

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Wladmir Virgílio Verly

Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aço Galvanizado após Dobramento

Belo Horizonte
2018

Wladimir Virgílio Verly

Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aço Galvanizado após Dobramento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra Ivete Peixoto Pinheiro
Coorientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Belo Horizonte
2018

Verly, Wladimir Virgílio.
V521c Caracterização microestrutural e avaliação da resistência à
corrosão de aço galvanizado após dobramento / Wladimir Virgílio
Verly – 2018.
80 f. : il., fotos, grafos.
Orientadora: Ivete Peixoto Pinheiro
Coorientador: Marcello Rosa Dumont

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Sistemas e processos construtivos. 2. Corrosão. 3.
Conformação mecânica I. Pinheiro, Ivete Peixoto. II. Dumont,
Marcello Rosa. III. Título.

CDD: 620.11223



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E
AValiaÇÃO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇO
GALVANIZADO APÓS DOBRAMENTO”

Autor: Wladimir Virgílio Verly

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro (ORIENTADORA)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont (COORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof^a. Dr^a. Mônica Maria de Abreu Mendonça Schwartzman

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG

Belo Horizonte, 16 de Agosto de 2018.

À minha querida esposa Ludmylla, a quem escolhi passar a vida ao lado e que tanto me ajuda, seja no âmbito pessoal, profissional ou acadêmico. A pessoa que sonhou comigo meu sonho de me tornar mestre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, nosso criador, e por sua infinita misericórdia.

À minha orientadora Ivete e meu coorientador Marcello, pelo suporte dado.

Ao CEFET, FINEP, Capes e Fapemig.

À MG Sistema Construtivo, por ceder as amostras de Light Steel Frame.

À minha esposa Ludmylla, por seu carinho e suporte.

À minha mãe querida Rita, por todo o amor dado nessa vida, e ao meu pai Waldir, meu eterno companheiro, que do céu se alegra com essa conquista.

Aos meus irmãos Waldir e Wagner, grandes apoiadores que tenho na vida.

Às minhas cunhadas Júlia e Gabriela e meu cunhado Hygor.

Aos meus primos-irmãos Cássio, Thamyres e Mayara e tios Delizete, Edmar e Zezinho.

Às famílias Brito e Souza, que me acolheram como filho.

Aos grandes amigos e padrinhos Jac, Rafa, Fernando, Karina, Aline, Antônio, Diogo, Stephanye, Poly, Marcelo, Marina, Newtinho, Néia, Thiago, Amanda, Filipe, Juliana, Gleisson, Luana, Bruna, Lucas, Tatiana, Michelle, Gabriel e Vivi.

Aos meus amigos do Chat, da rua, do CEFET, da Una, St Jude, 3M e Accenture.

Aos meus líderes Ederson, Isabela, Jonatas e Alexandre, por flexibilizarem minha jornada, permitindo que eu cursasse o mestrado.

À Roberta Botinha e Mayra Vieira, pelo suporte dado em relação ao potenciostato.

RESUMO

O *Light Steel Frame* (LSF) é um sistema construtivo alternativo ao tradicional sistema de construção em concreto armado, onde são utilizadas chapas de aço galvanizado pré-fabricadas para construção de casas e pequenos edifícios. As chapas utilizadas nesse sistema passam por processos de conformação mecânica, como dobramento, para adquirirem o formato necessário para montagem das estruturas. O comportamento de corrosão da chapa revestida, porém, pode variar de acordo com os tipos de deformação que a mesma foi submetida, ou seja, diferentes regiões da mesma peça podem apresentar um comportamento de corrosão diferente. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de chapas de aço galvanizado após conformação mecânica por dobramento, comparando-a com a resistência à corrosão apresentada pelas chapas não conformadas. Para realização deste trabalho, foram analisadas 25 amostras de aço galvanizado utilizado para confecção da estrutura metálica do sistema construtivo LSF. As amostras foram previamente caracterizadas por meio de medição da espessura do revestimento e análise microestrutural da camada do revestimento. As mesmas foram separadas em cinco grupos, onde um grupo de amostras não sofreu deformação e, nos demais grupos, as amostras foram dobradas, formando os ângulos de 30°, 60°, 90° e 120°. Na sequência, todas as amostras, incluindo as não dobradas, foram submetidas ao teste de corrosão utilizando um galvanostato / potenciostato. A análise de corrosão foi realizada por meio da comparação do potencial de corrosão (E_{corr}) e da densidade de corrente de corrosão apresentados pelas amostras em diferentes situações de deformação. Os resultados mostraram que as amostras de aço que sofreram dobramento apresentaram potencial de corrosão de 20 mV a 30 mV maior em relação às não deformadas. Os resultados mostraram, ainda, que o percentual de deformação sofrido pela camada do revestimento influencia na aceleração do processo de corrosão. A análise da densidade de corrente de corrosão das amostras mostrou que o aumento no ângulo de dobramento da chapa gera um aumento no fluxo de corrente, fazendo com que a taxa de corrosão da chapa dobrada seja maior que a da chapa não dobrada.

Palavras-chave: *Light Steel Frame*; Corrosão; Aço Galvanizado; Conformação Mecânica

ABSTRACT

The Light Steel Frame (LSF) is an alternative building system to the traditional building system using reinforced concrete, where prefabricated galvanized steel sheets are used for construction of houses and small buildings. The steel sheets used in this process undergo through mechanical forming processes, as folding, to acquire the needed format for assembling the structures. The corrosion behavior of galvanized sheets, however, can vary according to the type of deformation that the part has suffered, that is, different regions of same part can present a different corrosion behavior. This study has as objective evaluate the corrosion resistance of galvanized steel sheet after forming by folding in comparison with the corrosion resistance presented by non-folding samples. To carry out this work, was analyzed 25 galvanized steel samples used to build the metallic structure of LSF construction system. The samples were previously characterized by measuring the thickness of coating and microstructural analysis of coating. The samples were separated in five groups, where one group didn't suffer forming and, on other groups, the samples were folded forming angles of 30°, 60°, 90° and 120°. After that, all the samples, including non-folded, were submitted to corrosion test using a galvanostatic / potentiostatic. The corrosion analysis were carried out by comparing the corrosion potential (E_{corr}) and the corrosion density of current showed by the samples in different forming situations. The results have showed that folded samples have presented 20 mV to 30 mV higher corrosion potential than non-folded samples. Also, the results have showed that the percentage of deformation suffered by the coating have influence on the acceleration of corrosion process. Analysis of the corrosion current density of the samples showed that the increase in the folding angle of the sheets generates an increase in the current flow, causing the corrosion rate of the folded sample to be greater than that of the non-folded.

Keyword: Light Steel Frame; Corrosion; Galvanized Steel; Mechanical forming

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Galvanização por eletrodeposição | 22 |
| Figura 2 - Linha de produção de aço eletrogalvanizado..... | 23 |
| Figura 3 - Microestruturas do revestimento de zinco..... | 25 |
| Figura 4 - Linha de produção de aço galvanizado por imersão a quente..... | 26 |
| Figura 5 - Micrografias MEV mostrando a morfologia da superfície de aço galvanizado como recebido (a, b) e <i>galvannealed</i> (c, d) | 28 |
| Figura 6 - Resultados de penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão Ciclado I, após 1.680 h de exposição..... | 30 |
| Figura 7 - Resultados de penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão GM 9540P/B, após 1.920 h de exposição..... | 30 |
| Figura 8 - Resultados de avanço médio da corrosão do teste de campo com aspersão de solução salina de NaCl a 5 % p/v duas vezes por semana, após três anos de exposição..... | 31 |
| Figura 9 - Resultados de avanço médio da corrosão do teste não-acelerado de corrosão, após três anos de exposição em atmosfera marinha..... | 31 |
| Figura 10 - Veículo com peças de aço oxidadas..... | 33 |
| Figura 11 - Curvas de polarização correspondentes a duas amostras de grão pequeno | 35 |
| Figura 12 - Curvas de polarização correspondentes a duas amostras de grão maior | 35 |
| Figura 13 - Curvas de polarização em solo com diferentes umidades | 36 |
| Figura 14 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tensão biaxial..... | 39 |
| Figura 15 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tração..... | 40 |
| Figura 16 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de modo de tensão..... | 40 |
| Figura 17 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tensão uniaxial.... | 41 |
| Figura 18 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tensão biaxial..... | 42 |
| Figura 19 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tração..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de modo de tensão..... | 43 |
| Figura 21 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tensão uniaxial..... | 44 |
| Figura 22 - Composição das forças atuantes no dobramento..... | 45 |
| Figura 23 - Micrografias das superfícies danificadas realizadas por meio de MEV... | 46 |
| Figura 24 - Corte da chapa para medição de espessura | 48 |
| Figura 25 - Amostras iniciais analisadas na MEV | 48 |
| Figura 26 - Chapa de aço galvanizado para corte das amostras | 49 |
| Figura 27 - Dobradeira de chapas manual | 49 |
| Figura 28 - Amostras dobradas para o teste | 50 |
| Figura 29 - Amostra isolada para ensaio de corrosão..... | 51 |
| Figura 30 - Bancada de testes durante um ensaio..... | 52 |
| Figura 31 - Fluxograma com as etapas adotadas | 53 |
| Figura 32 - MEV da superfície da amostra plana | 55 |
| Figura 33 - MEV da superfície da mostra curva 90° | 56 |
| Figura 34 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90° | 58 |
| Figura 35 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90° | 59 |
| Figura 36 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90° | 59 |
| Figura 37 - MEV da superfície externa da chapa – região plana..... | 60 |
| Figura 38 - MEV da superfície interna da chapa – região da curva 90° | 62 |
| Figura 39 - MEV da superfície interna da chapa – região da curva 90° | 63 |
| Figura 40 - MEV da superfície interna da chapa – região plana | 64 |
| Figura 41 - Ensaio de corrosão da amostra não dobrada | 65 |
| Figura 42 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 30° | 66 |
| Figura 43 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 60° | 66 |
| Figura 44 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 90° | 67 |
| Figura 45 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 120° | 67 |
| Figura 46 - Densidade de Corrente de Corrosão (A/cm ²)..... | 68 |
| Figura 47 - Potencial de corrosão em função do ângulo de dobramento | 71 |
| Figura 48 - Comparação dos resultados de Sacco et al (2003) e o estudo atual..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 49 - MEV da amostra dobrada a 90° - interface entre a área exposta e a área isolada..... | 74 |
| Figura 50 - MEV da amostra dobrada a 90° - interface entre a área exposta e a área isolada..... | 75 |
| Figura 51 - MEV da superfície após ensaio de corrosão..... | 76 |
| Figura 52 - MEV da superfície após ensaio de corrosão..... | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Resultado de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão para diferentes níveis de umidade no solo | 37 |
| Tabela 2 - Resultado das medições de espessura do revestimento em μm | 54 |
| Tabela 3 - Resultado das densidades de corrente de corrosão (A/cm^2) em função do ângulo de dobramento com intervalo de confiança de 95% | 68 |
| Tabela 4 - Soma, média e variância das amostras ensaiadas | 69 |
| Tabela 5 - Resultado ANOVA - Fator único | 69 |
| Tabela 6 - Resultado dos potenciais de corrosão (E_{corr}) dos ensaios de corrosão em Volts | 70 |
| Tabela 7 - Resultado ANOVA – Fator único do potencial de corrosão E_{corr} (V) das amostras dobradas..... | 71 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM - *American Society for Metals*

ASTM - *America Society for Testing and Materials*

EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy*

EG - Eletro galvanizado

EIS - *Electrochemical Impedance Spectroscopy*

GA - *Galvannealed*

GI - Galvanizado por Imersão

IF - *Interstitial Free*

ISO - *International Organization for Standartization*

LSF - *Light Steel Frame*

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira

OCP - *Open Circuit Potential*

PIB - Produto Interno Bruto

PPF - Perfil Pré Fabricado

SCE - *Saturated Calomel Electrode*

ZAR - Zincado de Alta Resistência

SS - Soma dos quadrados

df - Grau de liberdade

MS - Soma média dos quadrados

F - Razão entre as variâncias

P - Probabilidade

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa - Mega Pascal
Fe-C - ferro-carbono
mm - milímetro
mV - milivolts
h - horas
 g.m^{-2} - gramas por metro quadrado
 p.v^{-1} - peso por volume
 $^{\circ}\text{C}$ - temperatura Celsius
 H_2 - hidrogênio
 N_2 - nitrogênio
Fe-Zn - ferro-zinco
 μm - micrômetro
Zn-Ni - zinco-níquel
Fe - ferro
 Fe_2O_3 - óxido de ferro (Hematita)
 E° - potencial de oxidação
 ΔG - energia livre de Gibbs
V - volts
NaCl - cloreto de sódio
 mg.L^{-1} - miligramas por litro
 R_p - resistência à polarização
 mV.min^{-1} - milivolts por minuto
 mA.cm^{-2} - miliampéres por centímetro quadrado
 cm^2 - centímetro quadrado
 mV.s^{-1} - milivolts por segundo
KHz - quiloHertz
MHz - mega Hertz
Q - coulombs
I - corrente
 C.cm^{-2} - coulombs por centímetro quadrado

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | OBJETIVOS DO PROJETO..... | 17 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 3.1 | Aço | 18 |
| 3.2 | <i>Light Steel Frame</i> | 19 |
| 3.3 | Revestimento de chapa de aço | 20 |
| 3.4 | Galvanização | 21 |
| 3.4.1 | Eletrodeposição..... | 21 |
| 3.4.2 | Galvanização por Imersão a Quente | 24 |
| 3.5 | Zinco | 28 |
| 3.6 | Corrosão..... | 32 |
| 3.7 | Influência da conformação mecânica na resistência à corrosão | 34 |
| 3.8 | Composição de forças atuantes no dobramento..... | 44 |
| 3.9 | Influência do processo de galvanização nos danos superficiais apresentados após conformação mecânica | 45 |
| 4 | METODOLOGIA | 47 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 54 |
| 5.1 | Medição da espessura do revestimento das amostras não dobradas..... | 54 |
| 5.2 | Análise Inicial do Revestimento por meio da MEV | 55 |
| 5.3 | Resultado dos ensaios de corrosão | 65 |
| 5.4 | Análise final do revestimento por meio da MEV | 73 |
| 6 | CONCLUSÃO | 78 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 80 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 81 |

1 INTRODUÇÃO

O *Light Steel Frame* é um sistema construtivo já consagrado em países como os Estados Unidos, porém ainda pouco difundido no Brasil. Esse trabalho tem como motivação a avaliação da resistência à corrosão do aço galvanizado utilizado nesse sistema em virtude do potencial econômico que o mesmo apresenta no Brasil, onde a construção civil apresenta um importante papel na economia do país e ainda prevalece o sistema construtivo tradicional de alvenaria.

O macro setor da construção civil é responsável por uma grande parcela do PIB do Brasil, ocupando, portanto, um papel importante no cenário econômico nacional. A construção civil contempla uma série de atividades com diferentes graus de complexidade e níveis tecnológicos, ligadas entre si por meio de uma vasta gama de produtos, que vai desde a indústria siderúrgica até a venda de varejo e serviço (MELLO; AMORIM, 2009).

O *Light Steel Frame* (LSF) é um sistema construtivo onde são utilizadas estruturas metálicas pré-fabricadas para pequenas construções, apresentando diversas vantagens frente ao sistema construtivo convencional de alvenaria (LIU et al, 2015).

As construções em LSF utilizam o aço galvanizado como material base para formar a estrutura da edificação, integrado com outros componentes industrializados, como placas cimentícias, substituindo tijolos, madeiras, vigas e pilares de concreto com diversas vantagens técnicas, como a facilidade de manutenção, proporcionando um ganho qualitativo no processo produtivo e posicionando-se de modo competitivo no mercado (VIVAN; PALIARI, 2012).

Segundo Rodrigues (2006), os perfis pré-fabricados (PPF) para o sistema *Light Steel Frame* devem ser confeccionados a partir de bobinas de aço zincado de alta resistência (ZAR), com resistência ao escoamento igual ou superior a 230 MPa, para garantir a segurança da edificação.

A corrosão é um dos principais problemas enfrentados pela indústria e, devido a isso, tem sido uma preocupação. O uso de produtos químicos e os fatores ambientais, como o ar atmosférico, a poluição do ar em áreas industriais, a exposição a ambientes marinhos nas regiões costeiras, as chuvas ácidas, dentre outros, têm contribuído para o aumento da corrosão das peças metálicas utilizadas na indústria (ASM Handbook, 1992).

A galvanização é um processo de revestimento de peças de aço ou ferro fundido cuja finalidade é promover proteção contra corrosão. Essa proteção se dá por meio da adição de zinco à superfície do aço, onde o zinco atua tanto como uma barreira física, impedindo o contato do aço com o meio corrosivo, bem como proteção química, oferecendo proteção catódica ao aço, por possuir maior potencial de oxidação. O uso de aços galvanizados na indústria faz prolongar a vida útil dos produtos finais. Com isso, o consumo de matéria-prima é reduzido, contribuindo assim para a conservação dos recursos naturais, como minério de ferro, energia e água (GENTIL, 1996, p. 1).

As chapas de aço utilizadas no sistema construtivo LSF passam por processos de conformação mecânica, como dobramento, a fim de conferir forma e dimensão à mesma para atender aos requisitos de projeto e de norma. Esse trabalho visa o estudo da influência do dobramento na resistência à corrosão do aço galvanização em solução de NaCl à 5% em volume.

2 OBJETIVOS DO PROJETO

Objetivo Geral:

- Caracterizar a microestrutura e avaliar a resistência à corrosão em NaCl (5% em volume) do aço galvanizado utilizado no sistema construtivo *Light Steel Frame* (LSF) em função do ângulo de dobramento.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar as chapas de aço galvanizado utilizadas no sistema LSF em relação à espessura do revestimento.

- Analisar a camada do revestimento de zinco antes e após a conformação mecânica por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando a técnica de elétrons secundários.

- Desenvolver método de preparação de amostra para ensaio de corrosão de chapas de aço dobradas ou não.

- Aplicar método de análise eletroquímica potenciodinâmica para mensurar a corrosão em chapas e perfis deformados.

- Avaliar a resistência à corrosão dos diferentes tipos de corpos de prova (aço galvanizado não dobrado e aço galvanizado dobrado em ângulos pré-definidos) por meio da análise do potencial de corrosão (E_{corr}) e da densidade de corrente de corrosão (I_{corr} em A/cm^2) utilizando um potenciostato / galvanostato.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aço

O aço é uma liga metálica que possui como elementos básicos o ferro e o carbono, contendo cerca de 0,008 % a 2,11 % de carbono, além de elementos secundários, resultantes dos processos de fabricação do aço. O valor mínimo de 0,008 % se refere à máxima solubilidade, à temperatura ambiente, do carbono no ferro. Já o valor máximo de 2,11 % é referente ao máximo de carbono que é possível dissolver no ferro (CHIAVERINI, 1988, p. 21).

Os aços possuem, além de ferro e carbono, elementos residuais resultantes do processo de fabricação, como o enxofre, silício, etc., e elementos de ligas, adicionados a fim de atingir propriedades específicas, como o manganês, cromo, níquel, dentre outros (DIAS, 1998 apud PARANHOS, 2010).

As chapas de aço são materiais que possuem boa ductilidade e grande facilidade de conformação. Para confecção de chapas de aço, geralmente são utilizados aços “baixo carbono”, cuja concentração de carbono varia de 0,03 % a 0,12 % (CHIAVERINI, 1988, p. 223-224).

Ainda de acordo com Chiaverini (1988, p. 223), a distinção entre os produtos laminados planos da liga Fe-C é feita pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de acordo com a relação espessura/largura, da seguinte forma:

- Folha: espessura inferior a 0,30 mm e qualquer largura.
- Tira: espessura entre 0,30 mm e 5,00 mm e largura inferior a 300 mm.
- Chapa fina: espessura entre 0,30 mm e 5,00 mm e largura igual ou superior a 300 mm.
- Barra chata: espessura superior a 5,00 mm e largura inferior a 300 mm.
- Chapa grossa: espessura superior a 5,00 mm e largura igual ou superior a 300 mm.

Em geral, devido às condições de trabalho, as chapas deveriam possuir boa resistência à corrosão, tanto atmosférica quanto a outros agentes químicos a que

estiverem expostas. Como o aço utilizado para confecção de chapas geralmente não possui essa característica, é necessário realizar algum tipo de revestimento protetor, para evitar ou reduzir a corrosão. A escolha desse revestimento depende tanto do custo quanto da aparência desejada (CHIAVERINI, 1988, p. 223).

Com exceção do ouro, que é encontrado na natureza na forma metálica, os demais metais são obtidos a partir de minérios, com o uso de grande quantidade de energia no processo metalúrgico. Como um resultado inverso ao processo metalúrgico, a corrosão se apresenta de modo espontâneo como a razão termodinâmica que transforma os metais novamente em compostos (PARANHOS, 2010).

3.2 *Light Steel Frame*

O *Light Steel Frame* é um sistema construtivo alternativo ao tradicional sistema de construção em concreto armado, onde são utilizadas estruturas metálicas pré-fabricadas para construção de casas e pequenos edifícios. Esse sistema apresenta diversas vantagens, se comparado ao sistema tradicional de construção, como baixo tempo de execução, redução de peso, baixa intensidade de trabalho e alto grau de industrialização, sendo considerado um "edifício verde" (LIU et al, 2015).

Com exceção da fundação, que é realizada no local utilizando concreto armado, as construções em *Light Steel Frame* são produzidas a partir da montagem de seus componentes, sendo considerada uma atividade de montagem, por ser entendida como o ato de unir dois ou mais componentes com geometrias específicas, por meio de elementos de conexão e fixação, para originar as estruturas dos sistemas da edificação. As construções em LSF apresentam o aço como material base, integrado com outros componentes industrializados, para substituir tijolos, madeiras, vigas e pilares de concreto com diversas vantagens técnicas, como a facilidade de manutenção de instalações hidráulicas, elétricas, de ar condicionado, gás, etc., proporcionando um ganho qualitativo no processo produtivo e posicionando-se de modo competitivo no mercado (VIVAN; PALIARI, 2012).

As grandes vantagens do LSF são justificadas pela pré-fabricação dos seus componentes, apresentando um grande ganho do ponto de vista técnico. Segundo Gorgolewski (2006 apud VIVAN; PALIARI, 2012), esse sistema apresenta alta resistência mecânica, baixo peso da estrutura e demais componentes e alta precisão dimensional. Apresenta, ainda, alta sustentabilidade, uma vez que os materiais utilizados são quase totalmente recicláveis.

Segundo Burstrand (1998 apud VIVAN; PALIARI, 2012), o sistema LSF consiste na utilização de materiais secos, como os perfis de aço conformados, placas de vedação, lãs de vidro, utilizadas para proporcionar isolamento térmico e acústico, dentre outros.

O sistema permite a redução de custo por meio da otimização do tempo de fabricação e montagem da estrutura, uma vez que os materiais são fabricados concomitantemente nas fábricas, enquanto a fundação é executada no canteiro de obras. Essa redução de prazo pode chegar a um terço, se comparado com o método convencional. Há uma redução de custo de 20 % a 30 % por metro quadrado, se comparado ao método convencional, devido ao reduzido peso e distribuição uniforme dos esforços por meio de paredes leves e portantes, o que gera alívio nas fundações, e a inexistência de perdas comuns nas construções convencionais (VIVAN; PALIARI, 2012).

3.3 Revestimento de chapa de aço

Os revestimentos metálicos podem ser utilizados para diversos fins, como a proteção do metal base contra a corrosão. Os metais empregados em revestimentos anticorrosivos podem proteger o metal base por meio da formação de uma película protetora de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, reagindo com os oxidantes do meio corrosivo. Os revestimentos catódicos, como estanho, cobre, níquel, chumbo, prata e aço inoxidável, devem ser livres de imperfeição, pois, na presença de um meio eletrolítico, é formada uma pilha galvânica onde o metal base atua como ânodo, sofrendo oxidação. Já no caso dos revestimentos anódicos, como zinco e cádmio, se houver pequenas falhas no revestimento, o metal do revestimento será o

ânodo da pilha, protegendo assim catodicamente o metal base (GENTIL, 1996, p. 235).

Um dos processos de revestimento aplicado às chapas de aço é a galvanização ou “zincagem”, que tem como objetivo proteger o aço contra a corrosão por meio da adição de zinco na superfície do material. Essa adição pode ser realizada por meio de galvanização ou eletrodeposição, ou ainda por metalização (CHIAVERINI, 1988, p. 234).

3.4 Galvanização

A galvanização é um processo de revestimento a partir da adição de zinco e suas ligas, principalmente ferro-zinco, à superfície do aço, a fim de conferir ao mesmo proteção contra corrosão atmosférica. A galvanização pode ser realizada em todos os tipos de aço e apresenta vantagens que variam conforme a composição química e a estrutura do revestimento, como recobrimento uniforme e boa penetração, recobrimo cantos e bordas, boa conformabilidade e facilidade para o processo de pintura (PARANHOS, 2010).

Atualmente existem dois processos de produção de aços galvanizados em escala industrial: eletrodeposição e imersão a quente (PARANHOS, 2010).

