

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS PPGE3M**

RENATO AMÉRICO

**EFEITO DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DOS
AÇOS NBR7008 ZC/Z275 E GALVALUME® ASTM A792 CSB/AZM150**

**Porto Alegre
2016**

RENATO AMÉRICO

**EFEITO DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DOS
AÇOS NBR7008 ZC/Z275 E GALVALUME® ASTM A792 CSB/AZM150**

Trabalho desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Corrosão – LAPEC, da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de Concentração: Processo de Fabricação.

Orientador: Prof Dr. Alexandre da Silva Rocha
Co-orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti

Porto Alegre
2016

RENATO AMÉRICO

**EFEITO DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DOS
AÇOS NBR7008 ZC/Z275 E GALVALUME® ASTM A792 CSB/AZM150**

Esta dissertação deve ser julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processo de Fabricação e avaliada em sua forma final pela orientadora e pela banca examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof Dr. Alexandre da Silva Rocha

Co-orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti

Coordenador do PPGE3M Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

BANCA EXAMINADORA

Dr. Tiago Lemos Menezes - UFRGS

Dr^a. Eliane Coser - UFRGS

Prof. Dr. Jovani Castelan - SATC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me ajudar a conseguir concluir este mestrado com muitos estudos e dificuldades em alguns momentos;

A Professora Dra. Célia de Fraga Malfatti e o Dr. Alexandre Rocha, que me guiaram neste trabalho;

Ao Prof. Dr. Vilson Gruber, por ajudar com dicas, e sua grande experiência em elaboração e orientação em dissertações;

A todos os Funcionários da SATC ligados ao programa;

A equipe do LabTel da UFSC;

A todos meus amigos de aula;

Aos meus pais Gonçalo e Maria, meu sogro e sogra Antônio e Janete pelo incentivo total aos meus estudos;

A minha esposa Fernanda e minhas filhas, por todo apoio;

A todos os professores ao longo do curso que ajudaram com suas experiências e didática e em especial a banca examinadora;

A todos os colegas do LAPEC, principalmente ao Matheus Espindola, que ajudou e muito nos ensaios feitos na UFRGS;

Agradeço a Industrial Pagé de forma direta e indiretamente por conseguir realizar este objetivo pessoal.

Ao Marcos Martau que forneceu subsídios para o estudo sobre o aço pesquisado;

Ao meu gerente Edemar Ouriques por possibilitar as saídas da empresa nas sextas a tarde para estar presente nas aulas;

Agradeço ao meu colega Matheus Soranzo pela confecção dos gráficos e tabelas.

Agradeço ao Laboratório de Estudos Avançados da Universidade Feevale pela colaboração e parceria com o LAPEC.

Agradeço a Eng. Química Dra. Sandra Raquel Kunst, pela grande ajuda em revisão inicial da pesquisa.

Agradeço ao meu colega Dr. Tiago Lemos Menezes, pela grande ajuda na formulação e revisão final da pesquisa.

Agradeço ao Msc. Joel da Silva, pela grande ajuda na revisão final da pesquisa.

RESUMO

Os materiais usados nas indústrias de fabricação de máquinas para o setor de armazenagem e secagem de grãos, devem garantir o desempenho requerido, não gerando nenhum prejuízo ou descontentamento do cliente final. Esta pesquisa tem como objetivo principal, avaliar o desempenho do aço Galvalume[®] em relação ao aço Galvanizado NBR7008 quando conformados, quanto a resistência a corrosão de ambos os materiais. Para isso foram executados testes em amostras de chapas lisas e conformadas nos aços mencionados. As amostras foram avaliadas quanto à resistência à corrosão a partir de ensaio em câmara de névoa salina (chapas lisas) e ensaio de imersão (chapas conformadas). Além disso, as amostras foram caracterizadas quanto à espessura e morfologia dos revestimentos por MEV e perfilometria em (chapas conformadas). Também foi realizado o ensaio de envelhecimento em campo, que consistiu em avaliar o aspecto visual com ambas as chapas, montadas na tampa de um silo em uso na área rural. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, antes e após a conformação mecânica, ficou evidenciada a influencia do processo de conformação sobre a resistência à corrosão do aço Galvanizado NBR7008. Observou-se que as áreas submetidas com as dobras das laterais tiveram a taxa de corrosão aumentada. O mesmo não ocorreu para o aço revestido com Galvalume[®], o qual apresentou menor taxa de corrosão do que o aço Galvanizado NBR7008. Os resultados obtidos no ensaio de envelhecimento evidenciaram a grande diferença em relação ao aspecto visual dos painéis, observando-se no aço Galvanizado uma perda excessiva do brilho, com a escurecimento da chapa após 3 anos de exposição em zona rural. Já as chapas de aço Galvalume[®] mantiveram o brilho após todo esse período de exposição na mesma atmosfera evidenciando a sua superioridade quanto as intempéries. O custo inicial do aço Galvalume[®] é, em média, 12% mais elevado que o custo do aço galvanizado (NBR7008 ZC/Z275). Contudo é importante salientar que essas características quanto ao aspecto visual são determinantes para a aceitação dos silos pelos clientes.

Palavras-chave: aço Galvanizado; aço Galvalume[®]; conformação mecânica, corrosão.

ABSTRACT

The most used materials in the industry of manufacture of machines for the storage and grain drying department must ensure the required performance, and should not causing any loss or dissatisfaction to the final customer. This research has as main goal measuring the performance of Galvalume[®] steel compared to the Galvanized steel NBR7008, when conformed, evaluating the corrosion resistance of both materials. For that, tests were made on samples of plain steel sheet and conformed steel sheet with the mentioned kinds of steel. The samples were evaluated taking into consideration the corrosion resistance in immersion test (shaped plate) and salt spray test (flat sheet). Besides, the samples were described according to thickness and coating morphology by MEV and perfilometry. Also, a test of accelerated aging was made, which consisted in measuring visual aspect in both kinds of steel. They were assembled on the cover of a silo that was working, located in the countryside. From the results reached through the tests, before and after the mechanical conformation, the influence of conformed process on the corrosion resistance of the Galvanized steel NBR7008 was evidenced. It could be noted that the areas submitted with lateral folds had corrosion rates increased. But, with the Galvalume[®] steel was different, this one showed lower corrosion rate than Galvanized steel NBR7008. The results reached with the accelerated aging test showed the big difference related to visual aspects of the panels, in which an excessive brightness loss on the Galvanized steel, with the darkening of the steel sheet after 3 years of exposure in the countryside was observed. Whereas the Galvalume[®] steel sheet kept the brightness after all this period of exposure to the same atmosphere, showing its superiority in corrosion resistance.

The cost of Galvalume[®] steel is about 12% higher than cost of Galvanized steel (NBR7008 ZC/Z275). However it is important to point these attributes, regarding to visual aspect, which are determinants for good acceptance of silos by the customers.

Keywords: Galvanized steel, Galvalume[®], Mechanical Conformation, Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características do Galvalume®	14
Figura 2 - Silos em unidade armazenadora de grãos.....	14
Figura 3 - Partes principais do silo armazenador de grãos	15
Figura 4 - Revestimento para proteção do aço base.....	18
Figura 5 - Componentes mecânicos presentes no pote de metal fundido: 1- tira de aço, 2- rolo submerso, 3-rolo corretor, 4- rolo estabilizador e obtenção espessura do revestimento.....	19
Figura 6 - Aspecto superficial dos cristais das chapas galvanizadas.....	20
Figura 7 - Corte transversal aço galvanizado	21
Figura 8 - Camadas do revestimento do aço Galvalume®	24
Figura 9 - Microestrutura do aço Galvalume®	25
Figura 10 - Ensaio de corrosão atmosférica rural.....	26
Figura 11 - Ensaio de corrosão atmosférica marinha.....	26
Figura 12 - de corrosão atmosférica marinha severa	27
Figura 13 - Perdas por corrosão dos revestimentos obtidos por imersão à quente em atmosfera industrial.....	28
Figura 14 - Representação da medição do Ra.....	34
Figura 15 - Curva Tensão – Deformação Convencional	34
Figura 16 - Padrão dimensão corpo prova	35
Figura 17 - Painel tampa de Silos	36
Figura 18 - Painel inferior	37
Figura 19 - Detalhe de montagem dos painéis.....	37
Figura 20 - a) Fluxograma b) Vista superior do processo produtivo.....	38
Figura 21 - Desbobinador.....	38
Figura 22 - Guilhotina corte do blank	39
Figura 23 - Blank na mesa do plasma.....	40
Figura 24 - a) Onduladeira b) Painel ondulado.....	40
Figura 25 - Arranhões e fissuras	41
Figura 26 - Perfiladeira.....	41
Figura 27 - Distribuição dos rolos conformadores	42
Figura 28 - Dobra nas duas laterais	42
Figura 29 - Painel estampado apenas um lado	42
Figura 30 - Painel estampado nos dois lados.....	43
Figura 31 - Painel estampado com áreas afetadas	43
Figura 32 - Estampagem no painel inferior	44
Figura 33 - A) Aços Galvanizados (GI) B) Aços Galvalume® (GA).....	45
Figura 34 – Aspectos das amostras antes do ensaio de imersão	46
Figura 35 - Desenho painel planejado	49
Figura 36 - Área das amostras em painel	49
Figura 37 - Localização das 3 áreas do painel, analisadas em ambos materiais.....	50
Figura 38 - Amostra ensaio DRX.....	50
Figura 39 - Localização das 3 regiões analisadas nas amostras	51
Figura 40 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvanizado	56
Figura 41 - Área das amostras em painel ensaiadas	56
Figura 42 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvalume®	57

Figura 43 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvanizado/Galvalume®.....	58
Figura 44 - Imagens MEV em aços Galvanizados antes do ensaio de imersão (área A1).....	59
Figura 45 - Imagens MEV em aços Galvanizados após imersão (área A1)	59
Figura 46 - Imagem MEV em aço Galvanizado após imersão (área A1)	60
Figura 47 - Gráfico ponto 1, 2 e 3 - EDS amostra da área A1 após ensaio de imersão em aço Galvanizado.....	60
Figura 48 - Imagens MEV em aços Galvalume® antes imersão (amostra da área A1)	61
Figura 49 - Imagens MEV em aços Galvalume® após imersão (amostra da área A1)	61
Figura 50 - Imagem MEV amostra de aço revestido com Galvalume® após imersão (amostra da área A1)	62
Figura 51 - EDS para a amostra de aço revestido com Galvalume® após imersão (amostra da área A1)	62
Figura 52 - Amostras expostas aço Galvanizado e Galvalume®	64
Figura 53 - Energia Solar refletida e absorvida	65
Figura 54 - Visão frontal do experimento	66
Figura 55 - Gráfico das temperaturas em um período de 24 horas, obtido dia 01 junho de 2014.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espessura do revestimento de zinco de acordo com o processo	19
Tabela 2 - Massa e espessura nominais de revestimentos para chapas de aço produzidas pelo processo de imersão a quente.....	20
Tabela 3 - Composição química dos aços galvanizados por imersão a quente.....	22
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aços galvanizados por imersão a quente..	22
Tabela 5 - Massa mínima do revestimento nos aços galvanizados por imersão a quente	23
Tabela 6 - Massa e espessura nominais de revestimentos para chapas de aço produzidas pelo processo de imersão à quente	28
Tabela 7 - Composição dos aços de acordo com a norma ASTM A792	29
Tabela 8 - Propriedades mecânicas de aços de alta resistência.....	29
Tabela 9 - Nomenclatura e descrição utilizadas nos resultados.....	51
Tabela 10 - Espessura de camada encontrada em amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA).....	53
Tabela 11 - Propriedades mecânicas obtidas nas amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA).....	54
Tabela 12 - Resultados do ensaio Salt Spray dos aços Espessura de camada encontrada em amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA)	54
Tabela 13 - Resultados do ensaio imersão aço Galvanizado.....	55
Tabela 14 - Resultados do ensaio imersão em aço Galvalume®.....	57
Tabela 15 - Resultados do ensaio de perfilometria em aços Galvanizados (GI) e aços Galvalume® (GA).....	63
Tabela 16 - Custo e demanda Galvalume®	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

®	Marca Registrada
AFM	Microscópio de Força Atômica
Al	Alumínio
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
Ra	Média aritmética de rugosidade
Rev.	Revestimento
Rms	Rugosidade quadrática média de rugosidade
Si	Silício
Zn	Zinco
ASTM	Norma Americana
Fe	Ferro
Cl	Cloreto
CAD	Desenho Assistido por Computador
DXF	Extensão de Arquivo de desenho para fabricação
CNC	Comando Numérico Computadorizado
SAE	Norma Americana
AZM150	Especificação e espessura do revestimento do aço Galvalume®
Z275	Especificação e espessura do revestimento do aço Galvanizado
ZC	Zinco com qualidade comercial
CSB	Aços para uso geral, com qualidade comercial
#22	Nomenclaturas para espessuras das chapas de aço na Industrial Pagé
GI	Aço Zincado
GA	Aço Galvalume®
T	Tracionada
C	Comprimida
P	Plana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 REVESTIMENTO DE ZINCO	17
2.1.1 PROCESSO DE REVESTIMENTO POR IMERSÃO A QUENTE	17
2.1.1.1 PRINCIPAIS APLICAÇÕES	20
2.1.1.2 MICROESTRUTURA	21
2.2 AÇOS GALVANIZADOS “NBR 7008”	21
2.3 AÇO GALVANIZADO (ASTM A792 GALVALUME®)	23
2.3.1 RESISTÊNCIA À CORROSÃO E MICROESTRUTURA DO GALVALUME®	24
2.3.3 REFLETIVIDADE	30
2.4 ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO	30
2.4.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO: NÉVOA SALINA “SALT SPRAY”	31
2.4.2 IMERSÃO	32
2.5 ANALISE MORFOLÓGICA E ESTRUTURAL	32
2.5.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/EDS)	32
2.5.2 PERFILOMETRIA	33
2.6 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	34
3 EXPERIMENTAL	36
3.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO PAINEL	36
3.1.1 ETAPA 1 – DESBOBINADOR	38
3.1.2 ETAPA 2 – CORTE DO BLANK “GUILHOTINA”	39
3.1.3 ETAPA 3 – PLASMA CNC	39
3.1.4 ETAPA 4 – ONDULAÇÃO “CALANDRA”	40
3.1.5 ETAPA 5 – PERFILADEIRA “DOBRA E FURAÇÃO LONGITUDINAL”	41
3.1.6 ETAPA 6 - ESTAMPAGEM “PINGADEIRA”	44
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS REVESTIDAS	44
3.2.1. ESPESSURA DE CAMADA ZINCADA E ESPESSURA DE CHAPA	45
3.2.2 ENSAIO MECÂNICO	45
3.2.3 ENSAIO ACELERADO DE NÉVOA SALINA “SALT SPRAY”	46
3.2.4 ENSAIOS DE IMERSÃO	46
3.2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA VARREDURA (MEV-EDS)	47

3.2.6 ENSAIOS DE PERFILOMETRIA.....	48
3.2.7 NOMENCLATURA UTILIZADA PARA AS AMOSTRAS ENSAIADAS	48
3.2.8 ENVELHECIMENTO	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS SEM CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM AÇO GALVANIZADO NBR 7008 E GALVALUME®	53
4.1.1 ESPESSURA DE CAMADA ZINCADA E ESPESSURA DA CHAPA AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®	53
4.1.2 ENSAIOS DE RESISTENCIA À TRAÇÃO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®	53
4.1.3 SALT SPRAY EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®	54
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS APÓS CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM AÇOS GALVANIZADOS NBR 7008 E GALVALUME®	55
4.2.1 RESULTADOS IMERSÃO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®	55
4.2.2 ANALISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA -MEV	58
4.2.3 RESULTADOS ENSAIOS DE PERFILOMETRIA EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME	63
4.2.4 ENVELHECIMENTO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®	64
5 CUSTOS DOS MATERIAIS E DEMANDA DE CONSUMO	67
6 CONCLUSÕES GERAIS	68
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
8 TRABALHOS PUBLICADOS	71
ANEXOS.....	75
ANEXO 1 - CERTIFICADOS DE QUALIDADE DO FORNECEDOR, REFERENTE AO AÇO GALVANIZADO NBR 7008, CONTENDO SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CAMADA DE REVESTIMENTO	76
ANEXO 2 – CERTIFICADOS DE QUALIDADE DO FORNECEDOR, REFERENTE AO AÇO GALVALUME® , CONTENDO SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CAMADA DE REVESTIMENTO	77
ANEXO 3 – UNIDADE ARMAZENADORA DE GRÃOS NÍVEL FAZENDA.....	78
ANEXO 4 – UNIDADE ARMAZENADORA DE GRÃOS NÍVEL COOPERATIVA....	79

1 INTRODUÇÃO

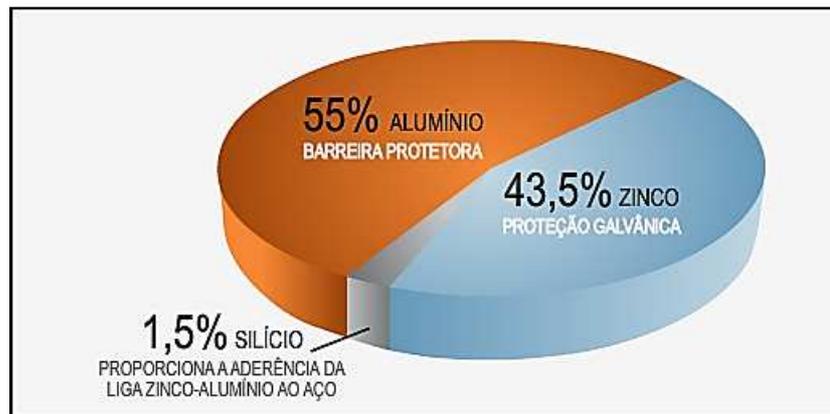
Com o aumento a cada ano da produção agrícola no Brasil e a grande necessidade de secagem e armazenagem de grãos, surge uma grande competitividade entre empresas fabricantes de máquinas e equipamentos para o setor na busca de excelência em qualidade, baixo custo de fabricação e aceitação do produto no mercado consumidor [1].

