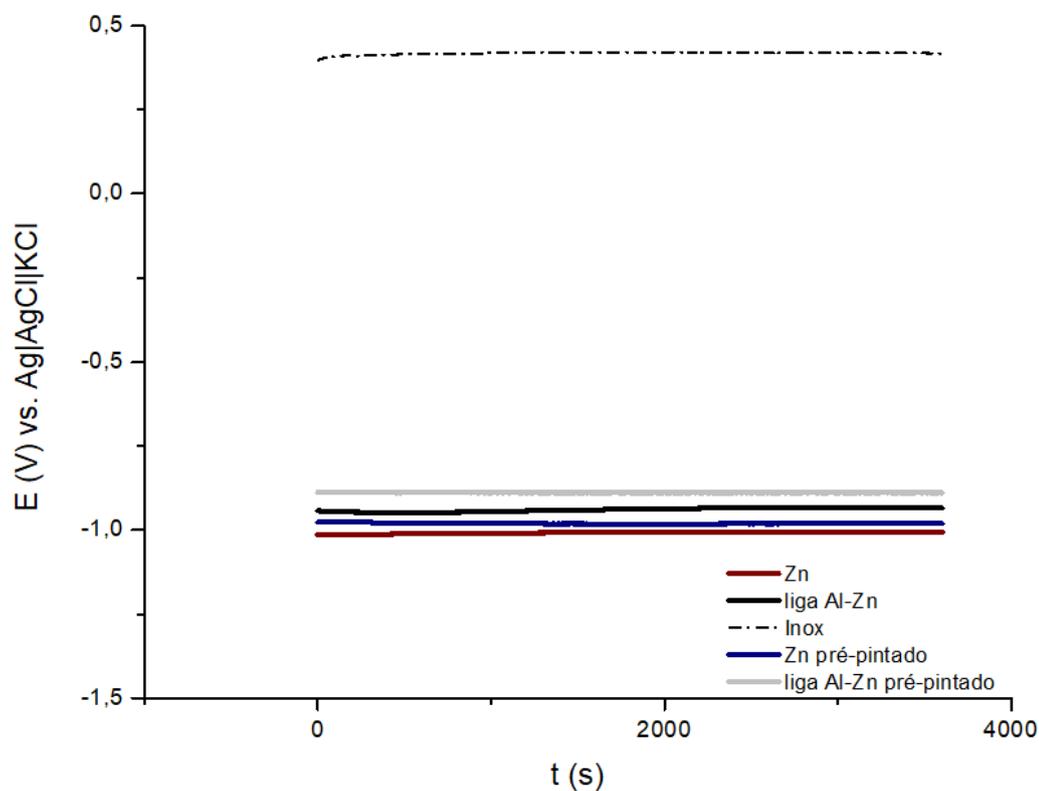
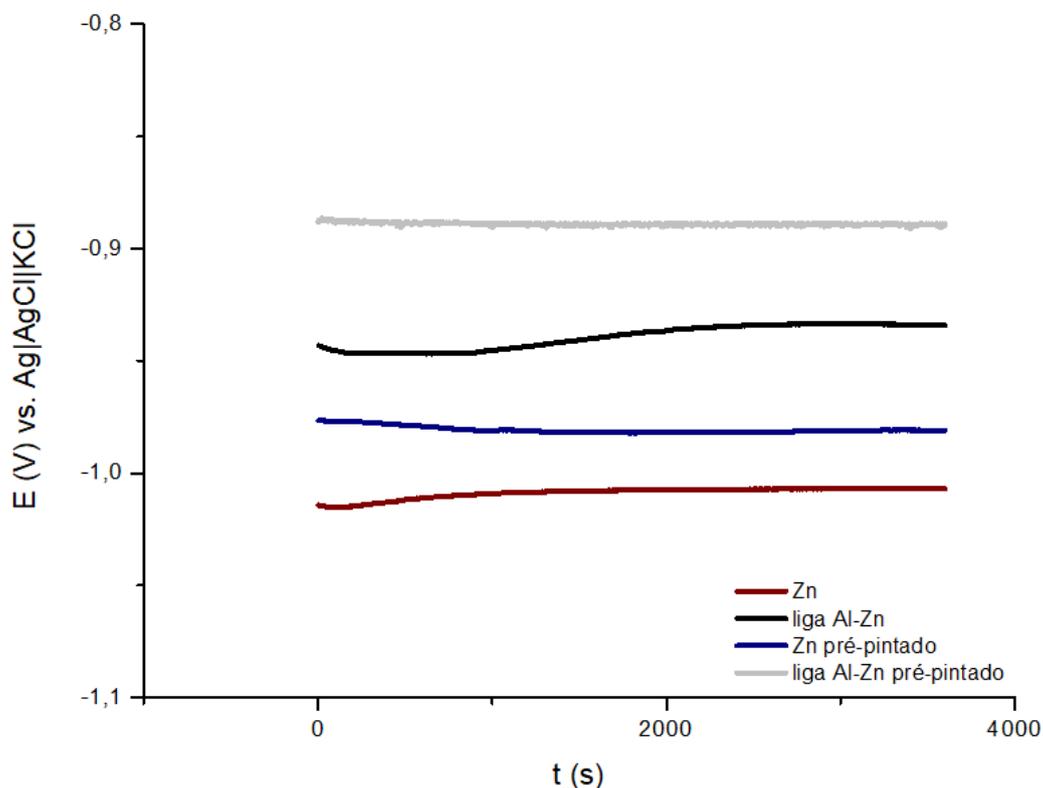


Figura 23: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço inoxidável duplex SAF 2205, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de HCl 0,01M.



Para uma melhor visualização dos resultados obtidos para os materiais aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de HCl 0,01M, estes foram colocados no gráfico na Figura 24.

Figura 24: Potencial de circuito aberto das amostras de aço revestido com Zn, aço revestido com liga 55% Al-Zn, aço revestido com Zn e pré-pintado e aço revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado em solução de HCl 0,01M.



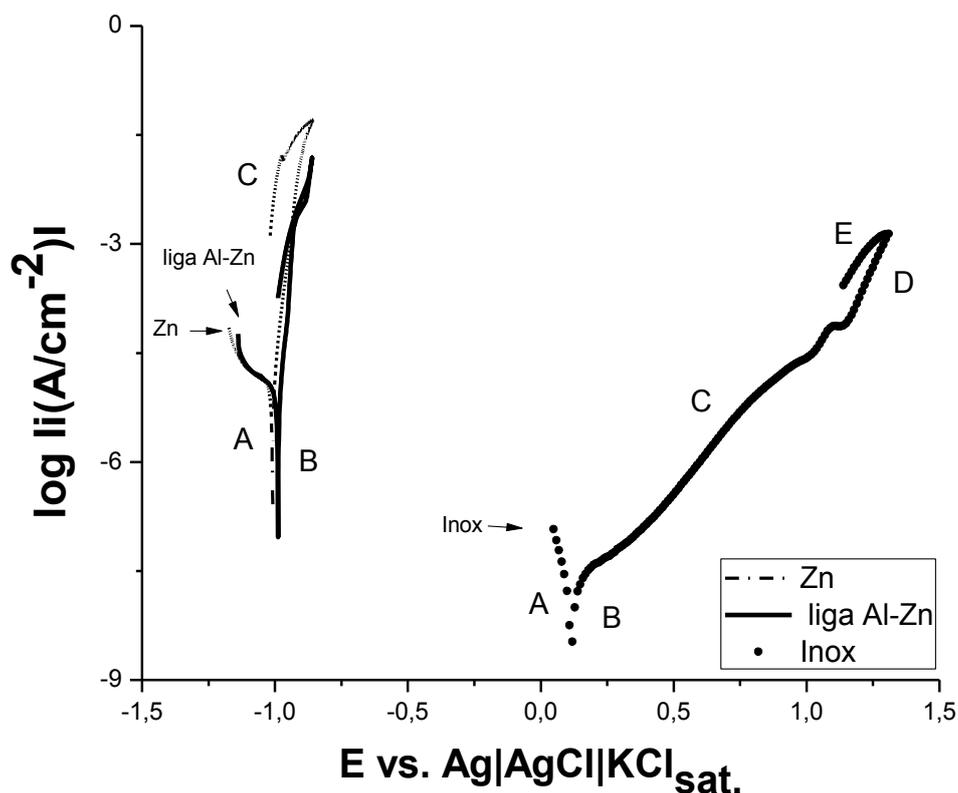
Analisando as curvas das medições de OCP na solução de HCl, verifica-se que o comportamento dos materiais revestidos com Zn e com a liga 55% Al-Zn tenderam ao aumento de seus potenciais quando comparados aos potenciais iniciais, fato que pode ser atribuído à formação de camada protetora em suas superfícies (WOLYNEC, 2003). Já o aço inoxidável duplex SAF 2205 apresentou decréscimo quando comparado seu potencial final com o inicial, o que é atribuído à dissolução da camada passiva comumente presente na superfície de metais que sofrem passivação.

5.3 Curva de Polarização Cíclica

Posteriormente aos ensaios de potencial em circuito aberto, o ensaio de curva de polarização cíclica foi realizado nas soluções de NaCl 3,5% m/m e HCl 0,01M para a obtenção de informações em relação a influência destas condições ambientais sobre os materiais estudados.

A Figura 25 apresenta as curvas de polarização cíclicas para os materiais revestido com Zn, revestido com liga 55% Al-Zn e aço inoxidável duplex SAF 2205 em solução de NaCl 3,5% m/m.

Figura 25: Curvas de polarização dos materiais revestidos e aço inoxidável duplex SAF2205 em solução de NaCl 3,5% m/m.



As curvas de polarização em solução de NaCl 3,5% m/m dos aços revestidos com Zn e com a liga 55% Al-Zn apresentam três regiões distintas enquanto que, a curva do aço inoxidável SAF 2205 apresenta cinco regiões.

A região identificada como A corresponde a parte catódica da curva de polarização e nela estão os potenciais abaixo do potencial de corrosão (E_{corr}). Nesta região a taxa de dissolução do metal é baixa devido à predominância de reações catódicas.

Na inversão entre a região A e B se dá o potencial de corrosão (E_{corr}), que nas curvas ilustradas na Figura 21 é definido, para cada material estudado, pelos valores que estão na tabela 3. Estes valores estão de acordo com os valores obtidos no ensaio de potencial em circuito aberto.

Tabela 3: Potenciais de corrosão obtidos através do ensaio de curva de polarização em solução de NaCl 3,5% m/m.

Material	E_{corr} (V)
	Eletrólito
	NaCl 3,5% m/m
Revestido com Zn	-1,008
Revestido com a liga 55% Al-Zn	-0,988
Inox duplex SAF 2205	0,119

A região B, logo após o potencial de corrosão, corresponde à varredura do potencial onde a oxidação é maximizada. A partir desta região tem-se a parte anódica da curva de polarização, onde pode ocorrer a dissolução anódica do metal ou reações de interface metal/solução.

Na região C, no aço inoxidável duplex SAF 2205, ocorre decréscimo do coeficiente de inclinação da reta, ou seja, a densidade de corrente se mantém sem grandes alterações em um determinado intervalo de potencial. Estudos como o realizado por Cheng et al., 2018, relacionam o comportamento nesta região anódica passiva à passivação do material e aumento da espessura do filme de óxido, resultando em uma baixa ou nenhuma taxa de corrosão. Esta região não é observada nos aços revestidos com Zn e com a liga 55% Al-Zn e pode estar associado à formação de um filme passivo menos eficiente do que o filme formado no aço inoxidável e que não inibe a transferência de cátions para a solução de eletrólito, favorecendo a oxidação (FERREIRA et al., 2013). Nestes materiais verifica-se somente região anódica ativa, em que a densidade de corrente aumenta com o potencial.

Na região D situa-se o potencial de pite (E_p), onde ocorre a quebra da passividade e inicia-se a formação de pite no material. No aço inoxidável esta região está bem definida com inclinação superior à região C, ou seja, há um aumento da densidade de corrente.

O E_p para o aço inoxidável duplex SAF 2205 foi de 1,283V. A presença de Cr no aço inox favorece o alto valor de potencial de pite quando comparado com os outros metais (FRANKEL, 2003). O inox apresenta E_p distante do E_{corr} (1,164V) devido ao intervalo de potencial em que ocorreu passivação. No caso dos materiais revestidos, ocorreu um

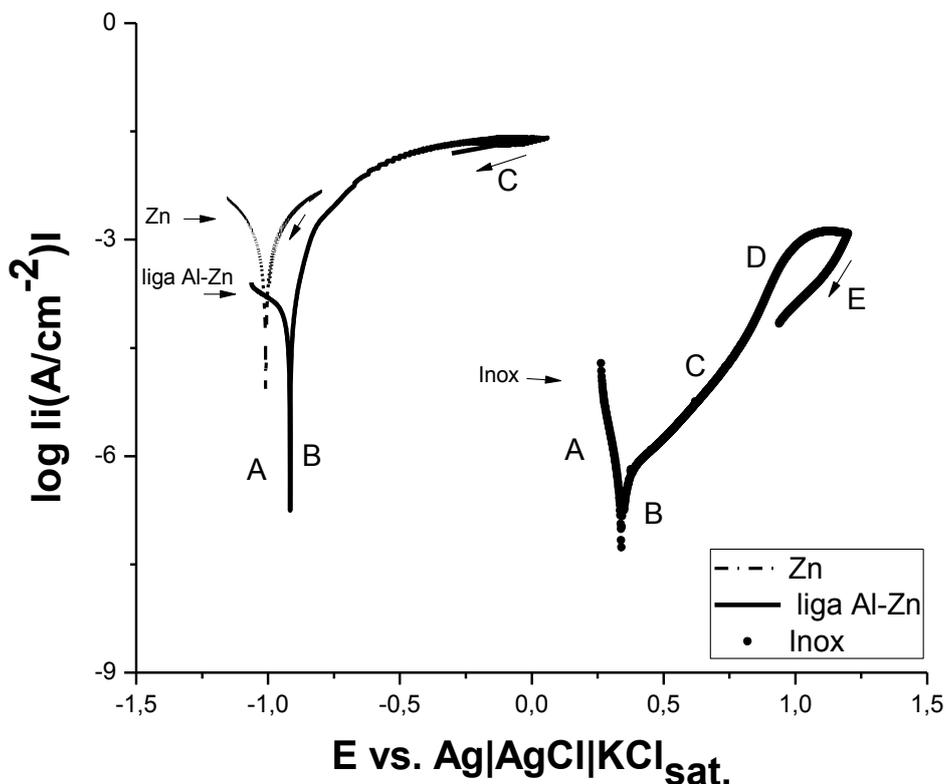
abrupto aumento da densidade de corrente para valores acima do OCP, sem a presença de uma região de corrente vs potencial característico de um material passivado indicando que o material sofreu, acima do OCP, corrosão generalizada.

A inversão de potencial ocorre na região E para o aço inoxidável e na região C para os aços revestidos e pode fornecer informações sobre a ocorrência de pite. Uma vez que, a existência da histerese é geralmente indicativa de ocorrência de pite, enquanto o tamanho do loop é frequentemente relacionado à quantidade (SANTOS, 2016).

O aço inoxidável apresentou histerese positiva no ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m, ou seja, apresentou valores de densidade de corrente maiores que os obtidos na varredura direta (antes de inverter a varredura), indicando que o ataque localizado foi iniciado, mesmo que discretamente (STEPHEN, 1994; FERREIRA et al., 2018). Os aços revestidos não apresentaram ou apresentaram menor loop, o que está associado à ausência de região passiva nestes materiais com a ocorrência de corrosão generalizada, conforme sugerido anteriormente

A Figura 26 apresenta as curvas de polarização para os materiais revestido com Zn, revestido com liga 55%Al-Zn e aço inoxidável duplex SAF 2205 em solução de HCl 0,01M.

Figura 26: Curvas de polarização dos materiais revestidos e aço inoxidável duplex SAF 2205 em solução de HCl 0,01M.



As curvas de polarização em solução de HCl 0,01M dos aços revestidos com Zn e com a liga 55% Al-Zn apresentam três regiões distintas enquanto que, a curva do aço inoxidável SAF 2205 apresenta cinco regiões.