3.4.1 Eletrodeposição

Segundo Gentil (1996), a galvanização por eletrodeposição (aços EG) é realizada por meio da redução de zinco na superfície do aço. O processo de eletrodeposição de zinco, conforme mostrado na figura 1, dá-se por meio de uma sequência de reações químicas, apresentadas nas equações (1) a (4), onde o metal a ser protegido é colocado como cátodo de uma cuba eletrolítica, contendo como eletrólito uma solução com o sal do metal a ser utilizado no revestimento. É passada uma

corrente elétrica por esses eletrodos, produzindo um revestimento de zinco praticamente puro:

Eletrólito:



Cátodo:



Ânodo:



Reação de Dissolução:

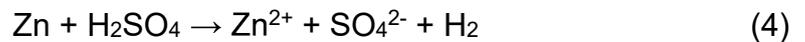
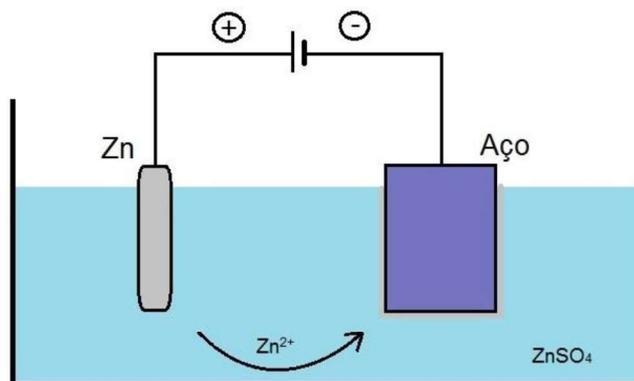


Figura 1 - Galvanização por eletrodeposição



Fonte: Próprio autor

O revestimento obtido a partir da eletrodeposição apresenta estrutura compacta, com cristais de zinco finos e uniformes e relativamente livre de poros. Essa uniformidade facilita tanto no processo de pintura, permitindo uma boa camada de fosfato no pré-tratamento, quanto no desempenho do produto no processo de estampagem. À medida que a camada de zinco aumenta, a resistência ao aparecimento do primeiro ponto de oxidação também aumenta (PARANHOS, 2010).

A linha de produção esquemática de aço galvanizado por eletrodeposição é apresentada na figura 2. Segundo Gentil (1996), a densidade da corrente aplicada, a concentração de sais, a temperatura do banho, a presença de aditivos e a natureza do metal base determinam a espessura da película do revestimento e suas propriedades. A linha de produção recebe as bobinas laminadas a frio, recozidas e encruadas. O próximo passo é a limpeza eletrolítica, onde há a passagem de uma corrente em solução alcalina entre um polo elétrico e a bobina, promovendo reações químicas por efeito elétrico, e a limpeza mecânica do aço, por meio de escovamento, deixando a bobina preparada para uma perfeita aderência do revestimento à superfície do aço. O terceiro passo é a galvanização eletrolítica, onde é depositada a camada de zinco por meio da passagem de corrente elétrica entre a chapa e um eletrodo. Após a galvanização o aço entra no pós-tratamento, onde há a possibilidade de aplicação de uma camada de fosfato sobre a camada de zinco, para melhorar a estampagem e pintura. Há ainda o processo de inspeção do material, e, por último, a rebobinação do aço para transporte.

Figura 2 - Linha de produção de aço eletrogalvanizado



Fonte: USIMINAS (Acesso em 2016)

3.4.2 Galvanização por Imersão a Quente

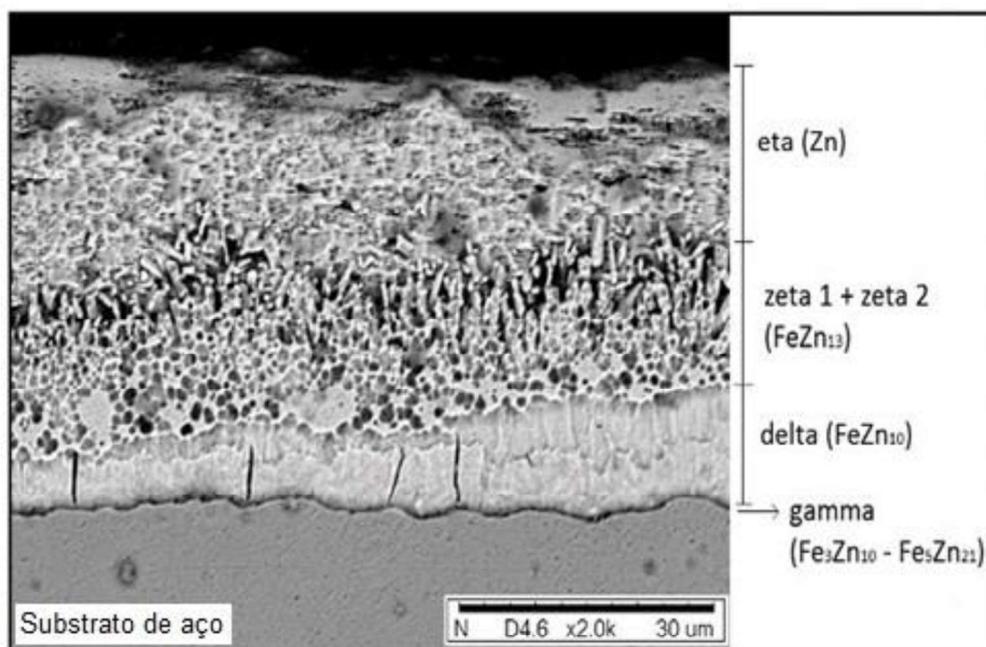
O processo para galvanização de aços mais comum utilizado pela indústria é por imersão a quente. Nesse processo, o aço carbono é mergulhado em um banho de zinco líquido. Inicialmente, é necessário um período para que o aço atinja equilíbrio térmico com o banho, e esse tempo se dá em função das dimensões da peça. Após o alcance do equilíbrio, inicia-se a formação de uma camada aderente de liga de zinco-ferro na superfície do aço. Quando o material é retirado do banho, é possível verificar, além da liga zinco-ferro na superfície do aço, uma camada externa de zinco puro. A camada de liga de zinco-ferro possui estrutura complexa, e sua espessura depende da temperatura do banho e do tempo de imersão realizado (GENTIL, 1996, p. 236).

As microestruturas do revestimento de zinco aplicado no aço, vista em um microscópio eletrônico de varredura, são apresentadas na figura 3, onde a superfície do material foi atacada quimicamente com Nital a 0,5 % em volume. A imersão dos substratos de aço no banho de zinco líquido promove várias reações, dependendo da composição do banho e do aço, formando fases primárias durante o tempo de imersão de galvanização: *eta*, *zeta* (1 e 2), *delta* e *gama*. A fase *gama* é fina, crescendo com o tempo de imersão, a fase *delta* é relativamente compacta, a morfologia dos cristais de *zeta* é coerente e colunar, com menos fissuras e a fase *eta* é composta de zinco puro (PEREIRA et al, 2015).

O processo de galvanização por imersão a quente é realizado com temperatura em torno de 450 °C, onde, a essa temperatura, pode ocorrer mudanças nas propriedades mecânicas do metal base. Devido a isso, é necessário que seja usado um metal base com propriedades selecionadas para cada tipo de aplicação. Quando o material entra no processo de galvanização por imersão a quente, é realizada a limpeza mecânica do aço, por meio de escovamentos, deixando a bobina preparada para uma perfeita aderência do revestimento à superfície do aço. Conforme mostrado na figura 4, a galvanização por imersão a quente apresenta vantagem produtiva por permitir, na mesma linha industrial, o recozimento do aço base e o revestimento da chapa. Esse recozimento é realizado sob atmosfera redutora de H₂

ou HN (5 % de H₂ + 95 % de N₂), removendo a camada de óxido da superfície do aço. Com isso, a superfície do aço é mantida sem óxidos e resíduos de carbono, o que permite a maior interação entre o ferro e o zinco, por ter melhor molhabilidade, melhorando o desempenho do sistema substrato/revestimento. Após o processo de recozimento, o calor do material é aproveitado como pré-aquecimento da chapa antes da mesma ser imersa no banho de zinco fundente. As temperaturas de imersão da tira de aço e do banho de zinco são praticamente as mesmas, sendo necessário fazer somente uma pequena compensação da perda de calor por meio de indutores elétricos instalados junto ao banho de zinco. Para controlar as reações fortemente exotérmicas entre o ferro e o zinco, são realizadas pequenas adições de alumínio ao banho de zinco, cuja função é diminuir a formação de ligas Fe-Zn, formando ligas de Fe-Al, melhorando a ductilidade do material. Após alguns segundos de imersão, é realizado o jateamento de ar ou nitrogênio a alta pressão para remoção do excesso de zinco e controle da espessura da camada de revestimento depositada sobre a superfície do material (PARANHOS, 2010).

Figura 3 - Microestruturas do revestimento de zinco



Fonte: Pereira et al. (2015)

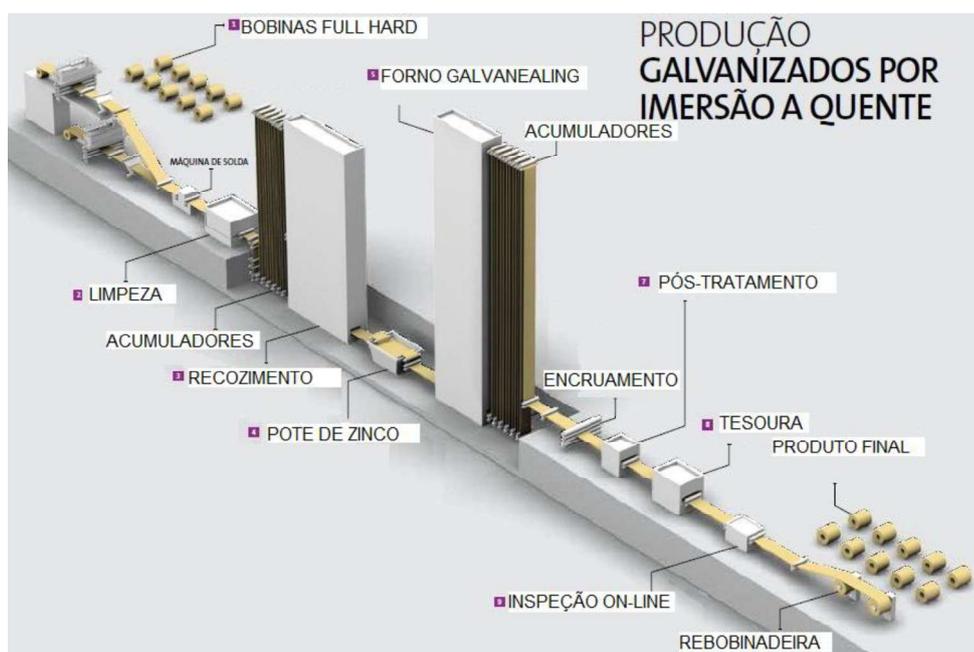
No Brasil, os aços galvanizados por imersão a quente mais empregados na indústria são o aço GI, que não apresenta tratamento térmico do revestimento, e o aço GA,

obtido a partir do aço GI, com o tratamento térmico do revestimento (SANTOS; RODRIGUES; DICK, 2013).

Caso o revestimento desejado seja o *hot-dip* (sem tratamento térmico da camada de zinco) o material é resfriado em uma torre de ar com névoa de água até atingir a temperatura de 320 °C, onde é realizada a solidificação da camada do revestimento. Porém, se o revestimento desejado for o *galvannealed* (com tratamento térmico da camada de zinco), o material entra em um forno vertical de aquecimento por indução e, posteriormente, em um forno de aquecimento elétrico com temperaturas entre 470 °C e 570 °C, a fim de converter o revestimento de zinco em compostos intermetálicos Fe-Zn, contendo entre 5 % m/m a 28 % m/m de ferro. Após esse processo, a tira é resfriada do mesmo modo que o material sem tratamento da camada de zinco (PARANHOS, 2010).

Já no fim da linha de produção ocorre o encruamento do material, onde há a adequação das propriedades do material. Após o encruamento, o aço entra no pós-tratamento, onde há a possibilidade de aplicação de uma camada de fosfato sobre a camada de zinco, para melhorar a estampagem e pintura. Há ainda o processo de inspeção do material, e, por último, a rebobinação do aço para transporte

Figura 4 - Linha de produção de aço galvanizado por imersão a quente



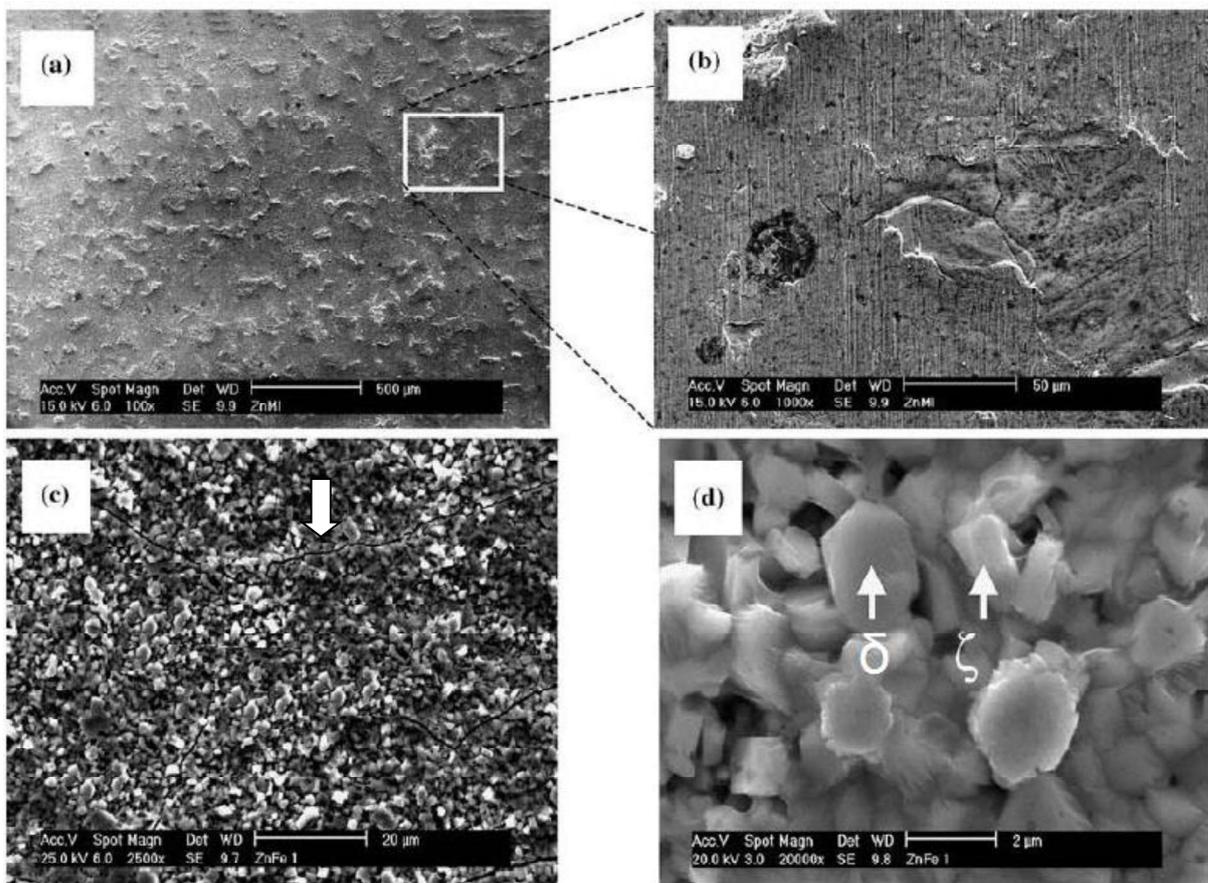
Fonte: USIMINAS (Acesso em 2016)

Segundo Shukla et al (2010), a espessura do revestimento de chapas galvanizadas fabricadas em simulador pode variar de 7 μm a 35 μm , dependendo dos parâmetros de processo utilizados. Verificou-se que a taxa de fluxo do gás de remoção e a temperatura do banho podem afetar de forma significativa a espessura do revestimento. Foi constatado que a espessura do revestimento diminui com o aumento da taxa de fluxo do gás. Além disso, foi possível verificar que, quanto maior a temperatura do banho, menor é a espessura da camada de zinco puro e maior é a espessura da camada da liga Fe-Zn, particularmente para o menor nível de alumínio no banho de zinco. Isto ocorre porque o aumento da temperatura do banho é geralmente associado ao aumento na cinética da formação de compostos intermetálicos de Fe-Zn, o que resulta na camada de liga mais espessa.

A imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da morfologia da superfície de aços galvanizado e *galvannealed* é mostrada na figura 5. O aço galvanizado, destacado na figura 5a, exibiu uma superfície homogênea, sem fissuras superficiais. Uma análise por MEV detalhada (Figura 5b) revelou alguns defeitos superficiais que podem ter sido resultados do processo industrial de galvanização por imersão a quente. Por outro lado, a superfície do aço *galvannealed*, destacada na figura 5c, foi granulada, apresentando fissuras. Uma análise por MEV detalhada (Figura 5d) permitiu a identificação de cristais hexagonais e monocínicos associados, respectivamente, com as fases intermetálicas *eta* (δ) e *zeta* (ζ).

A presença de fissuras é típica de outros revestimentos à base de zinco, como eletrodeposição de Zn-Ni, e pode ser relacionada com a tensão interna do revestimento, que se desenvolve durante a formação do revestimento (SILVA et al, 2006).

Figura 5 - Micrografias MEV mostrando a morfologia da superfície de aço galvanizado como recebido (a, b) e *galvannealed* (c, d)



Fonte: Silva et al. (2006)

3.5 Zinco

O zinco é um metal em estado sólido, à temperatura ambiente. A diferença de potencial eletrolítico entre o ferro e o zinco é de aproximadamente 335 mV, onde, quando ligado eletricamente ao ferro, o zinco atua como ânodo de sacrifício (SANTOS; RODRIGUES; DICK, 2013).

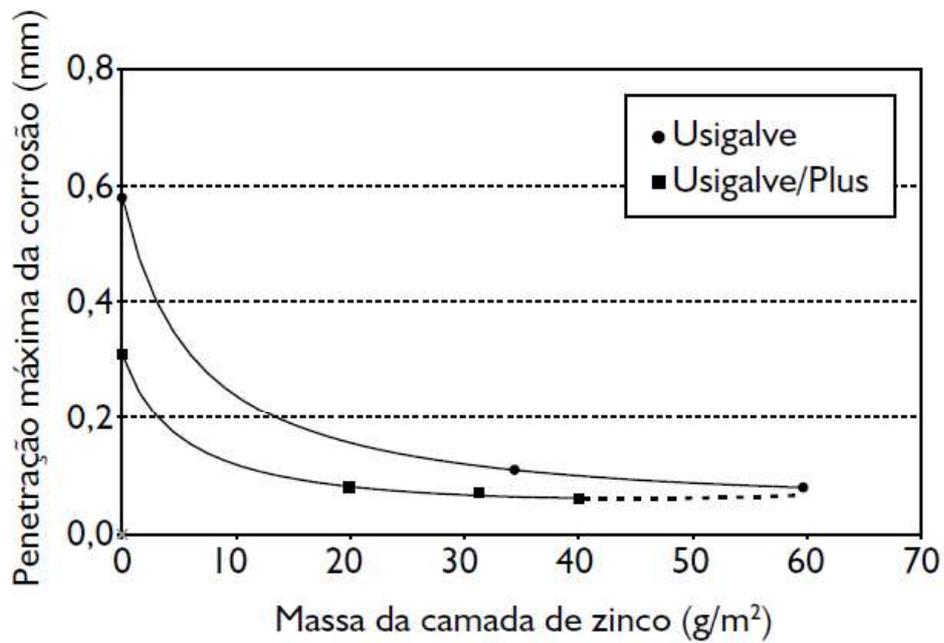
Devido à essa característica, o zinco é um metal que, quando aplicado na superfície do aço, oferece a esse três tipos de proteção:

- Proteção física: por meio de uma camada física, o revestimento de zinco impede o contato do aço com o ambiente corrosivo.

- Proteção galvânica: quando há algum tipo de dano no revestimento que deixa o aço exposto ao meio corrosivo, o zinco atua como ânodo e o ferro como cátodo.
- Proteção adicional: caso haja algum dano no revestimento, os produtos da corrosão do zinco se aderem à superfície do aço, recobrando discontinuidades menores no revestimento e formando uma barreira de proteção eletroquímica adicional (NEVISON, 1992 apud BATISTA, 2013).

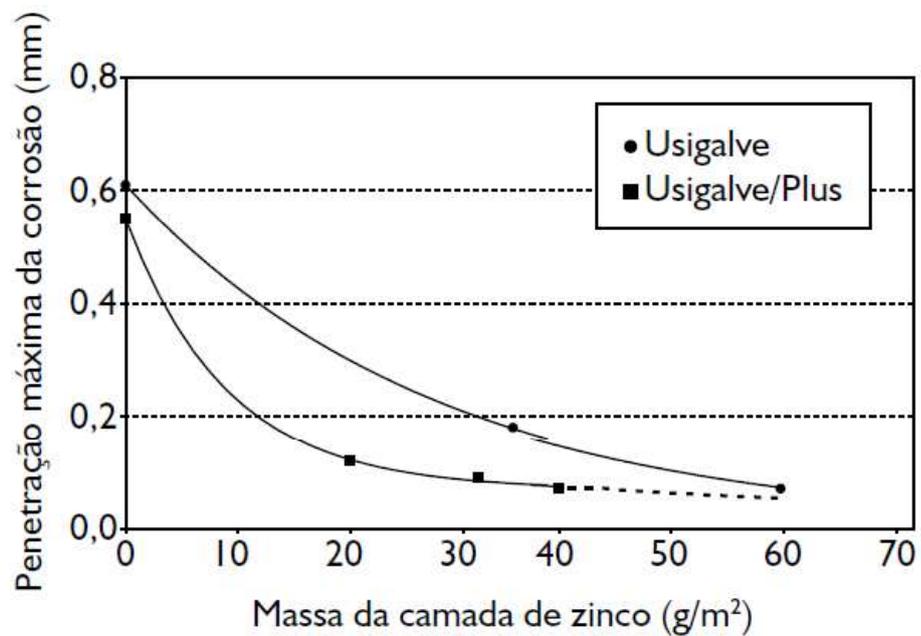
Alvarenga, Moreira e Buono (2007) estudaram a influência da massa de zinco na resistência à corrosão de aços eletrogalvanizados. Para realização desse estudo, foram utilizados dois aços eletrogalvanizados distintos, o Usigalve, de aço carbono convencional, e o Usigalve/Plus, de aço USI-R-COR-III que possui características de resistência à corrosão atmosférica. Foram preparados corpos de provas dos dois materiais nas dimensões de 100 mm x 150 mm e espessura de 0,72 mm a 0,85 mm, onde os mesmos foram fosfatizados e pintados. Após essa preparação, foram realizados os seguintes testes de corrosão: teste Ciclado I (teste de corrosão acelerado desenvolvido pela Usiminas) em 10 placas, teste GM 9540P/B, de uma indústria automobilística, em 10 placas, teste de campo com aspersão de solução salina de acordo com a norma ISO 11474 em 25 placas e teste de campo com exposição em atmosfera marinha, segundo a norma NBR 7011, em 25 placas. O valor da penetração máxima da corrosão é mostrado nas figuras 6, 7, 8 e 9. À medida que se aumentou a espessura da camada de zinco dos aços, o valor de penetração máxima da corrosão reduziu, onde pode-se concluir que a massa da camada de zinco exerce papel preponderante na resistência à corrosão de aços eletrogalvanizados.

Figura 6 - Resultados de penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão Ciclado I, após 1.680 h de exposição.



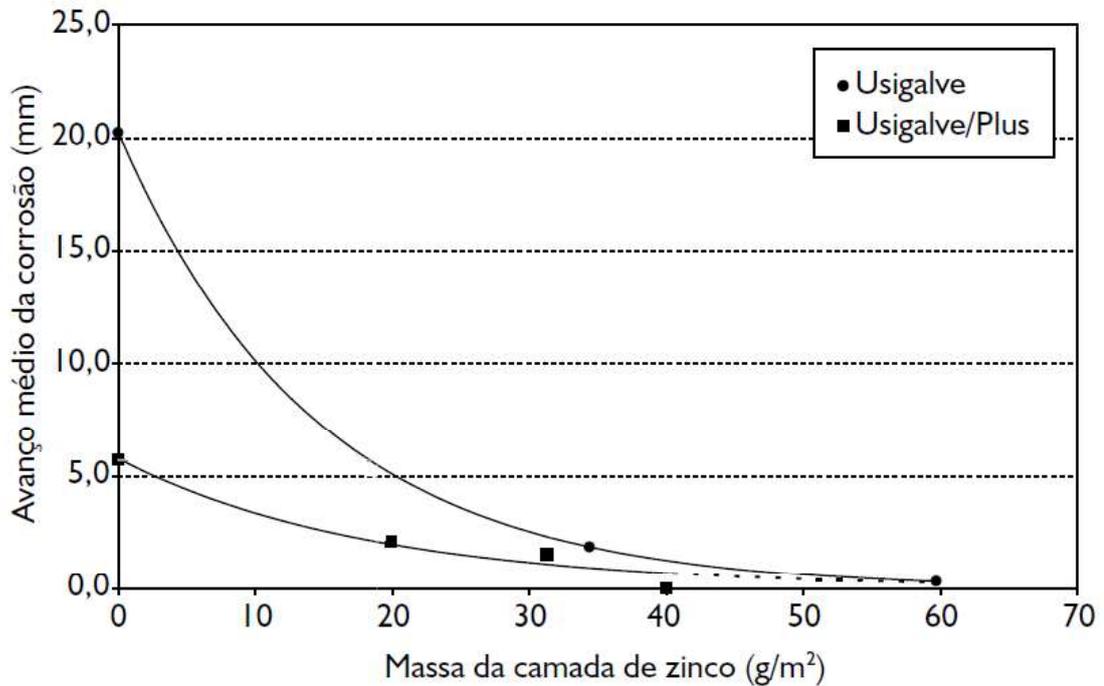
Fonte: Alvarenga, Moreira, Buono (2007)

Figura 7 - Resultados de penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão GM 9540P/B, após 1.920 h de exposição.