A partir disso, tornou-se necessária uma parceria com as siderúrgicas, na busca de novas soluções em matéria prima e processos, garantindo a existência de nossas indústrias num mercado cada vez mais competitivo. Dessa forma, visando uma grande oportunidade de crescimento no diferencial dos produtos ofertados em relação à concorrência é que em 2008 foi oferecido o aço Galvalume[®] para a fabricação dos painéis das tampas dos silos armazenadores [1].

Existem diversos tipos de revestimentos que possuem marcas comerciais registradas como: Galvalume[®], Aluzinc[®], Algafort[®], Zalutite[®], Zinalume[®], Zinalit[®], entre outros. O produto de aço revestido com liga 55%Al-Zn [2], ou seja, o seu revestimento possui em peso, 55% Alumínio, 43,5% Zinco e 1,5% Silício, é conhecido comercialmente como Galvalume[®] [3].

O Galvalume[®] é uma chapa de aço revestido com 55%Al-Zn [2] da liga. Sendo que o aço Galvalume[®] [3] foi desenvolvido e produzido comercialmente pela Bethlehem Steel Corporation a partir de 1972. Este revestimento se destaca em virtude de suas propriedades quanto à resistência a corrosão e maior refletividade. Atualmente 39 dos maiores produtores de aço do mundo já são licenciados, até a data atual, para o uso da tecnologia de produção de Galvalume[®] [3]. Na figura 1 é possível observar as principais características do Galvalume[®] [3].

Figura 1 - Características do Galvalume®



Fonte – CSN [3].

As chapas de aço revestidas com zinco por imersão a quente, também conhecidas como zincadas ou galvanizadas, são sem dúvida, as mais utilizadas mundialmente [4]. As chapas são normalmente revestidas com uma camada de zinco de, aproximadamente, 19 μ m de espessura em cada lado. Isso corresponde a uma massa total de revestimento de 275g/m² (somando os dois lados). Revestimentos espessos são aplicados onde se requer máxima resistência à corrosão, sendo que na indústria automobilística, a formabilidade e soldabilidade são requisitos fundamentais, para revestimentos leves com uma espessura de 90 g/m² são os mais utilizados atualmente neste segmento [4].

Na indústria de silos estudada, o material aplicado nos painéis das tampas dos silos até meados de 2008 era o aço galvanizado por imersão a quente, conforme a norma NBR7008 [5]. A figura 2 ilustra os painéis empregados nas tampas dos silos.

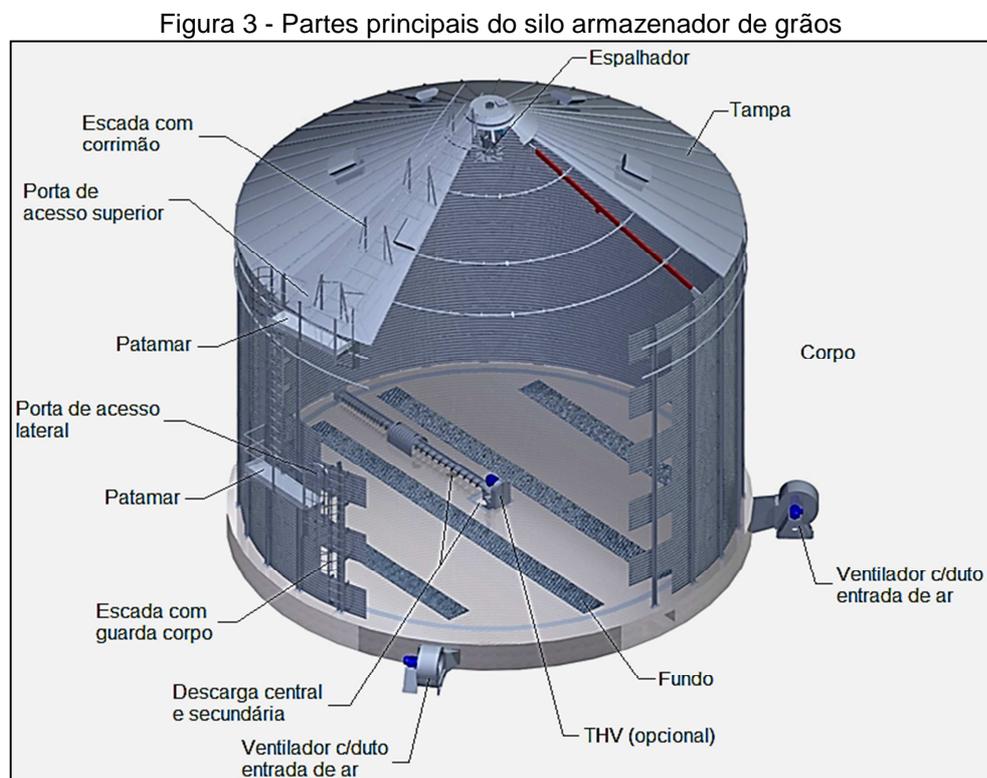
Figura 2 - Silos em unidade armazenadora de grãos



Fonte – Do autor

A principal finalidade dos silos de grãos é armazenar o produto mantendo a temperatura dos grãos com baixa temperatura interna, ou seja, quanto menor a temperatura, melhor a qualidade do grão para uma ótima qualidade na armazenagem por longos períodos, no Brasil, em média o produto fica armazenado dentro dos silos até 12 meses [1].

Os silos da empresa citada possuem tampas produzidas com aço carbono revestido com zinco por processo de imersão e com aço Galvalume® ASTM A792 [2] (AZM150), ou seja, 150g/m² de camada de revestimento sobre o aço base. O corpo do silo é composto de aço estrutural zincado por imersão a quente, fundo plano de perfil, com ventiladores de aeração e na tampa possui respiros de saída do ar, conforme ilustra a figura 3 [1].



1. Fonte - Industrial Pagé Ltda [1].

A partir de 2008, a empresa Industrial Pagé, substituiu o aço Galvanizado por imersão a quente NBR7008 [5] com revestimento Z275, por o aço Galvalume® ASTM A792 AZM150 [2]. O motivo da mudança foi em função de sua grande superioridade em relação à resistência a corrosão, com resultados apresentados através do teste de Salt Spray para chapas planas.

Em 2014 a empresa optou em retornar a fabricar os painéis das tampas dos silos, utilizando o aço NBR 7008 Z275 ZC [5], em função da dificuldade de compra

do aço Galvalume® [2] com a usina e também por seu custo estar quase 20% maior que o aço Galvanizado NBR7008 Z275 [5].

Contudo, como os painéis são submetidos ao processo de conformação mecânica e, portanto, é importante avaliar o efeito desse processo na resistência à corrosão do aço Galvalume® [2] e comparativamente do aço Galvanizado por imersão a quente NBR7008 [5] com revestimento Z275. A conformação mecânica pode introduzir tensões residuais nos painéis comprometendo a resistência à corrosão dos mesmos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da conformação mecânica sobre o desempenho quanto a resistência à corrosão do aço Galvalume® em relação ao aço Galvanizado.

Para isso será avaliado o comportamento desses materiais, submetidos a condições controladas de conformação, por ensaios de imersão em meio corrosivo.

Além disso, pretende-se avaliar o desempenho desses painéis empregados em tampas dos silos armazenadores de grãos, quando expostos por longo tempo (3 anos) em atmosfera rural.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Segundo Américo [6] devido a uma grande variedade de tipos de aços, foram criados sistemas para a sua classificação, os quais periodicamente são submetidos a revisões. Uma das classificações mais generalizadas e que, inclusive, serviu de base para o sistema adotado no Brasil, é a que considera a composição química dos aços, conforme as normas da “American Iron and Steel Institute – AISI”, “Society of Automotive Engineers – SAE”, “Norma Brasileira – NBR” e “American Society for Testing Materials ASTM”.

2.1 REVESTIMENTO DE ZINCO

Os aços quando expostos às intempéries, necessitam de um revestimento para a sua proteção contra a corrosão, sendo o papel importante do zinco e ligas de zinco, para proteção do aço base [7].

A Galvanização por imersão é um dos principais processos de deposição de zinco sobre o aço base, proporcionando a ele uma boa resistência à corrosão [7,8].

2.1.1 PROCESSO DE REVESTIMENTO POR IMERSÃO A QUENTE

Segundo MARDER [9] o zinco apresenta densidade de 7,13 g/cm³, ponto de fusão de 419 °C e forma cristalina hexagonal compacta. É um metal ativo que agrega resistência à corrosão ao aço quando é usado como sacrifício. É bastante maleável entre 100 e 150 °C, podendo ser laminado em chapas e estirado em fios. Apresenta pouca resistência ao ataque de ácidos usuais e de soda. O zinco pode ser encontrado na forma de placas, lingotes, chapas, grãos e pó.

O zinco é o 17º elemento mais comum na crosta terrestre, pois muitas rochas possuem o zinco em quantidades variadas, ele existe naturalmente no ar, na água e no solo [10].

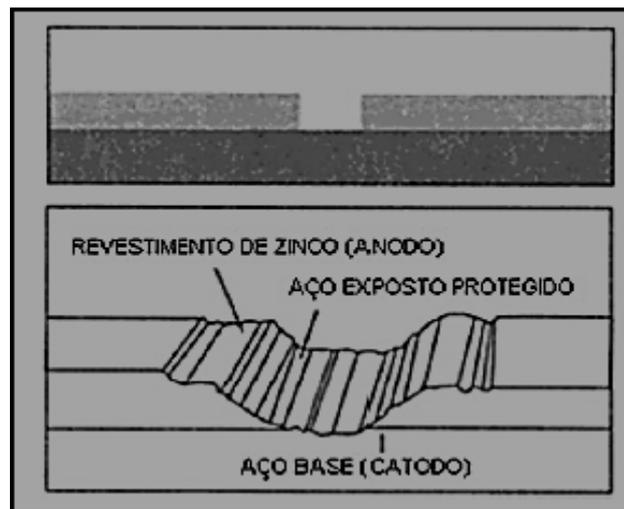
Uma das principais funções do zinco na indústria de implementos e máquinas agrícolas, na forma de camada protetiva no revestimento de peças e equipamentos de aço, constituindo o chamado aço galvanizado. Além disso, são muito utilizadas

em baterias, pigmentos, pinturas orgânicas e inorgânicas, como agente redutor em processos químicos e como aditivo na produção de produtos de borracha [10].

O zinco é um material menos nobre que aço carbono em condição normal, por isto o mesmo tende a sofrer mais com a corrosão, executando a função principal que é proteger o substrato “aço base” dos meios corrosivos [9,11].

Segundo a *American Galvanizers Association* [12], as camadas de revestimento a base de zinco puro sobre o aço base pelo processo de imersão a quente, confere excelente resistência a corrosão ao aço, mesmo que o material esteja com alguma imperfeição causada pelo processo de estampagem, manuseio ou montagem da peça, gerando riscos e arranhões sobre o revestimento. O zinco atua como anodo de sacrifício, pela ação galvânica, ou seja, protege o aço base, sendo o zinco como anodo e aço base como o catodo, conforme ilustra a figura 4.

Figura 4 - Revestimento para proteção do aço base



Fonte: American Galvanizers Association [12].

O processo de revestimento por imersão a quente consiste em uma linha contínua de imersão a quente na bobina de aço desenrolada, imergindo em pote de zinco puro a uma temperatura de 700 a 800C⁰ e com velocidade controlada de até 200m/min [7,13].

O zinco confere ao aço base uma proteção contra corrosão, e os processos mais comuns são de imersão a quente, aspensão térmica e eletrodeposição [8,11,14].

De acordo com os processos mencionados acima, é possível obter-se maior espessura de revestimento de zinco, conforme a tabela 1 [14].

Tabela 1 - Espessura do revestimento de zinco de acordo com o processo

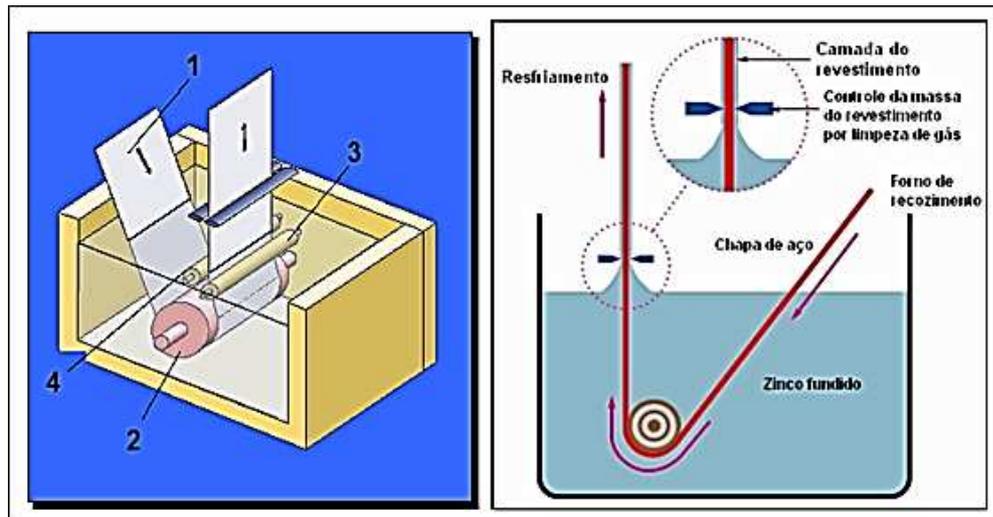
Processo de obtenção	Espessura (μm)
Eletrodeposição	Até 40
Imersão a quente	Até 125
Aspersão térmica	Até 200

Fonte: Kavitha et. [14].

Segundo ABCEM [15] os aços zincados pelo processo de imersão a quente, são aços de grande facilidade de conformação e resistência a corrosão atmosférica, pois essa resistência à corrosão, é devido ao revestimento de Zn.

A principal função do zinco é de proteção galvânica, ou seja, de sacrifício, podendo atender as indústrias de uma maneira mais econômica. Na figura 5, é possível visualizar o processo de imersão e obtenção da espessura do revestimento [13].

Figura 5 - Componentes mecânicos presentes no pote de metal fundido: 1- tira de aço, 2- rolo submerso, 3-rolo corretor, 4- rolo estabilizador e obtenção espessura do revestimento.



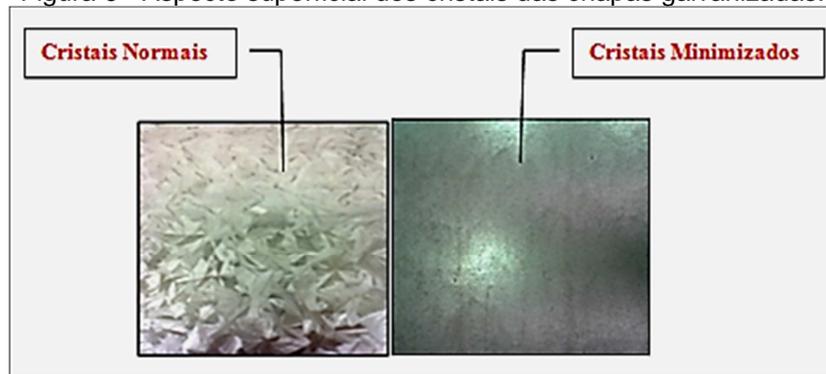
Fonte: Coni [7].

Com o processo de imersão a quente é possível obter-se chapas galvanizadas com cristais normais e também com cristais minimizados (figura 6). As chapas com os cristais normais ficam bem visíveis com um aspecto mais brilhoso e as chapas galvanizadas com cristais normais apresentam brilho metálico e desenho de flores resultantes do livre crescimento dos cristais de zinco durante o processo de solidificação [7,13].

As chapas Galvanizadas com cristais normais são muito utilizadas em aplicações sem pintura, no segmento da construção civil, na fabricação de silos e

equipamentos agrícolas. Já as chapas galvanizadas com cristais minimizados apresentam uma superfície mais lisa e com aparência mais regular, o que é adequado para aplicações que exijam pintura posterior, conforme ilustra a figura 6. Esse material é muito utilizado na fabricação de telhas pré-pintadas [7].

Figura 6 - Aspecto superficial dos cristais das chapas galvanizadas.



Fonte: Do autor

2.1.1.1 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Os produtos zincados ou galvanizados têm diversas características, tais como, alta resistência a corrosão, conformabilidade e soldabilidade, na qual se utiliza em grande escala na indústria automobilística, domésticas, construção civil e em indústrias de máquinas e equipamentos agrícolas [4].

De acordo com a sua aplicação possui uma camada de revestimento, e a mais utilizada a de 275g/m², somando os dois lados, pois isto corresponde a uma camada de revestimento de zinco de 19µm de espessura de cada lado, como ilustrada na tabela 2, os tipos de revestimentos com suas espessuras padrões [7].