A região identificada como A corresponde a parte catódica da curva de polarização e nela estão os potenciais abaixo do potencial de corrosão (E_{corr}). Nesta região a taxa de dissolução do metal é baixa devido à predominância de reações catódicas.

Na inversão entre a região A e B se dá o potencial de corrosão (E_{corr}), que nas curvas ilustradas na Figura 23 é definido, para cada material estudado, pelos valores que estão na tabela 4. Estes valores estão de acordo com os valores obtidos no ensaio de potencial em circuito aberto.

Tabela 4: Potenciais de corrosão obtidos através do ensaio de curva de polarização em solução de HCl 0,01M.

Material	E_{corr} (V)
	Eletrólito
	HCl 0,01M
Revestido com Zn	-1,009
Revestido com a liga 55% Al-Zn	-0,916
Inox duplex SAF 2205	0,340

A região B, logo após o potencial de corrosão, corresponde à varredura do potencial onde a oxidação é maximizada. A partir desta região tem-se a parte anódica da curva de polarização.

Na região C, no aço inoxidável duplex SAF 2205, ocorre decréscimo do coeficiente de inclinação da reta, ou seja, há redução da densidade de corrente devido à formação de película passiva. Esta região não é observada nos aços revestidos com Zn e com a liga 55% Al-Zn e pode estar associado à formação de um filme passivo pouco protetivo ou inexistente. Nestes materiais verifica-se somente região anódica ativa, em que a densidade de corrente aumenta com o potencial.

Na região D situa-se o potencial de pite (E_p), onde inicia-se a formação de pite no material. No aço inoxidável esta região apresenta inclinação superior à região C, ou seja, há um aumento da densidade de corrente. Porém nota-se que o aumento da densidade de corrente nesta solução é mais discreto do que o observado na solução de NaCl.

O E_p para o aço inoxidável duplex SAF 2205 foi de 1,028V. O aço inoxidável duplex SAF 2205 apresenta E_p distante do E_{corr} (0,688V) devido ao intervalo de potencial em que ocorreu passivação.

Na inversão de potencial ocorrida na região E para o aço inoxidável e na região C para os aços revestidos, verifica-se que os valores de corrente são menores do que os obtidos na varredura direta e refletem a reparação de filme passivo, indicando, portanto, que a corrosão por pite não foi iniciada ou foi iniciada e reparada no aço inoxidável SAF 2205 (STEPHEN, 1994; FERREIRA et al., 2018). No caso dos materiais revestidos, o

processo corrosivo pode ser caracterizado como sendo generalizado (SANTOS, 2016), uma vez que não foi observada região passiva na curva destes materiais.

A amostra de aço inox apresentou valor de potencial de pite maior em solução de HCl 0,01M quando comparado com o valor obtido em solução de NaCl 3,5% m/m

5.4 Teste de Exposição em Campo

Para verificar o comportamento dos materiais após 75 dias de exposição ao ambiente de uma área de decapagem, as amostras foram avaliadas visualmente e após, analisadas por MEV/EDS.

Na avaliação do material revestido com zinco (Figura 27) observou-se que as duas faces apresentaram escurecimento e suas texturas apresentaram-se ásperas. A face mais exposta, voltada para cima, apresentou-se com aspecto mais áspero e esbranquiçado, indicando ter iniciado a formação de produto de corrosão de zinco. Geralmente, os produtos de corrosão do zinco são formados por óxidos, hidróxidos ou sais básicos/neutros que formam uma camada branca, aderente e porosa superficialmente. Em meio ácido, o produto de corrosão tende a ser formado ainda, por sais solúveis como cloretos e sulfatos (RUELA; SILVEIRA, 2017).

Figura 27: Aço revestido com Zn após 75 dias de exposição em campo.



O material revestido com liga 55% Al-Zn na Figura 28, também apresentou escurecimento do revestimento e textura superficial áspera. A similaridade com a observação do aço revestido com zinco ocorre devido a corrosão inicial deste tipo de

material se dá no revestimento de zinco, conforme já mencionado no tópico sobre aço revestido com a liga 55% Al-Zn, e após o zinco ser consumido, ou seja, o revestimento ser essencialmente de produtos de corrosão de zinco, a corrosão torna-se mais característica do alumínio.

Figura 28: Aço revestido com liga 55% Al-Zn após 75 dias de exposição em campo.



Os materiais pré-pintados apresentaram pequenos pontos amarronzados na tinta imperceptíveis na Figura 29.

Figura 29: Aços pré-pintados após 75 dias de exposição em campo. A) Revestido com Zn e pré-pintado. B) Revestido com liga 55% Al-Zn e pré-pintado

(A)



(B)



O aço inoxidável apresentou vários pontos escuros superficialmente após 75 dias de exposição que com a limpeza sumiram em sua maioria (Figura 30). Após um ano de exposição, verificou-se uma camada escura em toda superfície do material que pode ser visualizada na Figura 31 (A). Após a limpeza, Figura 31 (B), verificou-se a presença de vários pontos indicando a presença de pites na superfície do material.

Figura 30: Aço inoxidável duplex SAF 2205 após 75 dias de exposição em campo.



Figura 31: Aço inoxidável duplex SAF 2205 após 1 ano de exposição em campo. A) Sem limpeza. B) Após limpeza.

(A)



(B)



Os resultados de MEV/EDS para as amostras expostas em ambientes corrosivos serão apresentados no tópico 5.5.

5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 32 a 37 mostram as imagens realizadas por microscopia eletrônica de varredura das amostras antes da realização dos ensaios eletroquímicos para conhecimento das características superficiais das amostras conforme recebidas.

As imagens obtidas por MEV na Figura 32 para o aço revestido com zinco mostram uma superfície com cristais de zinco com características de revestimento obtido por solidificação normal (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2017b), e na análise por EDS na Figura 33, predominância de zinco proveniente do revestimento de zinco puro na superfície.

Figura 32: MEV da amostra de aço revestido com Zn. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.

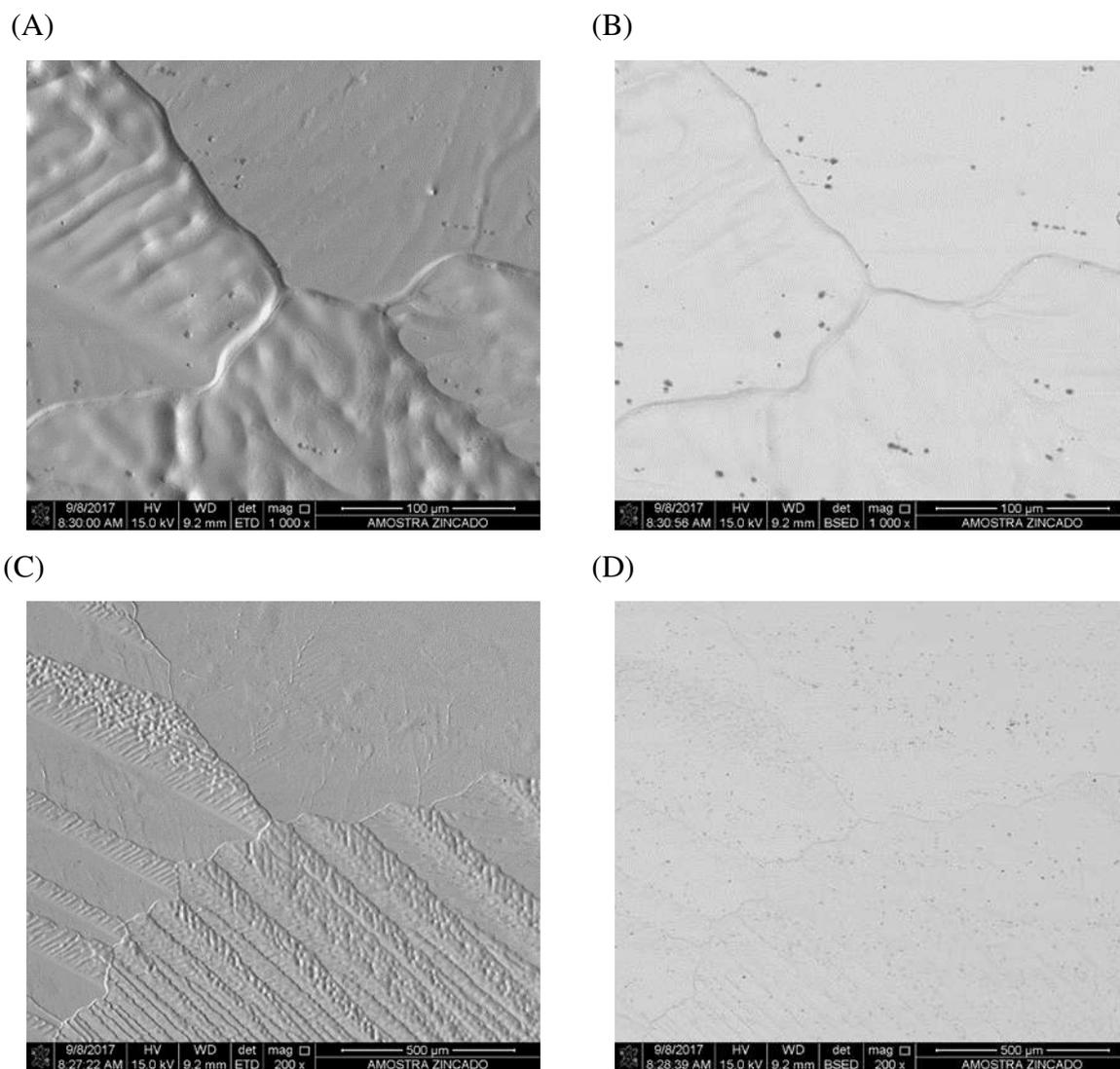
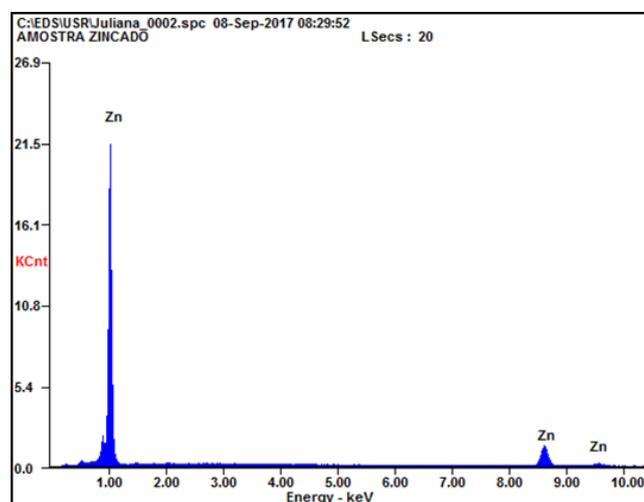


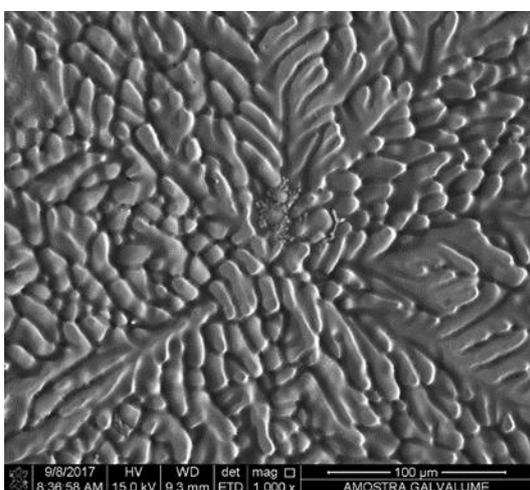
Figura 33: Composição química por EDS da amostra de aço revestido com Zn.



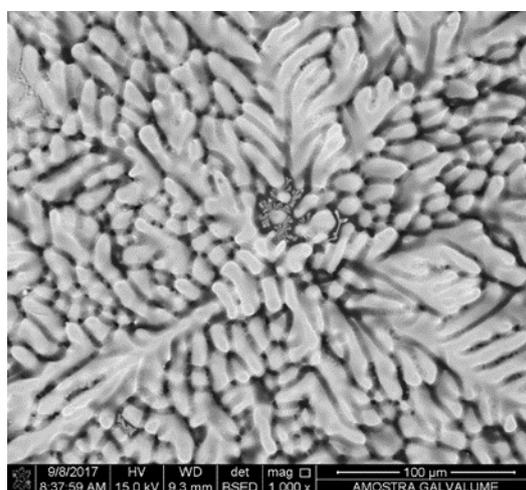
A Figura 34 obtida por MEV para o material revestido com a liga 55% Al-Zn mostra uma fase dendrítica, que segundo Manhabosco, 2017 é rica em alumínio e é a primeira fase a solidificar, representando cerca de 80% do volume da camada da liga, e uma fase interdendrítica rica em zinco a qual, na maioria das vezes, se encontra precipitados de silício.

Figura 34: MEV da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.

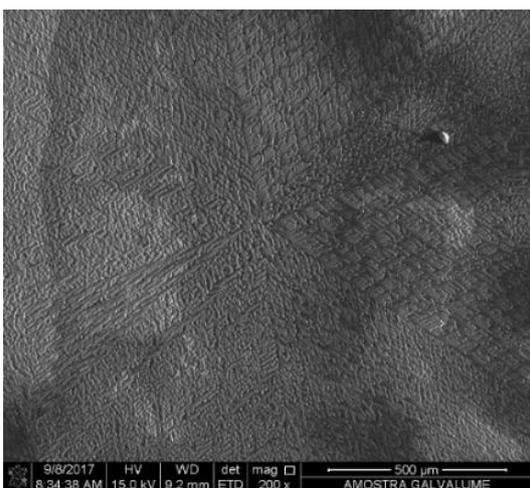
(A)



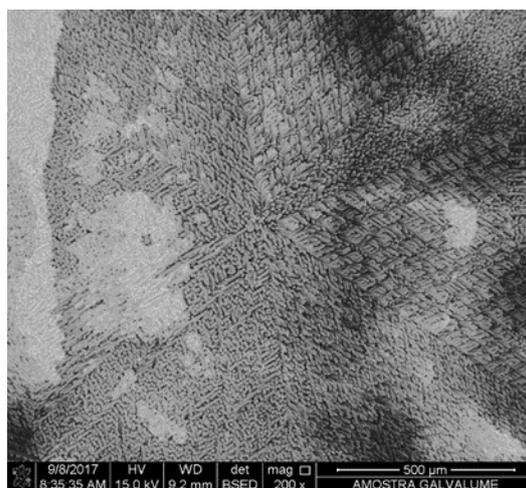
(B)



(C)



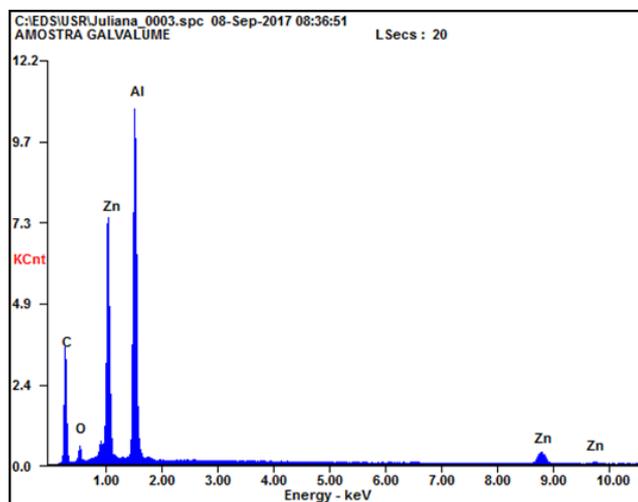
(D)



A Figura 35 representa o resultado da microanálise realizada na amostra do aço revestido com a liga 55% Al-Zn e indica a presença de Al, em maior quantidade, e de Zn

na superfície do material, além de mostrar um pequeno pico característico de oxigênio sugerindo a possibilidade de existência de óxido sobre o material.

Figura 35: Composição química por EDS da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn.