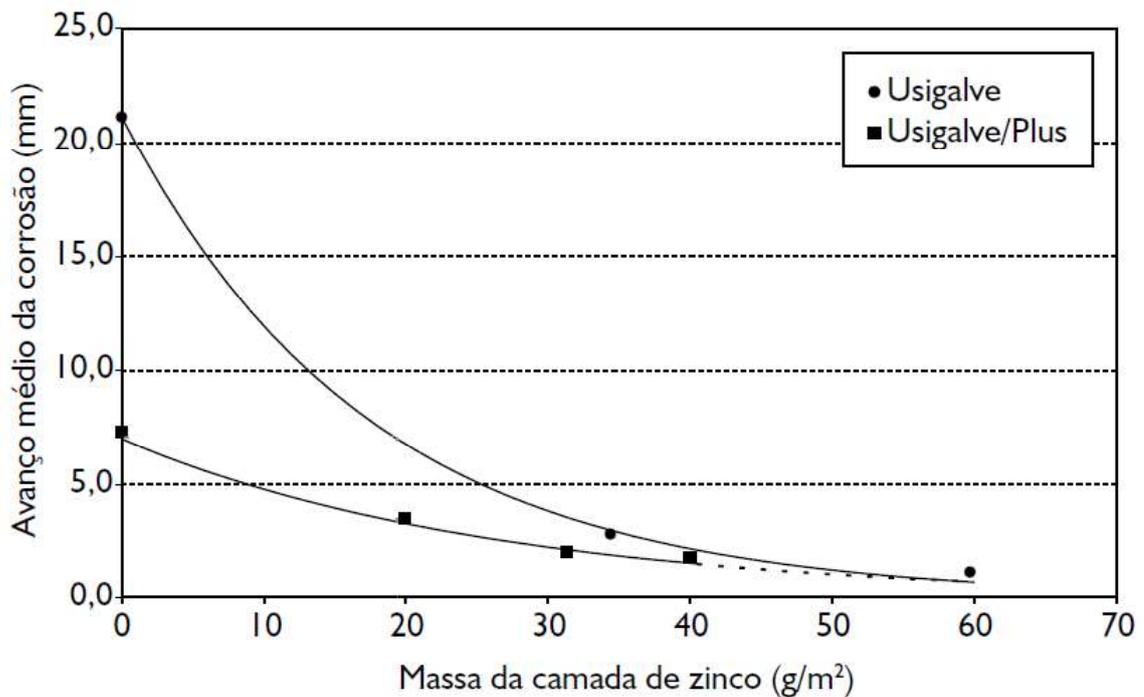
Fonte: Alvarenga, Moreira, Buono (2007)

Figura 8 - Resultados de avanço médio da corrosão do teste de campo com aspersão de solução salina de NaCl a 5 % p/v duas vezes por semana, após três anos de exposição.



Fonte: Alvarenga, Moreira, Buono (2007)

Figura 9 - Resultados de avanço médio da corrosão do teste não-acelerado de corrosão, após três anos de exposição em atmosfera marinha.



Fonte: Alvarenga, Moreira, Buono (2007)

Foi verificado que nos testes acelerados (Figura 6 e Figura 7) a penetração máxima da corrosão é inferior para o Usigalve/Plus nos dois ensaios, sendo a sua eficiência mais significativa para o ensaio Ciclado I. Em ambos os testes, a penetração máxima de corrosão diminui com o aumento da camada de zinco e, com uma camada de 60 g/m² de zinco, os dois materiais assumem a mesma penetração. Observa-se, também, que a penetração máxima de corrosão do Usigalve/Plus torna-se estável com uma camada de zinco de 20 g/m², enquanto que para o Usigalve, a estabilidade da penetração máxima só é alcançada com 60 g/m².

Para os ensaios não acelerados em três anos, em campo com aspersão de solução salina de NaCl de 5% (Figura 8) e exposição em atmosfera marinha (Figura 9), a penetração máxima da corrosão é inferior para o Usigalve/Plus. Em ambos os testes, a penetração máxima de corrosão diminui com o aumento da camada de zinco e, com uma camada de 50 g/m² de zinco, os dois materiais assumem o mesmo avanço médio de corrosão. Pode ser observado que a eficiência de proteção contra a corrosão é muito mais eficaz para o Usigalve/Plus, considerando que mesmo para menores massas de camada de zinco depositada, o avanço médio da corrosão é bem inferior.

Comparando os ensaios acelerados com os ensaios realizados em campo, pode-se concluir que o Usigalve/Plus apresenta maior eficiência contra a corrosão e que os ensaios acelerados mostraram a mesma performance dos ensaios realizados em campo.

3.6 Corrosão

Segundo Gentil (1996, p. 1): “[...] pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos [...]”.

A corrosão causa no material uma alteração indesejável de suas propriedades mecânicas, o que pode tornar o mesmo inadequado para uso por não mais satisfazer aos requisitos exigidos. A corrosão é considerada um processo

espontâneo, onde o material tende a produzir compostos semelhantes aos quais foram extraídos na natureza. No caso das ligas de ferro, como o aço, a corrosão pode ser considerada um processo inverso ao processo metalúrgico. No processo metalúrgico, o ferro (Fe) é extraído da Hematita (Fe_2O_3), enquanto no processo de corrosão, o ferro se torna $\text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O}$, óxido de ferro hidratado (GENTIL, 1996, p. 1).

É possível classificar o meio corrosivo a partir do seu estado físico e ocorrência. A maioria das peças metálicas está exposta ao ar atmosférico. Devido a esse motivo, o ar é o meio corrosivo que mais atinge os metais, possuindo vapor de água, oxigênio, gases que formam eletrólitos corrosivos, poeira, cinzas e outros sólidos particulados que se depositam nas superfícies metálicas, causando a corrosão (PARANHOS, 2010).

Segundo Dias (1998 apud PARANHOS, 2010), o aço é um metal que possui baixa resistência aos diferentes tipos de corrosão, como a atmosférica, sendo necessário protegê-lo por meio da aplicação de revestimentos inorgânicos (nanocerâmica), orgânicos (tintas, vernizes) e metálicos, como estanho e zinco. Na figura 10 pode ser observado um exemplo de veículo corroído por ação do meio atmosférico.

Figura 10 - Veículo com peças de aço oxidadas



Fonte: Costa (2009).

Segundo Gentil (1996, p. 23), termodinamicamente, o potencial de oxidação de um eletrodo (E) está relacionado à energia livre de Gibbs (ΔG). A partir desses dois parâmetros é possível avaliar a espontaneidade da reação de oxidação, onde:

$E^{\circ}_{\text{oxi}} < 0 \rightarrow \Delta G > 0$: Reação não espontânea

$E^{\circ}_{\text{oxi}} > 0 \rightarrow \Delta G < 0$: Reação espontânea

Comparando, portanto, o Zinco ($E^{\circ} = +0,76 \text{ V}$, $\Delta G = -19200$) e o Ferro ($E^{\circ} = +0,44 \text{ V}$, $\Delta G = -5000$), vê-se que a espontaneidade da reação do zinco é maior que a do ferro, fazendo com que o mesmo sofra a reação de oxidação preferencialmente (GENTIL, 1996).

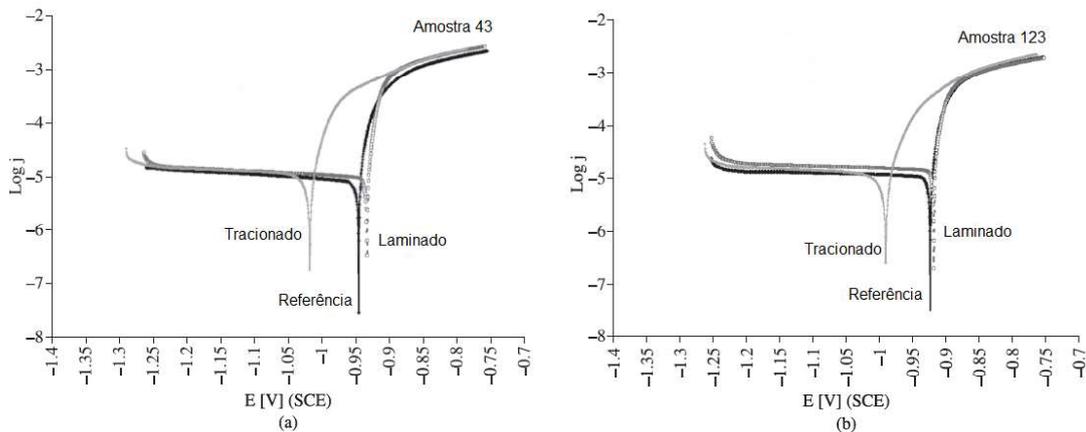
3.7 Influência da conformação mecânica na resistência à corrosão

Para analisar o comportamento de corrosão de um material sob dois diferentes tipos de deformação, laminação e tração, Culcasia, Elsnerb e Sarlib (2009) realizaram o teste eletroquímico potencioestático em diferentes faixas de potencial. Os pesquisadores fizeram também a medição do tamanho do grão do material e a influência do tamanho de grão na corrosão. Para alcançar o objetivo, foi utilizada uma célula eletroquímica típica. Nessa célula, a placa de aço galvanizada foi utilizada como eletrodo, um cilindro de grafite como eletrodo auxiliar e um eletrodo de calomelano saturado (*Saturated Calomel Electrode – SCE*) como eletrodo de referência. Como eletrólito, foi utilizada uma solução de 5,0 % de NaCl com uma concentração de oxigênio dissolvido de 21,82 mg.L⁻¹. As bordas das amostras foram isoladas com uma cera, para não influenciarem nos resultados dos testes.

A curva de polarização foi obtida empregando-se um potencioestato-galvanostato. As curvas de polarização foram plotadas no potencial E de circuito aberto (*Open Circuit Potential – OCP*). Os valores de resistência à polarização R_p foram definidos a partir da queda da densidade de corrente *versus* curvas E próximas de E_{ca} . As curvas de polarização também foram obtidas no intervalo E_{ca} de -250 mV a +250 mV, e os valores de potencial de corrosão do revestimento e densidade de corrente de corrosão foram definidos em relação ao modo de deformação. Foram testadas 8

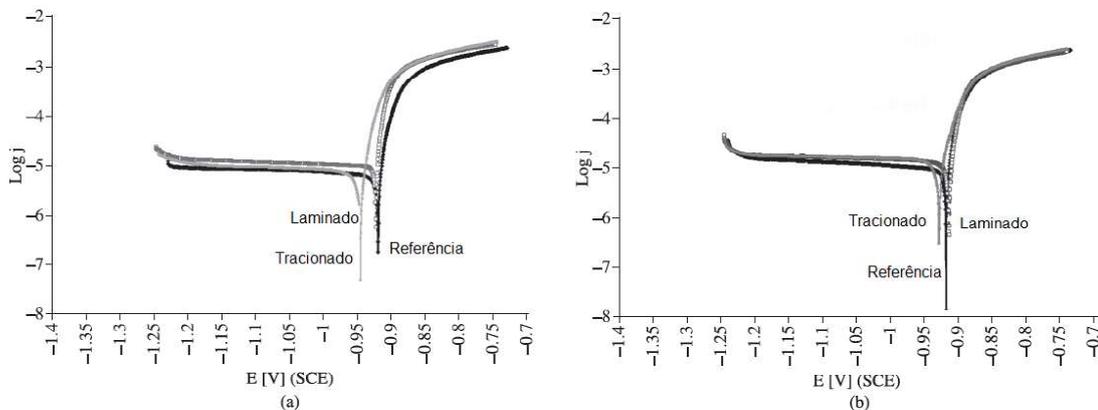
amostras em cada condição e o resultado apresentado é a média desses 8 resultados, conforme mostrado nas figuras 11 e 12 (CULCASIA; ELSNERB; SARLIB, 2009).

Figura 11 - Curvas de polarização correspondentes a duas amostras de grão pequeno



Fonte: Culcasia, Elsnerb e Sarlib (2009)

Figura 12 - Curvas de polarização correspondentes a duas amostras de grão maior

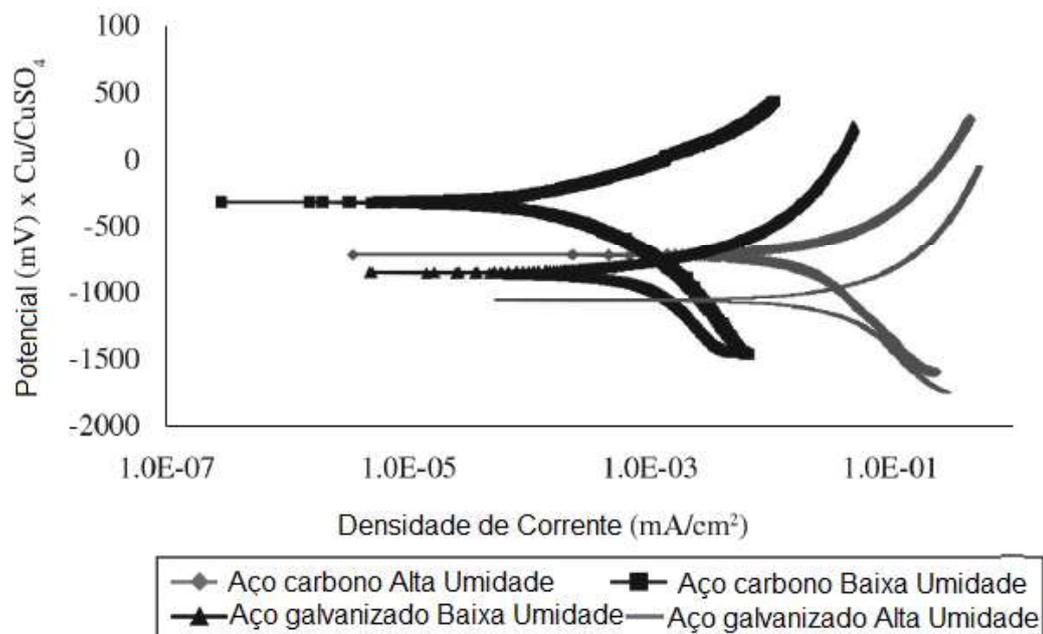


Fonte: Culcasia, Elsnerb e Sarlib (2009)

Como conclusão do experimento das figuras 11 e 12, Culcasia, Elsnerb e Sarlib (2009) destacaram que as variações de densidade de corrente de corrosão, embora pequenas, e os valores de resistência à polarização mostraram uma clara tendência crescente da reatividade eletroquímica do revestimento com a deformação. O material tracionado foi o que apresentou maior tendência de corrosão. Enquanto isso, materiais que possuem o grão da microestrutura maior, possuem menor variação na tendência de corrosão mediante a conformação mecânica.

Segundo Pereira et al (2015), a polarização potenciodinâmica é uma técnica que analisa a corrosão como fenômeno eletroquímico e possui grande confiabilidade. Para determinar a taxa de corrosão esperada de um aço galvanizado utilizado em torres de transmissão, ensaiado sob diferentes condições de umidade, estes pesquisadores fizeram um ensaio de polarização potenciodinâmica, onde as curvas foram obtidas em faixas anódicas e catódicas a uma taxa de varredura de 0,1 mV/min. Para esse experimento foi utilizada uma célula de três eletrodos, onde o aço galvanizado foi o eletrodo de trabalho, o cobre foi o eletrodo de referência e o Ti-MMO o contra-eletrodo. Conforme mostrado na figura 13 e tabela 1, a resistividade do solo influencia na densidade de corrente de corrosão, de tal forma que, quanto menor a resistividade, maior a densidade de corrente e a tendência à corrosão. Em condição de alta umidade, é possível verificar valores de densidades de correntes mais altos. De acordo com as curvas da figura 13 e tabela 1, o aço galvanizado apresenta maior densidade de corrente que o aço carbono em ambas as condições de umidade. A densidade de corrente maior, observada em amostras de aço galvanizado, reflete a tendência da oxidação do zinco.

Figura 13 - Curvas de polarização em solo com diferentes umidades



Fonte: Adaptado de Pereira et al (2015)

Tabela 1 - Resultado de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão para diferentes níveis de umidade no solo

| Material | Nível de Umidade | Ecorr (mVCu/CuSO4) | Densidade de Corrente de Corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) |
|-----------------|------------------|--------------------|---|
| Aço Galvanizado | Baixa | -840.8 | 0.00477 |
| | Alta | -1047.0 | 0.05270 |
| Aço Carbono | Baixa | -305.7 | 0.00029 |
| | Alta | -705.8 | 0.00346 |

Fonte: Adaptado de Pereira et al (2015).

As amostras de aço galvanizado apresentaram potencial de corrosão mais catódico do que as amostras de aço carbono, independente do teor de umidade do solo. O menor potencial de corrosão do zinco faz com que ele seja usado como ânodo galvânico em sistemas de proteção catódica, onde, caso ocorra dano à camada galvanizada, a célula eletroquímica promove a oxidação do zinco.

Um dos principais problemas apresentados na utilização de aços galvanizados na indústria é o desprendimento do revestimento durante os processos de conformação. Esse desprendimento pode se dar tanto por meio da formação de pó quanto de lascas. Esse desprendimento é mais acentuado quando a camada do revestimento é mais espessa e dura (ALVARENGA; MOREIRA; BUONO, 2007).

Gupta, Ravi e Mater (2006 apud VAGGE; RAJA; NARAYANAN, 2007) estudaram a conformação mecânica de aços *Interstitial Free* (IF) galvanizados por imersão a quente e investigaram o efeito da espessura do revestimento no comportamento de conformação do material. Eles estudaram a deformação de várias chapas com espessuras de revestimento variando até 30 μm e verificaram que o coeficiente de atrito na interface do perfurador e a chapa é menor à medida que aumenta a espessura do revestimento. Esse comportamento sugere que o zinco atue como lubrificante na interface.

Sacco et al (2003) estudaram a resistência de polarização de aços galvanizados deformados uniaxialmente e observaram um aumento na taxa de corrosão com o aumento do grau de deformação. Esse efeito está relacionado ao aumento na área superficial e na ativação da reação catódica, devido à ligação galvânica entre o revestimento e o substrato. Além disso, o estudo mostrou que a agressividade do

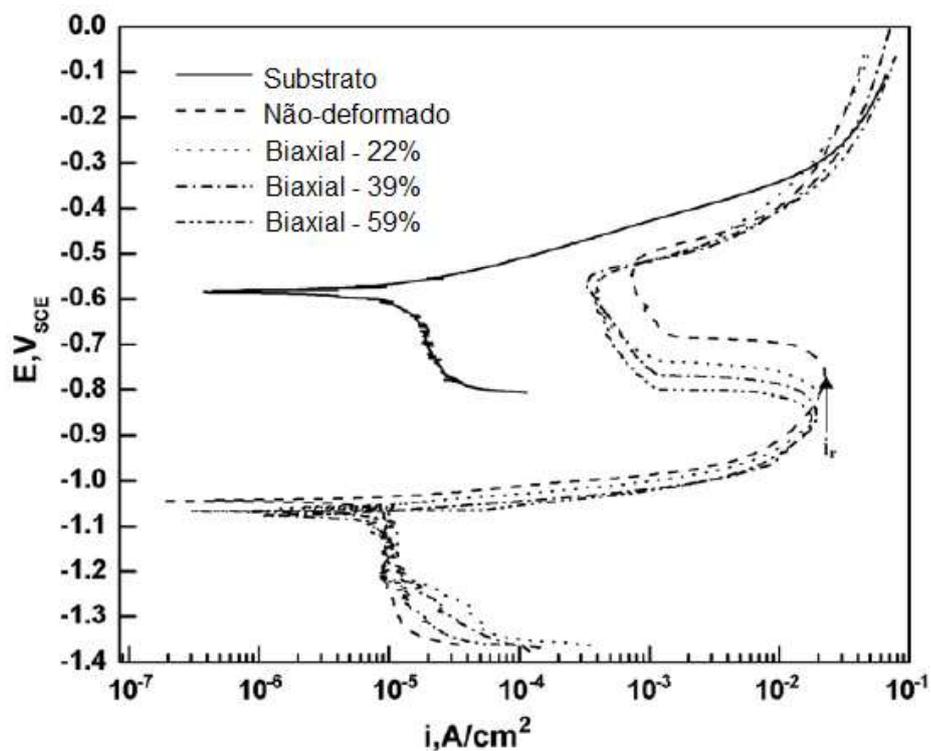
meio eletrolítico exerce influência sobre a cinética da corrosão. Os pesquisadores observaram que um leve grau de deformação pode reduzir a taxa de corrosão da peça. Isto é possível devido ao fato de que a deformação induz a corrosão acelerada, resultando na formação de uma camada de óxido espessa que protege a superfície do zinco. Já para deformações acima de 35 %, a deformação causada no revestimento é muito acentuada para esse permanecer intacto. Como consequência, a superfície do aço base exposta ao ambiente corrosivo sofre dissolução ativa.

Em geral, as chapas de aço utilizadas na indústria sofrem diferentes modos de deformação. Esses modos são variados, como alongamento uniaxial, alongamento biaxial, dobramento e estampagem. O comportamento de corrosão da chapa revestida pode variar de acordo com o modo de deformação que a mesma sofre, ou seja, diferentes regiões da mesma peça podem apresentar um comportamento de corrosão diferente de acordo com o esforço que cada região sofreu. Peças que sofreram deformação biaxial apresentam maior perda no revestimento metálico, seguido das peças que sofreram deformação plana, e menos nas peças que sofreram deformação uniaxial e tração (VAGGE; RAJA; NARAYANAN, 2007).

Vagge, Raja e Narayanan (2007) estudaram o efeito da deformação no comportamento eletroquímico de chapas de aços galvanizados por imersão a quente. Para realizar os estudos de corrosão, foram preparadas amostras com superfície de 1 cm² na região onde foi realizada a deformação. Foi soldado um fio de cobre isolado em uma das superfícies para fazer a ligação elétrica. Para isolar a outra superfície, foi utilizada uma resina acrílica para embutimentos a frio. As amostras foram limpas com acetona e, em seguida, passaram por limpeza ultrassônica em água destilada. Foi utilizado um recipiente de vidro com entradas separadas para o eletrodo de trabalho, o eletrodo de referência e o eletrodo auxiliar. Uma placa de platina foi utilizada como eletrodo auxiliar. A chapa de aço galvanizada foi o eletrodo de trabalho e o eletrodo de calomelano saturado (SCE) foi utilizado como eletrodo de referência. Foi utilizada uma ponte salina para minimizar a resistência ôhmica e os estudos de polarização potenciodinâmica foram realizados com uma solução de 3,5 % de NaCl de grau analítico dissolvido em água destilada. Os testes foram realizados a 25 °C. Antes de iniciar os testes, o eletrodo de trabalho foi colocado no meio eletrolítico para obter um potencial de circuito aberto (OCP)

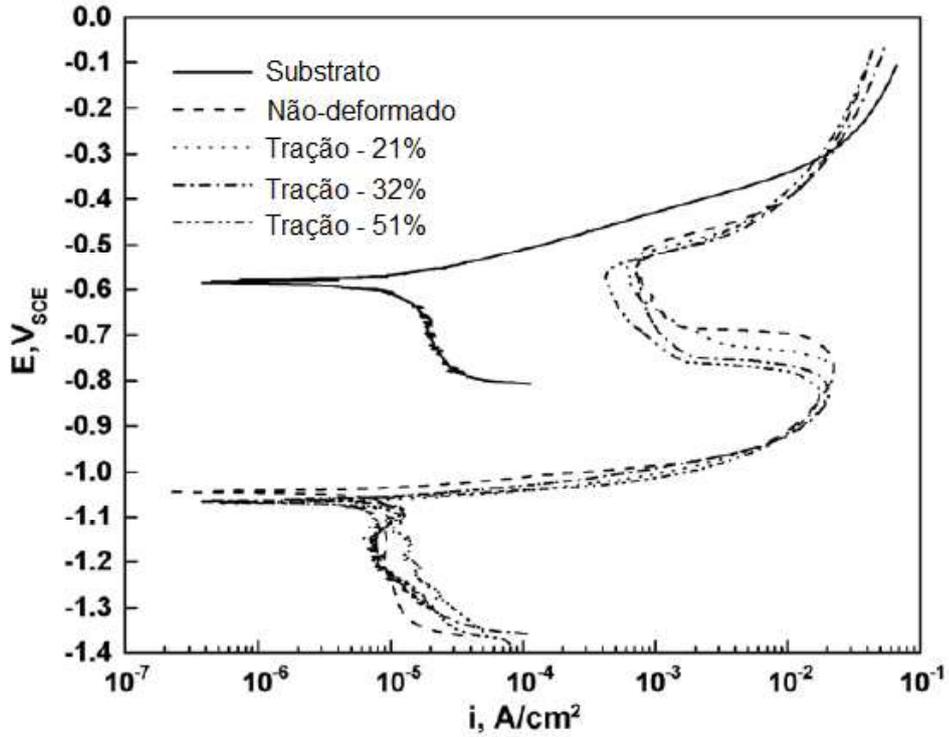
estável. Para todos os casos, as curvas de polarização foram obtidas começando a leitura do potencial catódico e aumentando até o potencial anódico em uma taxa de varredura de 0,16 mV/s. A medição da espectroscopia de impedância eletroquímica foi realizada com os mesmos parâmetros. As medições de impedância foram realizadas na faixa de 100 kHz a 1 MHz e a amplitude de sinal utilizada foi de ± 10 mV. Os resultados das curvas de polarização potenciodinâmica obtidos no estudo estão mostrados nas figuras 14, 15, 16 e 17.

Figura 14 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tensão biaxial.



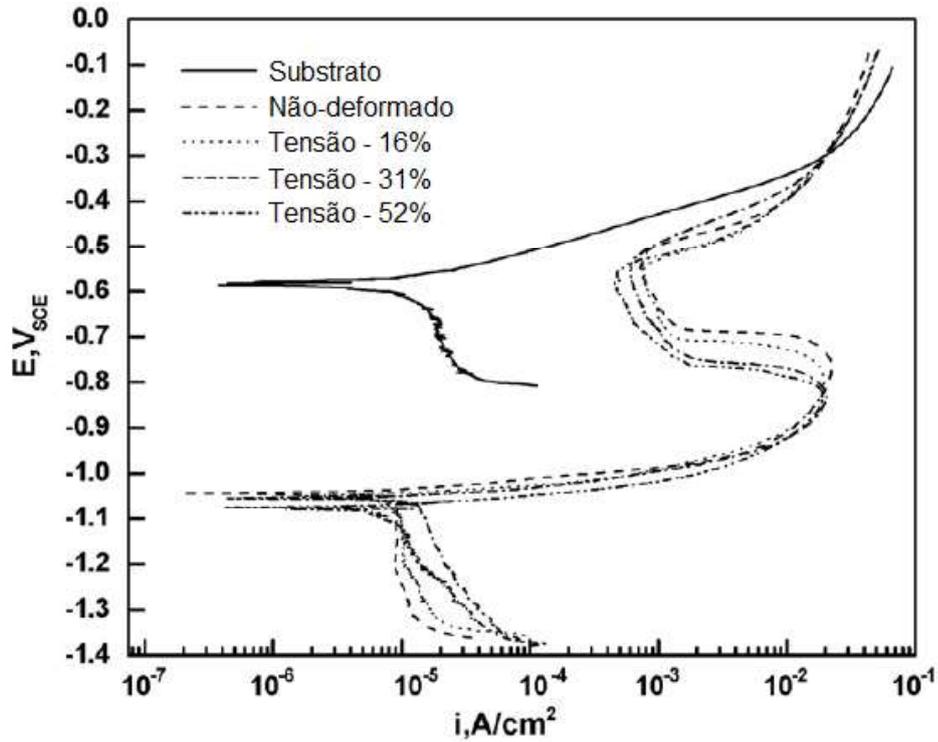
Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 15 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tração.