Tabela 2 - Massa e espessura nominais de revestimentos para chapas de aço produzidas pelo processo de imersão a quente.

Revestimento	Descrição	Massa Revestimento (g/m ²)	Espessura Revestimento (µm)
	Z1100	1100	78
	900	900	64
	700	700	50
	600	600	42
Zinco	450	450	32
	350	350	25
	275	275	19
	180	180	13
	90	90	6

Fonte: NBR 7008 [5].

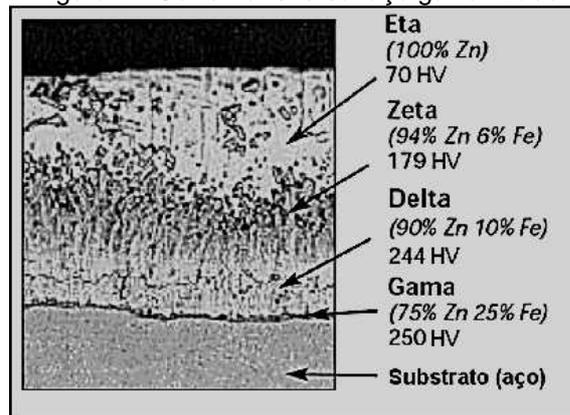
2.1.1.2 MICROESTRUTURA

As chapas Galvanizadas por processo de imersão a quente possuem revestimento de zinco e uma grande parte deste revestimento é composta por zinco puro. Entre o aço base e a camada final possui uma fase intermetálica contendo aproximadamente 6% de ferro e o zinco [7,15].

Segundo American Galvanizers Association [12] os processos de galvanização dos aços, formam várias camadas de Fe-Zn, e o zinco em solução líquida reage com o ferro e formando estas camadas intermediárias entre o aço base e a camada final.

Na figura 7 ilustra as camadas intermediárias e a final, na qual a camada final contendo apenas zinco puro.

Figura 7 - Corte transversal aço galvanizado



Fonte: American Galvanizers Association [12].

2.2 AÇOS GALVANIZADOS “NBR 7008”

Os aços galvanizados são chapas revestidas com zinco ou zinco-ferro, pelo processo de imersão a quente, produzidos em espessura igual ou inferior a 3,0mm, os mesmos designados em diversos tipos e graus de aço, quanto à composição química e resistência mecânica [5]:

Graus dos aços Galvanizados:

- Qualidade Comercial (ZC);
- Qualidade Perfilagem (ZP);
- Qualidade Estampagem Média (ZE);

- d) Qualidade Estampagem Profunda (ZEE);
- e) Qualidade Estrutural (ZAR).

Segundo a tabela 3, ilustra a composição química dos aços Galvanizados por imersão a quente, segundo a Norma NBR 7008 [5].

O substrato ou metal base como é conhecido, é formado por carbono, manganês, fósforo, enxofre além do material principal o ferro, de acordo com sua composição química e grau do aço especificado na norma NBR 7008 [5].

Tabela 3 - Composição química dos aços galvanizados por imersão a quente.

GRAU DE AÇO	C Máx. (%)	Mn Máx. (%)	P Máx. (%)	S Máx. (%)	Al Mín. (%)
ZC/ZP	0,15	0,6	0,04	0,04	
ZE	0,10	0,45	0,03	0,03	
ZEE grau 1	0,08	0,45	0,03	0,03	0,01 ²
ZEE grau 2	0,08	0,45	0,03	0,02	0,01 ²
ZEE grau 3 e 4	0,01	0,30	0,02	0,02	0,01 ²
ZAR 230	0,20	- ¹	0,04	0,04	- ¹
ZAR 250	0,20	- ¹	0,10	0,04	- ¹
ZAR 280	0,20	- ¹	0,10	0,04	- ¹
ZAR 320	0,20	- ¹	0,10	0,04	- ¹
ZAR 345	0,20	- ¹	0,20	0,04	- ¹
ZAR 400	0,20	- ¹	0,20	0,04	- ¹
ZAR 550	0,20	- ¹	0,04	0,04	- ¹

Fonte: NBR 7008 [5].

Segundo a NBR7008 [5], os limites das propriedades mecânicas são indicados na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aços galvanizados por imersão a quente

GRAU DE AÇO	Limite de escoamento	Resistência a tração	Afogamento mínimo
	LE ¹ MPa	LR Mpa	Lo=50mm A ^{2 3} %
ZC	-	-	-
ZP	140/340	450 máx.	20
ZE	140/300	420 máx.	26
ZEE grau 1	140/260	380 máx.	31
ZEE grau 2	140/220	350 máx.	37
ZEE grau 3	140/200	350 máx.	40
ZEE grau 4	120/180	350 máx.	40
ZAR 230	230 min	310 min	22
ZAR 250	250 min	360 min	18
ZAR 280	280 min	380 min	16
ZAR 320	320 min	390 min	14
ZAR 345	345 min	430 min	12
ZAR 400	400 min	450 min	10
ZAR 550 ⁴	550 min	570 min	-

Fonte: NBR 7008 [5].

Revestimento é a massa mínima depositada de zinco sobre o substrato “metal base”, por processo de imersão a quente, transformando em aços Galvanizados, este revestimento corresponde a soma das duas faces do material, é ilustrada na tabela 05, em que os métodos de ensaio são indicados na NBR7013 e ASTM A90 [16,17]:

Tabela 5 - Massa mínima do revestimento nos aços galvanizados por imersão a quente

DESIGNAÇÃO DO REVESTIMENTO	MASSA MÍNIMA DE REVESTIMENTO ¹	
	g/m ²	
	ENSAIO TRIPLO TOTAL NAS DUAS FACES ²	ENSAIO INDIVIDUAL TOTAL NAS DUAS FACES ³
Z 85 / ZF 85	85	75
Z 100 / ZF 100	100	85
Z 140 / ZF 140	140	120
Z 180 / ZF 180	180	150
Z 225	225	195
Z 275	275	235
Z 350	350	300
Z 450	450	385
Z 600	600	510

Fonte: NBR 7008 [5].

2.3 AÇO GALVANIZADO (ASTM A792 GALVALUME[®])

O aço Galvalume[®] é o nome comercial para a chapa de aço com revestimento constituído por peso de 55% de alumínio Al, 43% de zinco Zn e 1,5% de silício Si [18,19,20].

As bobinas de chapa de aço revestido com liga 55%Al-Zn, pelo processo contínuo de imersão a quente, são certificados pelas normas ASTM A792 [2], e NBR 15578 [21].

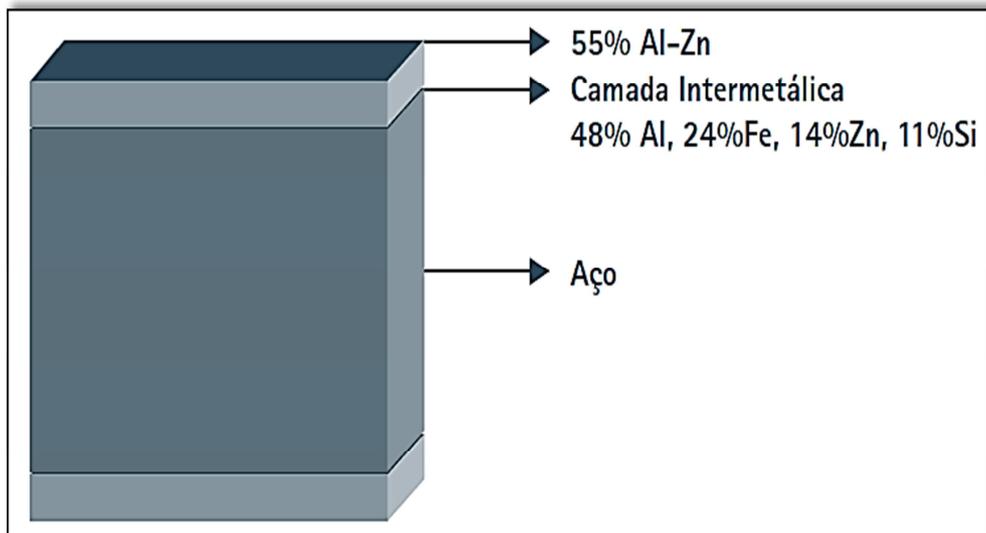
Segundo Paulo Sergio [19] o aço Galvalume[®] com seu revestimento confere uma grande barreira à corrosão oferecida pelo alumínio e a proteção galvânica oferecida pelo zinco, formada sobre o aço base, uma camada intermediária e a camada final, como ilustra a figura 8:

1 Uma massa de revestimento de 100g/m²(em ambas as faces) correspondente a uma espessura de revestimento de aproximadamente 7,1 µm por face

2 Valor médio da massa de revestimento determinada em três amostras de área conhecida, extraídas conforme NBR 7013

3 Valor mínimo das massas de cada uma das três amostras utilizadas no ensaio triplo. Devido às características do processo, o revestimento não é distribuído igualmente entre duas faces ou entre centro e bordas. O valor mínimo por face corresponde a 40% do valor mínimo do ensaio individual.

Figura 8 - Camadas do revestimento do aço Galvalume®



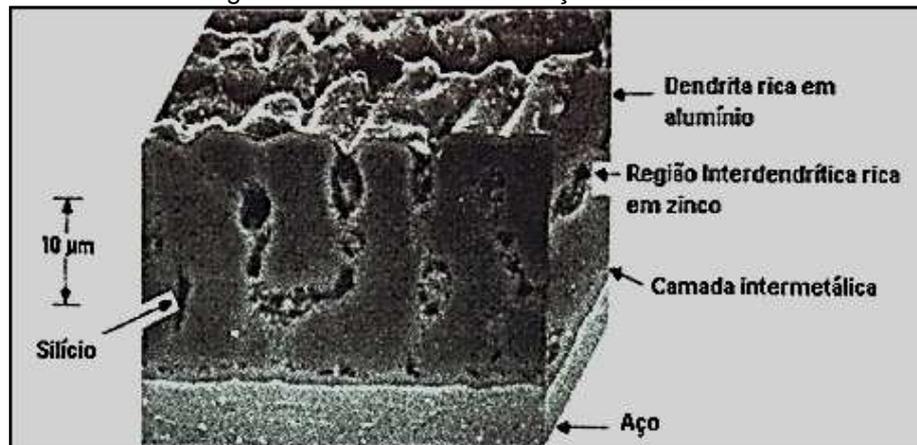
Fonte: CSN [3].

Segundo CONI [7] além da composição química oferecendo ao aço base uma grande resistência a corrosão em atmosferas severas, o Galvalume® também possui característica de resistência a altas temperaturas e refletividade térmica, ou seja, é um material com maior refletividade e menor absorvidade, gerando para o meio um melhor conforto térmico. Este aço pode ser comercializado com outros nomes, ou seja, marcas comercialmente registradas tipo: Galvalume®, Zinalume®, Aluzinc®, Algafort®, Zalutite®, entre outras marcas, e a mais conhecida e comercializada no Brasil o aço Galvalume®.

2.3.1 RESISTÊNCIA À CORROSÃO E MICROESTRUTURA DO GALVALUME®

Segundo SILVA [18] o revestimento Zn-55Al, possui 3 fases, a primeira fase rica em alumínio, denominada “Fase dendrítica”, segunda fase rica em zinco, a “Fase interdendrítica”, e a terceira fase intermetálica acima do substrato contendo Al-Fe-Zn-Si. O silício é adicionado ao banho para restringir o crescimento da fase intermetálica. As três fases estão apresentadas na figura 9.

Figura 9 - Microestrutura do aço Galvalume®



Fonte: 55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Research and Technology [22].

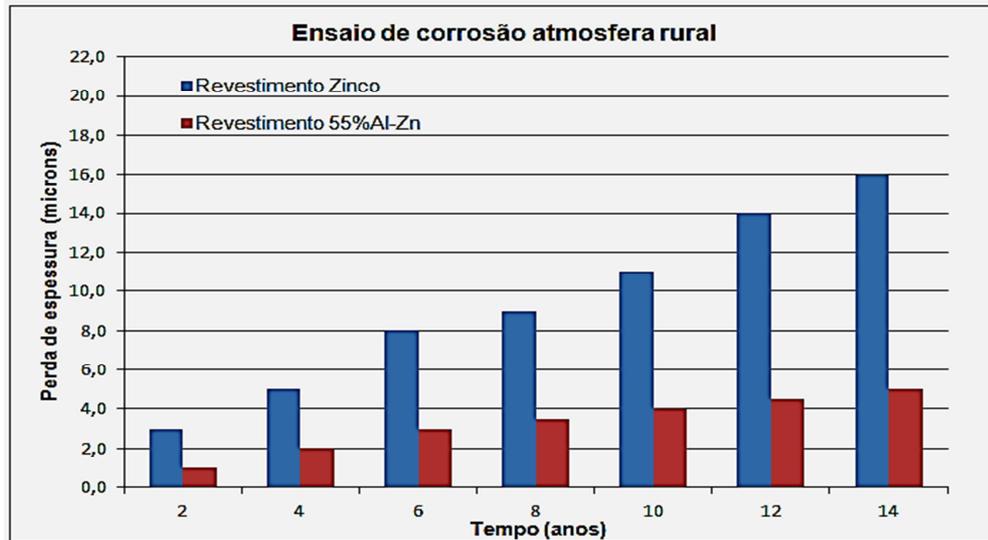
Com a possibilidade de fabricação em espessuras mais baixas, devido a elevada resistência mecânica do aço base, aliada a resistência superior do revestimento, o aço Galvalume® é muito utilizado na construção civil, agrícola, indústria automobilística e utensílios domésticos [3].

Os manuais dos aços Galvalume® fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional “CSN” [3], ilustram os comparativos de resistência a corrosão, de acordo com a sua aplicação em determinadas atmosferas.

A figura 10 ilustra a relação de perda do revestimento em relação ao tempo exposto dos aços, entre chapa zincada por imersão e aço Galvalume® em uma atmosfera rural entre 14 anos, perda do revestimento ao passar dos anos em chapa lisa [3].

Nesta atmosfera o material exposto segundo a figura 10, é possível verificar que em média o aço Galvalume® é duas vezes mais resistente que os aços Galvanizados, e quanto maior aumenta a exposição em anos, maior a perda de revestimento do Galvanizado em relação ao Galvalume®, em 14 anos o aço exposto em zona rural o Galvalume® perde em média de 4 a 5µm de revestimento, e o aço Galvanizado chega a perder 15µm, quase toda a sua camada de revestimento que é 19µm de espessura revestida [3].

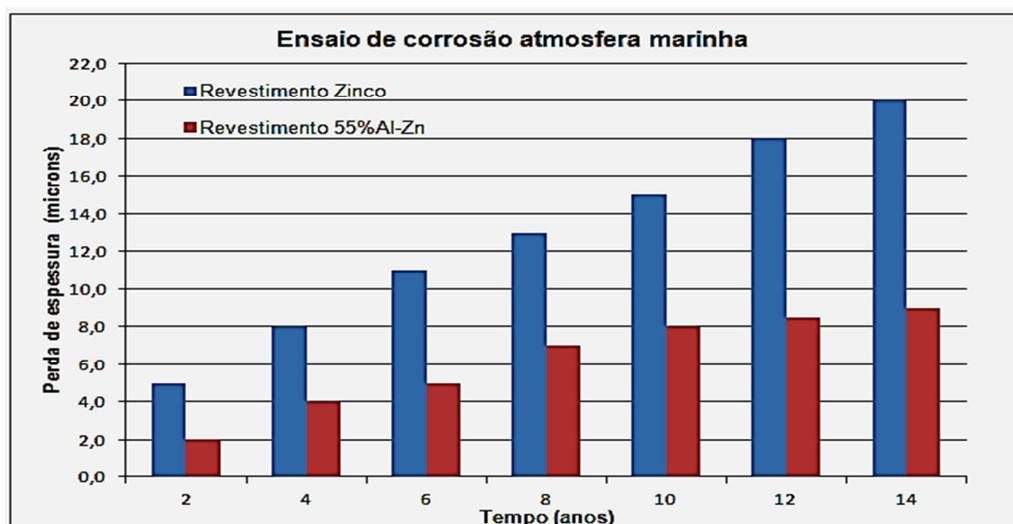
Figura 10 - Ensaio de corrosão atmosférica rural



Fonte: CSN [3].

Na figura 11 é apresentada a perda do revestimento ao longo de 14 anos, em uma atmosfera marinha, entre chapa zincada por imersão e aço Galvalume[®]. É possível verificar que em 14 anos nesta atmosfera a camada de revestimento do aço Galvanizado já está totalmente comprometida, pois a figura 11 mostra uma perda de massa (média) de 20µm de revestimento para o aço Galvanizado em 14 anos. Considerando a aplicação desse revestimento em tampas de silos, isso indica que em 14 anos nesta atmosfera a tampa já não teria mais o revestimento de zinco e a corrosão do substrato de aço iniciaria, enquanto nesse mesmo período o Galvalume[®] perdeu apenas 8 µm [3].