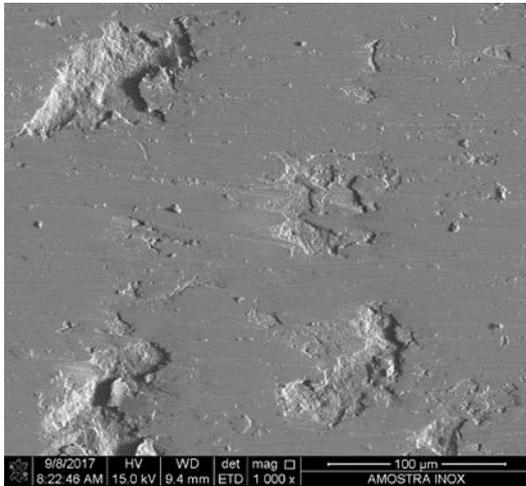


Na Figura 36, obtida por MEV para o material aço inoxidável SAF 2205, observa-se pontos de desgastes na superfície do material, podendo está associado ao atrito da amostra com a máquina de corte.

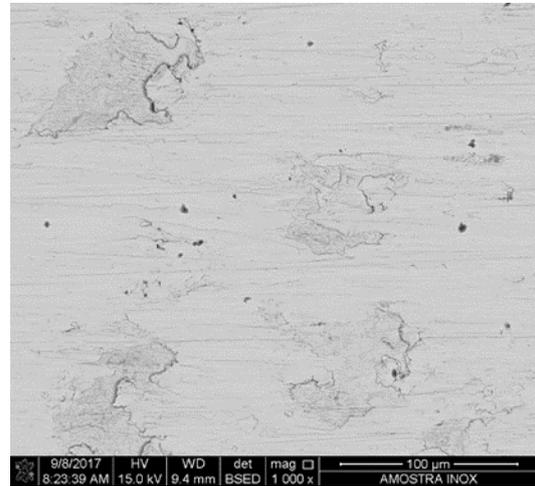
Na Figura 37 obtida na análise por EDS observa-se a presença em maior quantidade de Fe, Cr, Ni e Si, elementos presentes na composição química do material.

Figura 36: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205. A) Imagem obtida com o detector ETD – 1000x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 1000x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 200x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 200x.

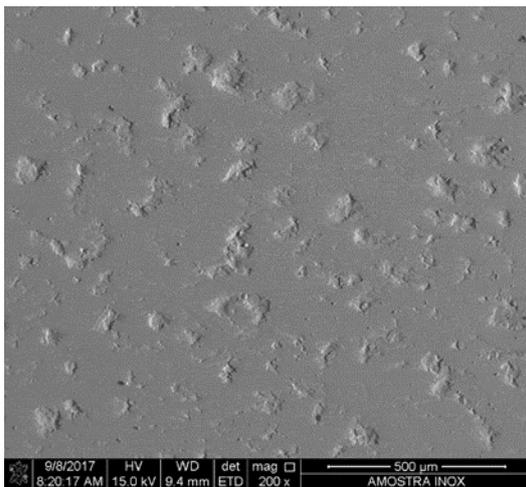
(A)



(B)



(C)



(D)

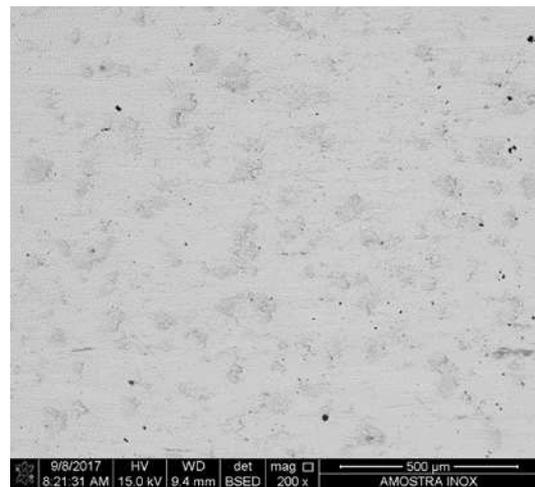
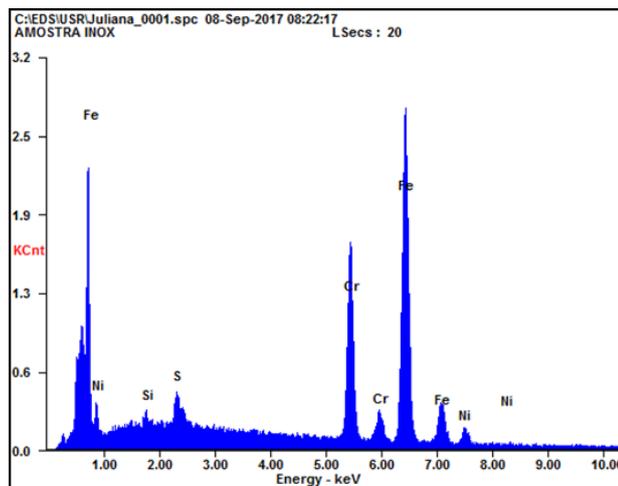


Figura 37: Composição química por EDS do aço inoxidável SAF 2205.

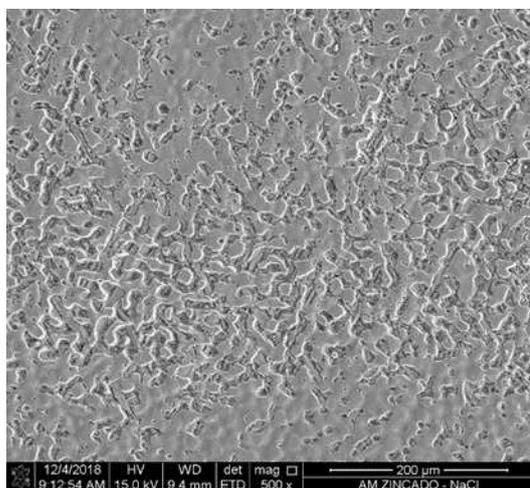


As Figuras 38 a 49 mostram as imagens de MEV e EDS após ensaios de curva de polarização em solução de NaCl 3,5% m/m e HCl 0,01M.

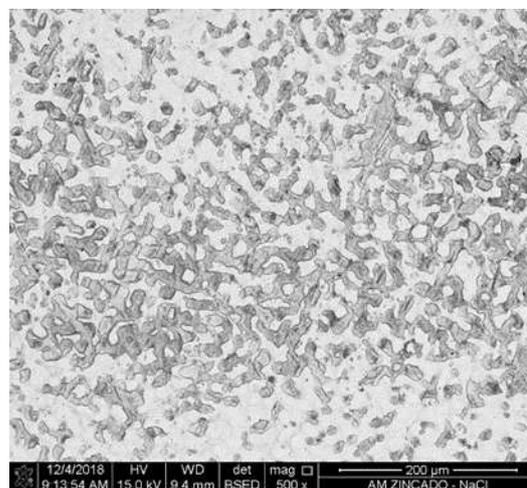
Nas Figuras 38 e 39 estão as imagens de MEV e a composição da superfície realizada por EDS para o material revestido com zinco após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A Figura 38 mostra que a superfície do material sofreu ataque uniforme e apresenta alguns poros no revestimento (SANTOS et al., 2015). Com a análise de EDS, no ponto 1 em que não foi observada a presença de poro no revestimento, foi observada somente a presença de zinco. No interior dos poros (ponto 2 e ponto 3) foi observada a presença de cloreto, oriundo da solução estudada, além de alumínio e oxigênio. A presença do alumínio no interior do poro sugere que sua profundidade tenha atingido a camada intermetálica que é composta de Al-Fe-Zn (CARVALHO, 1999) e a presença de oxigênio indica presença de óxidos de constituintes intermetálicos (SANTOS et al., 2015).

Figura 38: MEV da amostra de aço revestido com Zn após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.

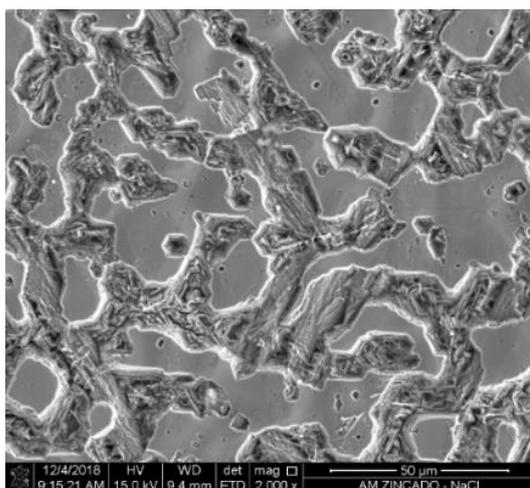
(A)



(B)



(C)



(D)

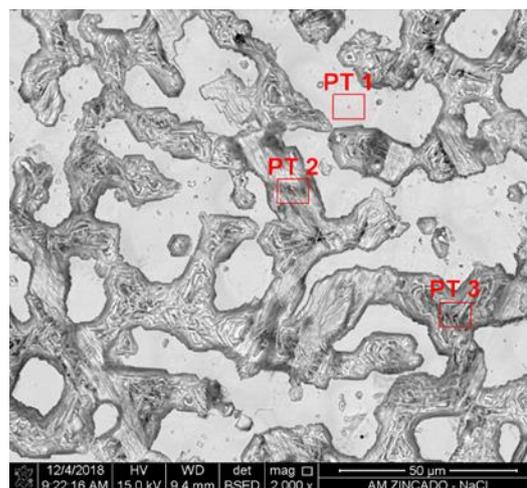
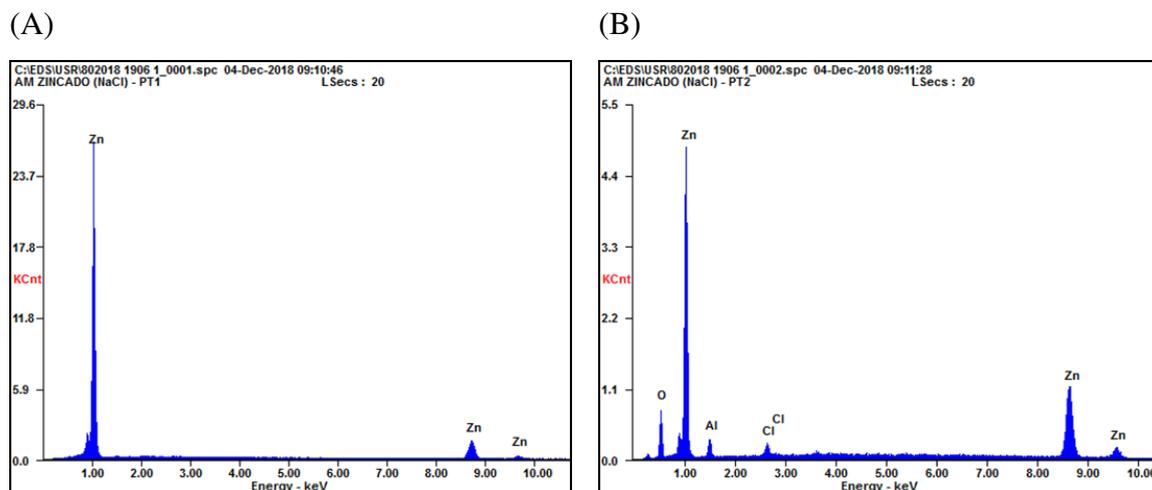


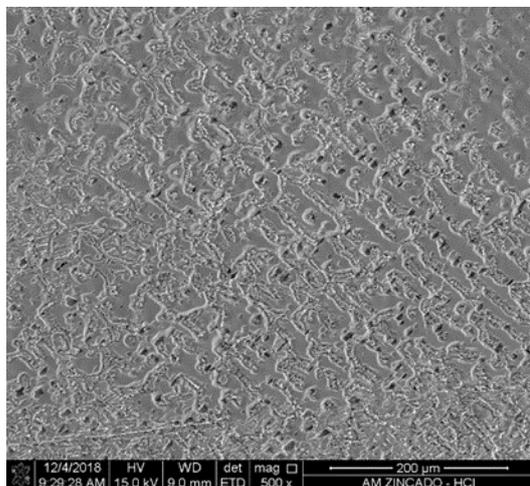
Figura 39: Composição química por EDS do material revestido com Zn após ensaio com solução de NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.



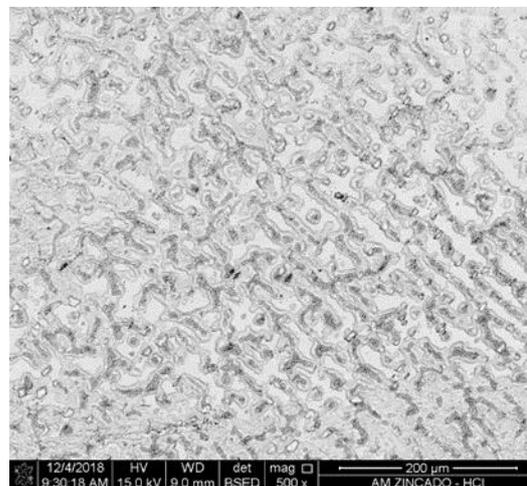
Nas Figuras 40 e 41 obtidas após ensaios do material zincado em solução de HCl 0,01M observa-se um ataque uniforme e presença de poros no revestimento, porém os poros observados após o ensaio (ponto 2 e ponto 3) não estão tão profundos e apresentam menor concentração de cloreto, quando compara-se com as características dos poros visualizados após ensaio com a solução de NaCl 3,5% m/m. No entanto, a camada intermetálica foi alcançada, devido à presença de alumínio verificada por EDS. No ponto 1, em que não foi observada a presença de poro no revestimento, foi encontrado somente a presença de zinco. A microanálise por EDS mostra ainda, um pequeno pico de oxigênio sugerindo a formação de filme de óxido sobre o material.

Figura 40: MEV/EDS da amostra de aço revestido com Zn após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.

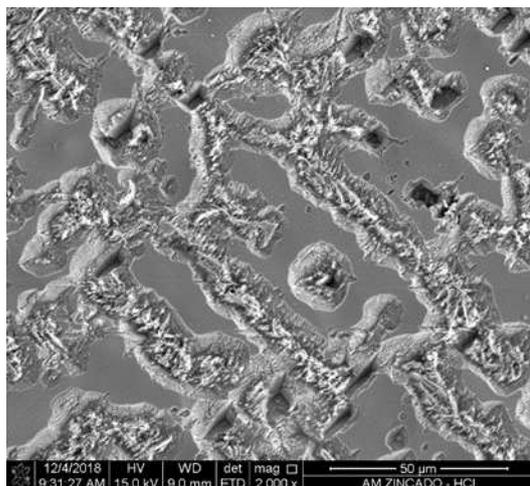
(A)



(B)



(C)



(D)

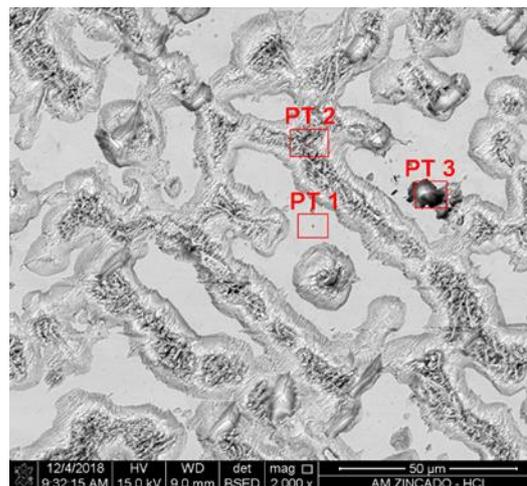
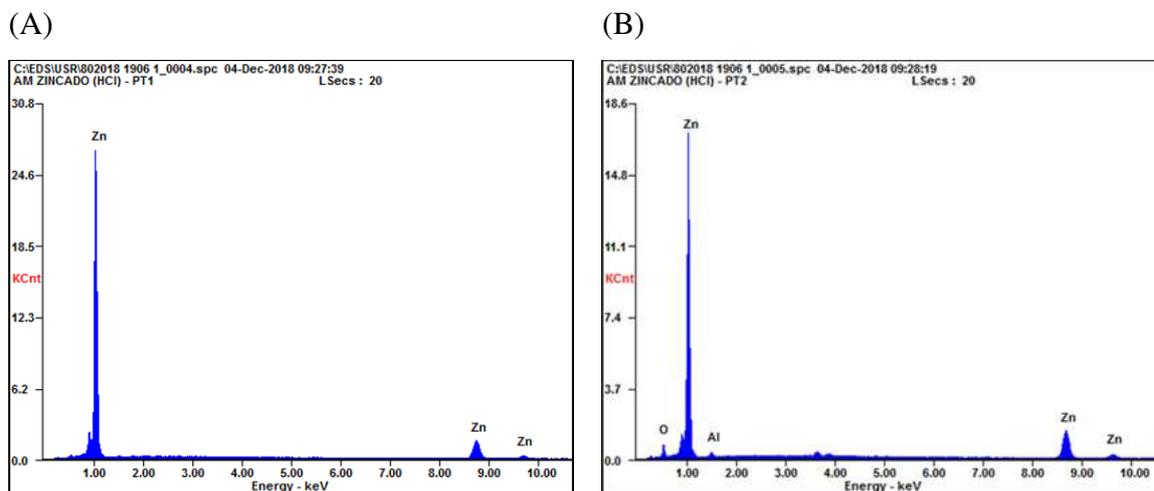


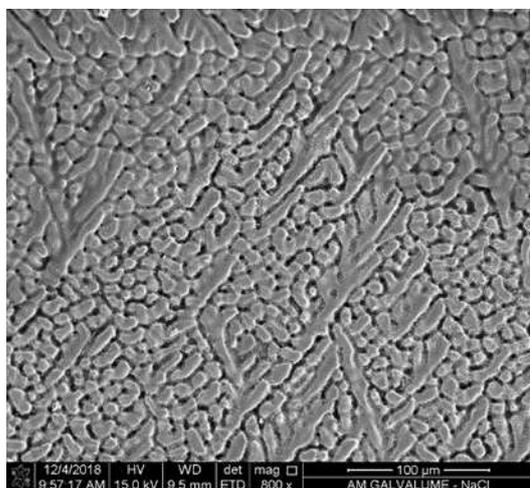
Figura 41: Composição química por EDS do material revestido Zn após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.