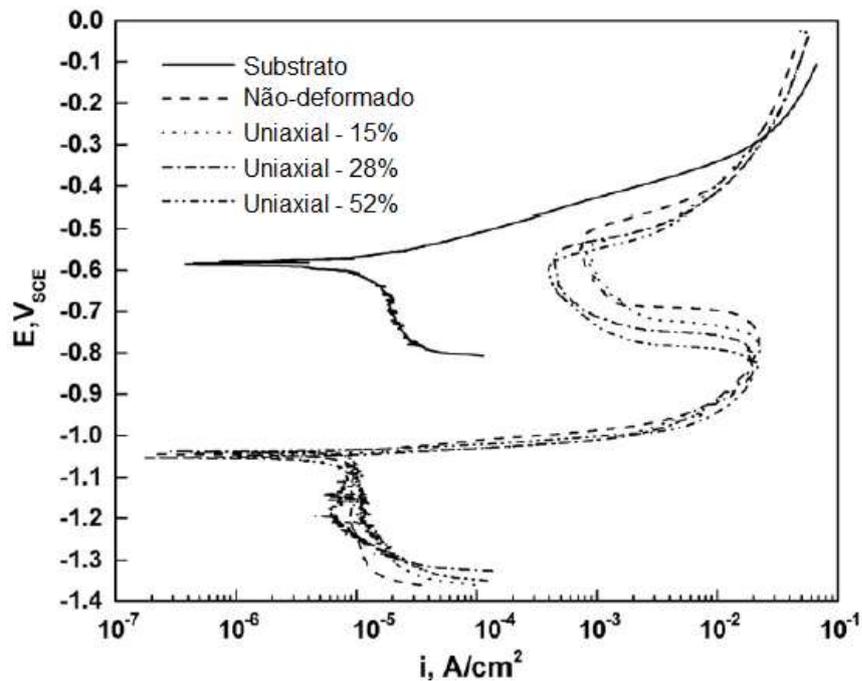
Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 16 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de modo de tensão.



Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 17 - Curvas de polarização sob diferentes percentuais de tensão uniaxial.



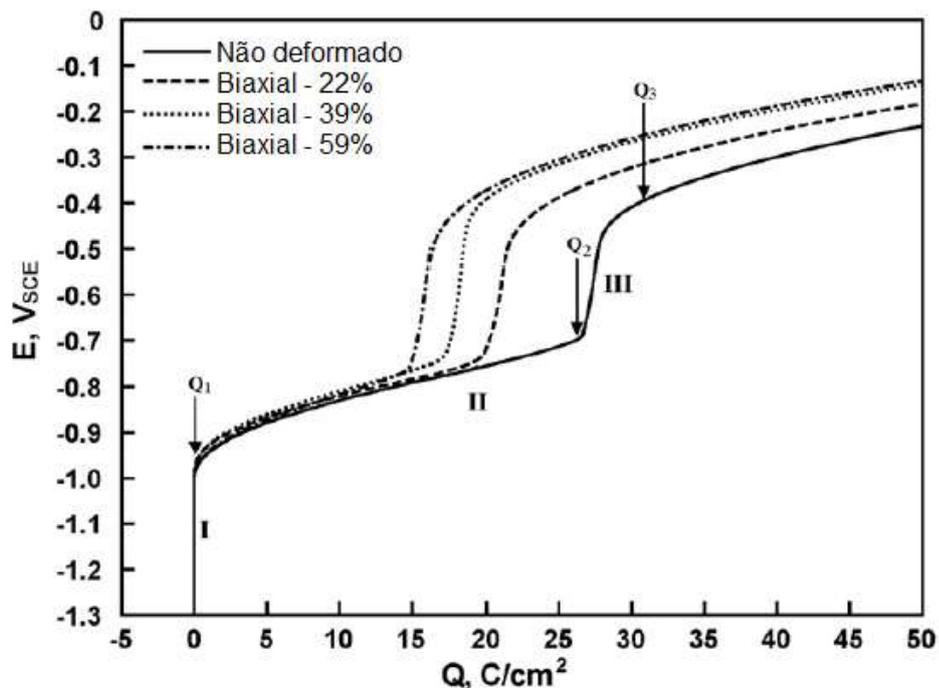
Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Os resultados obtidos por Vagge, Raja e Narayanan (2007) mostram que tanto as chapas revestidas conformadas quanto as chapas revestidas não conformadas apresentam um potencial de corrosão inferior ao do substrato metálico. O processo de dissolução de zinco é assistido pela presença de íons de cloreto, que atua como um catalisador, formando o composto complexo de $Zn-Cl-OH$. A produção do composto de cloreto facilita o acesso do eletrólito ao zinco, acelerando o processo de corrosão. A barreira formada pelos produtos de corrosão impede o fluxo de corrente durante as fases iniciais de polarização anódica. No entanto, ao aumentar os potenciais anódicos, os óxidos não se tornam capazes de resistir ao fluxo de corrente e as amostras apresentam uma elevada densidade de corrente anódica. Foi relatado que o dióxido de carbono dissolvido no eletrólito mantido em condições ambiente converte parte do hidróxido de zinco a um complexo de carbonato de zinco hidratado, confirmando a proposição acima.

As curvas de polarização apresentadas nas figuras 14, 15, 16 e 17 indicaram a dissolução do zinco, porém não foram capazes de correlacionar o grau de deformação com a cinética da dissolução do revestimento, uma vez que as curvas não apresentaram variação sistêmica com o grau de deformação. De acordo com a

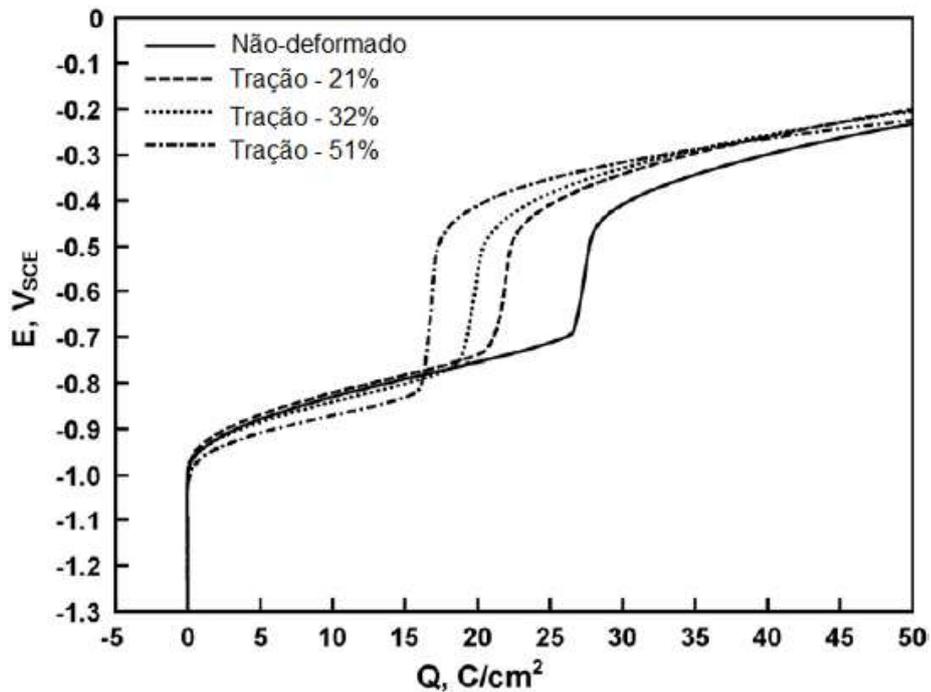
lei de Faraday, a perda de metal é diretamente proporcional à carga Q (Coulombs) de corrente que o material libera quando submetido a uma dissolução anódica. Desse modo, foi realizada a integração da corrente anódica com o tempo e foram plotados os Coulombs integrados de corrente com os potenciais anódicos, conforme mostrado nas figuras 18, 19, 20 e 21. Todas as curvas obtidas apresentam três pontos de inflexão, dividindo a curva em quatro regiões. Analisando os valores obtidos, no final da terceira região, Q_3 apresenta o valor de 32 C/cm^2 , sendo um valor muito próximo ao valor teórico de 36 C/cm^2 obtido para um revestimento de $18 \mu\text{m}$ de espessura. Essa proximidade sugere que a conclusão da terceira região corresponde à dissolução completa do revestimento das chapas, sendo possível correlacionar o valor de Q_3 com a quantidade de revestimento que permaneceu no substrato após a deformação. A diferença entre Q_3 da amostra não deformada e das amostras deformadas dá uma ideia da extensão do revestimento perdido devido à deformação, onde há uma quantidade maior de revestimento na amostra não deformada (VAGGE; RAJA; NARAYANAN, 2007).

Figura 18 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tensão biaxial.



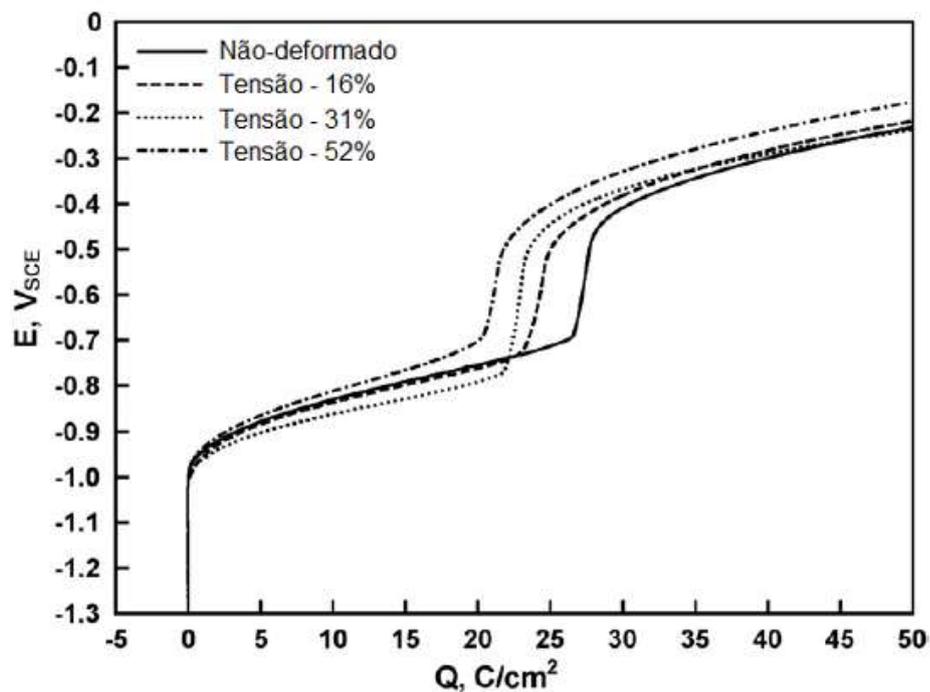
Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 19 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tração.



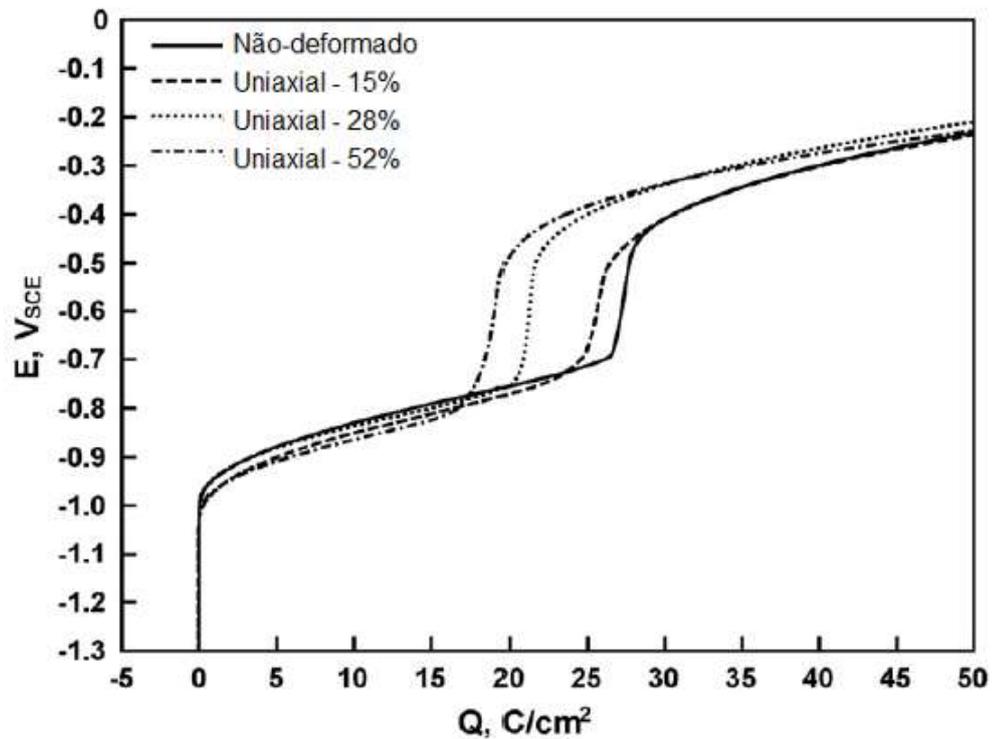
Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 20 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de modo de tensão.



Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

Figura 21 - Coulombs integrados (em relação a E) resultantes da dissolução do revestimento em vários potenciais anódicos para amostras não deformadas e deformadas sob diferentes percentuais de tensão uniaxial.

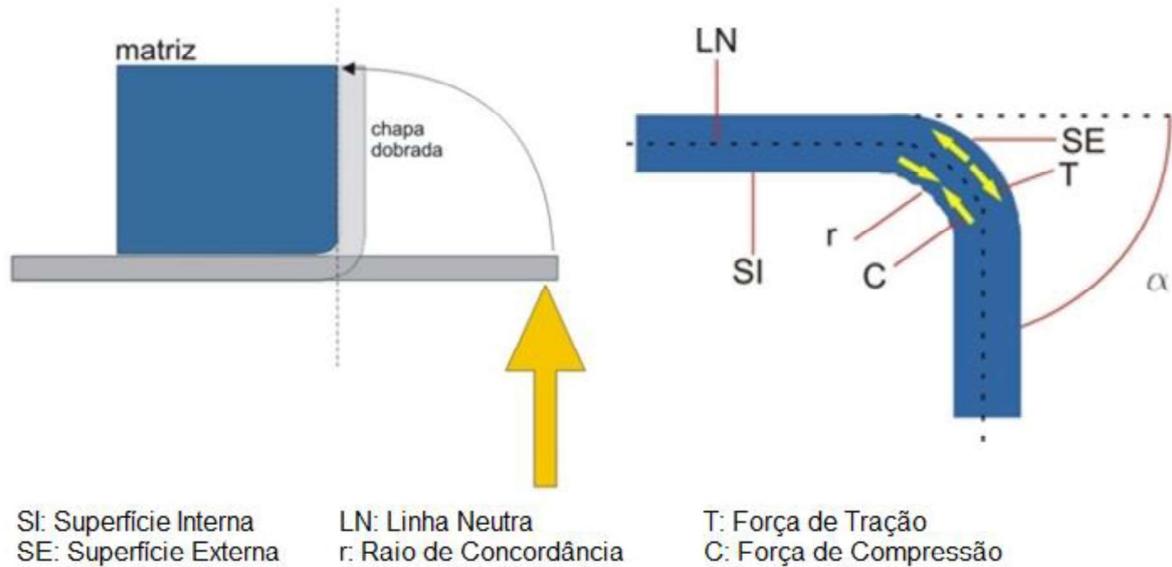


Fonte: Adaptado de Vagge, Raja, Narayanan (2007).

3.8 Composição de forças atuantes no dobramento

Durante o processo de dobramento de uma chapa, há vários tipos de força que atuam na mesma. Na figura 22 são apresentadas as forças atuantes em uma chapa durante o dobramento, sendo que a força de tração atua na superfície externa da chapa dobrada, enquanto a força de compressão atua na superfície interna.

Figura 22 - Composição das forças atuantes no dobramento



Fonte: Borges (2017)

3.9 Influência do processo de galvanização nos danos superficiais apresentados após conformação mecânica

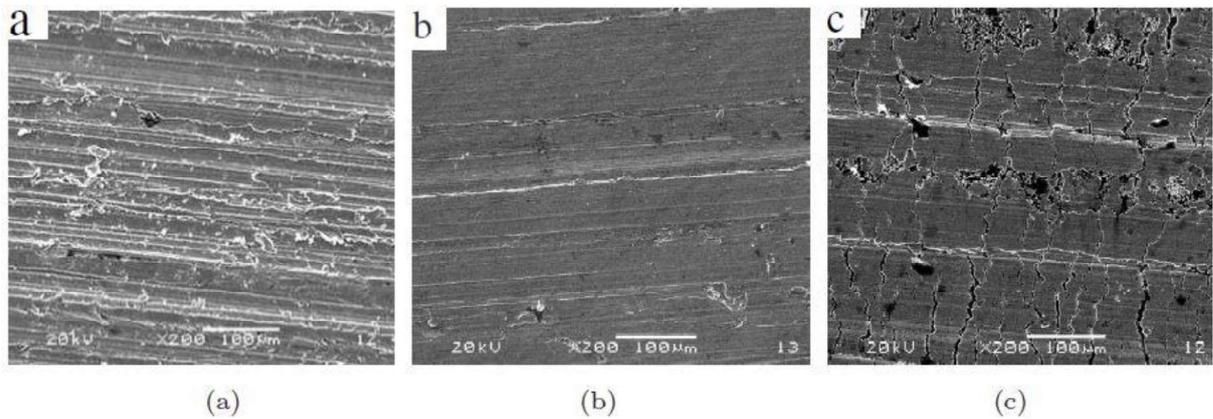
Segundo Yu et al (2010), a utilização de aços galvanizados na indústria apresenta muitos desafios durante os processos de conformação, soldagem e pintura. Os danos superficiais são um dos principais problemas na conformação de chapas de aço galvanizado, o que faz com que a resistência à corrosão e a qualidade da superfície das peças diminuam.

A dureza da ferramenta e a topografia da superfície têm efeitos importantes sobre os danos na superfície de uma peça durante a produção dos dois tipos de aços galvanizados. Diferentes tratamentos superficiais devem ser aplicados às ferramentas utilizadas na conformação dos aços galvanizados para alcançar uma melhor qualidade superficial dos produtos (YU et al, 2010).

Yu et al (2010) realizaram observações microscópicas utilizando um microscópio eletrônico de varredura para investigar a microestrutura das superfícies danificadas e os mecanismos de dano da superfície. As micrografias da topografia da superfície

são apresentadas na figura 23. A partir das micrografias das superfícies danificadas obtidas pela MEV, é possível ver claramente que a superfície do aço não revestido e a superfície do aço GI apresentam apenas riscos, enquanto no aço GA, além dos riscos, a superfície apresenta muitas imperfeições resultantes da esfoliação do revestimento. A diferença de comportamento entre os dois revestimentos pode ser resultado da diferença de conformabilidade que os dois materiais apresentam. No processo de conformação sob a tensão de flexão, a deformação do revestimento GA não é condizente com a do material de substrato. Assim, os aços GA apresentam uma deterioração da camada revestida.

Figura 23 - Micrografias das superfícies danificadas realizadas por meio de MEV



(a) aço sem revestimento; (b) aço GI; (c) aço GA.

Fonte: YU et al (2010)

4 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho, foram analisadas amostras de aço galvanizado SMART-FRAME #0.80 PCC Z275 NBR 6355, utilizadas para confecção das estruturas metálicas do sistema construtivo *Light Steel Frame*.

Após a aquisição das amostras, foi realizada a medição de espessura do revestimento da chapa por meio da microscopia óptica, utilizando um microscópio metalográfico Kontrol IM713, seguindo o padrão ASTM B-487.

Foram preparadas três amostras não dobradas para medição da espessura do revestimento, retiradas das extremidades da peça, como mostrado na figura 24, cortadas por meio de uma cortadora metalográfica Arotec COR80 refrigerada por meio de líquido refrigerante. As amostras foram retiradas de diferentes partes da peça a fim de aferir a homogeneidade do revestimento ao longo da chapa. O procedimento para medição da espessura da camada galvanizada, segundo a norma ASTM B-487, seguiu os seguintes passos:

- Em uma região plana da peça, foram cortadas as amostras em seção perpendicular ao revestimento.
- Foi removido todo o material danificado durante o corte com uma lixa de grão 100 mesh.
- Foi realizado o lixamento das amostras utilizando as lixas de 240, 320, 500 e 600 mesh, respectivamente, por 30 a 40 segundos em cada lixa.
- Foi realizado o polimento das amostras por 2 a 3 minutos, utilizando pasta de diamante com partículas da ordem de 1 μm a 9 μm e álcool etílico.
- Foi realizada a medição da espessura da camada galvanizada em 5 pontos diferentes das amostras ao longo da seção transversal.
- Foi calculada a média aritmética das medições realizadas para definição da espessura do revestimento.

Figura 24 - Corte da chapa para medição de espessura



Fonte: Próprio Autor.

A morfologia do revestimento foi avaliada por meio de microscopia eletrônica de varredura. Para preparação das amostras, foi realizado o corte da chapa recebida por meio de uma cortadora metalográfica Arotec COR80 refrigerada por meio de líquido refrigerante. Uma das amostras cortadas, utilizada para análise da seção transversal do revestimento, foi embutida a quente com baquelite por meio de uma embutidora Arotec PRE 30Mi, lixada em uma lixadeira Arotec Aropol 2V utilizando as lixas 240, 320, 500 e 600 mesh, polida com pasta de diamante com partículas da ordem de 1 μm a 9 μm em uma politriz Arotec Aropol V e atacada com Nital a 0,5 % em volume. Outras 2 amostras cortadas foram utilizadas “como recebido” para análise da morfologia da superfície do revestimento, sendo uma amostra da região plana da chapa e outra amostra retirada da região da curva 90°. Todos os corpos de prova foram ensaiados utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu SSx-550, calibrado com Tensão de Aceleração (AccV) = 15,0 kV e diâmetro do feixe (Probe) = 4,0 μm . As amostras utilizadas para análise do revestimento estão mostradas na figura 25.

Figura 25 - Amostras iniciais analisadas na MEV



Fonte: Próprio Autor.

Foram obtidas 25 amostras com dimensões aproximadas de 25mm x 40mm, retiradas da chapa original utilizando uma cortadora metalográfica Arotec COR80 refrigerada por meio de líquido refrigerante (Figura 26). Das 25 amostras cortadas, cinco não foram dobradas, cinco foram dobradas formando o ângulo de 30°, cinco foram dobradas formando o ângulo de 60°, cinco foram dobradas formando o ângulo de 90° e as cinco amostras restantes foram dobradas formando o ângulo de 120°. O dobramento foi realizado utilizando uma dobradeira de chapa manual (Figura 27), as amostras após o dobramento são mostradas na figura 28.

Figura 26 - Chapa de aço galvanizado para corte das amostras



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 - Dobradeira de chapas manual



Fonte: Próprio Autor.

Figura 28 - Amostras dobradas para o teste



Fonte: Próprio Autor.

Devido ao tamanho e formato das amostras (chapas planas ou dobradas), teve que ser desenvolvido um método de preparação das mesmas para os ensaios de corrosão, uma vez que técnicas mais comuns, como o embutimento, não eram viáveis. Para realizar o contato elétrico entre a amostra e o conector do equipamento, foi utilizado um cabo flexível de cobre de 2,5 mm de espessura. O mesmo foi decapado parcialmente e os fios de cobre foram fixados na peça mecanicamente com o auxílio de um alicate universal, uma vez que a solda fria com estanho não adere ao aço galvanizado. O conjunto amostra + cabo flexível foi isolado eletricamente, deixando somente uma área de 2,0 cm², coincidente com a região dobrada, exposta para realização do ensaio, conforme figura 29. Para realização do isolamento elétrico, foi utilizada uma fita isolante líquida Quimatic Tapmatic. Esse material se mostrou o mais adequado por ser líquido e permitir aplicação em peças com diferentes formas e tamanhos. Além disso, o material possui boa adesão à superfície do aço galvanizado e não apresenta fissuras ou outro defeito que permita a exposição da amostra ao meio corrosivo.