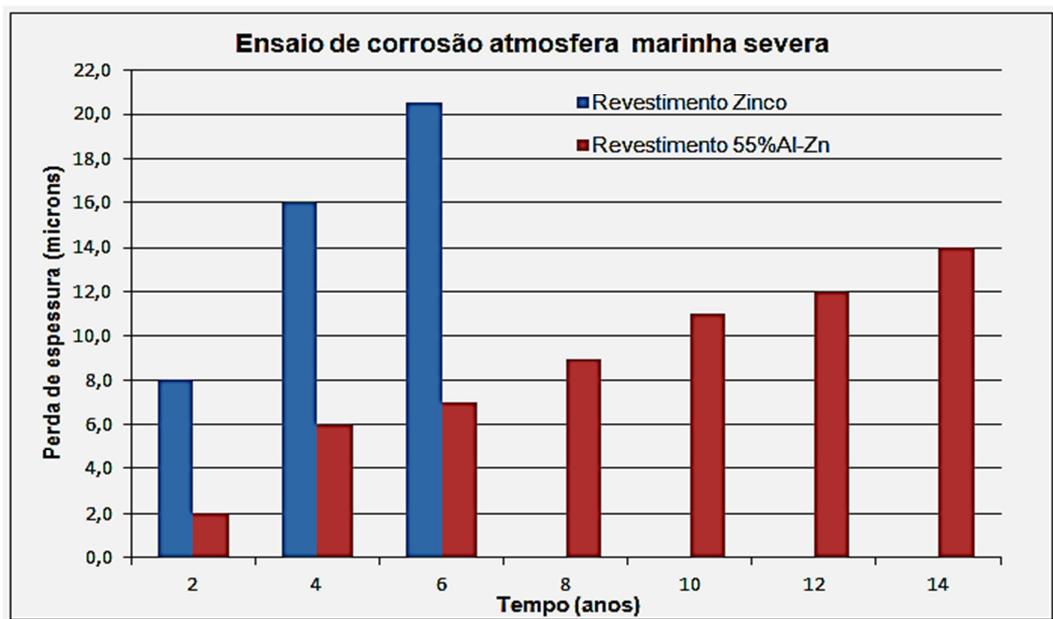
Figura 11 - Ensaio de corrosão atmosférica marinha



Fonte: CSN [3].

A figura 12 ilustra a perda do revestimento ao longo de 14 anos, em uma atmosfera marinha severa, entre chapa zincada por imersão e aço Galvalume®. A chapa Galvalume® neste teste apresentou uma superioridade muito significativa as exposições em zonas mais agressivas. O aço Galvanizado em 6 anos perde toda a sua camada de revestimento de 19µm, enquanto o aço revestido com Galvalume® perdeu apenas 12 µm em 14 anos [3].

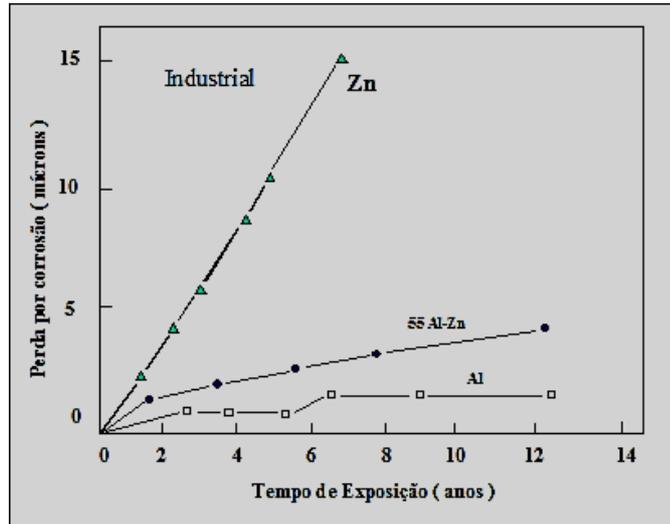
Figura 12 - de corrosão atmosférica marinha severa



Fonte: CSN [3].

Segundo TOWNSEND [23, 24] em ensaios com relação ao aço revestido com zinco puro e com aço Galvalume®, em média o aço Galvalume® é 4 vezes mais resistente à corrosão, considerando a chapa lisa sem conformação mecânica. A figura 13, ilustra melhor a superioridade do aço Galvalume® em relação ao Galvanizado ao longo dos anos, pois em média de 6 a 7 anos o Galvanizado perde 15µm de revestimento e o Galvalume® em 12 anos perderá apenas 3 a 4µm, isto é claro em aços sem conformação mecânica.

Figura 13 - Perdas por corrosão dos revestimentos obtidos por imersão à quente em atmosfera industrial.



Fonte: TOWNSEND, H. E.; ZOCCOLA, J. C. [23].

A espessura do revestimento em chapas de aço é um fator muito importante no desempenho dos produtos revestidos. O principal fator é diminuir o seu custo de produção. A liga Zn-55Al, possui menor densidade, em comparação ao Zn, tornando assim o aço revestido mais leve [20].

Os revestimentos mais espessos promovem ao aço uma maior proteção contra a corrosão. Entretanto os revestimentos espessos, sendo os principais agravantes com a dobra, gerando trincas nos revestimentos. Os revestimentos finos possuem maior facilidade nos processos de conformação [7].

Em aço Galvanizado NBR7008 [5] revestimento Z275, ou seja, 275 gramas de zinco em 1m² de chapa de aço, são possíveis conseguir uma camada revestida de 20µm, enquanto no aço Galvalume[®] [3] revestimento AZM 150, ou seja, 150 gramas da liga Zn-55Al em 1m² de chapa de aço, possui os mesmos 20µm de espessura revestida, sendo assim, usando um material mais leve com mesma área revestida e com a mesma espessura revestida, conforme ilustra a tabela 6 [3].

Tabela 6 - Massa e espessura nominais de revestimentos para chapas de aço produzidas pelo processo de imersão à quente

Tipo de Revestimento (a)	Denominação	Massa Revestimento(b) (g/m ²)	Espessura Revestimento(c) (µm)
Zn-55%Al	AZM210	210	29
	185	180	25
	165	165	22
	150	150	20
	100	100	13

Fonte: Normas ASTM A792, NBR 15578 [2, 21].

2.3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO GALVALUME® ASTM A792

Composição química para o aço Galvalume® ASTM A792 [2] de alta resistência a corrosão, de acordo com norma é apresentada na tabela 7, de acordo com a CSN [1] os aços com grau CSA, CSB e CSC são para uso comercial. Aços para uso geral, e os aços com grau FS e DS, são aços com qualidade para estampagem.

Tabela 7 - Composição dos aços de acordo com a norma ASTM A792

Especificação	Composição química %							
	Grau	C	Mn	P	S	Si	Ni	Outros
ASTM A792	CSA	0,10	0,6	0,03	0,035	-	-	-
ASTM A792	CSB	0,02 a 0,15	0,6	0,10	0,035	-	-	-
ASTM A792	CSC	0,08	0,6	0,10	0,035	-	-	-
ASTM A792	FS	0,02 a 0,10	0,5	0,02	0,030	-	-	-
ASTM A792	DS	0,06	0,5	0,02	0,025	-	-	-
ASTM A792	HTS	0,02 a 0,15	0,6	0,04	0,035	-	-	-

Fonte: Norma ASTM A792/A [2].

A tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas para o aço de alta resistência a corrosão de acordo com norma ASTM A792 [2].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas de aços de alta resistência

Especificação	Grau	Limite de resistência à tração MPa	Limite de escoamento MPa	Alongamento em 50mm (%)
ASTM A792	CS tipo A	-	205/410	20
ASTM A792	CS tipo B	-	245/410	20
ASTM A792	CS tipo C	-	205/450	15
ASTM A792	FS	-	170/275	24
ASTM A792	DS	-	140/240	30
ASTM A792	HTS	-	205/450	15

Fonte: Norma ASTM A792/A [2].

⁴ NOTAS: Valores baseados no valor mínimo do ensaio triplo.

(a) Especificação ASTM.

(b) Relativo aos 2 lados.

(c) Relativo a 1 lado. Calculado com base nas seguintes densidades em g/cm³:

Zinco – 55%Al – 3,70. ⁴

2.3.3 REFLETIVIDADE

Refletividade é uma propriedade que define a intensidade de reflexão em relação a uma superfície. Em superfícies mais claras o poder de refletividade é alto e superfícies escuras a refletividade é baixa e alta a absorvidade [25].

Segundo a Companhia Siderúrgica Nacional “CSN” [3] o Galvalume[®] possui uma maior refletividade térmica em relação a outros, resultando em maior eficiência térmica e conseqüentemente reduzindo os custos. O aço Galvalume[®] recebeu certificação da “Energy Star”, da administração Americana de meio ambiente, em função do produto estar contribuindo na redução do consumo de energia.

A radiação solar em tampa dos silos armazenadores de grãos, onde o Galvalume[®] apresenta maior refletividade do que os aços galvanizados, propiciando maior conforto térmico para os grãos, com temperatura interna mais amena, reduzindo conseqüentemente o consumo de energia elétrica, em função da ação dos aeradores “ventiladores centrífugos” [26,27].

2.4 ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO

Este ensaio acelerado tem como função principal caracterizar a agressividade em um determinado meio corrosivo, com intenção de fornecer fundamentos para o controle da corrosão em materiais metálicos com ou sem revestimento. Estes materiais são projetados e fabricados para atuarem em vários níveis de exposição atmosférica, material para uso rural, urbano ou em níveis mais altos de exposição crítica como em atmosfera marítima [28].

Segundo TRIDAPALLI [29] estes ensaios são utilizados para selecionar e avaliar os desempenhos dos materiais estudados, pois os mesmos podem ser avaliados em ensaios acelerados e não acelerados. Segundo TRIDAPALLI [29], os testes acelerados de laboratório, são usados corpos de prova do material a ser estudado, tem a função de avaliar a resistência a corrosão do material em condições constante e severa, e o teste são bem simples e para obtenção de resultados mais rápidos.

Segundo GARCIA [28] para produzir bons resultados, os ensaios usando o método acelerado devem obedecer às seguintes regras:

- a) Executar o ensaio e produzir os resultados em tempo curto;
- b) Produzir resultados e avaliar com os dados obtidos em atmosfera natural;
- c) Produzir ensaio com degradação muito próximo do natural;
- d) Avaliar em uma grande quantidade de material e condições.

Em testes não acelerados ou também chamados como ensaios de campo, são métodos no qual são usados corpos de prova em condições reais do meio natural, em ambientes externos expostos as intempéries do sistema em período de longo prazo, este corpo de prova monitorado ao longo de sua exposição [30].

2.4.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO: NÉVOA SALINA “SALT SPRAY”

Segundo TRIDAPALLI [29] os ensaios executados pelo método de névoa salina “Salt Spray” como é mais conhecido, são realizados em câmara lacrada com controle das condições de exposição da amostra, podendo ser uma chapa galvanizada ou uma chapa pintada.

A principal função deste ensaio, é permitir a elevação do nível crítico de exposição da amostra, diminuindo a sua resistência a corrosão em curto prazo, para obter resultados com maior rapidez.

Este ensaio acelerado de laboratório é normalizado pelas normas ASTM B-117 [31] e NBR 8094 [32] (Ensaio Acelerado de Névoa Salina), com a função de simular a exposição dos materiais em várias condições, estes testes seguem um padrão de variáveis indicadas na norma. Esta simulação do material é semelhante a exposição marítima. As condições da névoa salina são solução NaCl (cloreto de sódio) em média 5% em peso com temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa da câmara é de 100% [31, 32].

2.4.2 IMERSÃO

O teste por imersão é dos ensaios mais simples e de baixo custo. Existem órgãos desenvolvendo procedimentos para condução destes testes como ASTM, NACE, ISSO e outras. Os ensaios por imersão são bastante flexíveis e podem ser adaptados para atender qualquer aplicação específica [29].

Os equipamentos podem ser configurados para permitir a exposição dos corpos de prova em vários tipos de solução (líquidos, nevoa salina, condensado e outros). As amostras podem ser adaptadas a fim de simular o mais próximo possível do natural, ou seja, em diferentes condições de risco como frestas, tensão, pintura, dobra entre outros.

Segundo TRIDAPALLI [29] o tempo de exposição pode variar de acordo com o tipo do material a ser estudado e ensaiado e também da solução que está sendo utilizada para imersão da amostra. Em geral é o ensaio que se consegue um maior grau de corrosão em menor tempo, por isso é utilizado quando se necessita resultados rápidos.

2.5 ANALISE MORFOLÓGICA E ESTRUTURAL

2.5.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/EDS)

Segundo PARANHOS [33] os ensaios de caracterização microestrutural, morfológica, podem ser aplicados a diversos materiais que atendam às condições operacionais de baixa pressão e alto vácuo da câmara. Podendo ser analisadas pequenas peças ou corpos de prova tipo metais, ligas, polímeros, compósitos, entre outros. As análises possíveis pelas técnicas de MEV e EDS são:

- a) Avaliação de superfícies de fraturas por MEV e EDS, para caracterização morfológica e em descontinuidades da composição respectivamente;
- b) Caracterização de superfícies quimicamente atacadas ou corroídas;
- c) Caracterização qualitativa de resíduos e contaminantes inorgânicos por EDS;
- d) Mapeamento da distribuição de elementos na região analisada por EDS;

- e) Captura de imagens da morfologia geral e de regiões específicas nas peças ou corpos de prova analisados por MEV;
- f) Altas ampliações de regiões da amostra, para verificação e investigação de falhas, processos, fraturas, entre outros e captura de imagens por MEV.

A Microsonda de Energia Dispersiva (EDS), acoplada ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), permite a análise qualitativa de quaisquer elementos químicos, caracterizando os diferentes elementos que podem ser encontrados na amostra, uma das mais modernas ferramentas para pesquisa de microestruturas metálicas, cerâmicas e de compósitos [34].

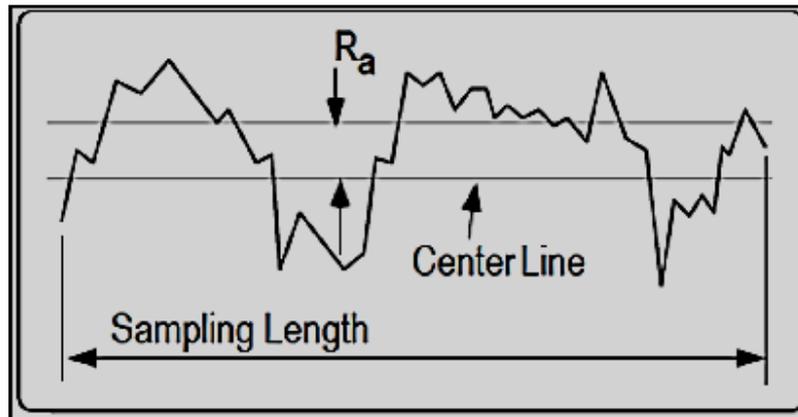
A Microsonda de EDS, é uma Microsonda de Raios- X, que permite além da análise química pontual, o mapeamento da composição química para avaliação da distribuição dos elementos na microestrutura analisada [34].

2.5.2 PERFILOMETRIA

A perfilometria é usada para avaliar a topografia de uma superfície (rugosidade de superfície) e permite medir a profundidade e as dimensões das estruturas.

Segundo XAVIER [35] a perfilometria é um ensaio usado para avaliar vários parâmetros, é um dos principais que indica as propriedades da superfície, sendo os parâmetros de amplitude os mais importantes, e fornecem as características irregulares da superfície do material. O parâmetro (Ra) é muito usado no controle de qualidade dos materiais e corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Este dado fornece a descrição geral das variações de altura das imperfeições da superfície, conforme é possível observar a figura 14, com o padrão de medição do (Ra).

Figura 14 - Representação da medição do Ra

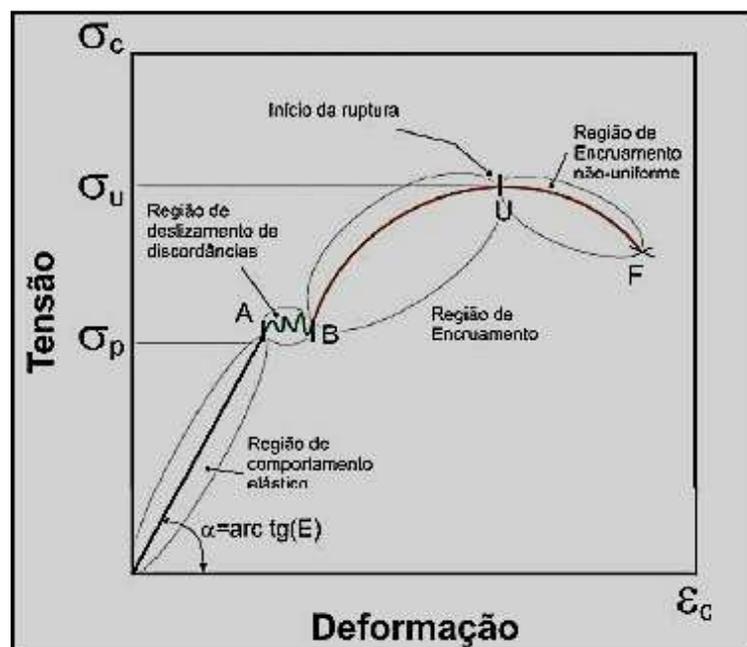


Fonte: Zygo [36].

2.6 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

A figura 15 ilustra a curva tensão deformação, consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais [28].