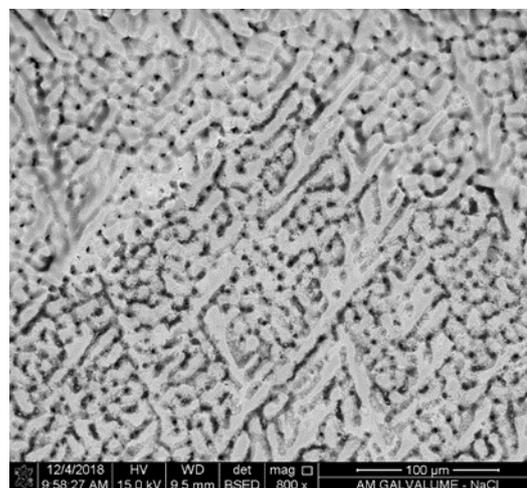
Nas Figuras 42 e 43 obtidas após ensaios do material revestido com a liga 55% Al-Zn em solução de NaCl 3,5% m/m, observa-se região mais escura composta de resina de carbono, comumente observada na superfície de aços revestidos com liga 55% Al-Zn, o que desfavorece a visualização das regiões com possibilidade de ocorrência de pites ou poros no revestimento. No ponto 1, verifica-se a presença de Al e Zn, elementos comuns ao revestimento. Em regiões um pouco mais claras e com pontos, com características da região interdendrítica (pontos 2 e 3), verifica-se a presença de cloreto em pequenas proporções, indicando possibilidade de ocorrência de ataque ao material pelo íon cloreto ou microporosidades nos espaços interdendríticos (SANTOS, 2015). Com EDS em todos os pontos analisados observa-se além da presença de Al e Zn em altas concentrações, a presença de oxigênio sugerindo a presença de óxido sobre o material.

Figura 42: MEV da amostra de aço revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 2000x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 2000x.

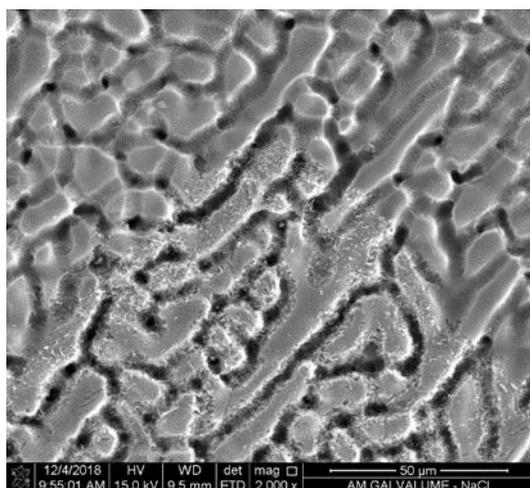
(A)



(B)



(C)



(D)

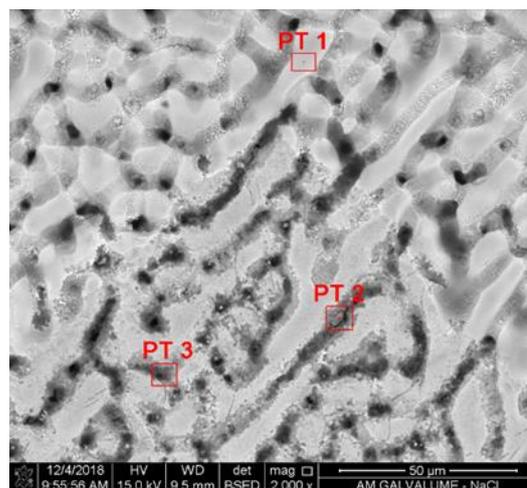
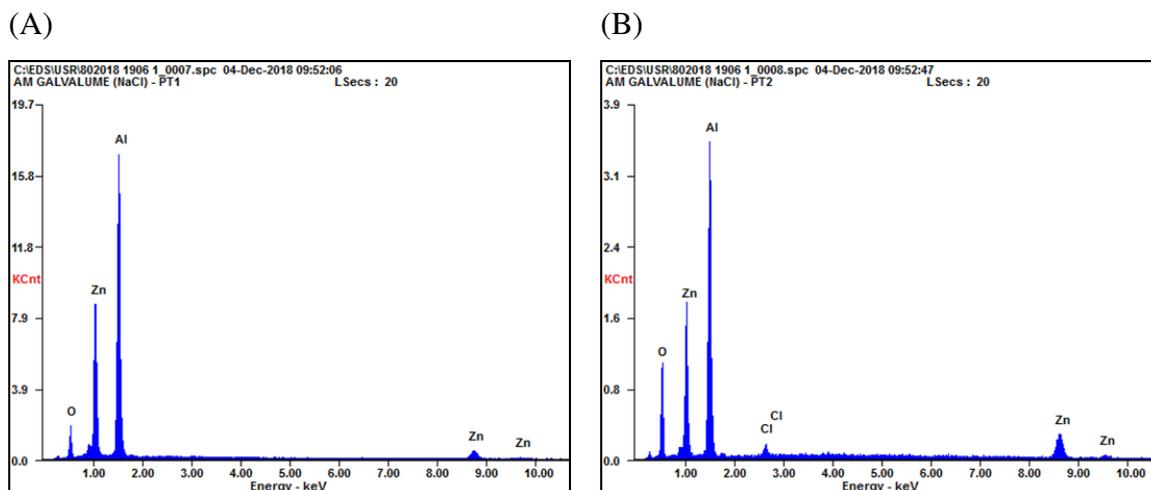


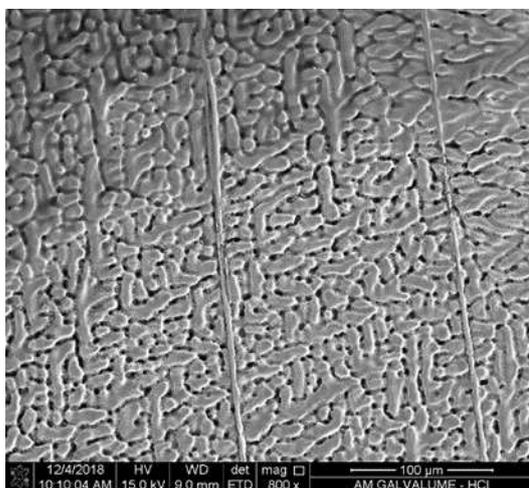
Figura 43: Composição química por EDS do material revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio com NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.



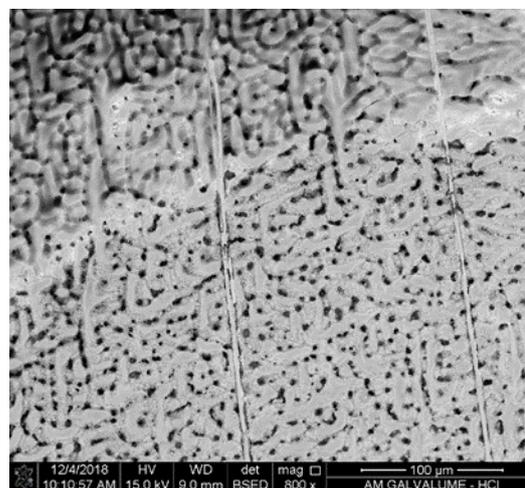
Nas Figuras 44 e 45 obtidas após ensaios do material revestido com a liga 55% Al-Zn em solução de HCl 0,01M, observa-se região com mancha mais clara com vários pontos escuros no revestimento. Na região mais clara, observa-se pontos indicativos de possibilidade de ocorrência de ataque ao material pelo íon cloreto ou microporosidades nos espaços interdendríticos (SANTOS, 2015). Com EDS além da presença de Al e Zn, observa-se presença de Si, presente na camada intermetálica formada durante a imersão do aço no banho de revestimento e também, presença de oxigênio associado à presença de óxido sobre o material.

Figura 44: MEV da amostra de aço revestido com liga 55%Al-Zn após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED - 100 μm . C) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.

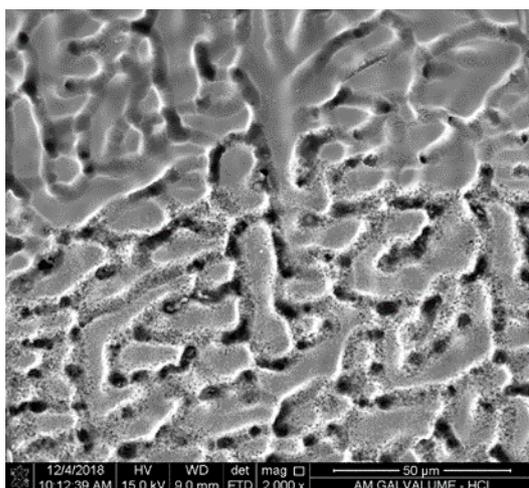
(A)



(B)



(C)



(D)

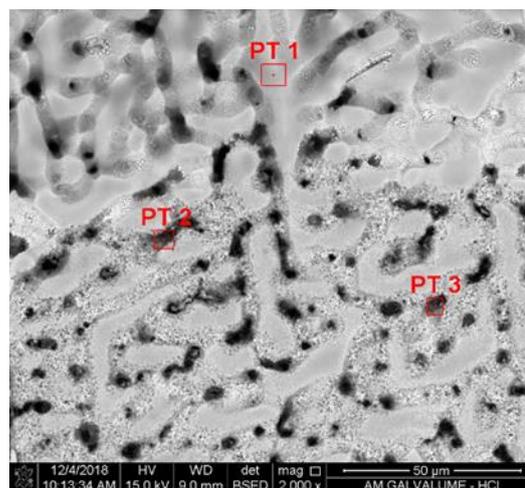
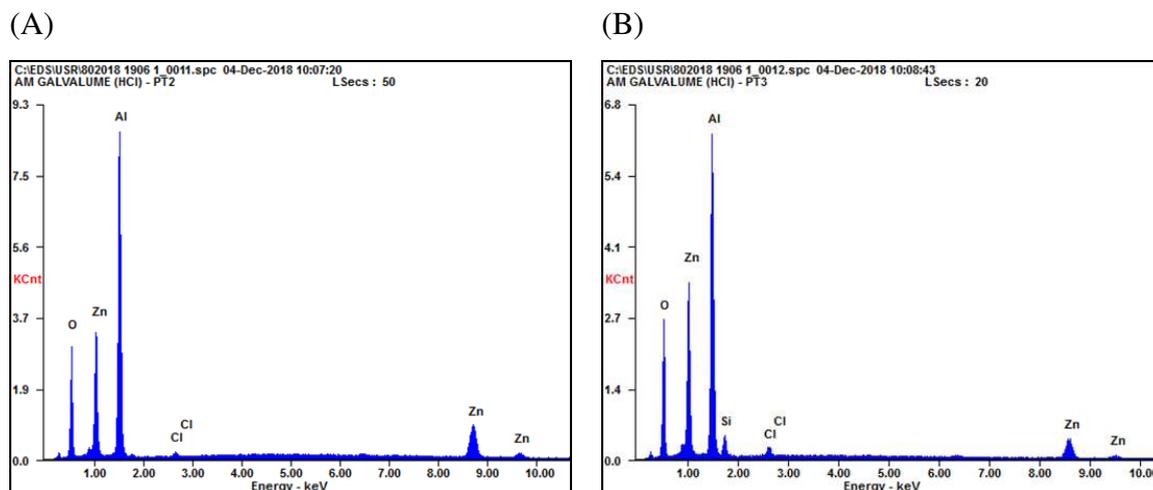


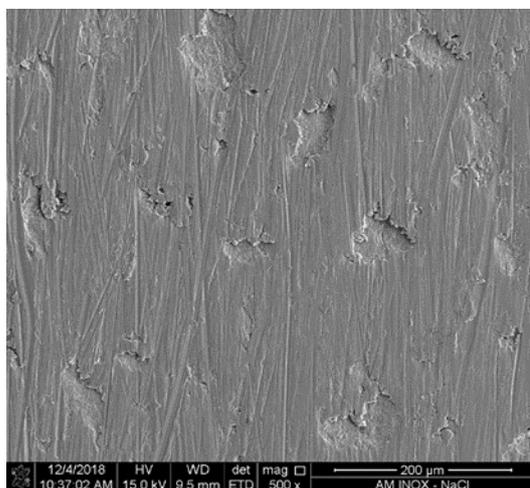
Figura 45: Composição química por EDS do material revestido com liga 55% Al-Zn após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.



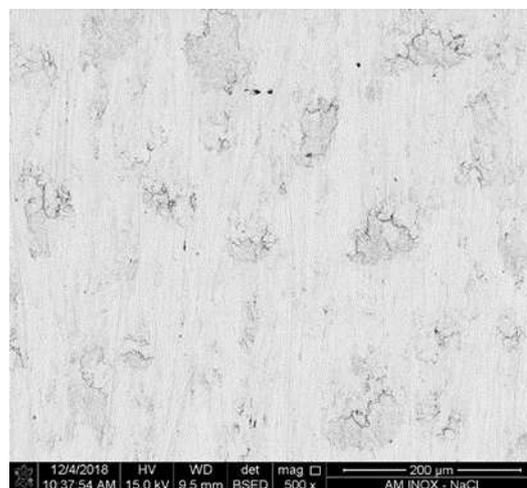
As Figuras 46 a 49 representam as imagens obtidas por MEV e a composição química obtida pela técnica EDS do aço inoxidável SAF 2205. Com elas são observadas escavações na superfície similares às observadas no material antes dos ensaios. Com isso, não é possível confirmar a ausência ou presença de pontos indicativos de corrosão por pite após os ensaios eletroquímicos. Com EDS foram observados elementos presentes na composição deste tipo de aço como: Fe, Cr, Ni e Si e ausência de íon cloreto, presente nas soluções eletrolíticas.

Figura 46: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205 após ensaio em solução de NaCl 3,5% m/m. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.