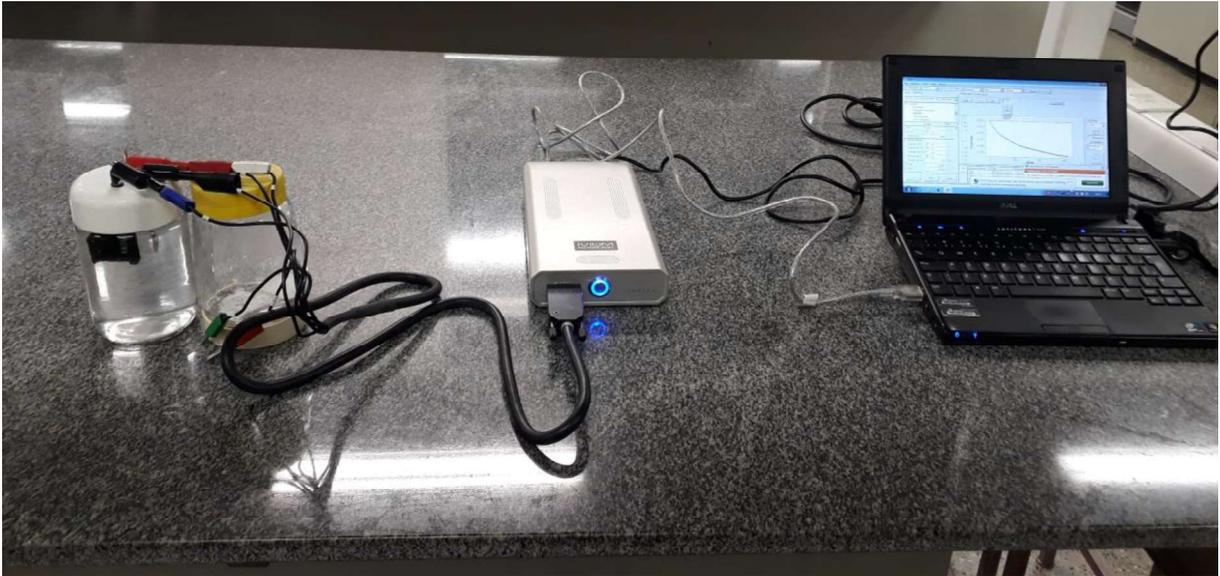
Figura 29 - Amostra isolada para ensaio de corrosão



Fonte: Próprio Autor.

As amostras foram, então, limpas e ensaiadas. Para o ensaio de corrosão, foi utilizada uma solução de 5,0 % de NaCl como eletrólito, conforme utilizado nos trabalhos de Culcacia, Elsnerb e Sarlib (2009) e Alvarenga, Moreira e Buono (2007), o eletrodo de platina espiralado com 23 mm de comprimento e 0,5 mm de espessura como contra eletrodo e o eletrodo RE-1B (Ag/AgCl) para meios aquosos com 80 mm de comprimento e 6 mm de largura com junção de vidro como referência. Os ensaios foram realizados utilizando um potenciostato / galvanostato Vertex 100mA.EIS – 1 MHz IVIUM por meio da análise da extrapolação das retas de Tafel geradas pelo potenciostato e por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície. Foi utilizado um tempo de 2000 segundos para estabilização do OCP a uma taxa de varredura de 0,16 mV/s. A bancada de testes montada para a realização de um ensaio é apresentada na figura 30. Após os ensaios, as amostras foram analisadas quanto à corrosão sofrida por meio de análise do potencial de corrosão e da densidade de corrente de corrosão apresentadas pelas amostras. Os resultados foram compilados e analisados estatisticamente utilizando o método t de Student com intervalo de confiança de 95%.

Figura 30 - Bancada de testes durante um ensaio



Fonte: Próprio Autor.

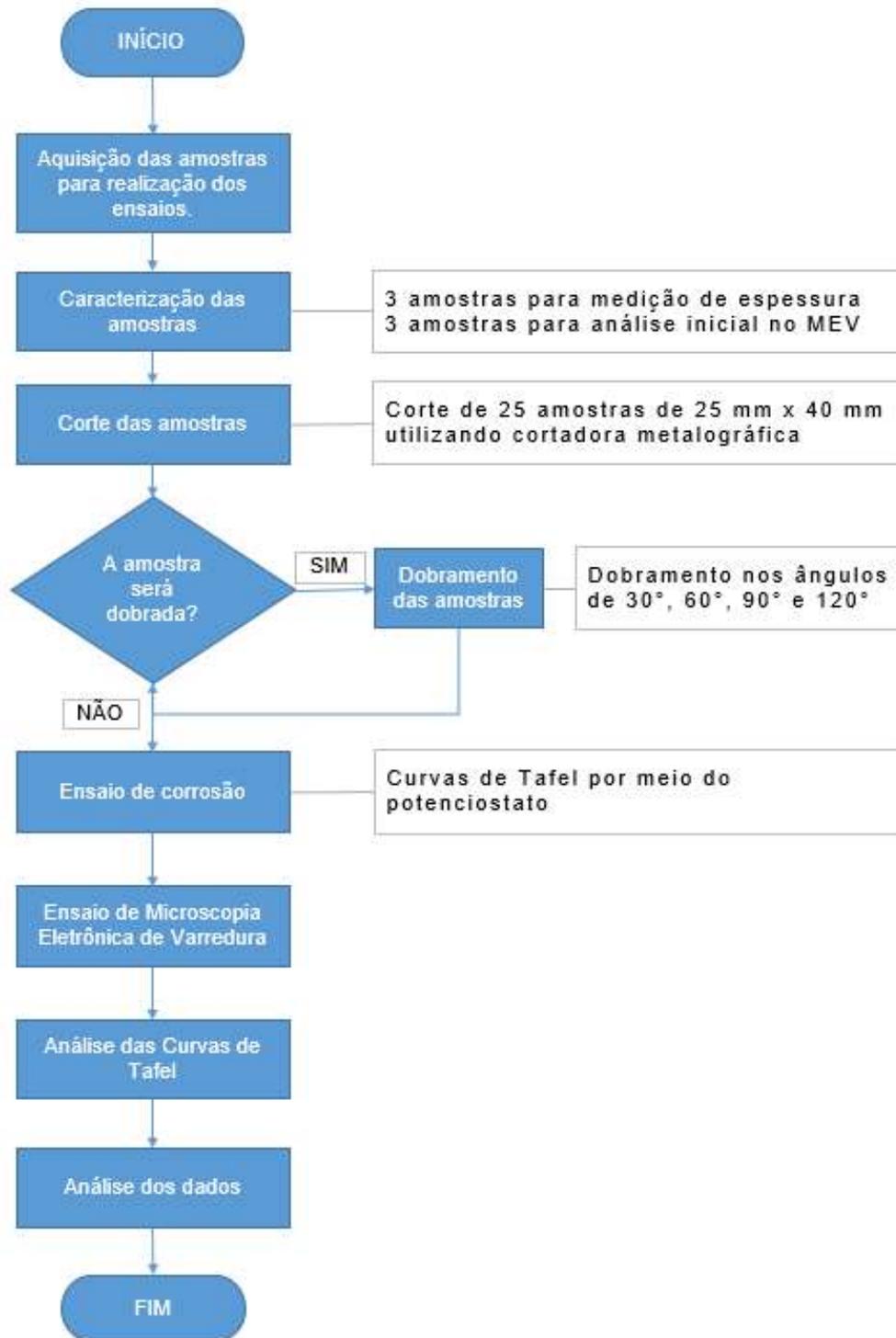
Já para a análise final após os ensaios de corrosão, foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura quatro amostras, sendo uma amostra não deformada, uma dobrada no ângulo de 60°, uma dobrada no ângulo de 90° e outra dobrada no ângulo de 120°. Para todas as amostras foram utilizados os mesmos parâmetros de calibração das imagens iniciais.

Para definição do grau de deformação sofrido pelo revestimento, foi realizada a medição do diâmetro externo das amostras dobradas por meio de gabarito de círculos e calculado o perímetro externo. Posteriormente, foi calculado o perímetro da linha neutra da chapa. A deformação percentual foi obtida por meio da diferença entre o perímetro externo e o perímetro da linha neutra, dividido pelo perímetro da linha neutra. A equação 5 apresenta a fórmula para o cálculo adotado.

$$\text{Def. Percentual} = (\text{Per. externo} - \text{Per. da Linha Neutra}) / (\text{Per. da Linha Neutra}) \quad (5)$$

O fluxograma com o resumo da metodologia adotada é mostrado na figura 31.

Figura 31 - Fluxograma com as etapas adotadas



Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Medição da espessura do revestimento das amostras não dobradas

A espessura do revestimento foi obtida segundo a norma ASTM B-487, conforme mencionado anteriormente. A partir dos resultados, a média aritmética das medições de cada amostra foi calculada e, então, foi realizada a média aritmética das espessuras médias das três amostras, a fim de definir a espessura média do revestimento ao longo de toda a chapa de aço galvanizado. Os resultados obtidos em cada medição realizada nas três amostras, assim como a média das amostras e a média final, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Resultado das medições de espessura do revestimento em μm

| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Medição 1 | 25 | 30 | 20 |
| Medição 2 | 28 | 31 | 20 |
| Medição 3 | 24 | 22 | 22 |
| Medição 4 | 27 | 25 | 29 |
| Medição 5 | 31 | 31 | 22 |
| Média | 27 + 3 | 28 + 4 | 23 + 4 |
| Média das médias | | | 26 + 3 |

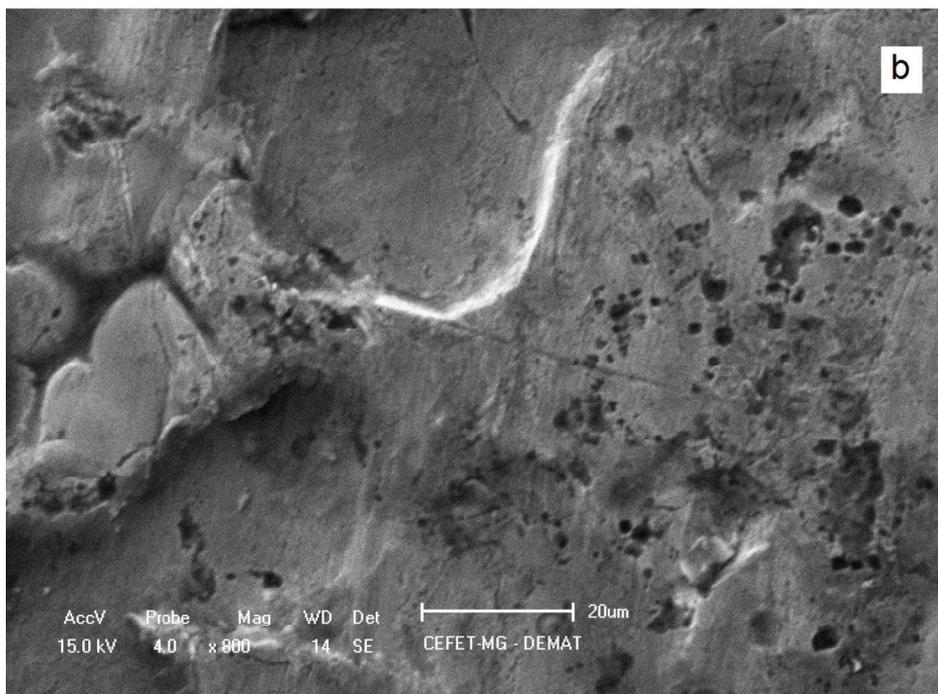
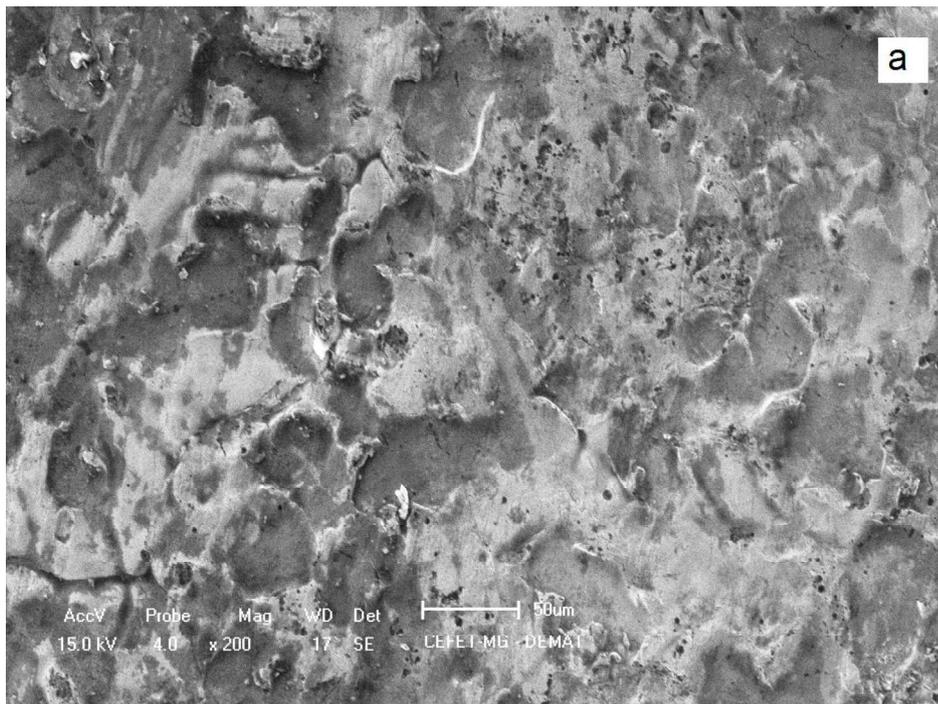
Fonte: Próprio Autor.

A espessura do revestimento apresentada pela chapa foi de 26 +/- 3 mm. Essa espessura de revestimento é condizente com um aço galvanizado comercial Z275 com massa mínima de 275 g/m², exigido pela norma NBR 6355 para construções em LSF, portanto, o material é adequado ao uso em construções LSF (SSAB, Acesso em 2018).

5.2 Análise Inicial do Revestimento por meio da MEV

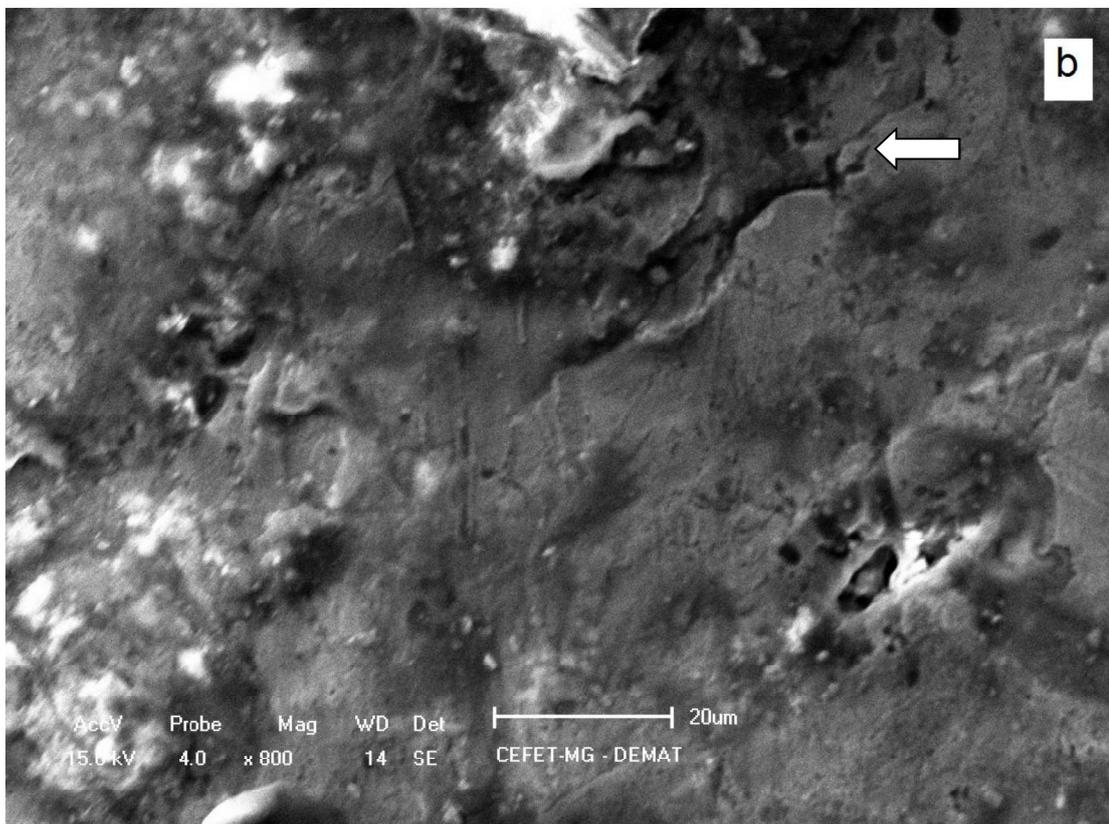
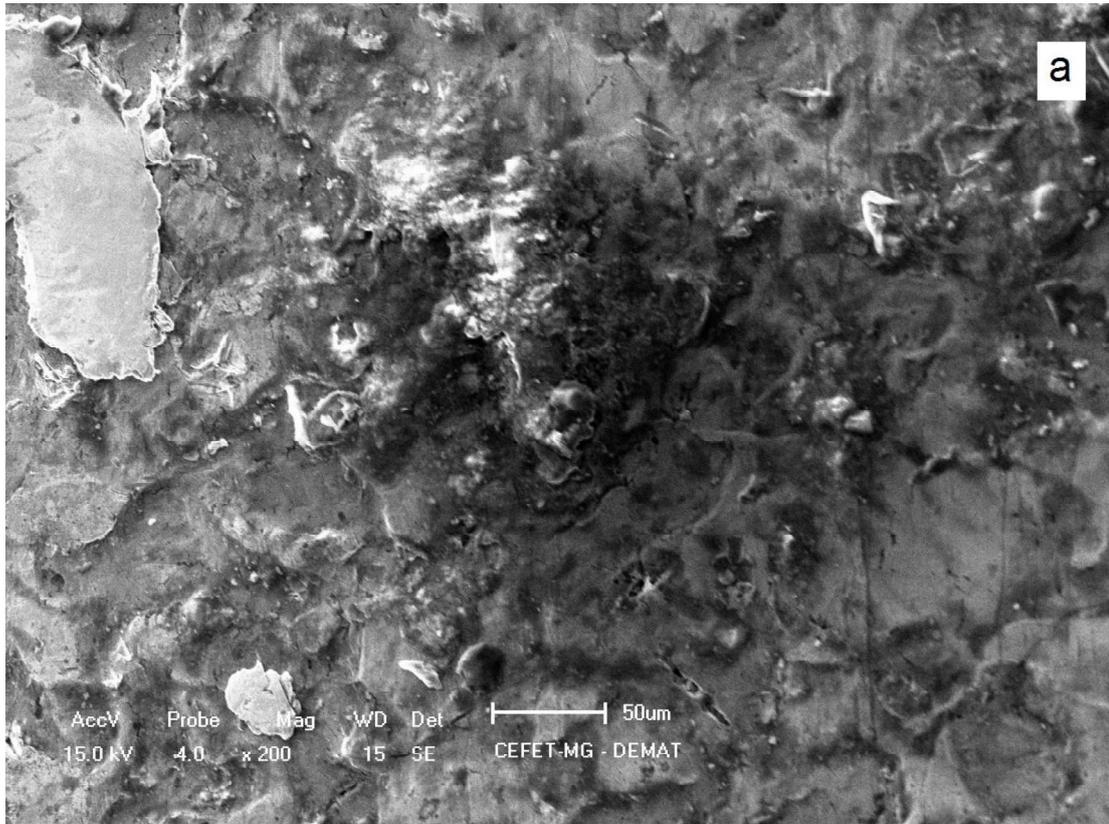
Pode ser observada na figura 32 a superfície externa da amostra plana. Já na figura 33, observa-se a superfície externa da amostra na região da curva 90°.

Figura 32 - MEV da superfície da amostra plana



Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 - MEV da superfície da mostra curva 90°



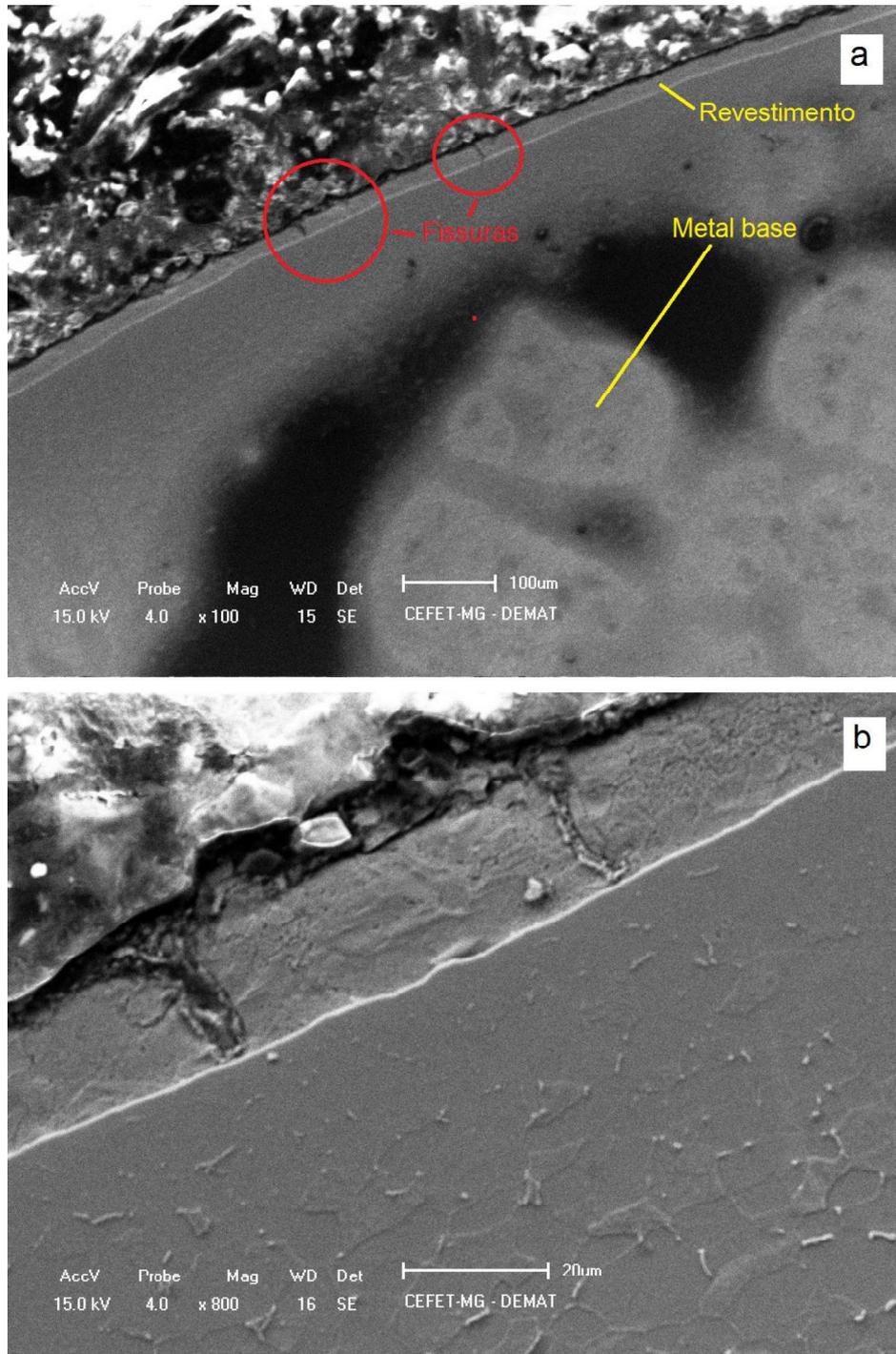
Trinca (seta)

Fonte: Próprio Autor.

É possível verificar que o relevo da amostra conformada é diferente da amostra plana. Enquanto a amostra plana apresenta um relevo constante ao longo da superfície, indicando uma homogeneidade do revestimento, a amostra conformada apresenta um relevo heterogêneo, onde é possível identificar regiões onde o relevo é semelhante ao da amostra plana e outras regiões distintas, com vales mais profundos e espaçados de modo diferente, indicando que a conformação mecânica pode causar alterações no revestimento da peça. Pode-se observar também na figura 33 pequenas trincas no revestimento (seta).

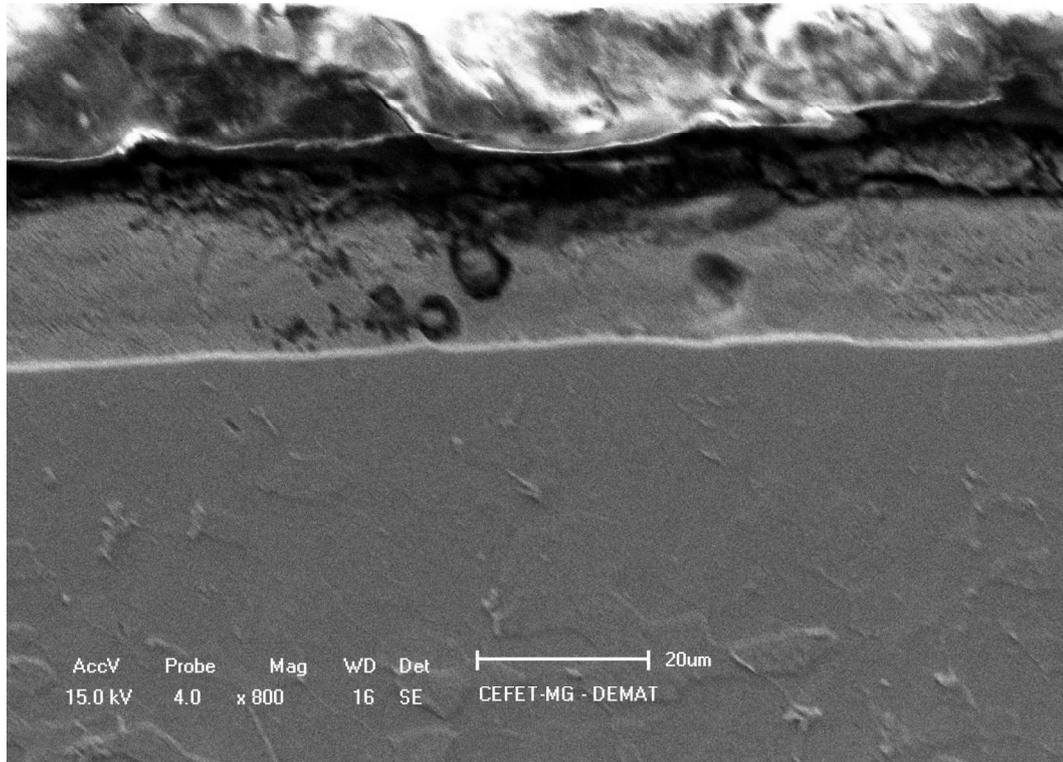
Pode ser observado nas fotomicrografias das figuras 34, 35 e 36 a superfície externa da chapa tiradas da terceira amostra (seção transversal da chapa com curva de 90°) por meio da MEV. De acordo com as figuras, a superfície externa, que sofreu força de tração durante o dobramento, apresenta fissuras no revestimento ao longo da região da curva 90°. Essas fissuras podem ter sido originadas diretamente pela carga trativa que a superfície sofreu durante o processo de dobramento ou, ainda, podem ser resultado da propagação de uma descontinuidade já presente no revestimento após a atuação da carga de tração. A região plana da superfície externa apresentada na figura 37, entretanto, não apresentou fissuras ao longo do revestimento. Esse resultado sugere que a conformação mecânica causa danos no revestimento, uma vez que somente a região dobrada apresentou descontinuidades.