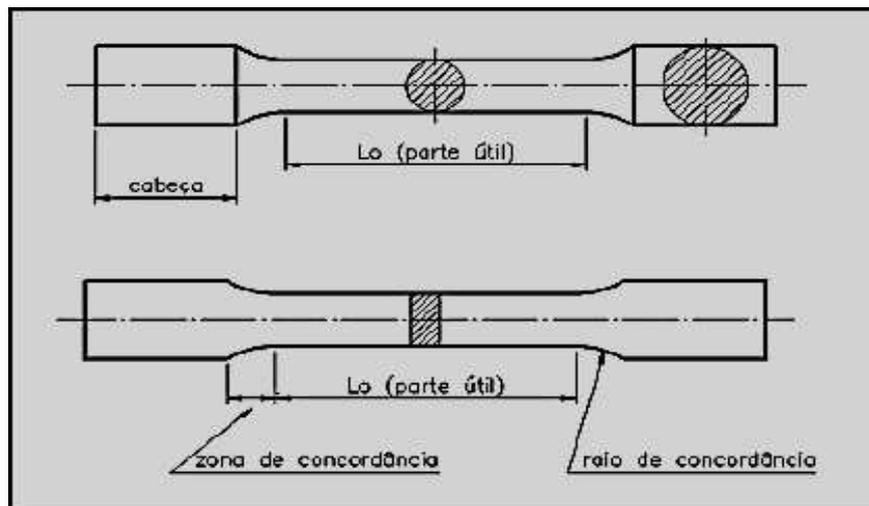
Figura 15 - Curva Tensão – Deformação Convencional



Fonte: Garcia [28].

A figura 16 ilustra os padrões para corpos de prova, possuindo características especificadas de acordo com as normas técnicas. Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou retangular. Durante os ensaios, a deformação fica confinada à região central, mais estreita, do corpo de prova, que possui uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento. O diâmetro padrão é de aproximadamente 12,8 mm, enquanto o comprimento da seção reduzida deve ser pelo menos quatro vezes, diâmetro é comum ser de 60 mm [37].

Figura 16 - Padrão dimensão corpo prova



Fonte: ASTM [37].

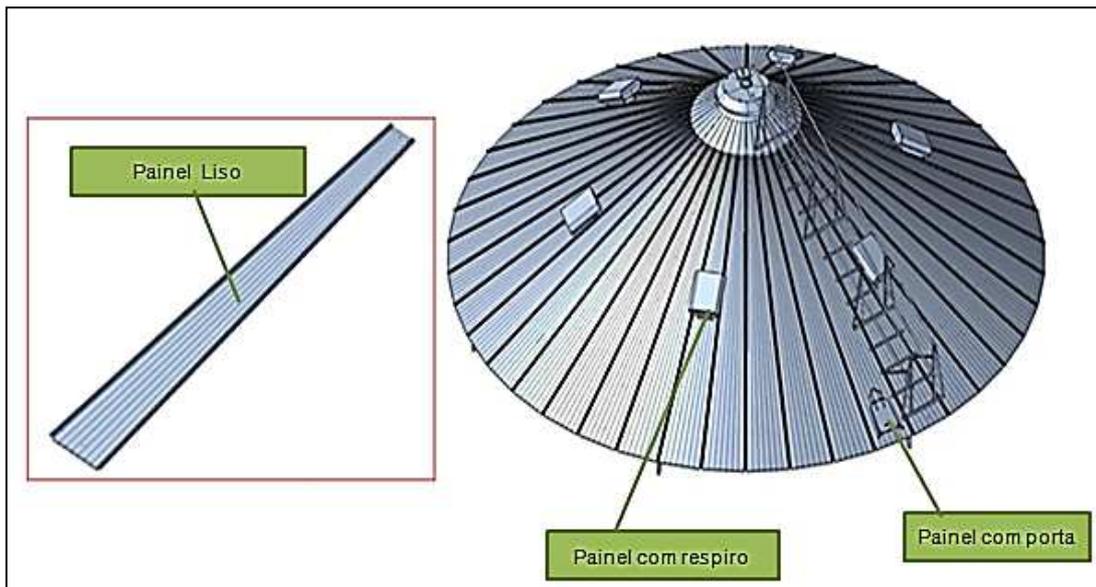
3 EXPERIMENTAL

3.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO PAINEL

Os painéis das tampas de silos dos modelos da Industrial Pagé são confeccionados em aço Galvanizado NBR7008 Z275 [5] na espessura de 0,8mm, chapa N°22 do fornecedor CSN. A função do painel é proteger os grãos armazenados dentro do silo, os mesmos possuem uma porta de acesso para a parte interna e saídas de ar, como respiro, em sua quantidade intercalada de acordo com o tamanho do silo e vazão de ar dos ventiladores centrífugos, montados na base do silo.

A figura 17 ilustra um desenho da tampa dos silos e do painel da tampa de silo, para melhor representar a montagem dos mesmos.

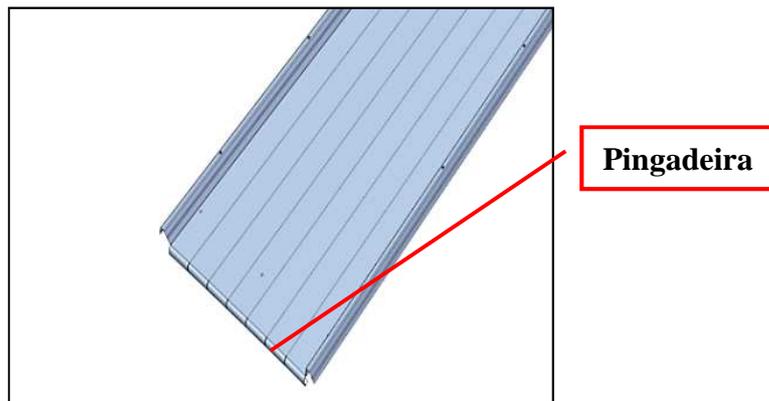
Figura 17 - Painel tampa de Silos



Fonte: Do autor

Os painéis inferiores, ilustrados na figura 18, possuem na conformação mecânica, uma estampagem no painel em sua borda, com um tipo de pingadeira, para não entrar água no silo e conseqüentemente não umedecer o grão.

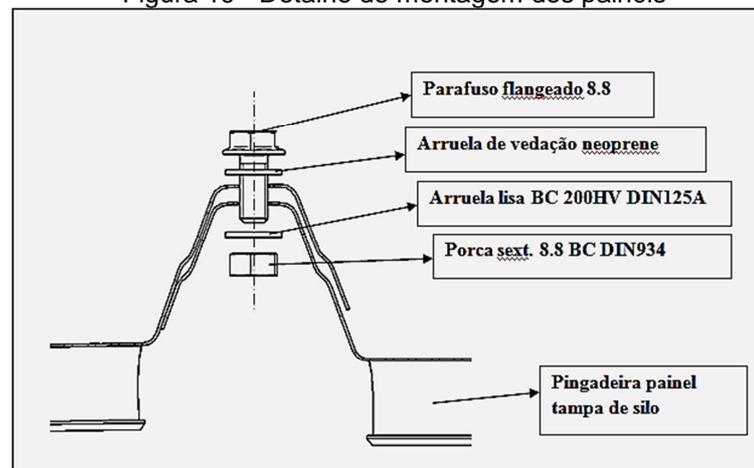
Figura 18 - Painel inferior



Fonte: Do autor

A figura 19 ilustra a forma e os dispositivos de fixação dos painéis montados em obra, na parte externa possui uma arruela de neoprene para melhor vedação e redução no potencial de corrosão entre os materiais.

Figura 19 - Detalhe de montagem dos painéis

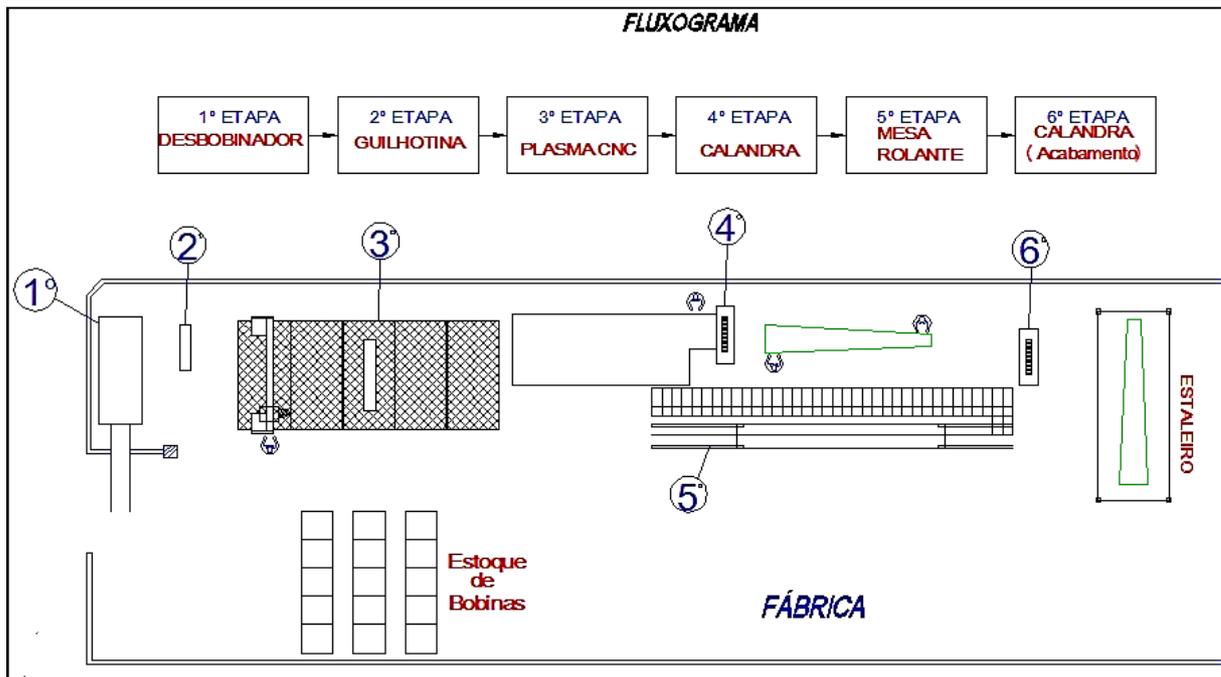


Fonte: Do autor

As bobinas de chapa de ao Galvanizado NBR 7008 [5] e Galvalume[®] [2] passam por 6 processos, é ilustrada na figura 20:

- 1) Desbobinar;
- 2) Cortar o blank “Guilhotina”;
- 3) Corte e furação “Plasma CNC”;
- 4) Ondulação “Calandra”;
- 5) Perfiladeira “dobra e furação na mesa rolante”;
- 6) Estampagem pingadeira nos painéis inferior “Calandra acabamento”.

Figura 20 - a) Fluxograma b) Vista superior do processo produtivo



3.1.1 ETAPA 1 – DESBOBINADOR

As chapas de ambos os materiais são desbobinadas em um processo contínuo. O desbobinador passa por uma guilhotina intermediária que faz o corte transversal da chapa e este *blank* cai na plataforma para o corte a Plasma, conforme ilustra a figura 21, desbobinando a chapa Galvalume[®], para inserir a mesma no processo de produção do painel da tampa dos silos.

Figura 21 - Desbobinador



Fonte: Do autor

3.1.2 ETAPA 2 – CORTE DO BLANK “GUILHOTINA”

Na frente da grade amarela, ilustrada na figura 22 o *blank* é cortado, caindo na mesa de corte a plasma. A frente da proteção amarela possui uma guilhotina que corta o *blank* de acordo com as dimensões.

Figura 22 - Guilhotina corte do blank



Fonte: Do autor

3.1.3 ETAPA 3 – PLASMA CNC

O corte das chapas de aço é feito através do processo corte a plasma, que nesta etapa é cortado o *blank ou chapa de aço*, de acordo com o gabarito. O gabarito neste caso é digital e vem em formato do desenho em DXF, nada mas é que um arquivo eletrônico com o formato da peça e suas cotas dentro da escala real do desenho. O setor de engenharia de processos envia este arquivo pela rede, para a máquina “CNC”, e a mesma poder entender as informações de corte e dimensões do material, ou seja, são fornecidas as medidas do painel no programa da máquina e a mesma corta e faz as furações na transversal, faz o furo dos painéis que possuem respiro e os que possuem porta de acesso de acordo com as informações do arquivo digital. Mesa de corte a plasma, conforme ilustra a figura 23.

Figura 23 - Blank na mesa do plasma



Fonte: Do autor

3.1.4 ETAPA 4 – ONDULAÇÃO “CALANDRA”

Esta etapa é de grande importância para o painel, pois a ferramenta de ondulação executa uma função de dar resistência mecânica em função da ondulação feita na chapa. São executadas as ondulações para enrijecer a chapa, por ser um material de pouca espessura, com 0,8mm de espessura, deixando o material com maior resistência mecânica, é neste processo com as ações dos rolos de ondulação sobre a chapa revestida, gera no painel a conformação, como ilustra a figura 24, na figura 25 estão ilustrados os arranhões, esmagamento e fissuras sobre o revestimento do Galvalume®.

Figura 24 - a) Onduladeira b) Painel ondulado



Fonte: Do autor

Figura 25 - Arranhões e fissuras

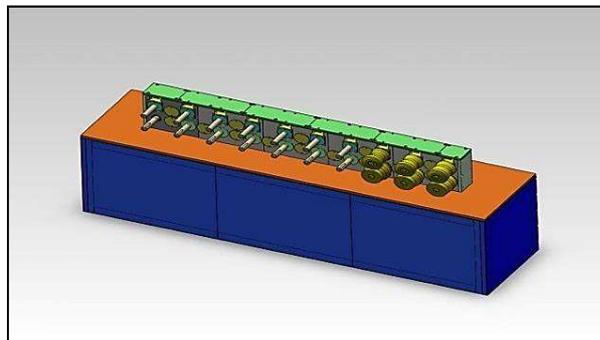


Fonte: Do autor

3.1.5 ETAPA 5 – PERFILADEIRA “DOBRA E FURAÇÃO LONGITUDINAL”

Nesta operação o painel já cortado em suas dimensões e ondulado, o mesmo passa pelo processo de dobra nas duas laterais e posteriormente executado a furação. A figura 26 ilustra o projeto da perfiladeira e a distribuição dos rolos conformadores.

Figura 26 - Perfiladeira



Fonte: Do autor

A chapa passa entre os rolos que executam as dobras no painel em suas 2 laterais, feito este processo uma de cada vez. Este processo é considerado dobra. As figuras 27 e 28, é possível observar a mesa com roletes de movimentação do painel, e os rolos conformadores em material aço SAE 1045 temperado, para estampar as laterais do painel, a lateral estampada uma de cada vez em toda a sua extensão.

Figura 27 - Distribuição dos rolos conformadores



Fonte: Do autor

Figura 28 - Dobra nas duas laterais



Fonte: Do autor

A figura 29, ilustra uma das laterais do painel já dobrado, neste processo é feita as dobras uma das laterais de todo o lote de peças e após executado nas outras laterais.

Figura 29 - Painel estampado apenas um lado



Fonte: Do autor

Após a passagem por este processo, os painéis do silo se encontram prontas para as devidas codificações, conforme ilustra a figura 30, exceto os painéis inferiores que passam pela etapa 6.

Figura 30 - Painel estampado nos dois lados

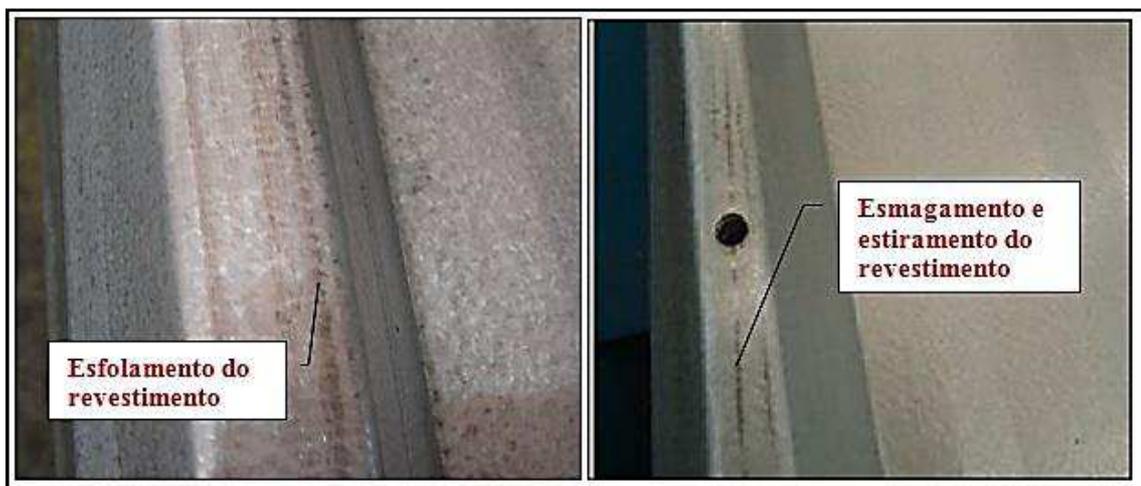


Fonte: Do autor

Este processo de dobra nas laterais do painel, com ação dos rolos conformadores, o mesmo executa força e estiramento do revestimento, um dos principais problemas, são os riscos e arranhões sobre o painel, principalmente nas posições que possuem os rolos mais antigos, desgastados ao longo do seu uso no processo de fabricação dos painéis.

Como ilustra a figura 31, detalhes das áreas afetadas pela ação dos rolos conformadores.