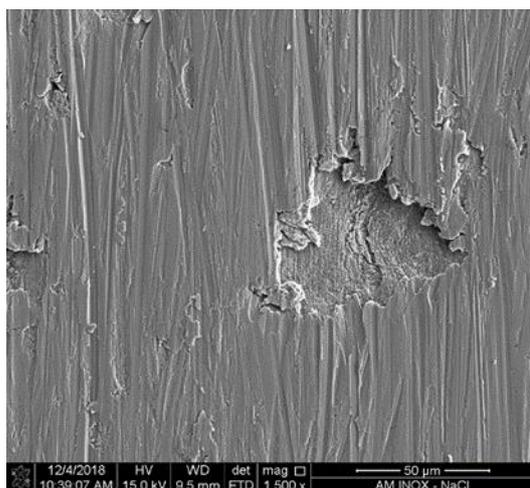
(A)



(B)



(C)



(D)

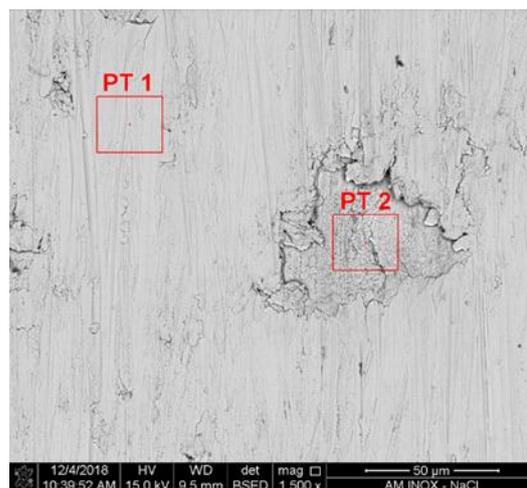
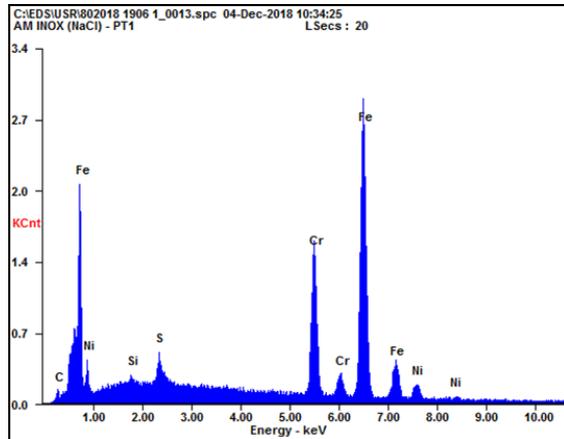


Figura 47: Composição química por EDS do material aço inoxidável SAF 2205 após ensaio com solução de NaCl 3,5% m/m. A) ponto 1 e B) ponto 2.

(A)



(B)

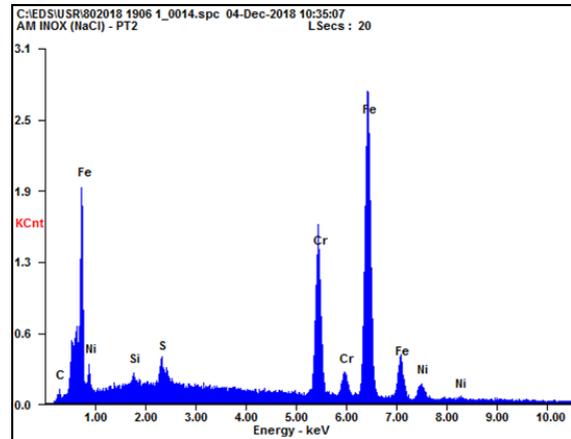
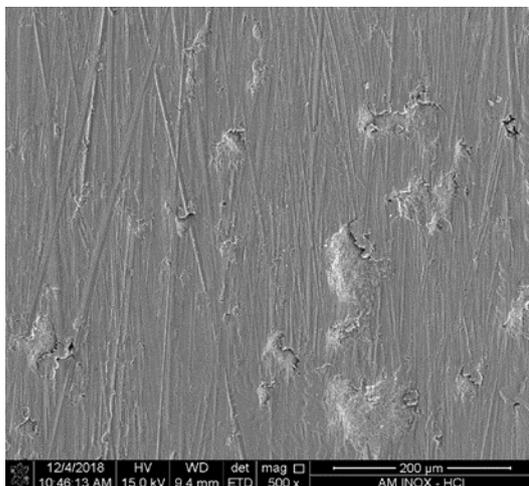
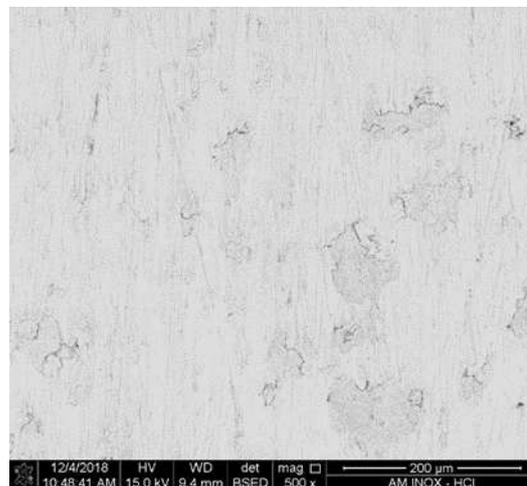


Figura 48: MEV da amostra de aço inoxidável SAF 2205 após ensaio em solução de HCl 0,01M. A) Imagem obtida com o detector ETD – 500x. B) Imagem obtida com o detector BSED – 500x. C) Imagem obtida com o detector ETD – 1500x. D) Imagem obtida com o detector BSED – 1500x.

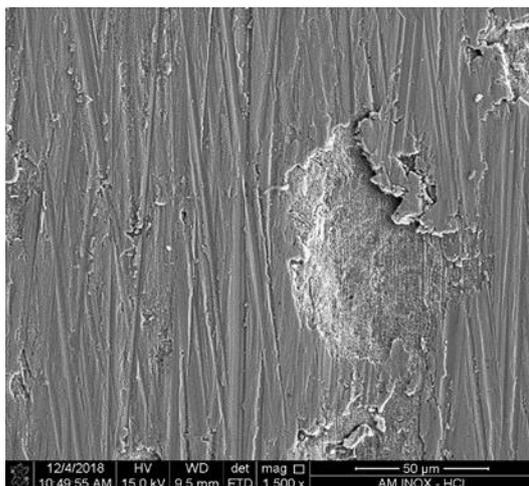
(A)



(B)



(C)



(D)

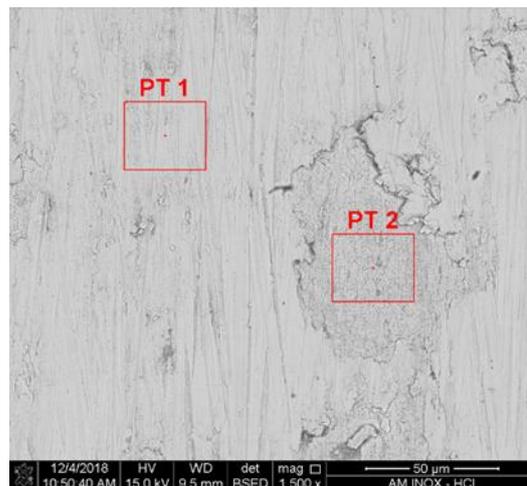
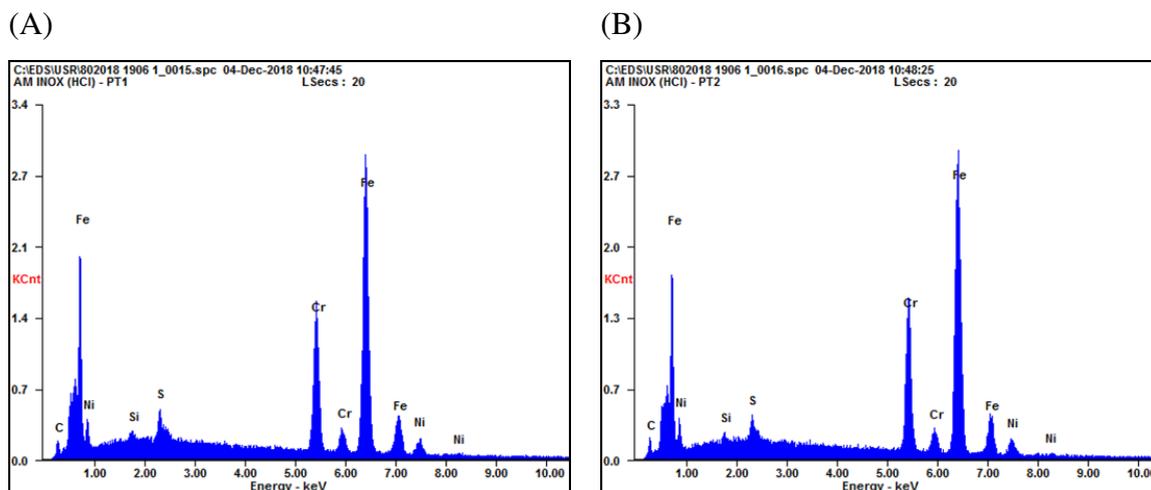


Figura 49: Composição química por EDS do material aço inoxidável SAF 2205 após ensaio com solução de HCl 0,01M. A) ponto 1 e B) ponto 2.



Os aços revestidos apresentam presença de oxigênio em pequenas proporções em sua superfície após os ensaios eletroquímicos. Essa presença pode ser associada ao início do processo corrosivo dos revestimentos estudados que origina produtos de corrosão formados por óxidos de zinco, principalmente. As análises por MEV nos materiais revestidos indicaram corrosão uniforme em suas superfícies, fato este compatível com o observado durante o ensaio de curva de polarização que indicou dissolução ativa dos revestimentos. A presença de cloreto em pequena quantidade em escavações ou poros destes revestimentos também favorece o início de formação de pite.

No aço inoxidável não foi observada a presença de cloreto superficialmente e nem evidência de presença de pite.

As Figuras 50 a 63 representam as amostras de aço após exposição por 75 dias em área de decapagem de usina siderúrgica e as Figuras 64 e 65 representam as amostras de aço inoxidável duplex SAF 2205 exposta por 1 ano na mesma área.

Figura 50: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn.

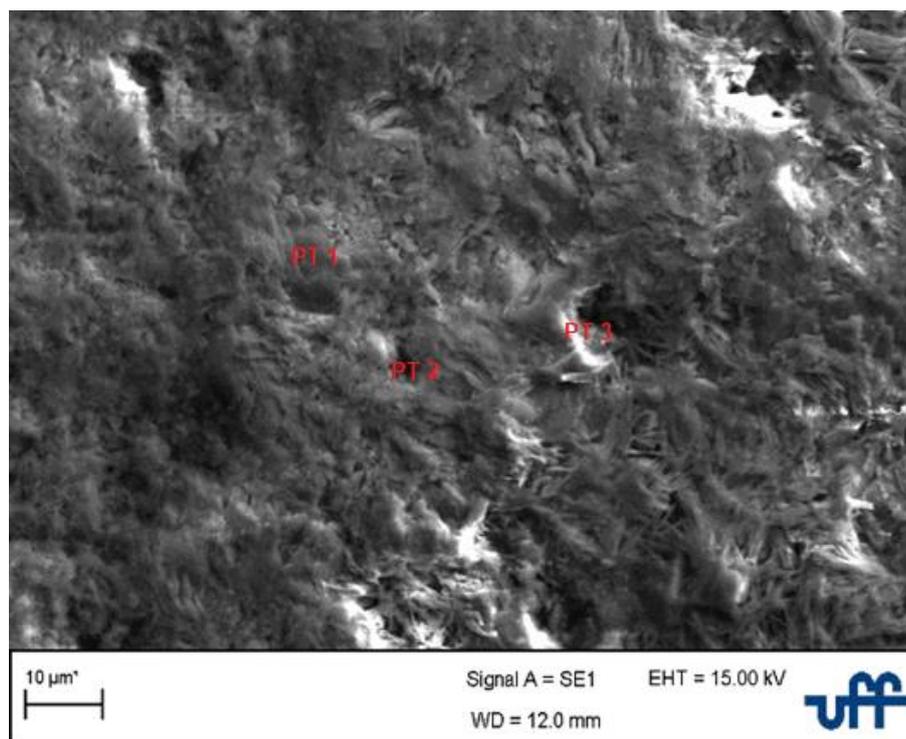
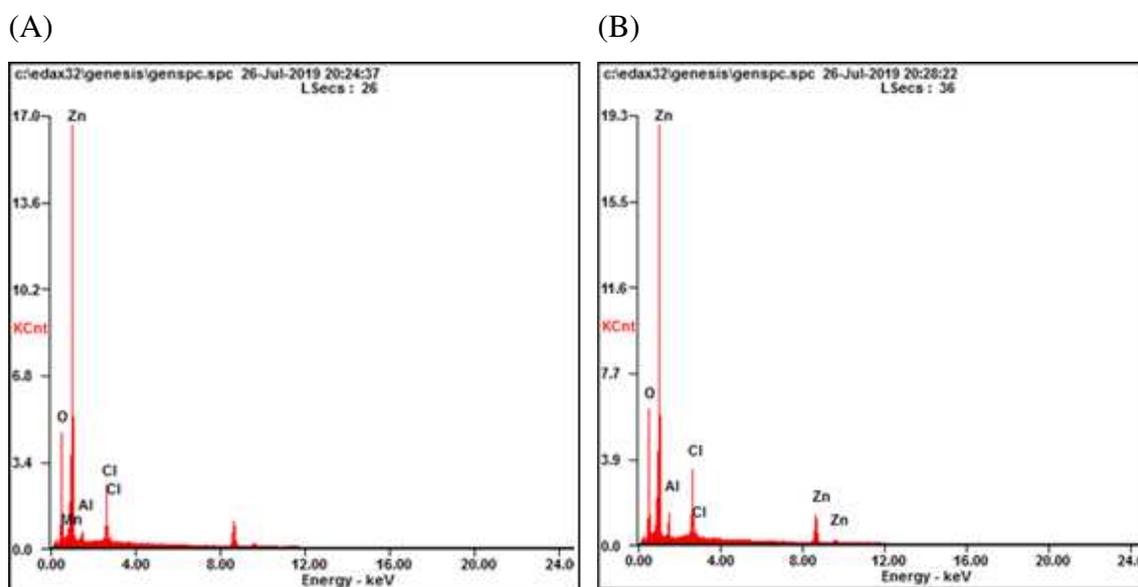


Figura 51: Composição química por EDS do material revestido com Zn após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2.



O aço revestido com Zn apresenta relevos com áreas mais claras na Figura 50. Na microanálise por EDS (Figura 51) verifica-se no ponto 1, ocorrência de Zn, Al e Cl e O e no ponto 2, mais escuro, e ponto 3, brilhante, composição igual ao ponto 1. A presença de oxigênio era esperada devido às características das amostras avaliadas visualmente em

que observou-se ataque do revestimento. A presença de cloreto aderido na superfície do material reforça a agressividade do ambiente e sua consequência aos materiais presentes nele.

Figura 52: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com a liga 55% Al-Zn.