Figura 34 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90°



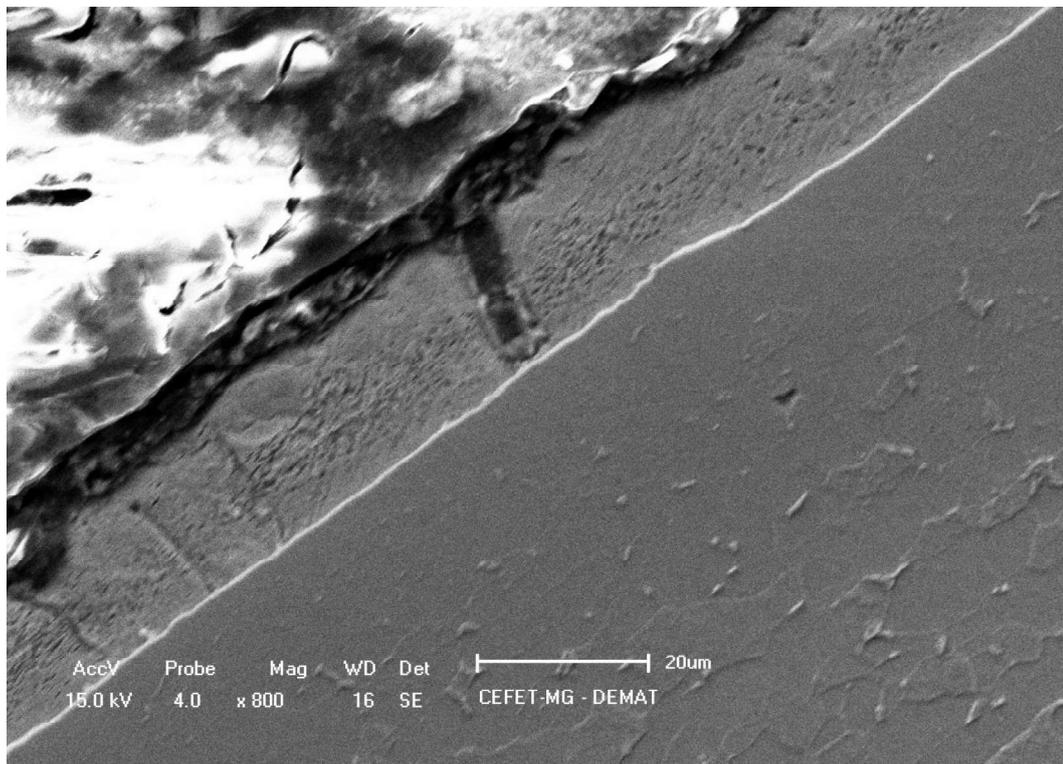
Fonte: Próprio Autor.

Figura 35 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90°



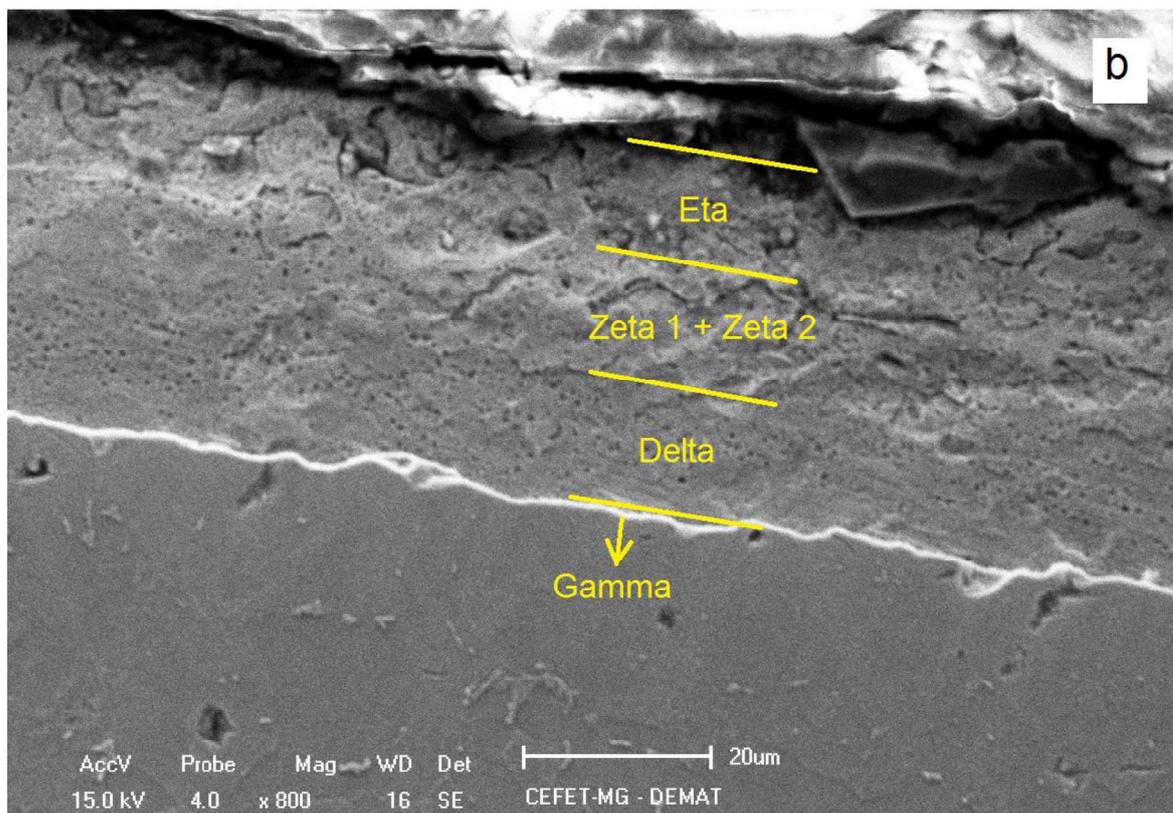
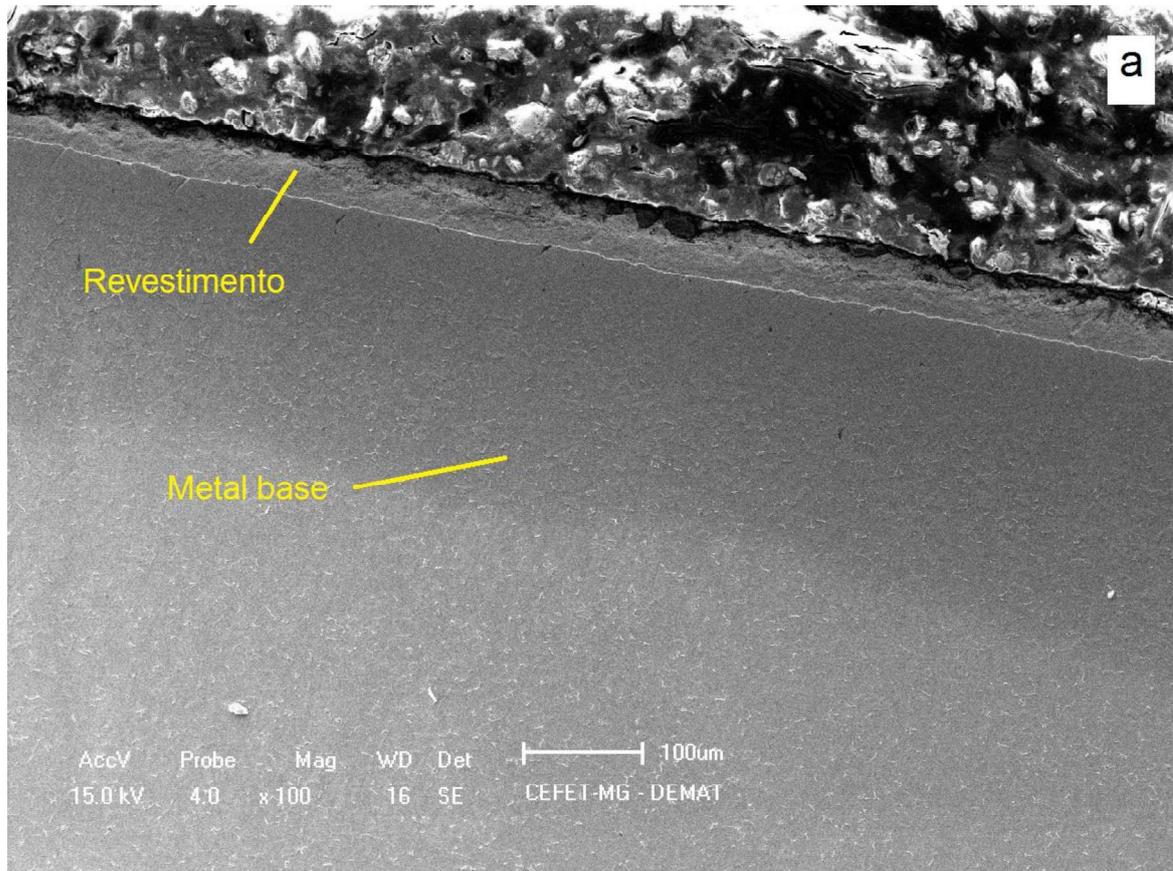
Fonte: Próprio Autor.

Figura 36 - MEV da superfície externa da chapa – região da curva 90°



Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 - MEV da superfície externa da chapa – região plana



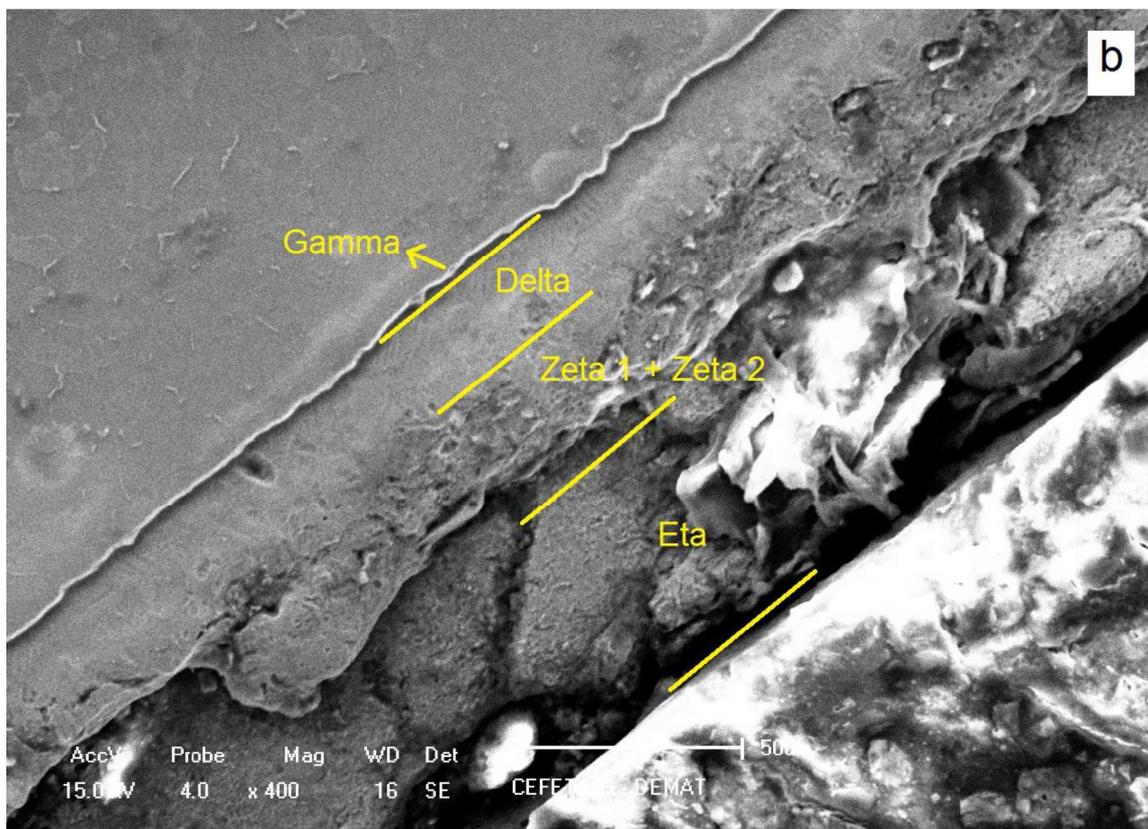
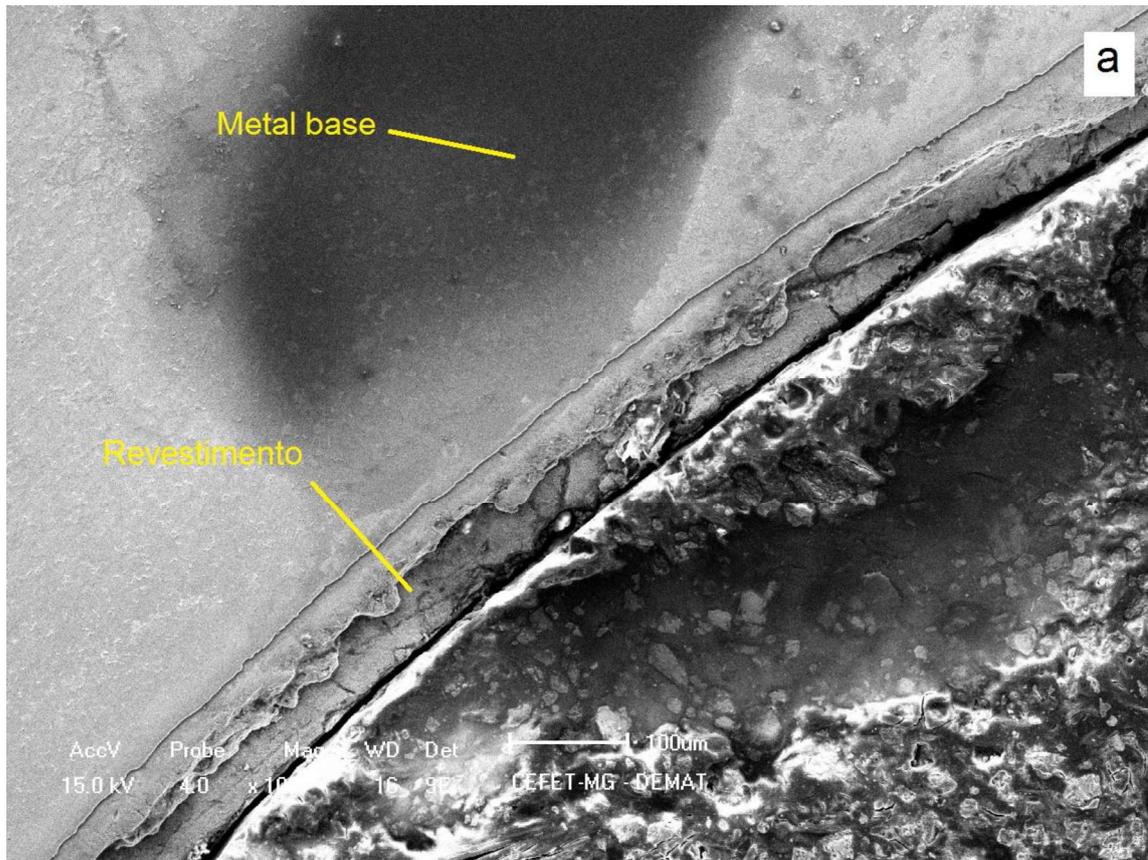
Fonte: Próprio Autor.

Na figura 37 (b) podem ser observadas as distintas camadas formadas durante o processo de galvanização por imersão a quente. Verificou-se a formação da fina camada gamma ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ – $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$) diretamente sobre o substrato, seguida da camada delta (FeZn_{10}), mais compacta. Observou-se também as camadas zeta 1 + zeta 2 (FeZn_{13}) e eta (Zn). As camadas encontradas são coerentes com as apresentadas por Pereira et al (2015), exceto que neste trabalho não foi possível observar com nitidez a morfologia colunar dos cristais zeta.

Nas figuras 38, 39 e 40 é possível verificar o revestimento da superfície interna da chapa dobrada, sendo que as figuras 38 e 39 mostram o revestimento da superfície interna na região da curva 90° e a figura 40 mostra o revestimento na região plana.

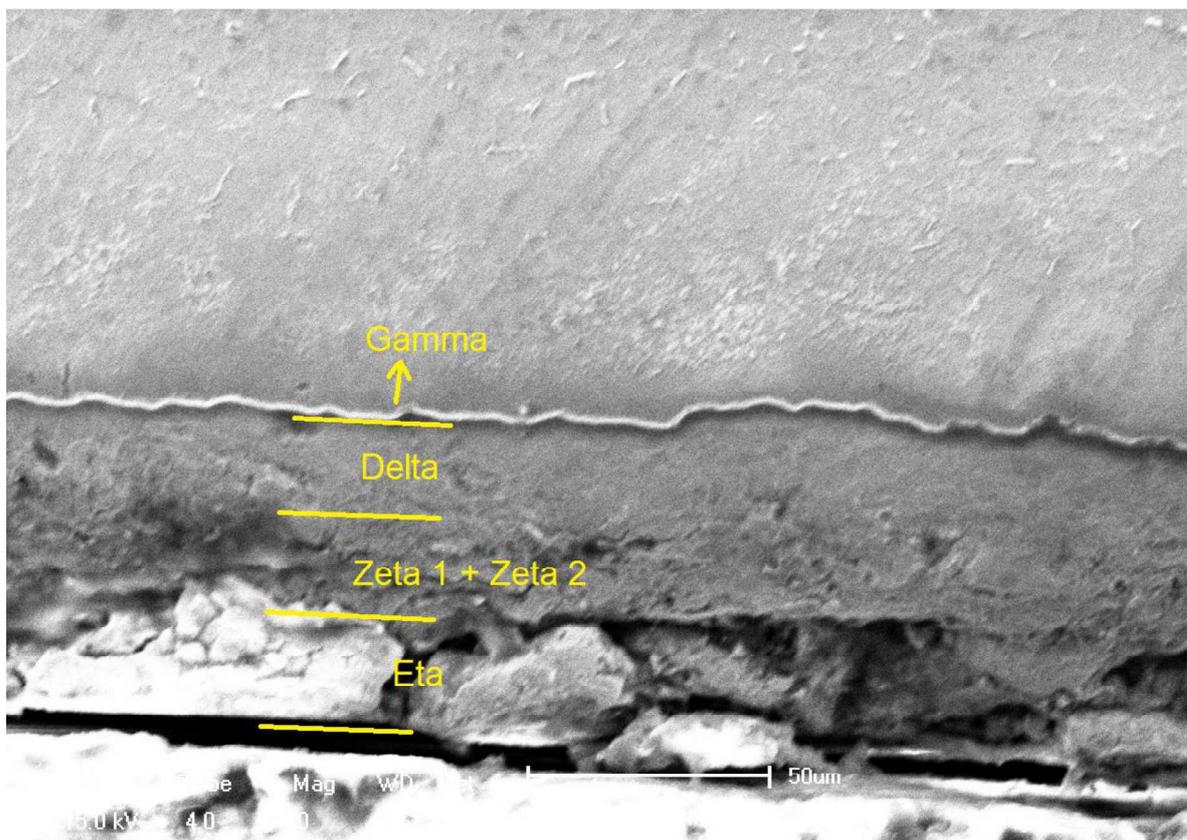
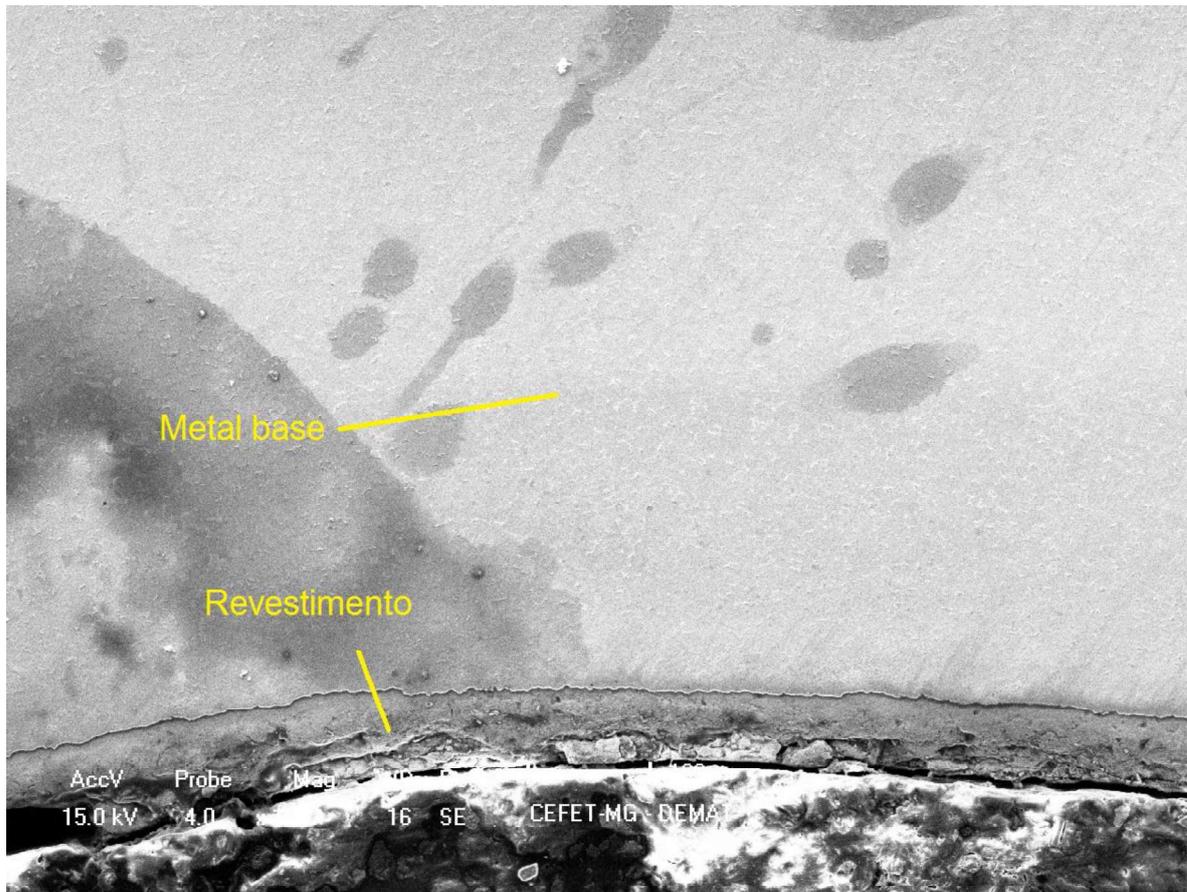
É possível constatar que o revestimento presente na superfície interna da chapa, assim como o revestimento presente na superfície externa, sofre danos. Nesse caso, ao invés de cargas trativas, estão atuando sobre a chapa cargas compressivas. Essas cargas fazem com que o revestimento seja comprimido, causando descontinuidades e sobreposição de material, como pode ser visto nas figuras 38 e 39, onde as camadas eta e zeta 1 + zeta 2 estão fraturadas. Já na figura 40, referente à região plana da chapa, observa-se o revestimento íntegro, sem sinais de sobreposição de camadas.

Figura 38 - MEV da superfície interna da chapa – região da curva 90°



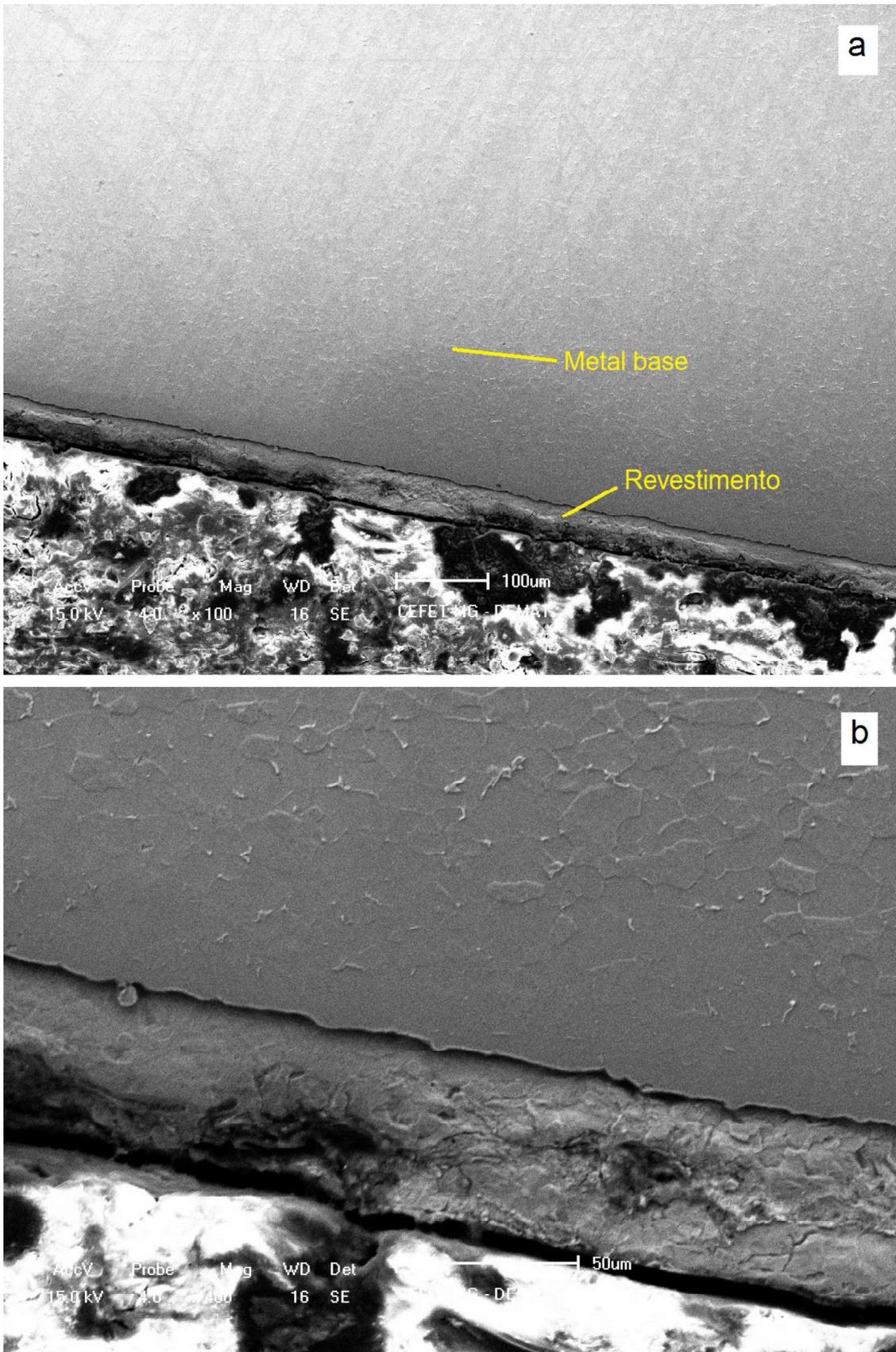
Fonte: Próprio Autor.