Figura 31 - Painel estampado com áreas afetadas

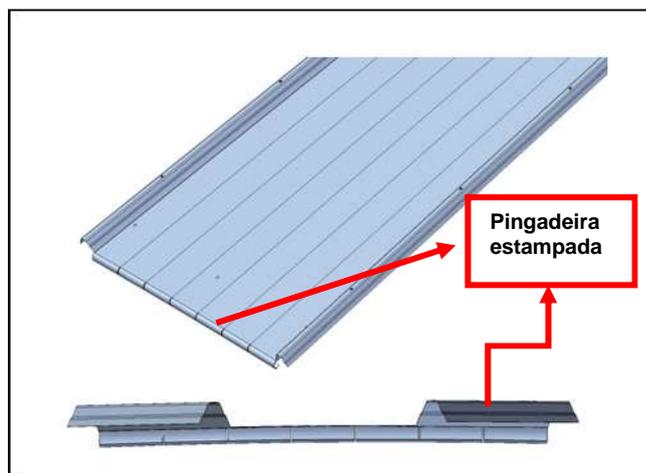


Fonte: Do autor

3.1.6 ETAPA 6 - ESTAMPAGEM “PINGADEIRA”

Nesta operação apenas os painéis inferiores são submetidos, com uma dobra nas bordas, para uma melhor vedação da tampa quanto a infiltração de água no interior do silo, conforme ilustra a figura 32, a forma da pingadeira.

Figura 32 - Estampagem no painel inferior



Fonte: Do autor

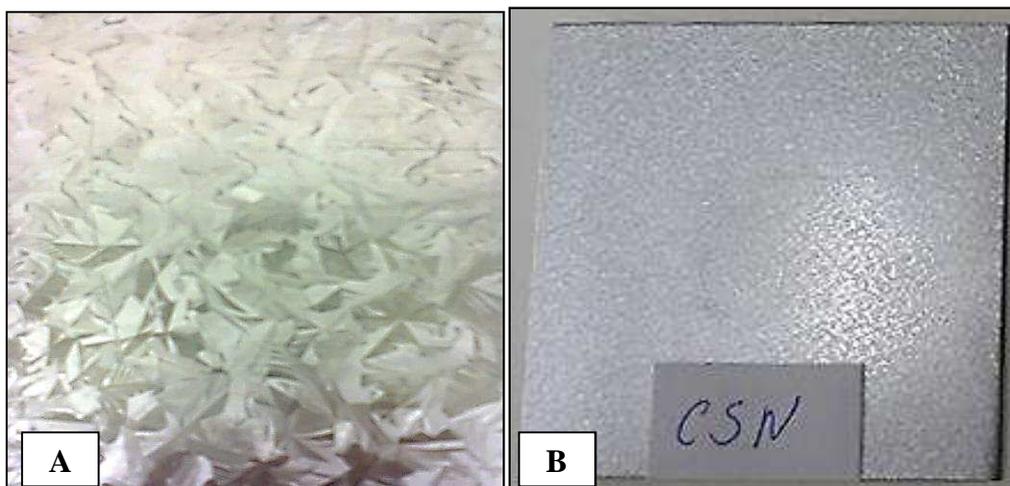
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS REVESTIDAS

Foram realizados as caracterizações quanto à espessura de camada do revestimento, rugosidade, comportamento mecânico em resistência à tração, ensaio em câmara de névoa salina, ensaio de imersão e envelhecimento nas amostras das chapas ilustrada na figura 33. As especificações das chapas estão conforme NBR 7008 ZC/Z275 [5] (aço galvanizado) e aço Galvalume® ASTM A792 CS-B AZM150 [2]. Os ensaios foram realizados na Pagé, Senai / CTCMat, LAPEC/UFRGS e FEEVALE.

Para o ensaio de envelhecimento as chapas ficaram expostas em uma atmosfera rural, montadas nas tampas dos silos armazenadores, monitoradas a cada 3 anos, avaliando o aspecto do revestimento e possíveis focos de corrosão.

A figura 33 mostra a imagem do aço NBR 7008 ZC/Z275 [5], indicada nos resultados com a denominação “GI” (quando não conformada) e do aço Galvalume® ASTM A792 CS-B AZM150 [2], denominada quando não conformada como “GA”, ambos com 0,8mm de espessura e com chapa sem conformação mecânica.

Figura 33 - A) Aços Galvanizados (GI) B) Aços Galvalume® (GA)



Fonte: Do autor

3.2.1. ESPESSURA DE CAMADA ZINCADA E ESPESSURA DE CHAPA

Os ensaios de espessura de camada, foram executados com aparelho de medição de camada da marca Mitutoyo, com resolução de (0,1 μ m) e grau de exatidão de (\pm 5 μ m) e a espessura da chapa foi medida com aparelho paquímetro digital marca Mitutoyo, modelo Coolant Proof. Grau de isolamento IP67, com resolução (0,01mm) e exatidão de (\pm 0,03mm) ambos os ensaios executados no setor de controle de qualidade da própria empresa.

3.2.2 ENSAIO MECÂNICO

Os ensaios de tração foram executados em uma máquina Universal marca Time Group Inc, modelo Waw 600C 60 toneladas. Os ensaios foram feitos no setor de controle de qualidade da própria empresa. Todos os aparelhos são calibrados, para obtenção de resultados mais precisos.

Parâmetros e procedimentos empregados no ensaio, foi inserida a amostra na bancada, no programa da máquina Universal são identificados o tipo da amostra, espessura e largura do material, para a mesma calcular a área em mm². A velocidade do ensaio é constante aplicando uma força de até 60 toneladas,

deixando o material se romper e após gerar o gráfico tensão x deformação do material ensaiado.

3.2.3 ENSAIO ACELERADO DE NÉVOA SALINA “SALT SPRAY”

Exposição à névoa salina, proveniente de nebulização de cloreto de sódio 5% a temperatura de 35 °C com inspeção a cada 24h. Este método baseado na norma NBR 8094/1983 [32]. O equipamento utilizado foi uma câmara de névoa salina da marca BASS, modelo USC-MP-01/2003, e foi executado pelo laboratório do SENAI de Criciúma.

3.2.4 ENSAIOS DE IMERSÃO

A norma usada como base foi a ASTM G 31 [38], revisão de 1972 “Laboratoty Immersion Corrosion Testing of Metals”. As amostras foram recebidas pela equipe do LAPEC com suas indicações. As amostras recebidas foram limpas com acetona e pesadas antes de serem colocadas imersas em 500 mL de uma solução de NaCl 0,01M.

A figura 34, ilustra as imagens das amostras em processo antes do ensaio de imersão.

Figura 34 – Aspectos das amostras antes do ensaio de imersão



Fonte: Do autor

O ensaio de imersão foi realizado em solução NaCl 0,01M, durante 7 dias. Após o ensaio, as amostras foram pesadas novamente e foi obtida uma tabela para cada material, uma para o Galvalume® e outra para o aço Galvanizado NBR7008 [5], indicando os resultados obtidos quanto à perda de massa após o ensaio de imersão.

A Norma ASTM G31 [38] recomenda expressar a taxa de corrosão em milésimos de polegadas por ano (mpy) ou milímetros de penetração por ano (mm/yr).

A equação 1 demonstra como se calcula a taxa de corrosão:

$$\mu mpy = \frac{13.56 \times W}{\rho \times S \times t} \times 1000 \quad (1)$$

mmpy = Milímetros de penetração por ano;

μmpy = Micrometros de penetração por ano;

W = perda de peso após um tempo de exposição (g);

ρ = massa específica (g/cm³);

S = área exposta da amostra (mm²)

t = tempo de exposição (horas);

1000 = Transformar de mm para μm;

3.2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA VARREDURA (MEV-EDS)

A morfologia dos revestimentos foi avaliada com uso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no laboratório de materiais da Universidade Feevale. Foram utilizados dois equipamentos para a caracterização: um microscópio da marca JEOL, modelo JSM-6510LV acoplado a um equipamento de análise dispersiva de raios-X (EDS), ambos com sistema computacional de aquisição de imagens, em que as amostras foram observadas em vista de topo para identificação da morfologia superficial.

3.2.6 ENSAIOS DE PERFILOMETRIA

A rugosidade da superfície revestida foi caracterizada por um perfilômetro de contato CETR (modelo PRO5003D) do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC) da UFRGS.

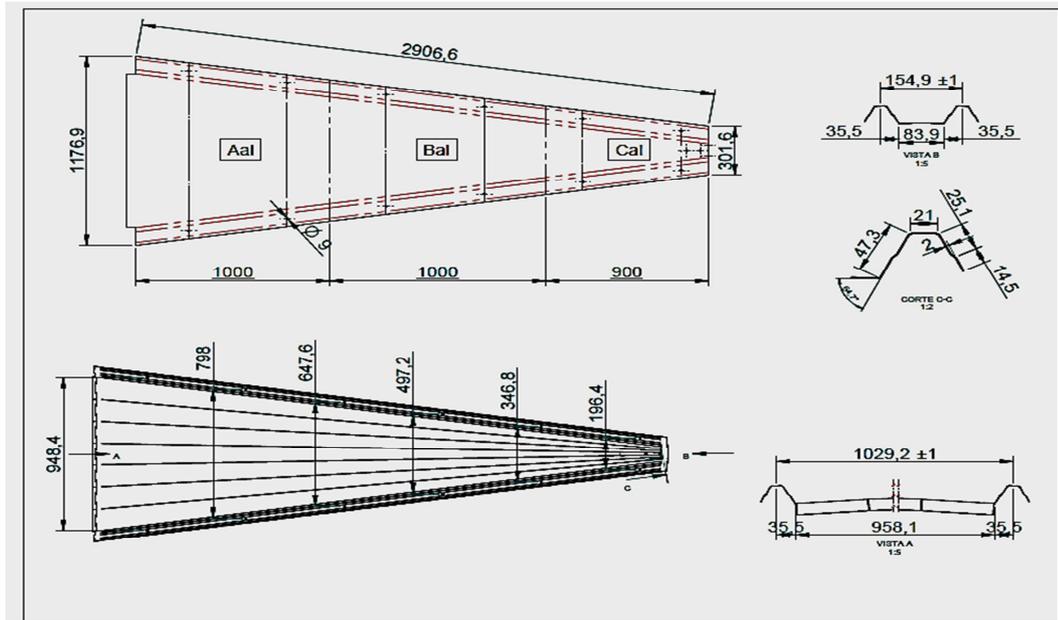
A caracterização permite quantificar Ra (média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição).

3.2.7 NOMENCLATURA UTILIZADA PARA AS AMOSTRAS ENSAIADAS

Foram desenhados em “CAD” no programa Solid Edge, dois desenhos, um para painel em aço Galvanizado NBR7008 [11] com padrão de revestimento NBR 7013 [16] e outro em aço Galvalume[®] ASTM A792 [2], e após identificado os números das amostras no desenho, para melhor organização, foram fabricados os painéis, e ambos com o mesmo processo de fabricação, após o painel pronto cortado em amostras de 2x2cm e 5x10cm, identificadas com suas numerações e embaladas em caixas, para análises no LAPEC, laboratório de pesquisa em corrosão, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul “UFRGS”.

Um desenho dos painéis para o Galvanizado NBR7008 [5] e outro para o Galvalume[®] [2], sendo idêntico em todas as suas dimensões e cotas, conforme ilustra a figura 35. Nestas amostras foram feitos ensaios de imersão, MEV, e perfilometria, para avaliar a influência do processo de conformação mecânica (dobra e estampagem) na resistência a corrosão considerando a posição na chapa ondulada, dobrada e estampada de acordo com a figura 35.

Figura 35 - Desenho painel planificado

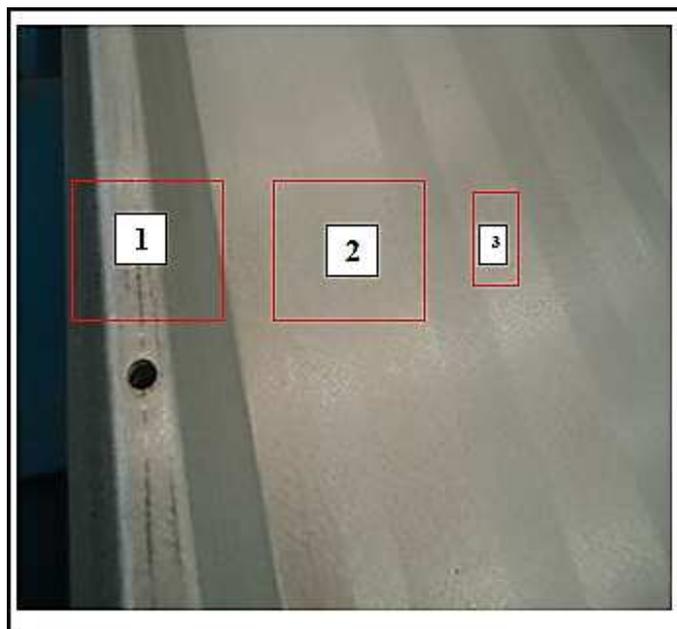


Fonte: Do autor

O painel possui três áreas fundamentais para ser analisado o efeito do processo de conformação sobre a resistência à corrosão das amostras. A figura 36 ilustra a localização dessas áreas que serão analisadas no painel conformado:

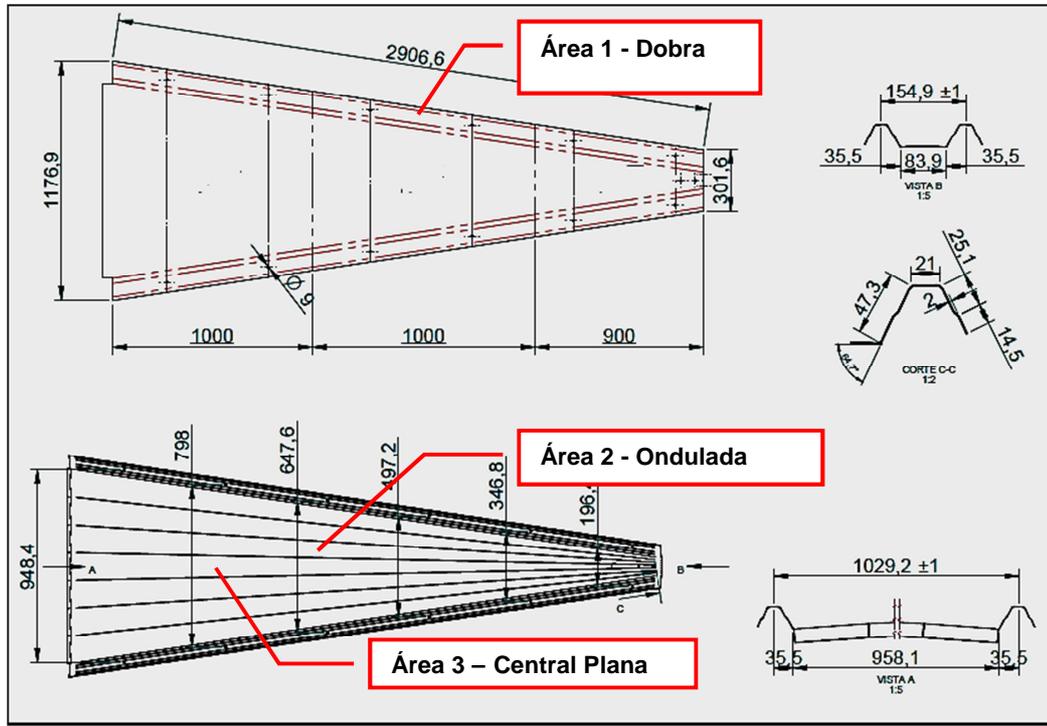
- Área 1 - Áreas laterais com dobra;
- Área 2 - Área central ondulada;
- Área 3 - Área central plana;

Figura 36 - Área das amostras em painel



A figura 37 ilustra uma representação real do desenho utilizado para ser conformado o painel e analisando as áreas e regiões, que serão avaliadas.

Figura 37 - Localização das 3 áreas do painel, analisadas em ambos materiais



A figura 38 ilustra melhor o formato da amostra analisada com os dois tipos de materiais, em aço Galvanizado NBR7008 [5] e aço Galvalume® ASTM A792® [2].

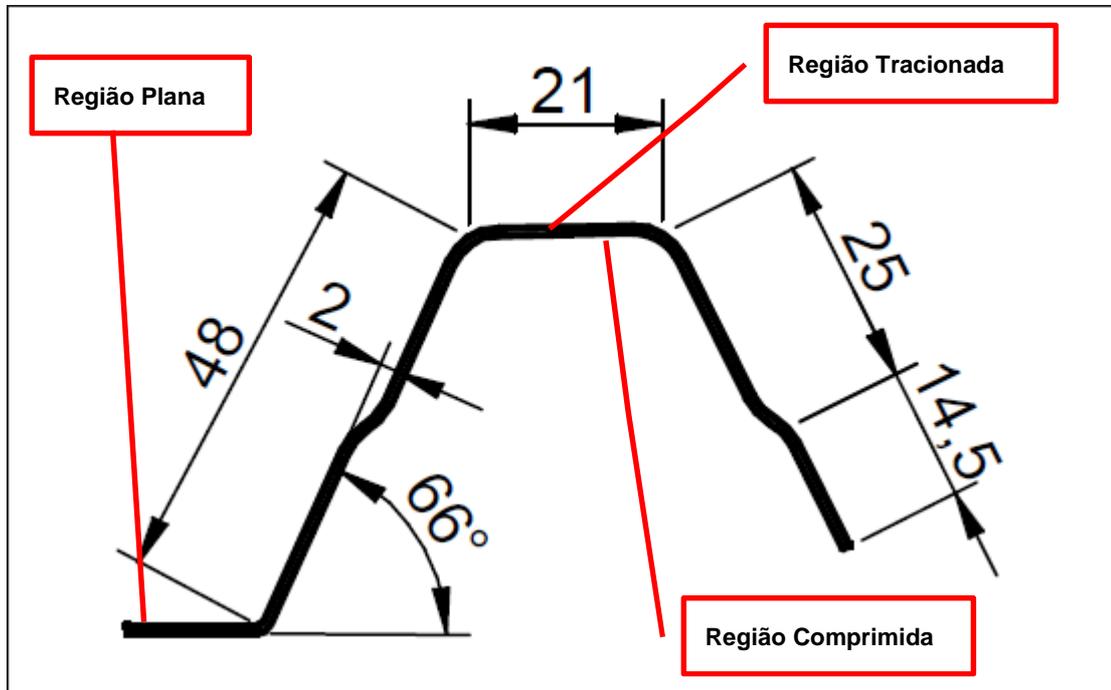
Figura 38 - Amostra ensaio DRX



Fonte: Laboratório LAPEC da UFRGS

A figura 39 representa em detalhe as regiões analisadas no painel conformado de ambos os materiais.