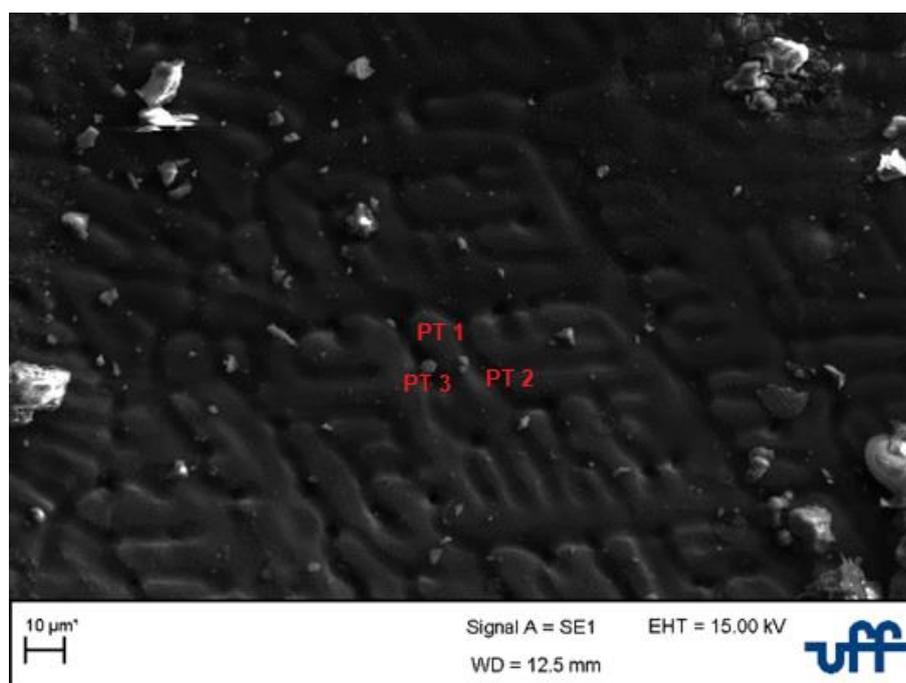
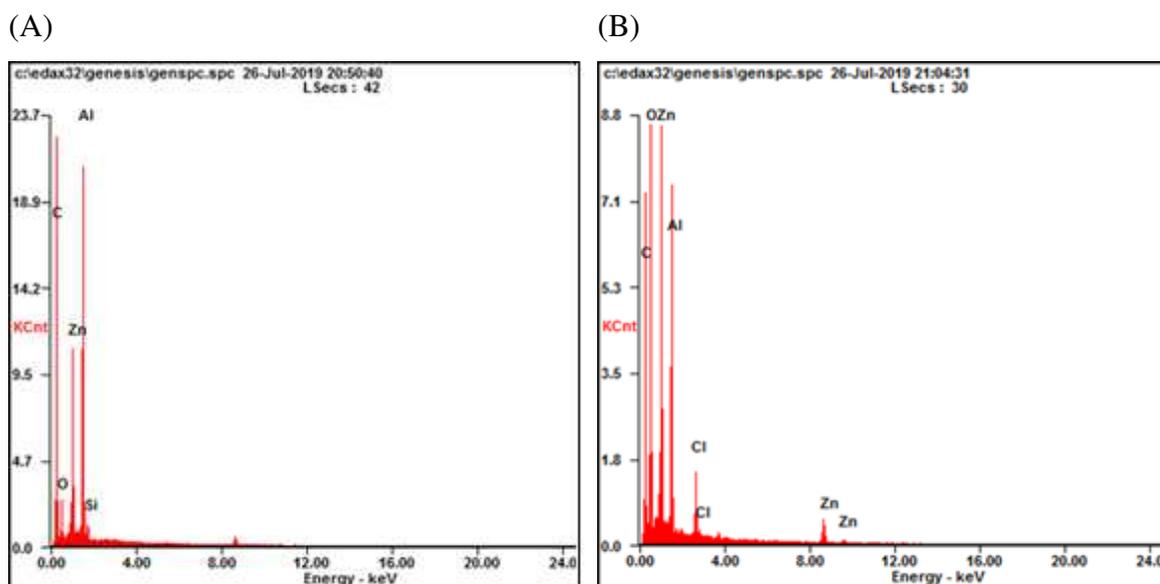


Figura 53: Composição química por EDS do material revestido com a liga 55% Al-Zn após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 3.



Nas Figuras 52 e 53, o aço revestido com a liga apresenta superfície com parte com pequenos relevos e parte sem. No ponto 1 presença de Al, Zn e Si, característicos do revestimento e nos pontos 2 e 3, presença de Al, Zn, Cl⁻ e O. Observa-se uma maior concentração de oxigênio na superfície evidenciando que o filme de óxido formado é maior para este material do que para o material revestido com zinco.

O aço revestido com Zn e pré-pintado apresenta superfície com furos e aspecto poroso que podem ser observados na Figura 54, porém o que se observa por EDS na Figura 55 é a presença de alguns metais atribuídos à composição da tinta (CAVALCANTE, 2010) e pequena quantidade de cloreto.

Figura 54: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn e pré-pintado - com tinta.

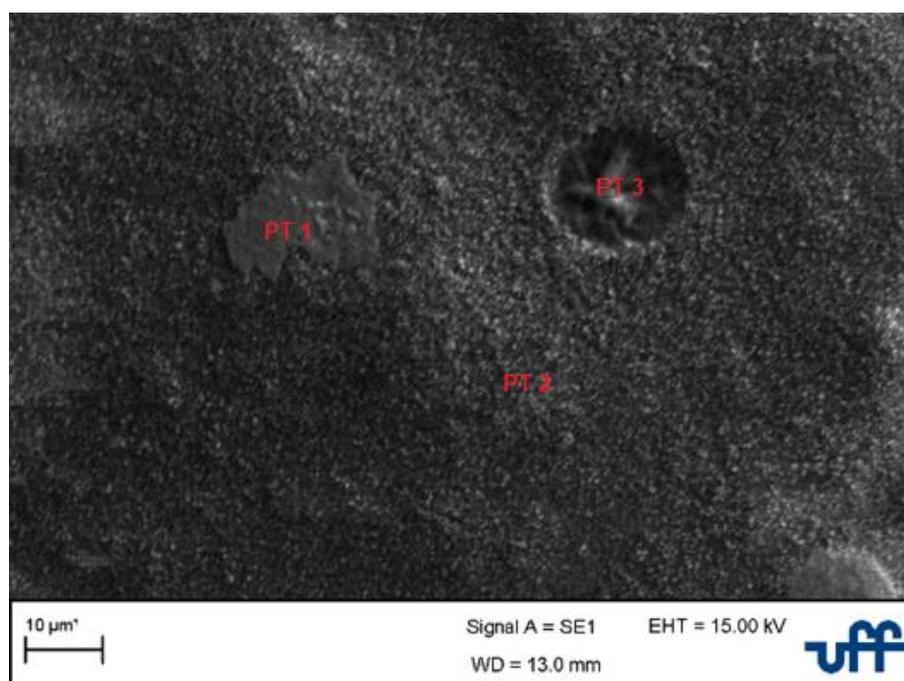
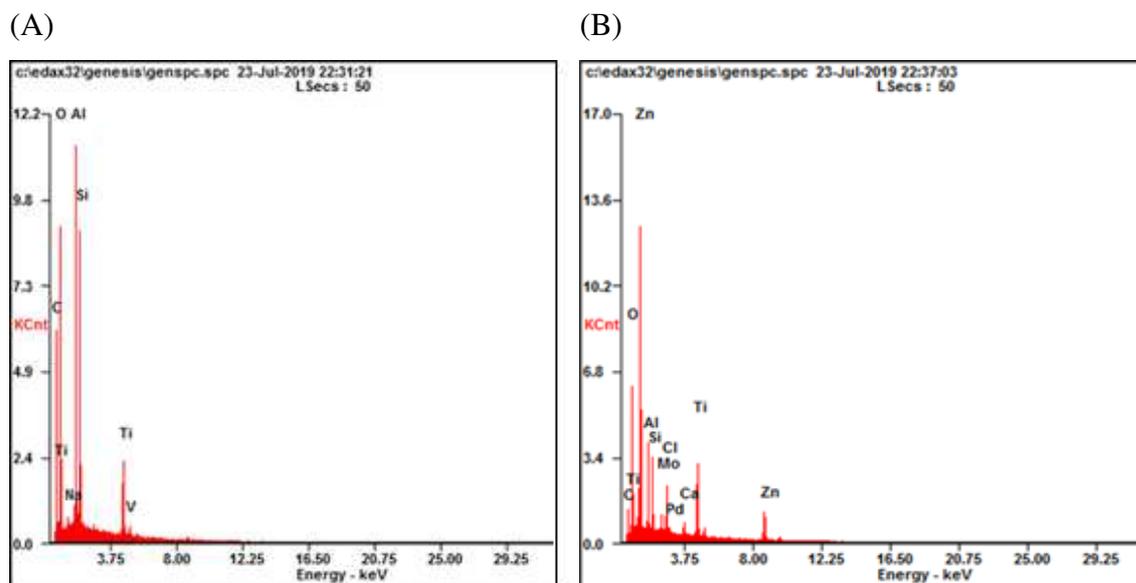


Figura 55: Composição química por EDS do material revestido com Zn e pré-pintado - com tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2.



Para uma avaliação da eficácia da camada de tinta sobre o material com revestimento metálico, removeu-se a camada de tinta do aço zincado pré-pintado e realizou-se MEV e EDS.

Figura 56: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com Zn e pré-pintado - sem tinta.

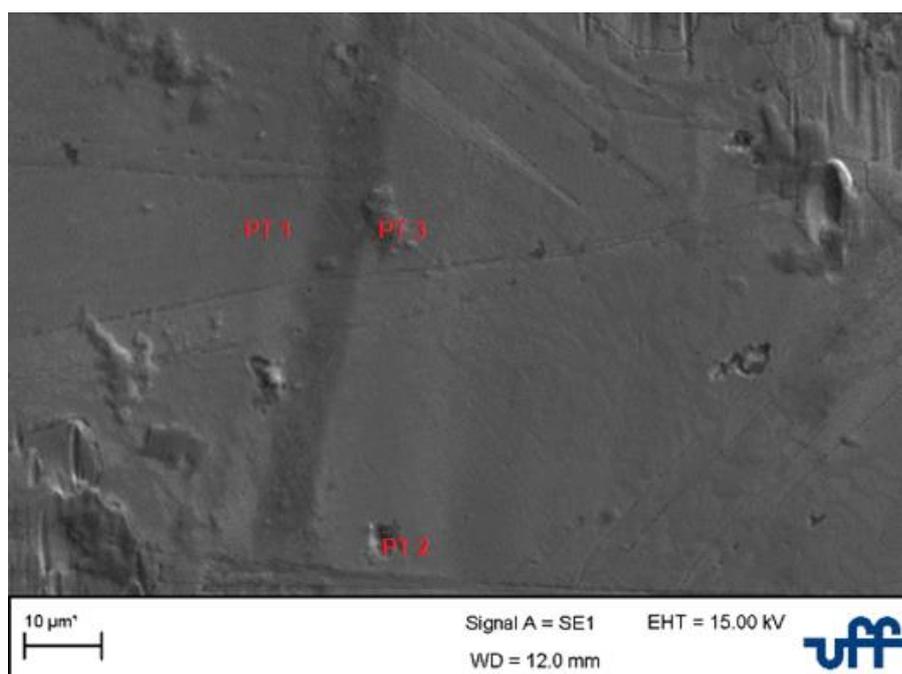
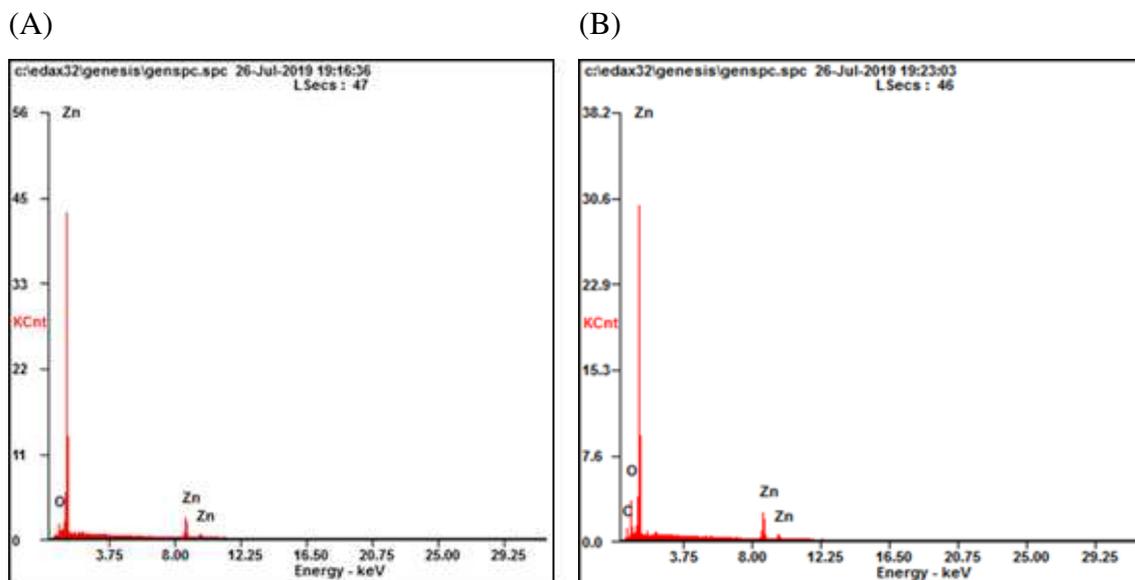


Figura 57: Composição química por EDS do material revestido com Zn e pré-pintado - sem tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 e B) ponto 2.



O aço zincado com a camada de tinta removida após exposição em campo (Figura 56) apresenta na superfície predominância de zinco e aparente escavações sem chegar no aço-base, essas escavações se dão somente no revestimento. Por EDS na Figura 57, observa-se predominância de Zn e pequena concentração de oxigênio, mostrando que o cloreto presente no ambiente não atingiu o revestimento metálico e tão pouco, o aço-base.

A imagem obtida por MEV para o aço revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado na Figura 58 mostra aspecto poroso e presença de partículas na superfície.

A microanálise por EDS na Figura 59 mostra presença de alguns metais atribuídos à composição da tinta (CAVALCANTE, 2010). No ponto 1, região mais clara, verifica-se presença de cloreto. No ponto 2 a composição encontrada difere da observada nas regiões com tinta, indicando ser uma partícula aderida na superfície resultado de poluentes do ambiente.

Figura 58: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - com tinta.

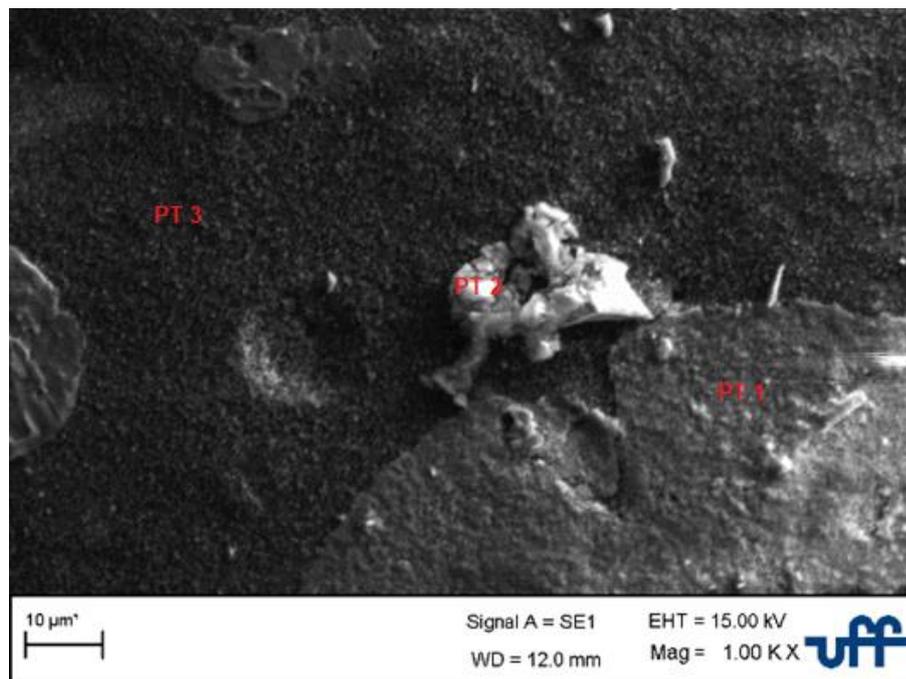
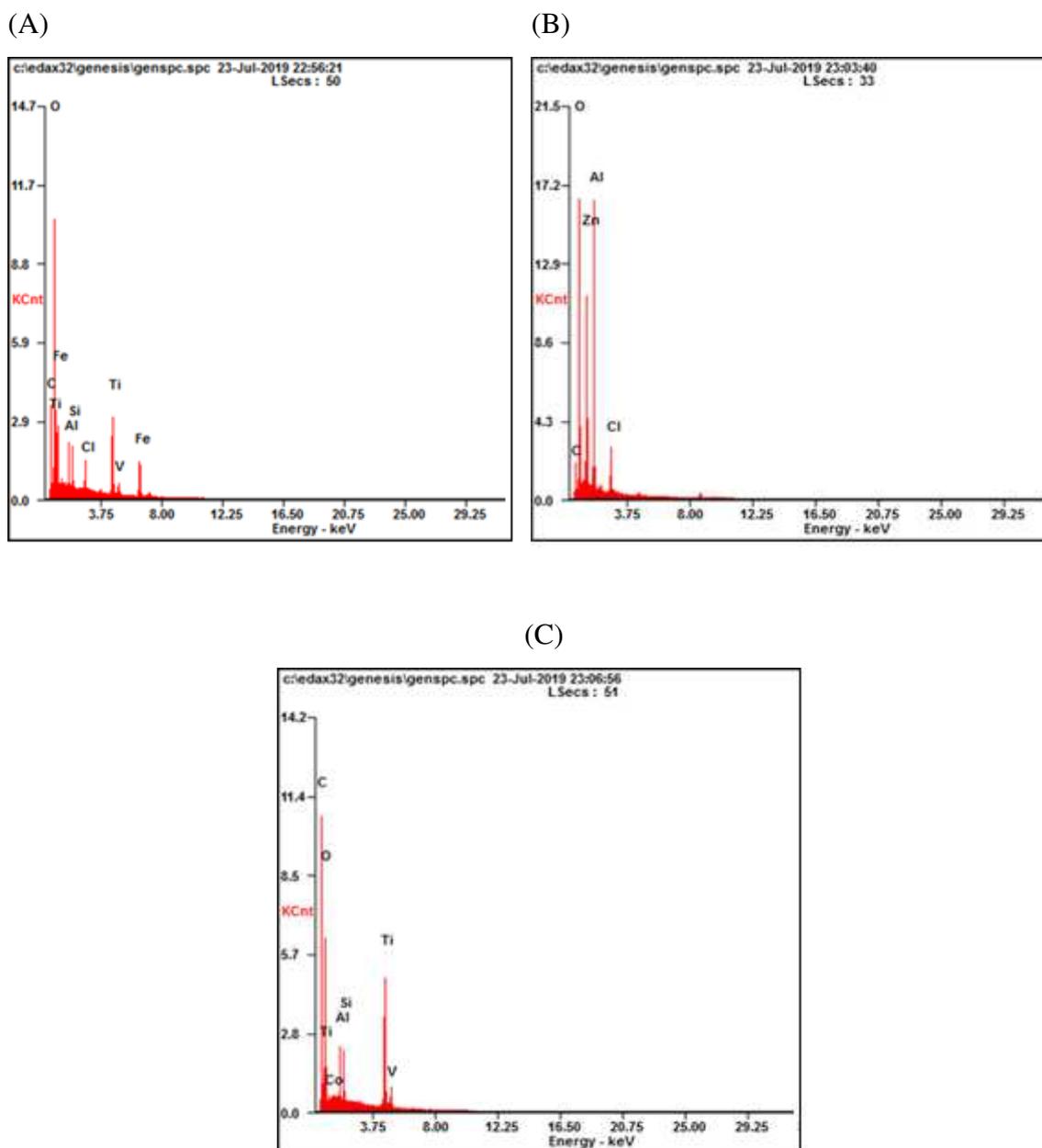