Figura 39 - MEV da superfície interna da chapa – região da curva 90°



Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 - MEV da superfície interna da chapa – região plana



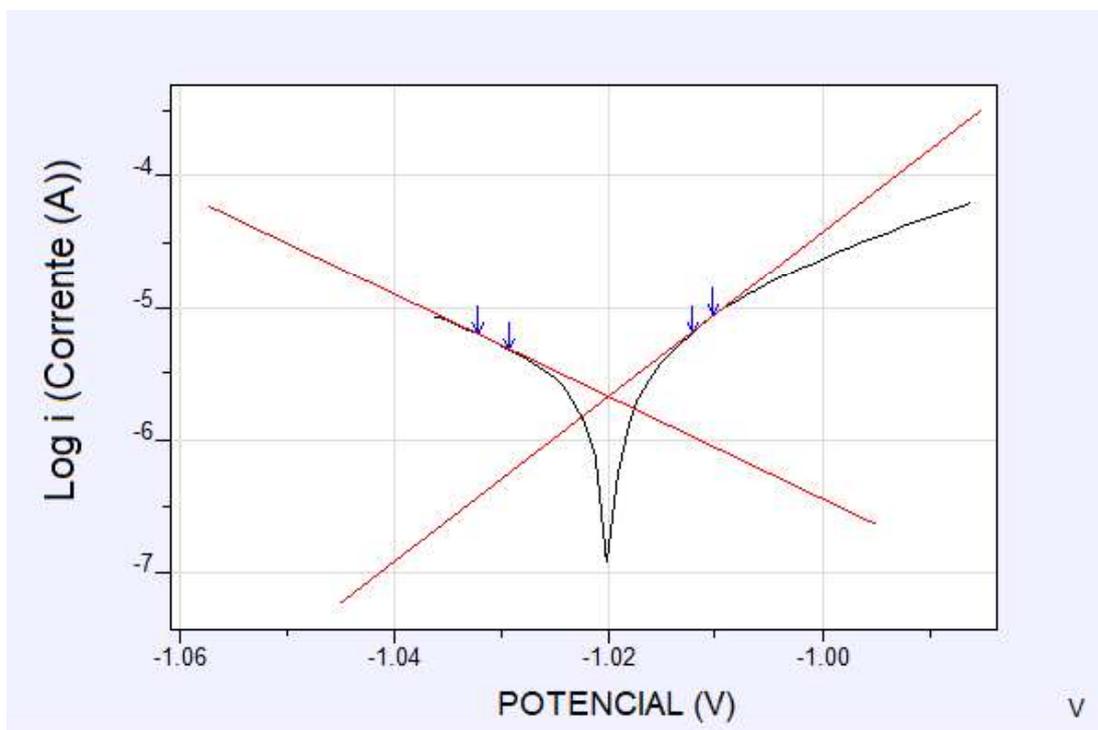
Fonte: Próprio Autor.

5.3 Resultado dos ensaios de corrosão

As análises dos resultados de corrosão foram realizadas por meio de polarização potenciodinâmica do método de Tafel. Para leitura do potencial de corrosão (E_{corr}) e da corrente (I_{corr}), foi necessário realizar a intersecção da curva de polarização anódica com a curva de polarização catódica geradas pelo potenciostato. O potencial de corrosão foi definido por meio da leitura direta do gráfico no ponto de intersecção das retas. Já para definição da densidade de corrente de corrosão (A/cm^2), foi necessário fazer a leitura no eixo Y, calcular o antilogaritmo lido no gráfico e dividir pela área exposta.

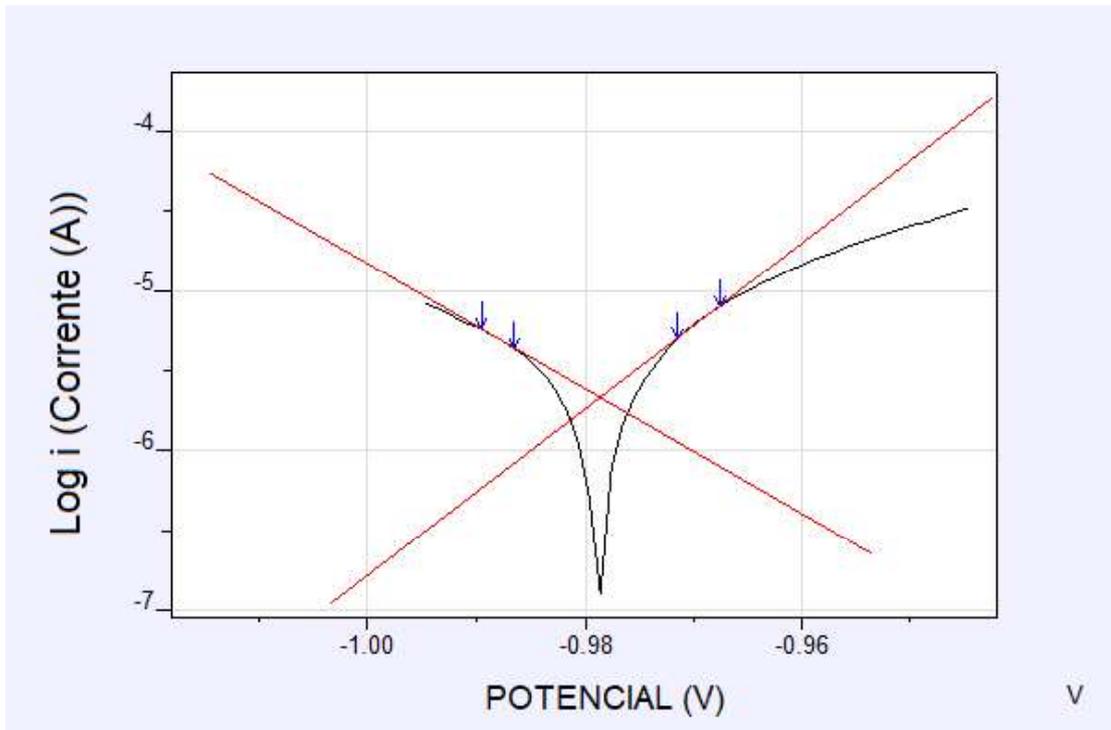
Os ensaios de corrosão apresentaram boa repetibilidade, portanto, somente um resultado de ensaio de corrosão obtido para cada nível diferente de dobramento aplicado nas amostras foi apresentado nas figuras 41 a 45.

Figura 41 - Ensaio de corrosão da amostra não dobrada



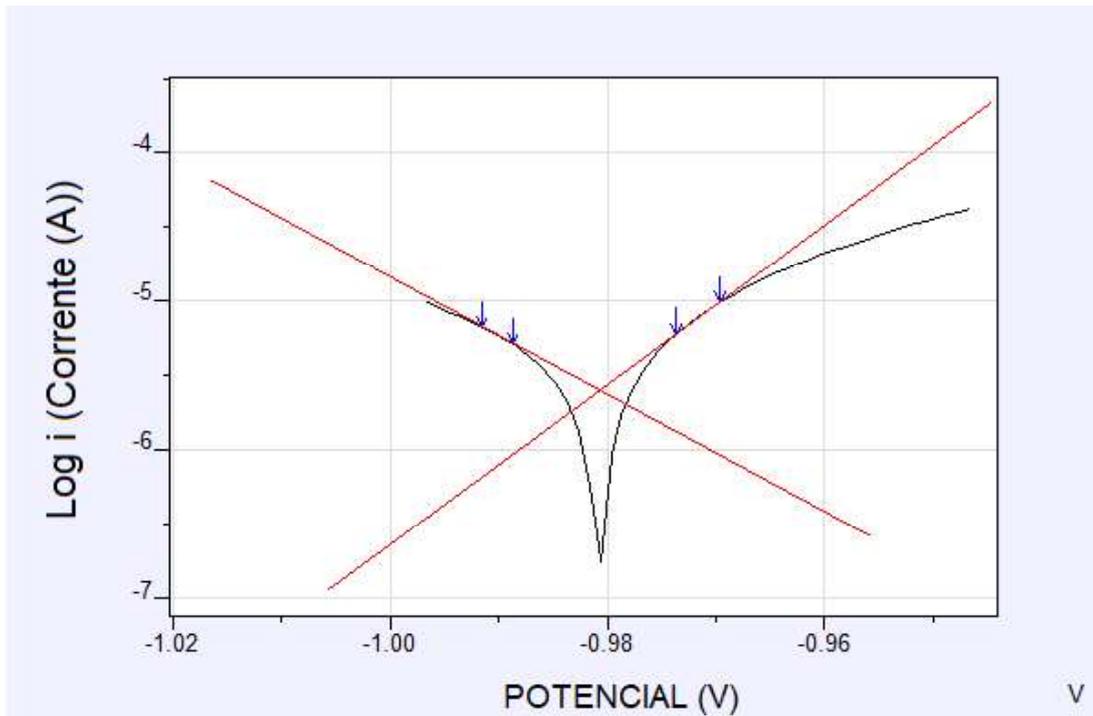
Fonte: Próprio Autor.

Figura 42 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 30°



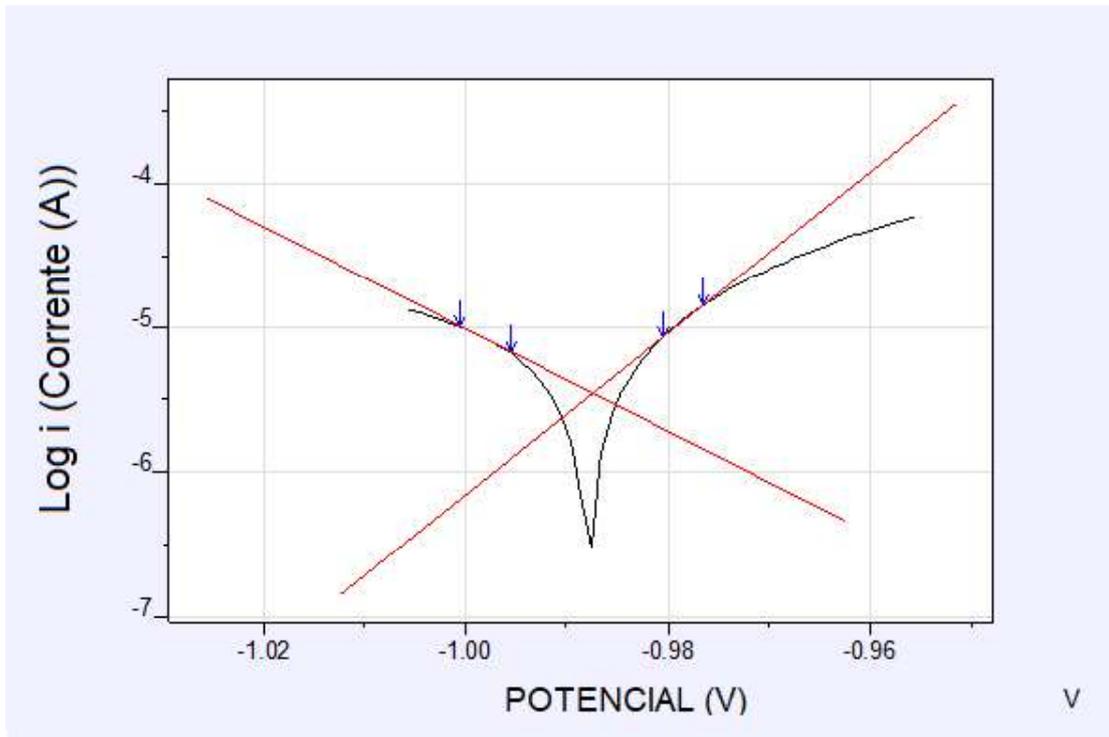
Fonte: Próprio Autor.

Figura 43 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 60°



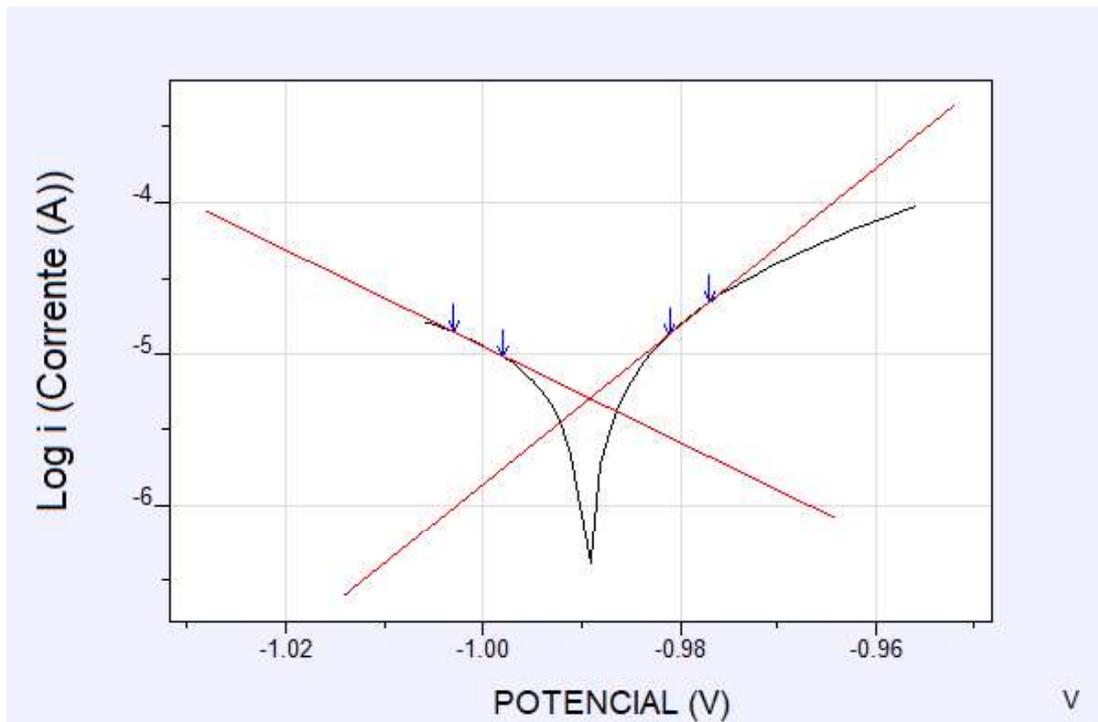
Fonte: Próprio Autor.

Figura 44 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 90°



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 - Ensaio de corrosão da amostra dobrada a 120°



Fonte: Próprio Autor.

A média dos valores de densidade de corrente de corrosão (A/cm^2), assim como o desvio-padrão, o valor mínimo e o valor máximo para cada condição são mostrados na tabela 3.

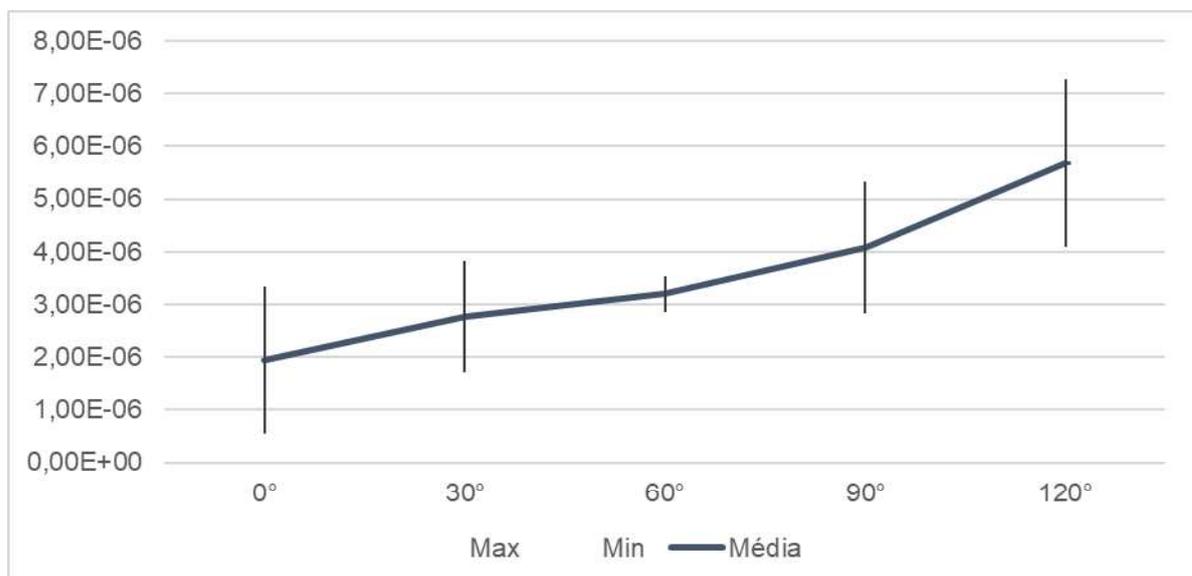
Tabela 3 - Distribuição t de Student das densidades de corrente de corrosão (A/cm^2) em função do ângulo de dobramento com intervalo de confiança de 95%

| Ângulo de Dobramento | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Amostra 1 | 2,51E-06 | 3,97E-06 | 3,30E-06 | 3,54E-06 | 4,67E-06 |
| Amostra 2 | 2,45E-06 | 2,51E-06 | 3,15E-06 | 4,56E-06 | 4,56E-06 |
| Amostra 3 | 3,54E-07 | 2,08E-06 | 2,81E-06 | 5,61E-06 | 7,06E-06 |
| Amostra 4 | 1,26E-06 | 1,99E-06 | 3,15E-06 | 3,54E-06 | 5,00E-06 |
| Amostra 5 | 3,15E-06 | 3,30E-06 | 3,54E-06 | 3,15E-06 | 7,06E-06 |
| Média | 1,94E-06 | 2,77E-06 | 3,19E-06 | 4,08E-06 | 5,67E-06 |
| Desvio Padrão | 1,12E-06 | 8,48E-07 | 2,65E-07 | 1,00E-06 | 1,28E-06 |
| Mínimo | 5,51E-07 | 1,72E-06 | 2,86E-06 | 2,84E-06 | 4,08E-06 |
| Máximo | 3,34E-06 | 3,82E-06 | 3,52E-06 | 5,32E-06 | 7,26E-06 |

Fonte: Próprio Autor.

A corrosão sofrida pelas amostras deve ser avaliada por meio da densidade de corrente apresentada pela mesma durante o ensaio de corrosão potenciodinâmica. As densidades de corrente para cada situação de dobramento estão apresentadas na figura 46.

Figura 46 - Densidade de Corrente de Corrosão (A/cm^2)



Fonte: Próprio Autor.

Foi realizado o teste de análise de variância ANOVA – Fator Único por meio do programa Microsoft Excel para análise estatística dos resultados e comparação das cinco populações (ângulo de dobramento), utilizando nível de confiança de 95% e nível de significância $\alpha = 5\%$. Os resultados são apresentados pelas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Soma, média e variância das amostras ensaiadas

| <i>Grupos</i> | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|---------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| 0° | 5 | 9,72E-06 | 1,94E-06 | 1,26E-12 |
| 30° | 5 | 1,39E-05 | 2,77E-06 | 7,19E-13 |
| 60° | 5 | 1,60E-05 | 3,19E-06 | 7,02E-14 |
| 90° | 5 | 2,04E-05 | 4,08E-06 | 1,00E-12 |
| 120° | 5 | 2,84E-05 | 5,67E-06 | 1,64E-12 |

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5 - Resultado ANOVA - Fator único

| <i>Fonte de Variação</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|---------------|
| Entre Grupos | 4,04E-11 | 4 | 1,01E-11 | 10,77244 | 0,0000803 | 2,86608 |
| Dentro dos Grupos | 1,88E-11 | 20 | 9,39E-13 | | | |
| Total | 5,92E-11 | 24 | | | | |

SS: Soma dos quadrados

df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

Fonte: Próprio Autor.

A partir da análise ANOVA – Fator único das densidades de correntes apresentadas pelas amostras, rejeita-se a hipótese nula H_0 de que as médias são iguais para $p < \alpha$ e $F > F_{\text{crítico}}$, indicando que há diferença estatística significativa entre os grupos comparados. É possível analisar por meio da tabela 5 que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($0,0000803 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o $F_{\text{crítico}}$ ($10,77244 > 2,86608$). Portanto, pode-se concluir que as densidades de correntes dos grupos analisados são estatisticamente diferentes. Para cada nível de dobramento realizado, houve aumento na densidade de corrente de corrosão, assim como apresentado no estudo de Vagge, Raja e Narayanan (2007), indicando que o material realizou uma maior troca de elétrons com o meio corrosivo nas amostras mais dobradas. Esse resultado sugere um crescimento da densidade de corrente de

corrosão da amostra à medida que o ângulo de dobramento é aumentado, evidenciando a influência do dobramento na resistência à corrosão de chapas de aço galvanizado.

Após o término dos ensaios de corrosão, foi realizada a coleta e compilação de todos os resultados, onde foi calculada a média aritmética, o desvio padrão dos potenciais de corrosão (E_{corr}) e os valores de mínimo e máximo aceitos com intervalo de confiança de 95%, conforme mostrado na tabela 6.

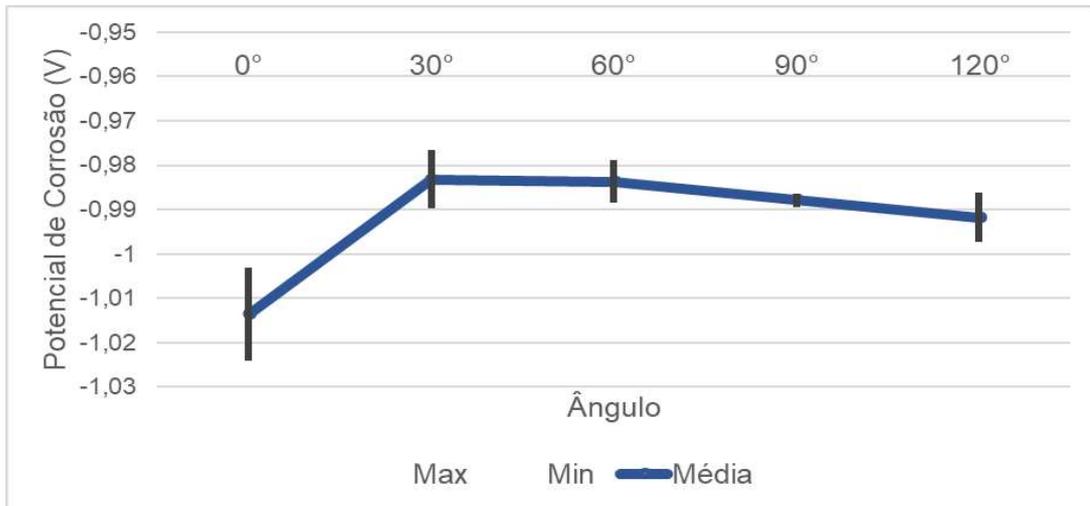
Tabela 6 - Distribuição t de Student dos potenciais de corrosão (E_{corr}) em função do ângulo de dobramento com intervalo de confiança de 95%

| Ângulo de Dobramento | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra 1 | -1,0046 | -0,9853 | -0,9815 | -0,9888 | -0,9927 |
| Amostra 2 | -1,0042 | -0,9915 | -0,9842 | -0,9892 | -0,9892 |
| Amostra 3 | -1,0178 | -0,9792 | -0,9808 | -0,9862 | -0,9989 |
| Amostra 4 | -1,0200 | -0,9786 | -0,9903 | -0,9875 | -0,9873 |
| Amostra 5 | -1,0215 | -0,9815 | -0,9816 | -0,9879 | -0,9909 |
| Média | -1,0136 | -0,9832 | -0,9837 | -0,9879 | -0,9918 |
| Desvio Padrão | 0,0085 | 0,0053 | 0,0039 | 0,0012 | 0,0044 |
| Mínimo | -1,0242 | -0,9898 | -0,9885 | -0,9894 | -0,9973 |
| Máximo | -1,0030 | -0,9766 | -0,9788 | -0,9865 | -0,9863 |

Fonte: Próprio Autor.

Analisando a média e o desvio-padrão comparativamente, pode-se verificar que o potencial de corrosão das amostras não dobradas é menor que o potencial de corrosão das amostras dobradas, pois não há nenhum valor de potencial de corrosão encontrado nas amostras dobradas que coincida com o intervalo de desvios das amostras não dobradas. A tabela 6 apresenta os valores de mínimo e máximo de acordo com a distribuição t de Student, utilizando um intervalo de confiança de 95%. A figura 47 apresenta o potencial de corrosão (V) e o desvio padrão existente entre as amostras ensaiadas.

Figura 47 - Potencial de corrosão em função do ângulo de dobramento



Fonte: Próprio Autor.