Figura 39 - Localização das 3 regiões analisadas nas amostras



A tabela 9 indica a nomenclatura com a descrição utilizada no presente trabalho, utilizando **(GI)** para os resultados com aços NBR 7008 [5] e **(GA)** para aços Galvalume® ASTM A792 [2].

Tabela 9 - Nomenclatura e descrição utilizadas nos resultados

AMOSTRA	DESCRIÇÃO
GIA1T	Aço Galvanizado NBR7008, Área 1, Região superior Tracionada
GIA1C	Aço Galvanizado NBR7008, Área 1, Região inferior Comprimida
GIA2T	Aço Galvanizado NBR7008, Área 2, Região superior Tracionada
GIA2C	Aço Galvanizado NBR7008, Área 2, Região inferior Comprimida
GIA3P	Aço Galvanizado NBR7008, Área 3, Região Plana "reta"
GAA1T	Aço Galvalume® ASTM A792, Área 1, Região superior Tracionada
GAA1C	Aço Galvalume® ASTM A792, Área 1, Região inferior Comprimida
GAA2T	Aço Galvalume® ASTM A792, Área 2, Região superior Tracionada
GAA2C	Aço Galvalume® ASTM A792, Área 2, Região inferior Comprimida
GAA3P	Aço Galvalume® ASTM A792, Área 3, Região Plana "reta"

3.2.8 ENVELHECIMENTO

Para o ensaio de envelhecimento um painel de chapa Galvanizado NBR7008 com revestimento Z275 [5], foi montado em uma tampa de silo em aço Galvalume® [2].

Este silo foi montado em cliente em zona rural, em 2012, e está sendo feito um acompanhamento referente ao envelhecimento da camada protetora (monitoramento apenas do aspecto visual), fazendo uma visita a cada 3 anos na obra para levantamento de dados, deixando este material montado no silo nestas condições em 15 anos, fazendo no mínimo 5 visitas ao longo deste tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS SEM CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM AÇO GALVANIZADO NBR 7008 E GALVALUME®

4.1.1 ESPESSURA DE CAMADA ZINCADA E ESPESSURA DA CHAPA AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®

Os ensaios de espessura de camada apresentaram os seguintes valores, conforme a tabela 10, para as amostras:

Tabela 10 - Espessura de camada encontrada em amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA)

Amostra	Espessura de chapa (mm)		Espessura média de camada	Concentração Mássica ⁵	
	Encontrada	Especificada		Encontrada	Especificada
GI	0,80	0,80	20 µm	282 g/m ²	275 g/m ²
GA	0,80	0,80	20µm	166 g/m ²	150 g/m ²

Ambos os materiais estão de acordo com suas referidas normas e laudo técnico fornecido pela usina, em relação a espessura da chapa e espessura do revestimento.

4.1.2 ENSAIOS DE RESISTENCIA À TRAÇÃO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®

Os resultados ensaios de tração apresentaram os seguintes valores, conforme a tabela 11:

⁵ Calculada com base na espessura de camada encontrada, utilizando densidade do Zinco igual a 7,14 g/cm³.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas obtidas nas amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA)

Amostra	CP1			CP2			CP3			Média		
	LE ⁶	LR ⁷	AL ⁸	LE	LR	AL	LE	LR	AL	LE	LR	AL
GI	230	368	21	234	390	21	220	378	22	228	378	21
GA	280	450	23	315	485	22	305	470	22	300	468	22

Ambos os materiais estão de acordo com suas referidas normas e laudo técnico fornecido pela usina, em relação as suas propriedades mecânicas. Além disso, apresentam propriedades mecânicas muito semelhantes entre si. Este ensaio foi importante, para evidenciar as resistências mecânicas de ambos os materiais e validar com o mínimo necessário para aplicação em tampas dos silos.

4.1.3 SALT SPRAY EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME®

O ensaio de salt spray foi realizado nas chapas lisas, ou seja, antes do processo de conformação mecânica.

O ensaio de Salt Spray apontou os resultados apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio Salt Spray dos aços Espessura de camada encontrada em amostras dos aços Galvanizados (GI) e Galvalume® (GA)

Amostra	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
GI	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Corrossão branca	Corrossão branca
GA	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração

Todas as amostras do aço NBR 7008 apresentaram corrosão branca a partir de 96h de exposição. Ao ser exposta a uma atmosfera úmida e confinada, no caso aplicado no ensaio de névoa salina, a condensação da umidade saturada e ácido carbônico (H₂CO₃) atacam o zinco e impedem que haja a oxidação natural (passivação), que daria ao aço uma proteção.

⁶ LE: Tensão limite de escoamento (MPa)

⁷ LR: Tensão limite de resistência (Mpa)

⁸ AL: Alongamento % em relação ao comprimento útil da amostra.

Neste caso há a formação de um produto de corrosão sob a forma de pó com uma cor cinza-escuro nas regiões atacadas do zinco. Este produto não protege o zinco contra a sua corrosão, pois não é aderente e é conhecido como corrosão ou oxidação branca do aço Galvanizado [39].

Todas as amostras de aço revestido com Galvalume[®], não apresentaram nenhuma modificação de seu revestimento a exposição até 120h.

Este ensaio evidenciou que o aço Galvalume[®] (GA) em chapa lisa sem conformação mecânica, obteve uma resistência maior em relação aos aços Galvanizados (GI), não apresentando corrosão branca em ensaio até 120 horas de exposição em câmara de névoa salina.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS APÓS CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM AÇOS GALVANIZADOS NBR 7008 E GALVALUME[®]

4.2.1 RESULTADOS IMERSÃO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME[®]

A tabela 13 apresenta os resultados das análises do ensaio por imersão das amostras do aço Galvanizado NBR7008. A perda de massa foi calculada conforme equação (1).

Tabela 13 - Resultados do ensaio imersão aço Galvanizado

Amostra	Espessura do Rev. inicial (µm)	Espessura do Rev. final (µm)	Média perda de massa (µm/ano)*	Desvio Padrão (µm/ano)
GI A1	19,0	17,963	1,037	0,111
GI A2	19,0	17,976	1,024	0,027
GI A3	19,0	18,399	0,601	0,184

*mmpy= perda de peso *13,56/area*tempo*densidade do zinco(7,13g/cm³)=milímetros por ano ou micrometros por ano.

As amostras retiradas das áreas que sofreram dobra (área A1: área lateral com dobra) e na área central ondulada (área A2) (Figura 41), ocasionou uma perda

de massa maior (tabela 13 e na figura 40) comparativamente à amostras retiradas da área 3 (área central plana). As áreas A1 e A2 são as áreas mais submetidas a maiores tensões durante a conformação da chapa. Esta área é submetida a maior estiramento da camada do revestimento durante o processo de conformação. As amostras GIA3 (amostras da área central plana), correspondem a amostras de uma área que sofre pouco esforço durante a conformação do painel (Figura 41).

Figura 40 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvanizado

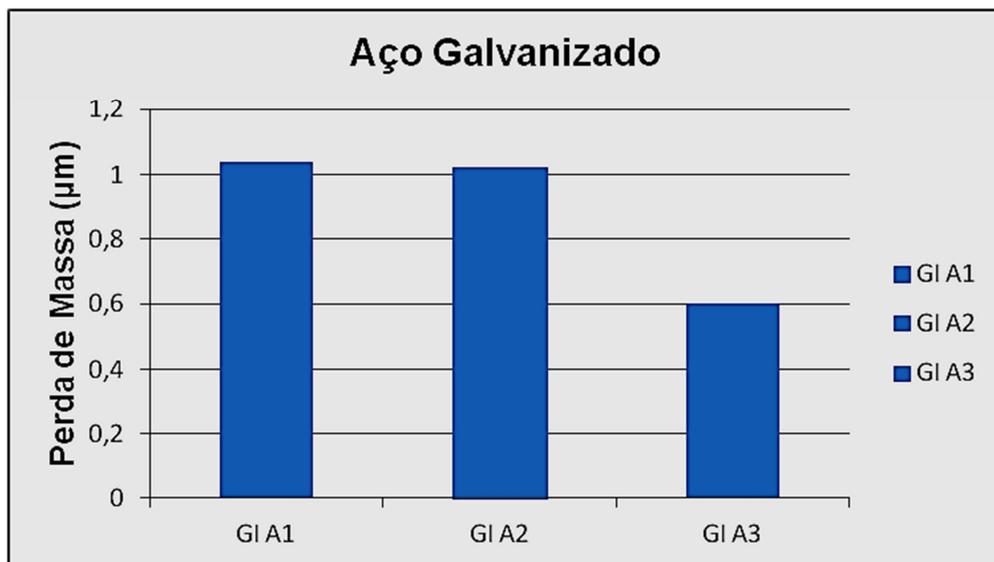
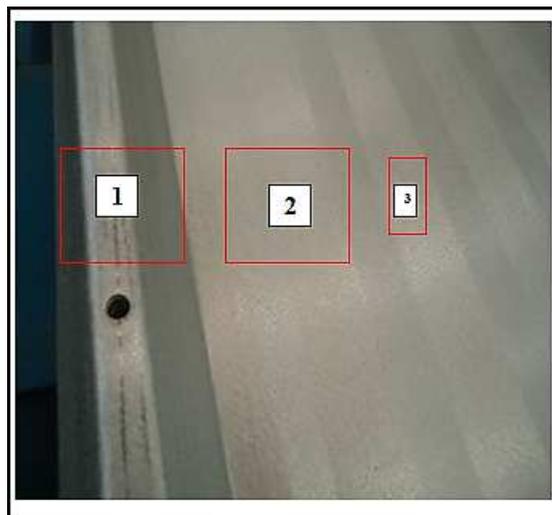


Figura 41 - Área das amostras em painel ensaiadas



A tabela 14 e a figura 42 apresentam os resultados quanto à perda de massa para o ensaio imersão do aço revestido Galvalume®. Como é possível observar, diferentemente do aço Galvanizado NBR7008, aço revestido com Galvalume®

apresentou menores perdas de massa para as diferentes áreas da chapa. Isso indica que o revestimento Galvalume® aplicado sobre essa chapa sofre menos efeito das tensões aplicadas durante a conformação mecânica.

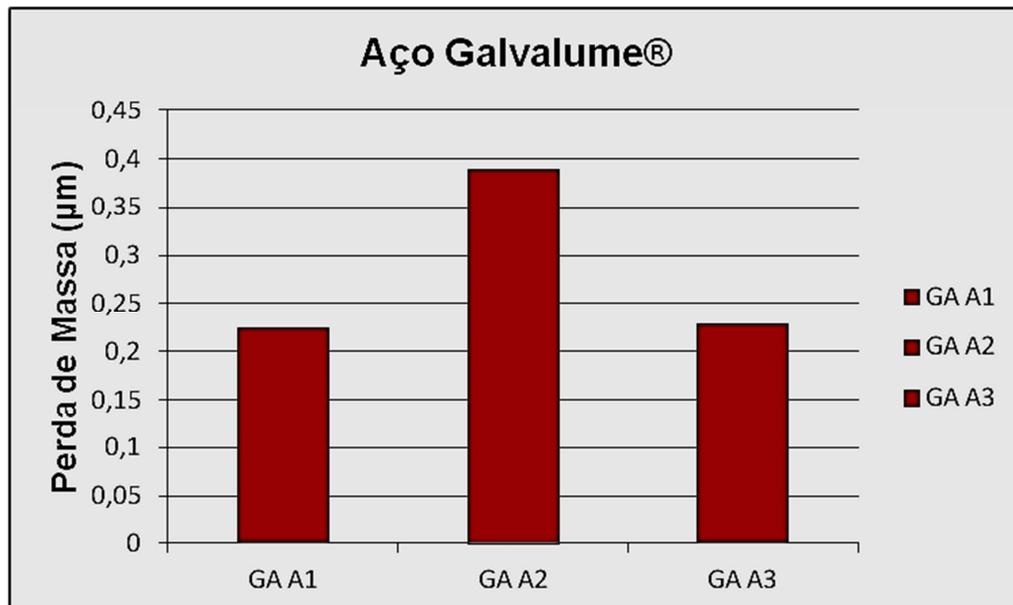
A taxa de corrosão foi calculada em perdas de revestimento por ano, utilizando a densidade do aço Galvalume® de 4,63g/cm³, conforme indicado na equação (1).

Tabela 14 - Resultados do ensaio imersão em aço Galvalume®

Amostra	Espessura inicial Rev. (µm)	Espessura final Rev. (µm)	Média perda de massa (µm/ano)*
GA A1	19,0	18,775	0,225
GA A2	19,0	18,610	0,390
GA A3	19,0	18,771	0,229

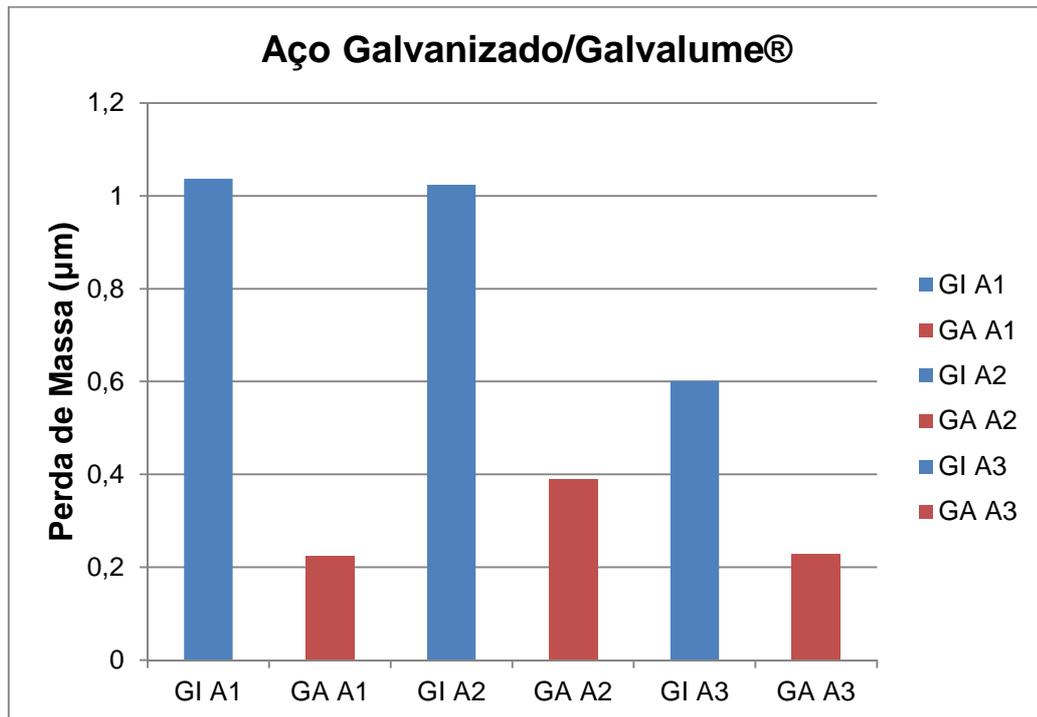
mmpy= perda de peso *13,56/area*tempo*densidade do Galvalume(4,63g/cm³)=milímetros por ano ou micrometros por ano.

Figura 42 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvalume®



Além disso, o aço revestido com Galvalume® apresentou menores taxas de perdas de massa comparativamente ao aço Galvanizado NBR7008 (Figura 43).

Figura 43 - Gráfico da perda de massa em ensaio imersão no aço Galvanizado/Galvalume®



4.2.2 ANALISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA -MEV

É possível verificar nas amostras dos aços Galvanizados NBR 7008 (amostras após conformação, área A1: área lateral com dobra) a presença de irregularidades no revestimento (Figura 44). Essas irregularidades podem ter sido geradas em função da dobra na lateral do painel.

Após ensaio de imersão (Figura 45 e Figura 46), observa-se a mudança da morfologia da camada, possivelmente devido ao processo de corrosão da camada de zinco.