Figura 59: Composição química por EDS do material revestido com com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - com tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 2 e C) ponto 3.



Assim como para o aço revestido com Zn, removeu-se a camada de tinta do aço revestido com a liga e realizou-se MEV e EDS para avaliar a existência de ataque ao revestimento metálico.

O aço revestido com a liga 55% Al-Zn e pré-pintado com remoção de tinta na Figura 60 apresenta ondulações na superfície correspondente ao revestimento de Al-Zn. Por EDS, na Figura 61, foi observado predominância de Zn e Al característica do

revestimento. No ponto 1 e no ponto 2 apareceram Al e Na, porém a faixa de energia do Na está próxima do Zn, podendo esta identificação ser do Zn e não indicativa de presença de Na na superfície do material. No ponto 3, na região interdendrítica, similar à calhas, presença de Zn e Al do revestimento e baixa concentração de oxigênio.

Figura 60: MEV após exposição em campo por 75 dias do material revestido com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - sem tinta.

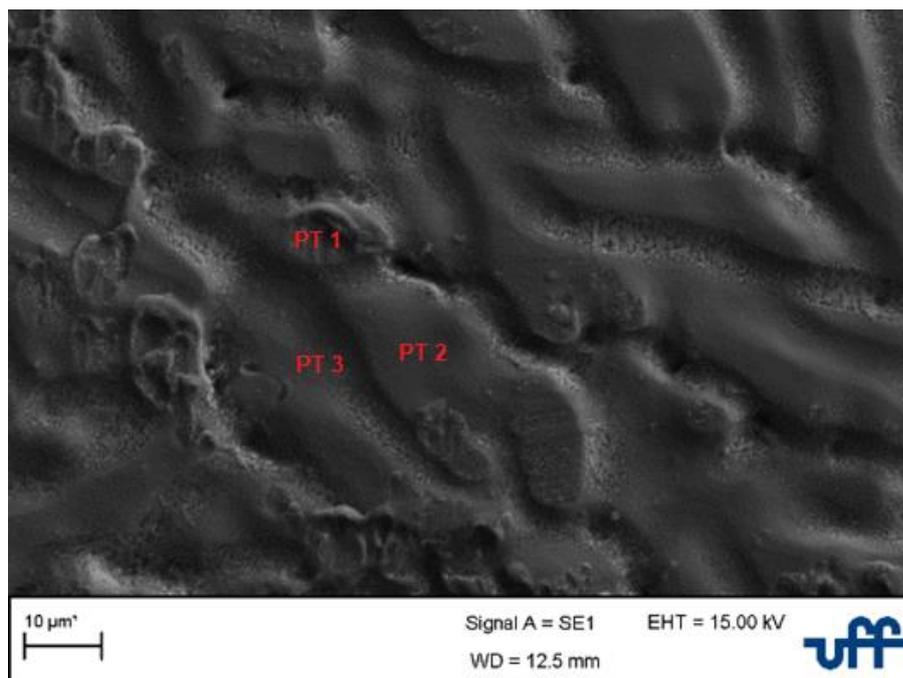


Figura 61: Composição química por EDS do material revestido com com liga 55% Al- Zn e pré-pintado - sem tinta após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 3.

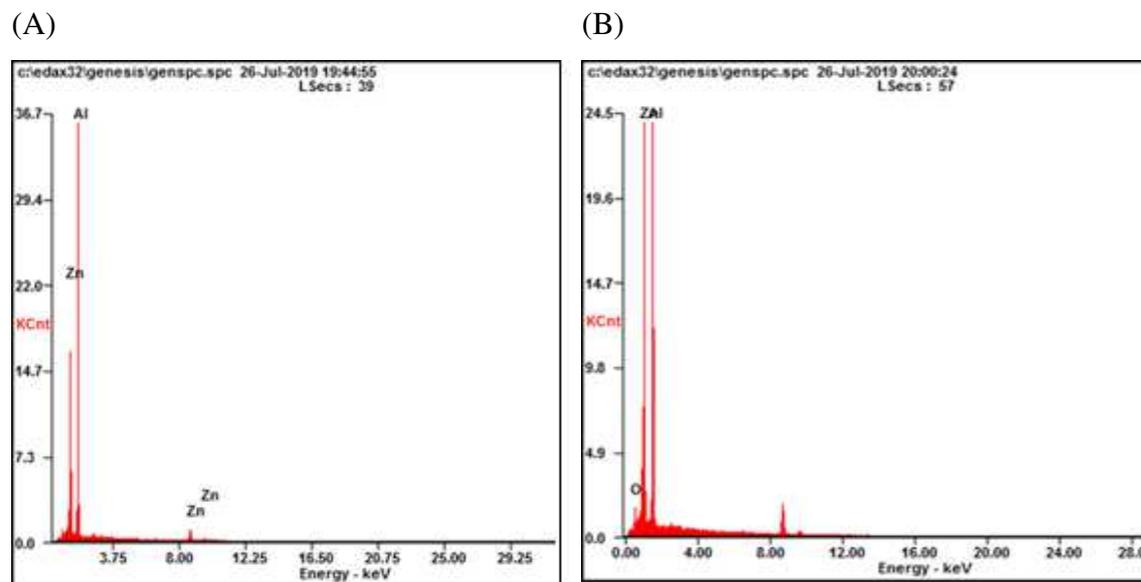


Figura 62: MEV após exposição em campo por 75 dias do material aço inoxidável duplex SAF 2205.

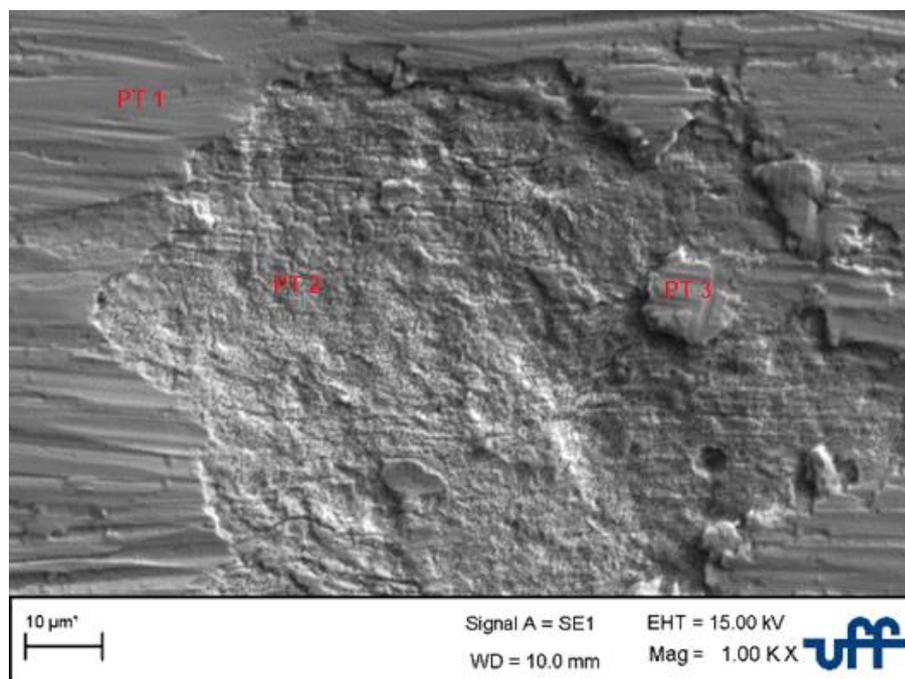
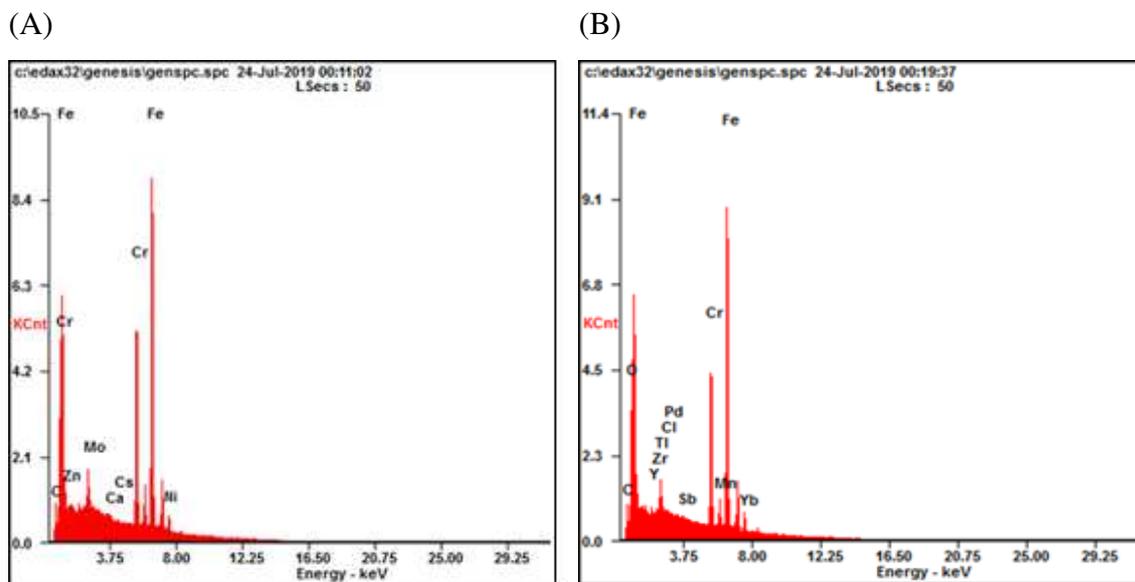


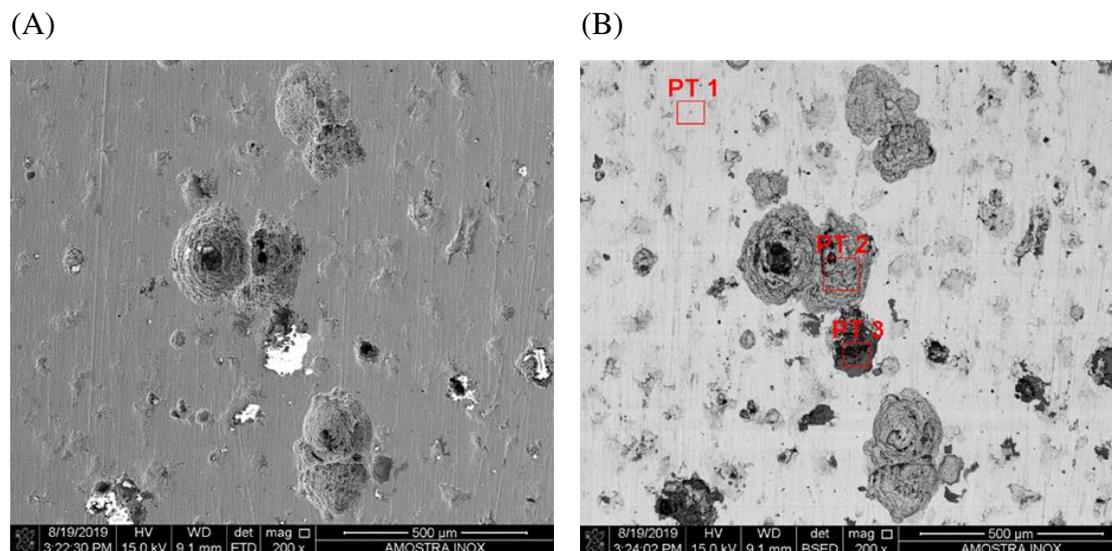
Figura 63: Composição química por EDS do material revestido aço inoxidável duplex SAF 2205 após exposição em campo por 75 dias. A) ponto 1 B) ponto 2.



Na Figura 62 está a imagem de MEV do aço inoxidável com tempo de exposição de 75 dias na área de decapagem ácida, nela pode ser observada escavação, já mencionada anteriormente, sugestiva de desgaste do material durante corte. Por EDS na Figura 63 na região desta escavação, observa-se presença de oxigênio e cloreto. Nesta escavação não descarta-se o início de formação de pite.

Após limpeza da amostra exposta na área por 1 ano, a superfície da mesma apresentou vários pontos indicativos de pites que com as imagens de MEV da Figura 64 puderam ser confirmados.

Figura 64: MEV após exposição em campo por 1 ano do material aço inoxidável duplex SAF 2205.

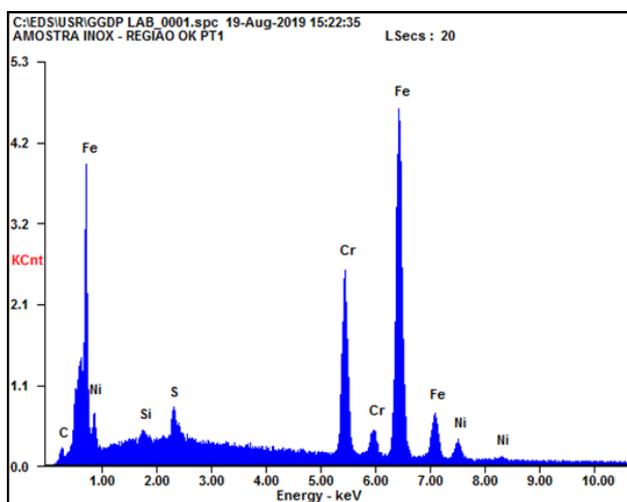


Na microanálise por EDS (Figura 65) observa-se que na região do ponto 1, onde não há ocorrência de pite, a composição química apresenta Fe, Cr, Ni e Si, elementos típicos do material.