A partir da análise apresentada na tabela 6, foi realizado o teste de hipótese em pares, comparando as amostras não dobradas com as amostras dobradas em cada ângulo. Em todos os casos, a hipótese de que há igualdade foi negada, portanto, é possível verificar que o potencial de corrosão das amostras não dobradas é estatisticamente inferior às amostras dobradas. Já para avaliação entre as amostras dobradas, foi realizado o teste de análise de variância ANOVA – Fator Único por meio do programa Microsoft Excel, comparando os quatro grupos que sofreram dobramento (30°, 60°, 90° e 120°), utilizando nível de confiança de 95% e nível de significância $\alpha = 5\%$. Os resultados são apresentados pela tabela 7.

Tabela 7 - Resultado ANOVA – Fator único do potencial de corrosão E_{corr} (V) das amostras dobradas

| Fonte de Variação | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|-------------------|--------|----|-------------|--------|---------|--------|
| Entre Grupos | 0,0002 | 3 | 8,12018E-05 | 5,0085 | 0,0123 | 3,2389 |
| Dentro dos Grupos | 0,0003 | 16 | 1,62128E-05 | | | |
| Total | 0,0005 | 19 | | | | |

SS: Soma dos quadrados

df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

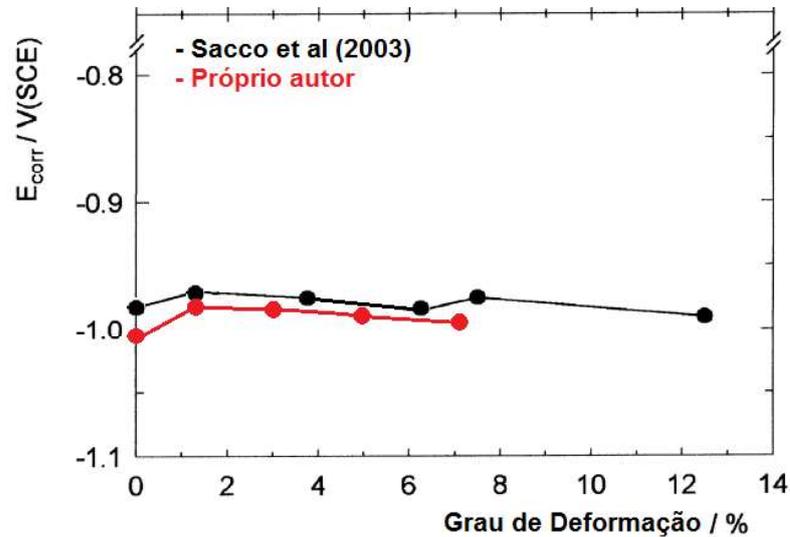
Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras dobradas, o valor de *Pvalue* calculado foi menor que α ($0,0123 < 0,05$) e valor de *F* também foi maior que o *F* crítico ($5,0085 > 3,2389$), portanto, há diferença estatística entre as amostras analisadas.

Os ensaios de corrosão apresentados, realizados por meio do potenciostato, evidenciaram que o potencial de corrosão das amostras não deformadas é menor do que o potencial de corrosão das amostras que passaram pelo processo de dobramento. Com esse resultado, é possível inferir que a deformação mecânica efetuada na chapa por meio do processo de dobramento danificou a camada de revestimento de zinco presente na mesma, causando um aumento do potencial de corrosão da amostra.

Em contrapartida, os resultados mostraram que o potencial de corrosão não aumentou de acordo com o aumento da deformação causada no revestimento. O potencial de corrosão da amostra apresentou crescimento entre as amostras não dobradas e dobradas a 30° . O não crescimento do potencial de corrosão de acordo com o aumento no ângulo de dobramento pode ser explicado pelos produtos de corrosão depositados na superfície das amostras. Nevison (1992, apud BATISTA, 2013) classificou esse tipo de comportamento como proteção adicional, onde os produtos da corrosão do zinco se aderem à superfície do aço, recobrendo discontinuidades menores no revestimento e formando uma barreira de proteção eletroquímica adicional. O mesmo comportamento foi observado por Sacco et al (2003), que concluiu na ocasião que a deformação causada no revestimento do material induz a corrosão acelerada, resultando na formação de uma camada de hidróxido de zinco espessa que protege a superfície do aço. A figura 48 apresenta a sobreposição dos resultados obtidos por Sacco et al (2003) e os resultados obtidos nesse estudo em relação ao grau de deformação percentual.

Figura 48 - Comparação dos resultados de Sacco et al (2003) e o estudo atual



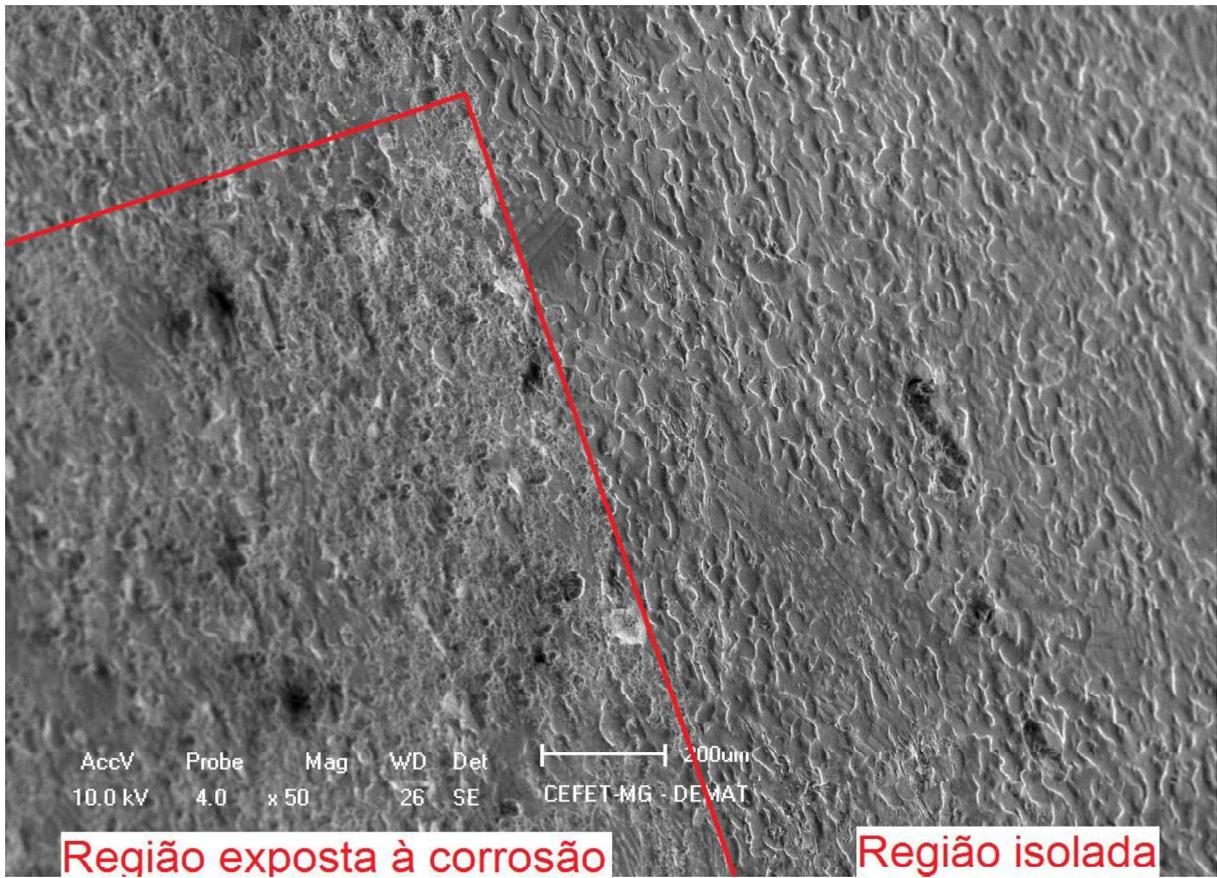
Fonte: Próprio Autor.

Como pode ser observado nos dois estudos, o comportamento do potencial de corrosão em relação ao grau de deformação sofrido apresentou um crescimento inicial e, após certo grau de deformação, apresentou redução. A proximidade dos resultados obtidos nos dois estudos indica que esse pode ser um comportamento aceitável e esperado do aço galvanizado.

5.4 Análise final do revestimento por meio da MEV

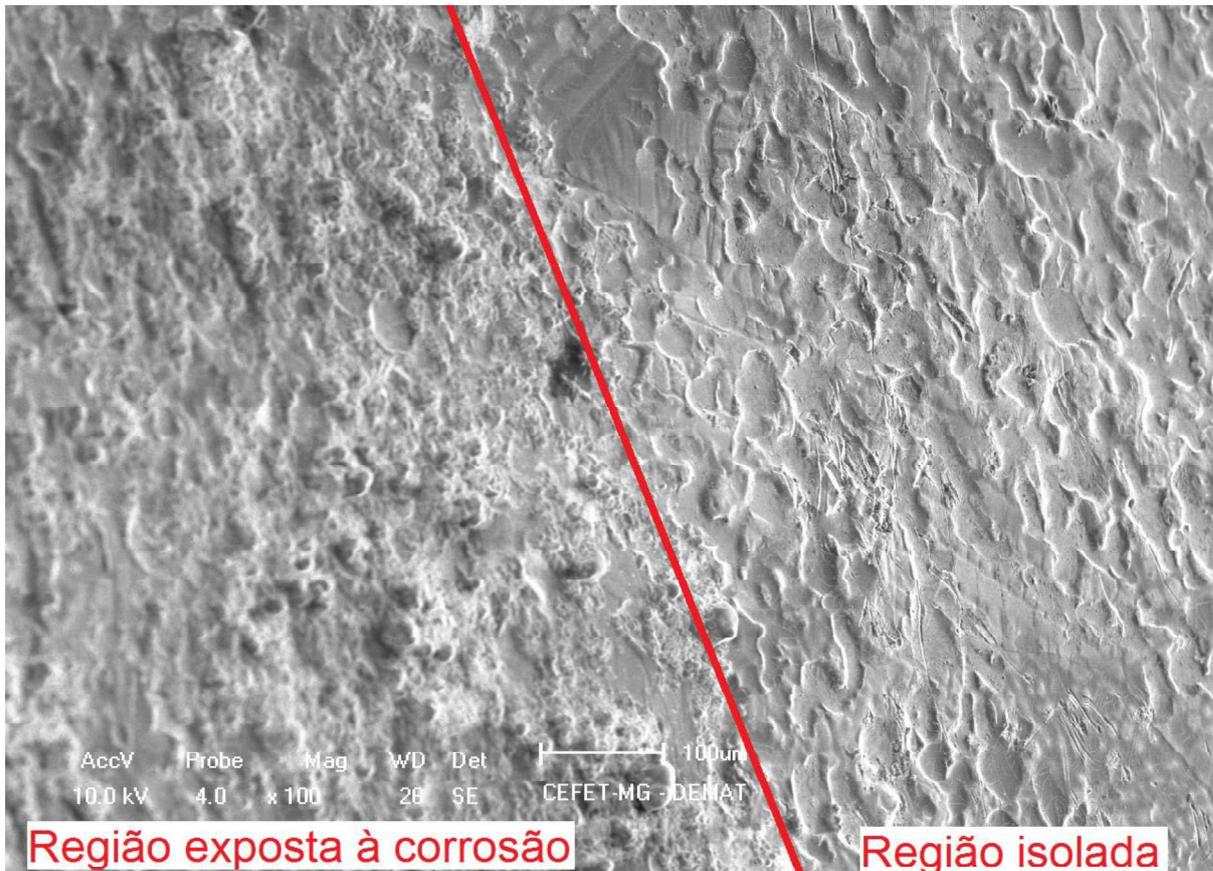
As figuras 49 e 50 apresentam a superfície externa da amostra dobrada a 90° após o ensaio de corrosão.

Figura 49 - MEV da amostra dobrada a 90° - interface entre a área exposta e a área isolada



Fonte: Próprio Autor.

Figura 50 - MEV da amostra dobrada a 90° - interface entre a área exposta e a área isolada

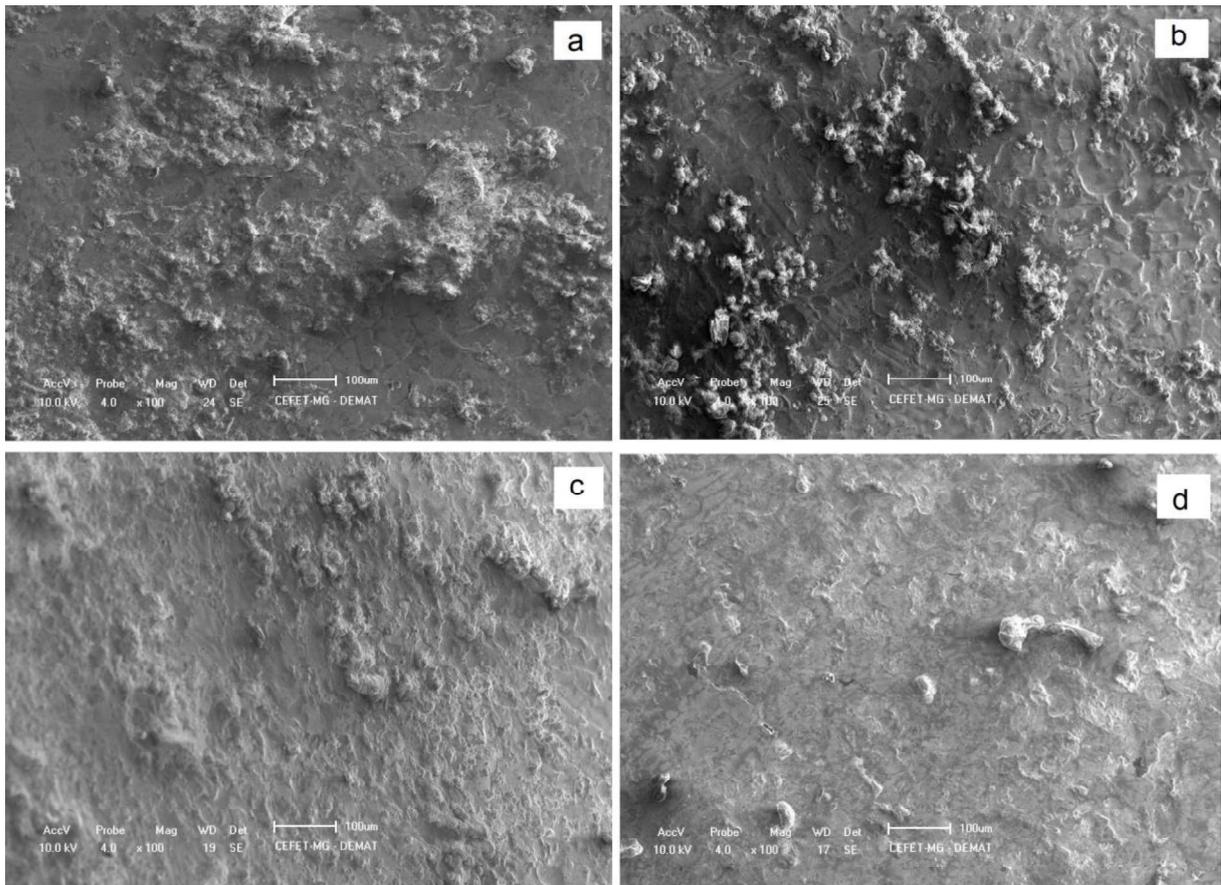


Fonte: Próprio Autor.

É possível observar nas figuras que o ensaio eletroquímico realizado nas amostras causou uma alteração na morfologia da superfície do revestimento na região que foi exposta à corrosão em relação à região isolada. Enquanto que na região isolada o revestimento apresenta uma morfologia homogênea ao longo da superfície, verificou-se na região exposta das amostras a deposição dos produtos de corrosão.

As figuras 51 e 52 apresentam a superfície das amostras após o ensaio de corrosão com ângulos de dobramento diferentes.

Figura 51 - MEV da superfície após ensaio de corrosão

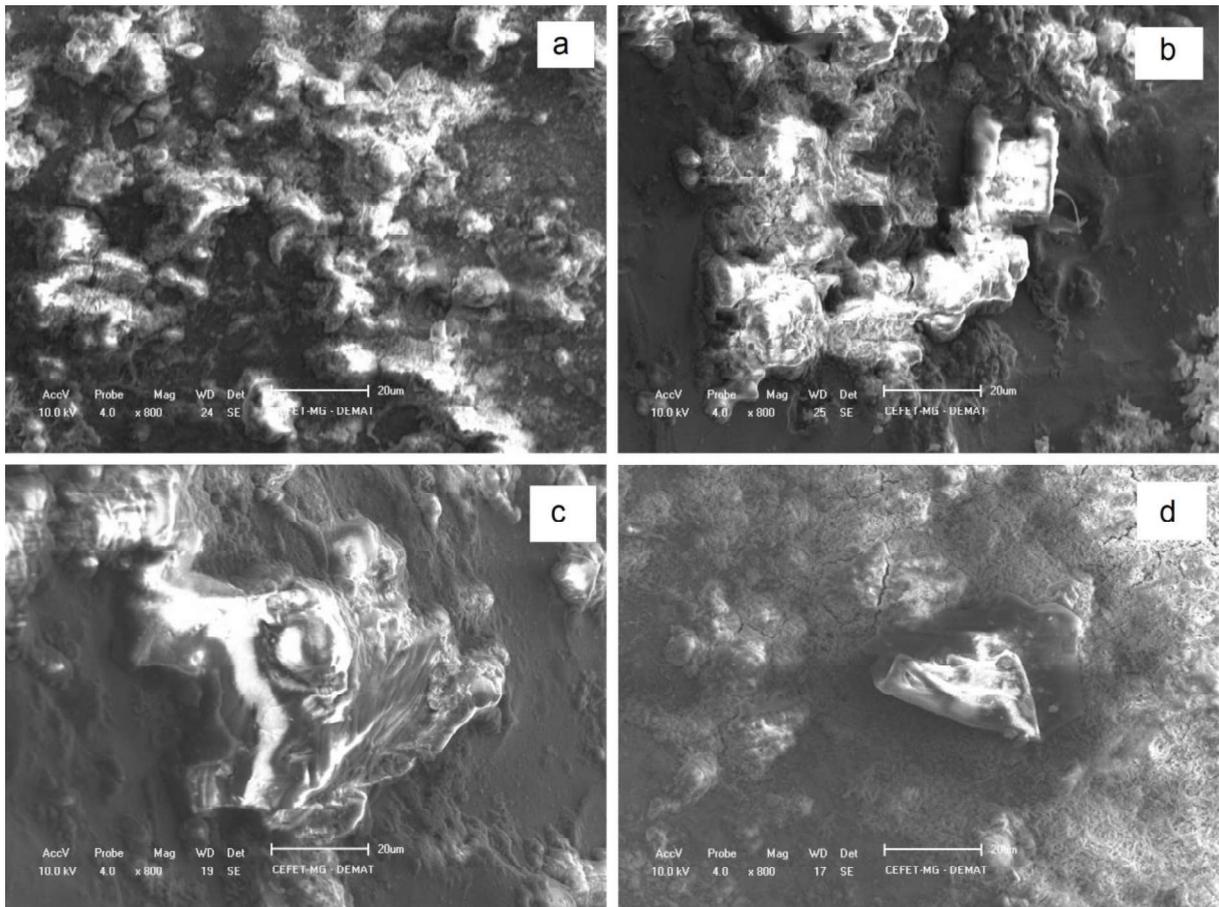


a) Amostra não dobrada
c) Amostra dobrada 90°

b) Amostra dobrada 60°
d) Amostra dobrada 120°

Fonte: Próprio Autor.

Figura 52 - MEV da superfície após ensaio de corrosão



a) Amostra não dobrada
c) Amostra dobrada a 90°

b) Amostra dobrada a 60°
d) Amostra dobrada a 120°

Fonte: Próprio Autor.

Com base nas figuras 51 e 52, é possível observar a presença de produtos de corrosão em todas as condições de dobramento, sendo que para as amostras dobradas a 90° e 120° é possível observar acumulos maiores de produtos de corrosão. A partir dessas imagens, pode-se inferir que a partir de 90°, a amostra sofre corrosão acelerada, o que provoca a deposição de produtos de corrosão em pontos específicos.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados ao longo desse estudo, pode-se concluir que:

- A espessura do revestimento apresentado pela chapa (25,8 +/- 3 μm) está condizente com um aço galvanizado Z275, exigido pela norma NBR 6355, indicando que o material é adequado para a aplicação em construções *Light Steel Frame*.
- De acordo com a análise da MEV, o relevo da região da curva 90° é diferente do relevo da região plana do material. A variação de relevo existente entre a região plana e a curva sugere que a conformação mecânica causa alterações no revestimento da peça.
- A superfície externa da peça, que sofreu força de tração durante o dobramento, apresentou fissuras no revestimento ao longo da região da curva. Esse resultado reforça a hipótese que o dobramento causa danos no revestimento, uma vez que somente a região dobrada apresentou descontinuidades no revestimento.
- O método de preparação de amostra desenvolvido foi efetivo, uma vez que os resultados obtidos para cada situação foram próximos e houve boa repetibilidade do processo, sendo o mesmo capaz de evidenciar a alteração que o dobramento causou na resistência à corrosão das chapas de aço galvanizado.
- O potencial de corrosão das amostras que não foram dobradas é estatisticamente menor do que o potencial de corrosão das amostras que foram dobradas segundo o método estatístico t de Student, independente do ângulo de dobramento a que foram submetidas.
- O potencial de corrosão não aumentou de acordo com o aumento da deformação causada no revestimento. A deformação causada no revestimento do material induz a corrosão acelerada, resultando na formação de produtos de corrosão que

protegem a superfície do aço, recobrimo discontinuidades menores no revestimento e formando uma barreira de proteção eletroquímica adicional.

- A densidade de corrente de corrosão aumentou à medida que foi aumentado o ângulo de dobramento. Esse resultado mostra que o dobramento influencia na corrosão do aço galvanizado, fazendo com que a peça ou uma região dobrada da mesma possua uma resistência à corrosão menor do que a região plana da chapa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o conhecimento sobre corrosão em estruturas de *Light Steel Frame*, os seguintes estudos são sugeridos:

- Avaliação do comportamento de corrosão em regiões de corte ou furo, onde há exposição direta do substrato ao meio corrosivo.
- Realizar teste de longa duração para avaliação da propagação da corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, E. A.; MOREIRA, J. G.; BUONO, V. T. L. Resistência à corrosão de aços eletrolgalvanizados fosfatizados e pintados. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 21-26, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Handbook**. Corrosion: corrosion in the automotive industry.v.13. ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM B-487**: standard test method for measurement of metal and oxide coating thickness by microscopical examination of cross section. West Conshohocken, PA, USA. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.

BATISTA, K. B. **Caracterização de superfícies de aços galvanizados utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica**. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BORGES, M. M. **Dobramento**. Disponível em: <http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/dobramento.htm>. Acesso em: 08 set 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988. 576 p.

COSTA, R. N. **Chevrolet Veraneio 1969**. Disponível em: <<http://www.carrosinuteis.com.br/chevrolet-veraneio-1969/>>. Acesso em: 25 jun 2016.

CULCASIA, José Daniel; ELSNERB, Cecilia Inés; SARLIB, Alejandro Ramón. Effect of zinc crystals size on galvanized steel deformation and electrochemical behavior. **Materials Research**, v.12, n. 3, p. 273-279, 2009.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.

LIU, X., et al. Design and model test of a modularized prefabricated Steel Frame Structure with inclined braces. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015 (2015), Article ID 291481, 12 p, 2015.

MELLO, L. C. B. B.; AMORIM, S. R. L. **O subsetor de edificações da construção civil no Brasil**: uma análise comparativa em relação à União Europeia e aos Estados Unidos. Ed. Produção. v. 19, n. 2, p. 388-399, 2009.

PARANHOS, R. M. V. **Caracterização de fases intermetálicas presentes em aço galvanizado por imersão a quente com tratamento térmico do revestimento**

metálico. 2010. 96 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.2010.

PEREIRA, R. F. C. et al. Corrosion of galvanized steel under different soil moisture contents. **Materials Research**, v. 18, p. 563-568, 2015.

RODRIGUES, Francisco Carlos. **Steel framing**: engenharia. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. 127 p.

SACCO, E. A., et al. Effect of the plastic deformation on the electrochemical behavior of metal coated steel sheets. **Surface and Coatings Technology**, v. 168, p. 115-122, 2003.

SANTOS, A. P.; RODRIGUES, J. S.; DICK, L. F. P. Estudo comparativo da resistência à corrosão de aços revestidos pelos processos de galvanização a fogo, galvannealing e galvalume. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, n. 3, p. 280-286, 2013.

SHUKLA, S. K. et al. Effect of process parameters on the structure and properties of galvanized sheets. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 19, p. 650-655, 2010.

SILVA, P. S. G. et al. Evaluation of the corrosion behavior of galvanized steel in chloride aqueous solution and in tropical marine environment. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 36, p. 375-383, 2006.

SSAB. **Proteção contra corrosão com revestimento de zinco**. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/products/steel-categories/metal-coated-steels/coatings/zinc-coating>>. Acesso em: 02 ago, 2018.

USIMINAS. **Eletro galvanizados**. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/nossos-produtos/eletro galvanizados/>>. Acesso em: 07 jun, 2016.

USIMINAS. **Galvanizados por imersão a quente**. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/nossos-produtos/galvanizados-por-imersao-quente/>>. Acesso em: 07 jun, 2016.

VAGGE, S. T.; RAJA, V. S.; NARAYANAN, R. G. Effect of deformation on the electrochemical behavior of hot-dip galvanized steel sheets. **Applied Surface Science**, v. 253, p. 8415-8421, 2007.

VIVAN, André Luiz; PALIARI, José Carlos. *Design for Assembly* aplicado ao projeto de habitações em Light Steel Frame. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 101-115, out./dez. 2012

YU, Z. Q.; HOU, Y. K.; LI, S. H.; LIN, Z. Q. Surface damage behavior of galvanized steel sheets in forming process under tension-bending. **International Journal of Modern Physics B**, v. 26, n. 30, p. 5877-5884, 2010.