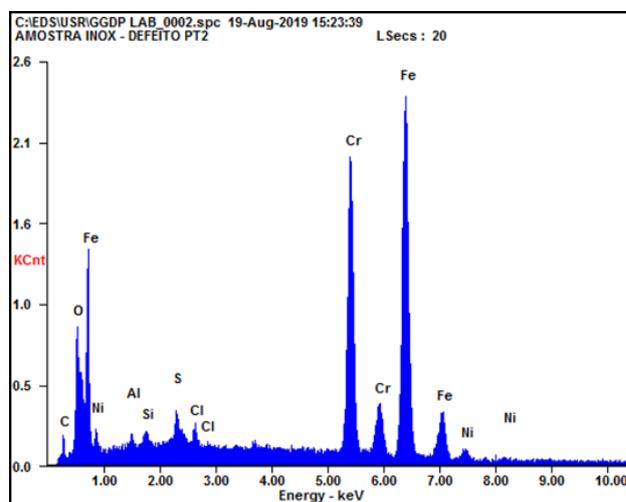
Já nos pontos 1 e 2 da Figura 65, a microanálise realizada no interior dos pites mostra presença de cloreto e oxigênio. A presença destes elementos pode ser associada à quebra da passividade do material e existência de pite. Existem vários mecanismos propostos para explicar o início da formação do pite e que estão relacionados com essa quebra da passividade, além de condições associadas como a presença de íons cloreto e estagnação do material no meio corrosivo (FRANKEL, 1998; AHMAD, 2006).

Figura 65: Composição química por EDS do material aço inoxidável duplex SAF 2205 após exposição em campo por 1 ano. A) ponto 1. B) ponto 2. C) ponto 3.

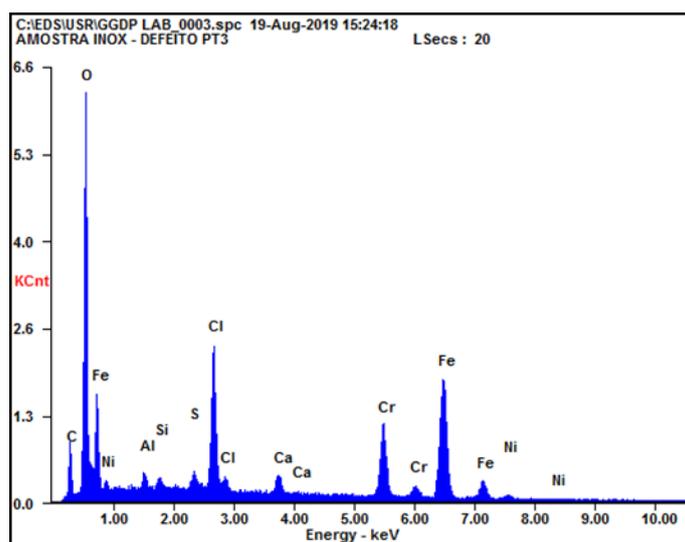
(A)



(B)



(C)



6. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados confirmaram a superior resistência à corrosão por pite do aço inoxidável duplex SAF 2205 e que a pré-pintura dos aços revestidos confere uma proteção adicional ao material contra a corrosão.

O aço inoxidável e os aços revestidos e pré-pintados não apresentaram processos corrosivos quando analisados visualmente após ensaio em câmara de névoa salina, indicando serem mais resistentes em ambientes agressivos com alta concentração de cloreto do que os materiais revestidos com zinco e com liga 55% Al-Zn.

Os ensaios eletroquímicos mostram uma maior resistência à corrosão por pites do aço inoxidável seguido pelos aços revestidos com a liga 55% Al-Zn e Zn. Os ensaios eletroquímicos de curva de polarização cíclica não foram realizados com as amostras de aços pré-pintados uma vez que a resistência à transferência de carga é bem elevada devido à alta resistência à corrosão proporcionada pela pintura.

A microanálise por EDS mostrou a eficiência da aplicação de tinta sobre revestimentos metálicos para impedir ou retardar o ataque do material pela ação de cloretos presentes no ambiente, uma vez que, nestes materiais não foi observada ocorrência de pite.

Apesar do aço inoxidável duplex SAF 2205 mostrar alta resistência ao pite, este quando exposto ao ambiente de uma linha de decapagem por um período prolongado, apresenta formação de pites. A exposição ao ambiente também mostra desvantagem deste material quando se requer resistência associada à estética para aplicação em coberturas.

7. REFERÊNCIAS

- ADELI, M.; GOLOZAR, M.; RAEISSI, K. Pitting Corrosion of SAF2205 Duplex Stainless Steel in Acetic Acid Containing Bromide and Chloride. **Chemical Engineering Communications**, v. 197, p. 1404, 2010.
- AHMAD, Z. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control - 1st Edition**. 1ª ed. Oxford: Elsevier, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Manual Técnico - Telhas de Aço**. ABCEM, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. NBR ABNT NBR 8094:1983. **Material Metálico Revestido e Não-Revestido - Corrosão por Exposição à Névoa Salina**, 1983.
- BEDOYA, F.; CALDERÓN, J.; BERMÚDEZ, Á.; CASTAÑO, J.; ECHEVERRÍA, F.; MAYA, J. Ingeniería y Universidad. **Análisis de los Factores de Mayor Influencia en la Evaluación del Desempeño de Recubrimientos Orgánicos Mediante Ensayos Acelerados y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica**, v. 15, n. 1, p. 245, 2011.
- BELLEZZE, T.; GIULIANI, G.; ROVENTI, G. Study of Stainless Steels Corrosion in a Strong Acid Mixture. Part 1: Cyclic Potentiodynamic Polarization Curves Examined By Means Of An Analytical Method. **Corrosion Science**, v. 130, p. 113, 2018.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. São Paulo: LTC Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- CARVALHO, J.E.R. **Curso Básico de Zincagem por Imersão a Quente**. Programa de Treinamento em Tecnologia de Zincagem por Imersão a Quente. Galvasud, 1999.
- CAVALCANTE, T. S. L. **Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Revestidos ou não com Zinco Fosfatizados e Pintados**. Dissertação de Mestrado —Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Cenário dos Fabricantes de Telhas de Aço e Steel Deck**. ABCEM, 2018.
- CHENG, X.; WANG, Y.; LI, X.; DONG, C. Interaction Between Austenite-Ferrite Phases on Passive Performance of 2205 Duplex Stainless Steel. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 34, n. 11, p. 2140, 2018.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Galvalume**. Disponível em: <http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59683&prSv=1>. Acesso em: 29 abr. 2017a.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Galvanizados**. Disponível em: <http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59673&prSv=1>. Acesso em: 29 abr. 2017b.

- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Pré-pintado**. Disponível em: <www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59681&prSv=1>. Acesso em: 29 abr. 2017.
- DEFLORIAN, F.; FEDRIZZI, L.; ROSSI, S. Effects of Mechanical Deformation on the Protection Properties of Coil Coating Products. **Corrosion Science**, v. 42, n. 7, p. 1283, 2000.
- DIAS, L. A. DE M. **Estruturas de Aço – Conceitos, Técnicas e Linguagem**. São Paulo: ZIGURATE EDITORA, 1998.
- ELSNER, C. I.; SERÉ, P. R.; DI SARLI, A. R. Atmospheric Corrosion of Painted Galvanized and 55%Al-Zn Steel Sheets: Results of 12 Years of Exposure. **International Journal of Corrosion**, 2012.
- FERREIRA, E. A.; DELLA NOCE, R.; FUGIVARA, C. S.; BENEDETTI, A. V.. Influence of Ethanol, Acidity and Chloride Concentration on the Corrosion Resistance of AISI 316L Stainless Steel. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 3, p. 397, 2013.
- FERREIRA, E. A.; SILVA, R. C. D. C.; COSTA, L. A. T.; OLIVEIRA, C. P. R. DE; SILVA, G. C.; PAULA, A. DOS S.; FUGIVARA, C. S.; BENEDETTI, A. V. Is Duplex Stainless Steel more Corrosion Resistant than 316L in Aqueous Acid Chloride-Containing Environments at Temperatures Higher than 100°C? **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 53, n. 7, p. 502, 2018.
- FRANKEL, G. S. Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 145, n. 6, p. 2186, 1998.
- FRANKEL, G. S. **Pitting Corrosion**. **ASM Handbook, Vol. 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection**. [s.l.] ASM International., 2003. v. 13A.
- FUENTE, D.; CASTAÑO, J. G.; MORCILLO, M. Long-Term Atmospheric Corrosion of Zinc. **Corrosion Science**, v. 49, n. 3, p. 1420, 2007.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3^a ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- GUNN, R. **Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications**. 1^a ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 1997.
- GUO, L.; STREET, S. R.; MOHAMMED-ALI, H. B.; GHAHARI, M.; MI, N.; GLANVILL, S.; DU PLESSIS, A.; REINHARD, C.; RAYMENT, T.; DAVENPORT, A. J. The Effect of Relative Humidity Change on Atmospheric Pitting Corrosion of Stainless Steel 304L. **Corrosion Science**, v. 150, p. 110, 2019.
- GUPTA, G.; PATHAK, S. S.; KHANNA, A. S. Anticorrosion Performance of Eco-Friendly Silane Primer for Coil Coating Applications. **Progress in Organic Coatings**, v. 74, n. 1, p. 106, 2012.
- HA, H.-Y.; LEE, T.-H.; BAE, J.-H.; WON CHUN, D. Molybdenum Effects on Pitting Corrosion Resistance of FeCrMnMoNC Austenitic Stainless Steels. **MDPI**, v. 8, 2018.

- HUANG, I.-W.; HURLEY, B. L.; YANG, F.; BUCHHEIT, R. G. Dependence on Temperature, pH, and Cl⁻ in the Uniform Corrosion of Aluminum Alloys 2024-T3, 6061-T6, and 7075-T6. **Electrochimica Acta**, v. 199, p. 242, 2016.
- HUANG, M.; YANG, J. Salt Spray and EIS Studies on HDI Microcapsule-Based Self-Healing Anticorrosive Coatings. **Progress in Organic Coatings**, v. 77, n. 1, p. 168, 2014.
- ITMAN FILHO, A.; SILVA, R. V.; CARDOSO, W. DA S.; CASTELETTI, L. C. Effect of Niobium in the Phase Transformation and Corrosion Resistance of one Austenitic-Ferritic Stainless Steel. **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 801, 2014.
- KAGE I.; SHIOTANI K.; TAKEMURA M.; KOMORI T.; FURUTA A.; KYONO K. Estimation of Corrosion Loss for Ni-added High Corrosion Resistant Weathering Steel based on Field Exposure Test. **Zairyo-to-Kankyo**, v. 55, n. 4, p. 152, 2006.
- KAHRAM, M.; ASNAVANDI, M.; KOSHY, P.; SORRELL, C. Corrosion Investigation of Duplex Stainless Steels in Chlorinated Solutions. **Steel Research International**, v. 86, n. 9, p. 1022, 2014.
- KELLY, R.; R SCULLY, J.; SHOESMITH, D.; G BUCHHEIT, R. **Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering**. 1^a ed. New York: CRC Press, 2003.
- LANDOLT, D. **Corrosion and Surface Chemistry of Metals**. 1^a ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2007.
- MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC., [s.d.]. Disponível em: <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.
- MANHABOSCO, S. M. **Avaliação do Comportamento Corrosivo de Aços Galvanizados Utilizando Microssondas Eletroquímicas**. Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- MARCUS, P.; MANSFELD, F. B. **Analytical Methods in Corrosion Science and Engineering**. 1^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- NAKAZATO, R. Z. **Estudo do Comportamento Eletroquímico do Zinco em Solução de Ions Crômio(VI) no Intervalo de pH 1,8-8,4**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1997.
- PAIVA, C. O Desempenho da Construção em Aço. **Finestra**, n. 97, 2016.
- PALM, M.; KRIEG, R. Neutral Salt Spray Tests on Fe–Al and Fe–Al–X. **Corrosion Science**, v. 64, p. 74, 2012.
- PALMA, E.; PUENTE, J. M.; MORCILLO, M. The Atmospheric Corrosion Mechanism of 55%Al-Zn Coating - Made in Spain by CSI Pianos Under the Trademark Algafort, Which Has Been Licensed by BIEC International, Inc. on Steel. **Corrosion Science**, v. 40, n. 1, p. 61, 1998.

- PANOSSIAN, Z. **Revestimentos Metálicos para Proteção contra a Corrosão**. Florianópolis: ABM, 2001. 94p.
- PARANHOS, R. M. V. **Avaliação da Resistência à Corrosão Atmosférica de Aços Fosfatizados e Pintados para Aplicação na Indústria da Construção Civil**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- PARANHOS, R. M. V. **Caracterização de fases Intermetálicas Presentes em Aço Galvanizado por Imersão a Quente com tratamento Térmico do revestimento Metálico**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- PERSSON, D.; THIERRY, D.; KARLSSON, O. Corrosion and Corrosion Products of Hot Dipped Galvanized Steel During Long Term Atmospheric Exposure at Different Sites World-Wide. **Corrosion Science**, v. 126, p. 152, 2017.
- REVIE, R. W. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. Edição: 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell, 2008.
- ROBERGE, P. R. **Handbook of corrosion engineering**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- ROSA, P. C. **Estudo da Eficiência de Inibidores Voláteis de Corrosão para o Aço Galvannealed**. Dissertação de Mestrado—Araraquara: Universidade Estadual Paulista, 2009.
- RUELA, M. S. P.; SILVEIRA, D. M. DA. Corrosão de Aço Galvanizado em Soluções Ácidas. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1250, 2017.
- SANTOS, A. P.; MANHABOSCO, S.M; RODRIGUES, J. S; DICK, L. F. P. Comparative Study of the corrosion Behavior of Galvanized, Galvannealed and Zn55Al coated Interstitial Free Steels. **Surface & Coatings Technology**, n. 279, p. 150, 2015.
- SANTOS, C. A. L. As Sofisticadas Armas do Combate à Corrosão. **Corrosão & Proteção**, v. 13, n. 61, p. 9, 2016.
- SCHWEITZER, P. **Corrosion of Linings & Coatings: Cathodic and Inhibitor Protection and Corrosion Monitoring**. 1ª ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2006.
- SCHWEITZER, P. A. **Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes and Preventative Methods**. 1ª ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2009.
- SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. Estudo Comparativo entre os Aços Inoxidáveis Dúplex e os Inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 175, 2007.
- SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. (EDS.). **Corrosion: Metal/Environment Reactions**. 3ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. v. 1.
- SIOW, K. S.; SONG, T. Y.; QIU, J. H. Pitting Corrosion of Duplex Stainless Steels. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 48, n. 1, p. 31, 2001.

- SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R.; HOLLER, F. J. **Princípios de Análise Instrumental**. 6^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- STANSBURY, E. E.; BUCHANAN, R. A. **Fundamentals of electrochemical Corrosion**. Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- STEPHEN, W. **An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers and Scientists**. USA: Pair O Docs Pubns, 1994.
- SUZUMURA, K.; NAKAMURA, S. Environmental Factors Affecting Corrosion of Galvanized Steel Wires. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 1, p. 1, 2004.
- TANG, B.; SU, W.; WANG, J.; FU, F.; YU, G.; ZHANG, J. Minimizing the Creation of Spent Pickling Liquors in a Pickling Process with High-Concentration Hydrochloric Acid Solutions: Mechanism and Evaluation Method. **Journal of Environmental Management**, v. 98, p. 147, 2012.
- TOMIELLO, S. S. **Tratamento Termoquímico Assistido a Plasma para Incremento da Resistência à Corrosão de Aço-Carbono**. Dissertação de Mestrado—Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2012.
- VERA, R.; GUERRERO, F.; DELGADO, D.; ARAYA, R. Atmospheric Corrosion of Galvanized Steel and Precipitation Runoff from Zinc in a Marine Environment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 3, p. 449, 2013.
- WANG, S. G.; SUN, M.; XU, Y. H.; LONG, K.; ZHANG, Z. D. Enhanced Localized and Uniform Corrosion Resistances of Bulk Nanocrystalline 304 Stainless Steel in High-Concentration Hydrochloric Acid Solutions at Room Temperature. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 34, n. 12, p. 2498, 2018.
- WICKS, Z. W., Jr; JONES, F. N.; PAPPAS, S. P. **Organic Coatings: Science and Technology**. Edição: 3rd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007.
- WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: EdUSP, 2003.
- YU, Y.; SHIRONITA, S.; SOUMA, K.; UMEDA, M. Effect of Chromium Content on the Corrosion Resistance of Ferritic Stainless Steels in Sulfuric Acid Solution. **Heliyon**, v. 4, n. 11, p. 958, 2018.