Figura 44 - Imagens MEV em aços Galvanizados antes do ensaio de imersão (área A1)

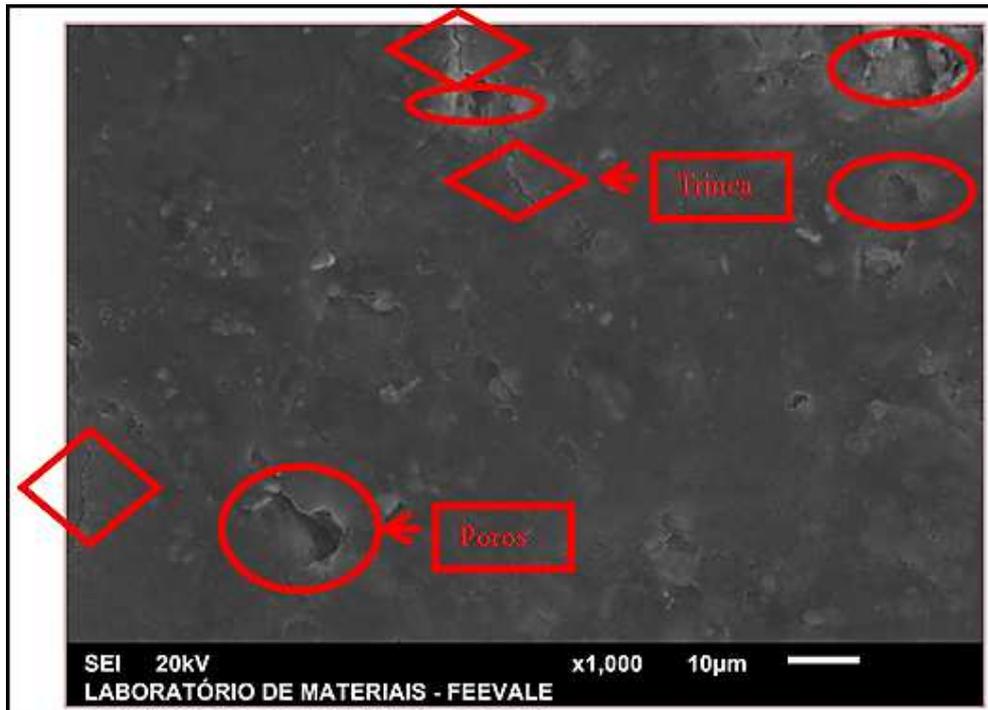


Figura 45 - Imagens MEV em aços Galvanizados após imersão (área A1)

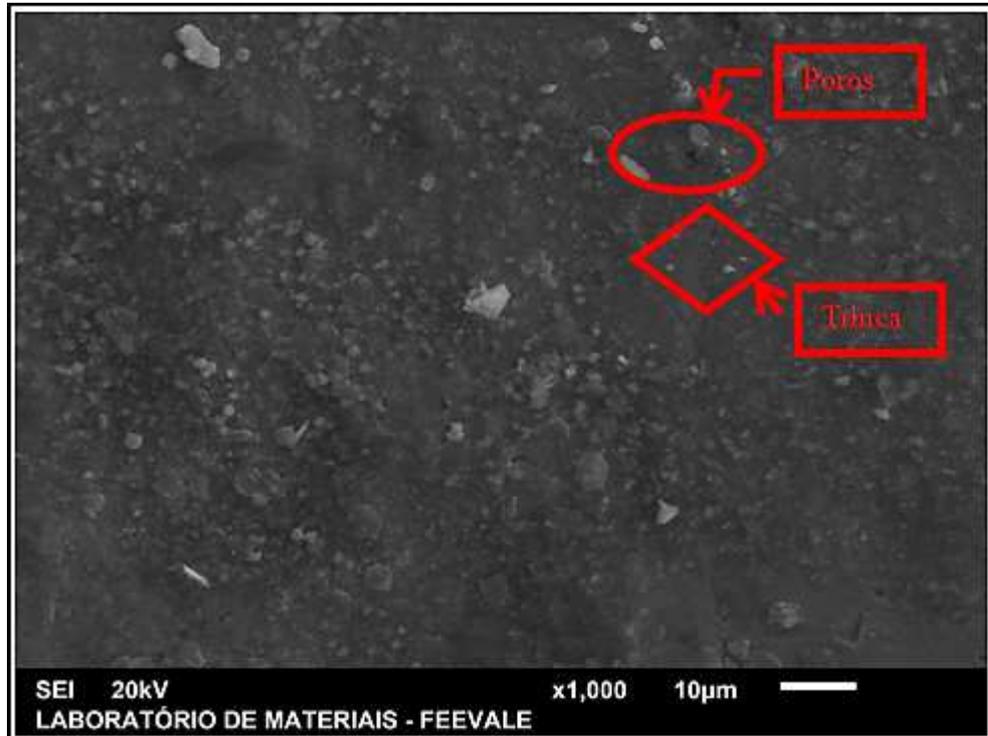
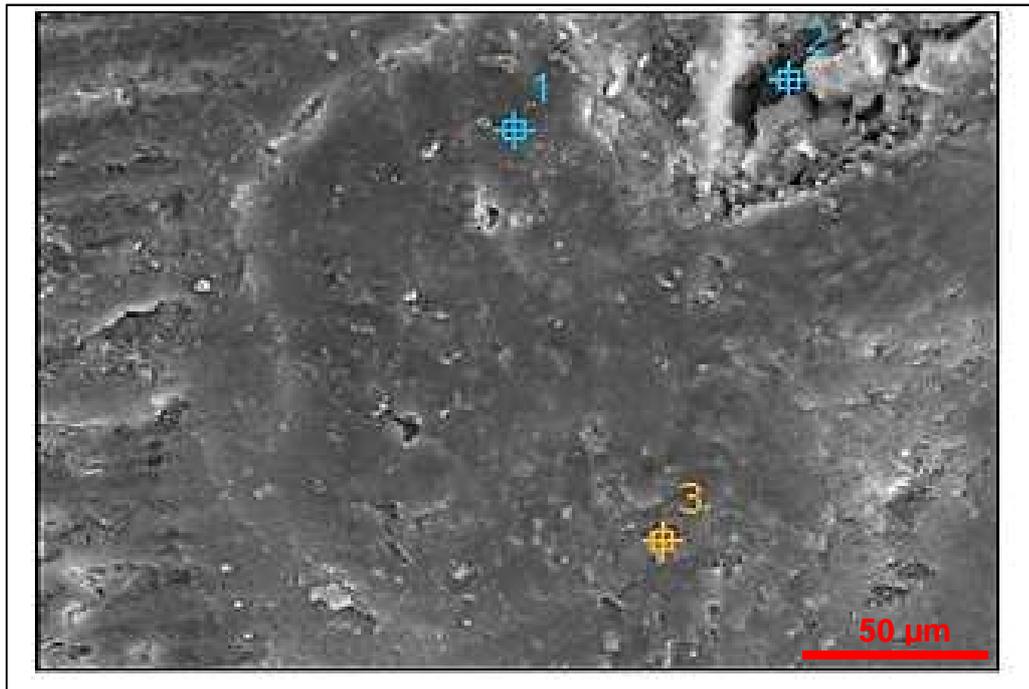
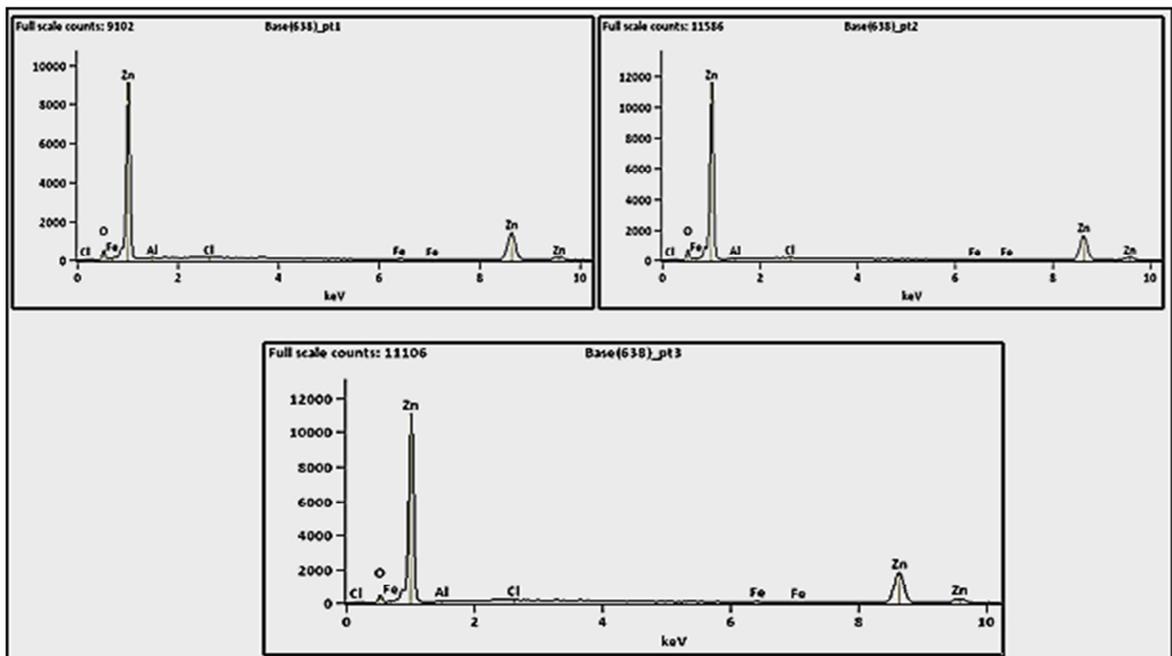


Figura 46 - Imagem MEV em aço Galvanizado após imersão (área A1)



Por análise de EDS (Figura 47) é possível observar para as amostras de aço Galvanizado NBR 7008, os elementos presentes nos pontos 1, 2 e 3 da Figura 46. Como se pode observar, são detectadas a presença dos elementos Zn (do revestimento) e traços de cloreto (da solução onde as amostras forma imersas)

Figura 47 - Gráfico ponto 1, 2 e 3 - EDS amostra da área A1 após ensaio de imersão em aço Galvanizado



O aço revestido com Galvalume[®] apresentou pontos com porosidades, mas não apresentaram trincas na região de maior sollicitação em conformação mecânica, conforme ilustra a Figura 48. Após ensaio de imersão (Figura 49) é possível observar a alteração de morfologia, típica da formação de produtos de corrosão. A superfície do revestimento do aço Galvalume[®], apresenta uma superfície mais regular comparada com a superfície do aço Galvanizado NBR7008.

Figura 48 - Imagens MEV em aços Galvalume[®] antes imersão (amostra da área A1)

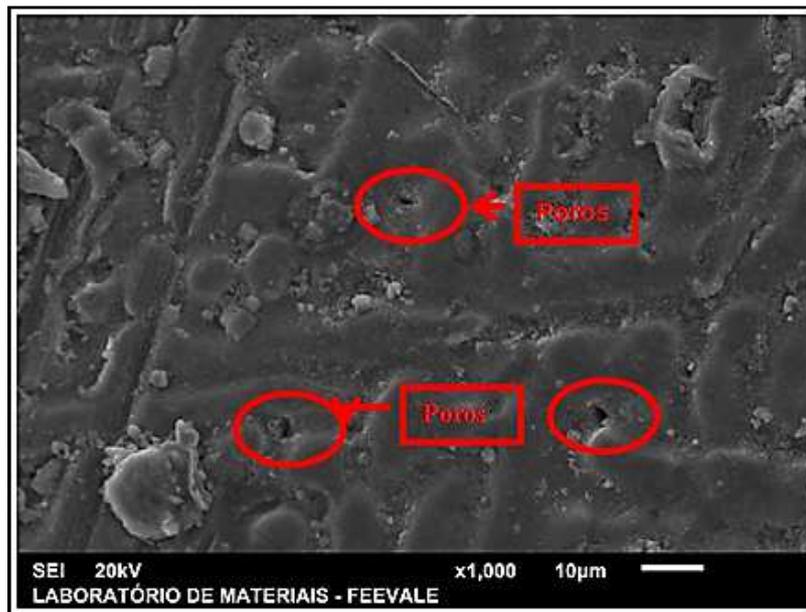
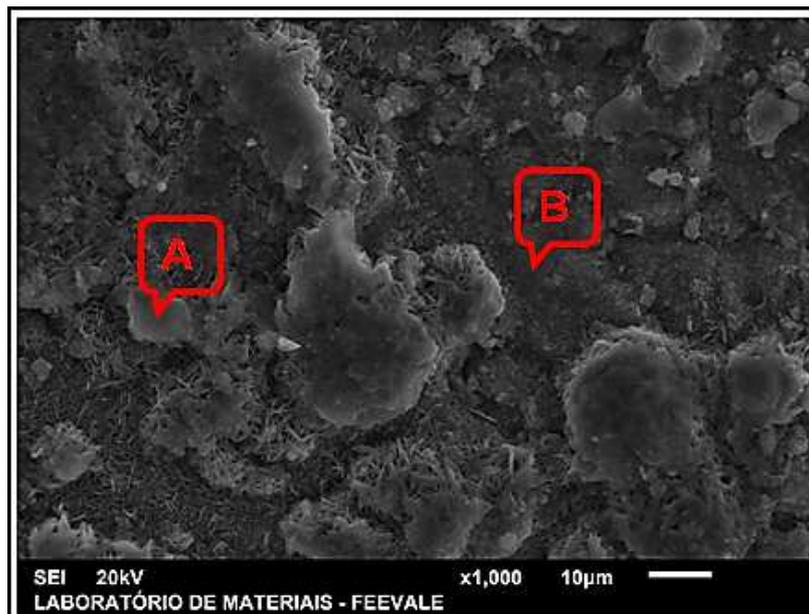
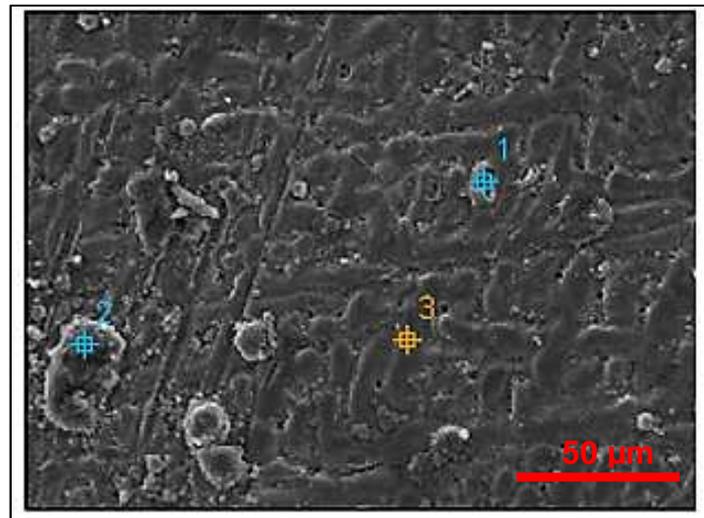


Figura 49 - Imagens MEV em aços Galvalume[®] após imersão (amostra da área A1)



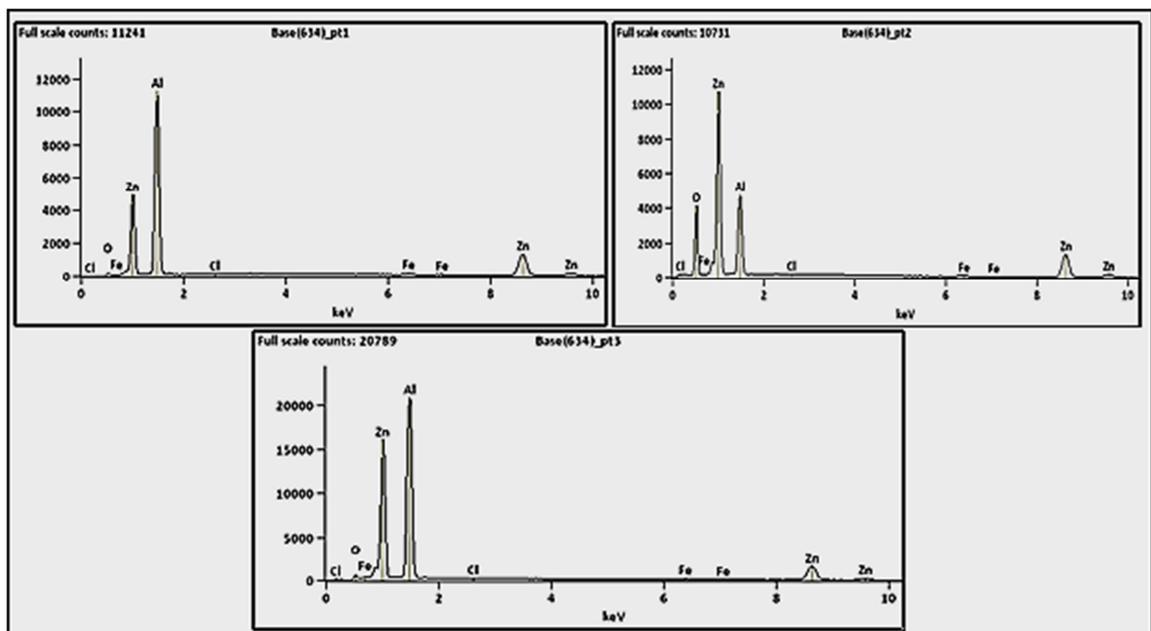
A imagem ilustrada na figura 50, indicando os pontos 1, 2 e 3 onde foram realizadas as análises por EDS.

Figura 50 - Imagem MEV amostra de aço revestido com Galvalume® após imersão (amostra da área A1)



A partir da análise por EDS (Figura 51), é possível avaliar a composição química observada em cada ponto indicados na imagem da Figura 50. É possível observar a presença dos elementos Al e Zn, que são constituintes do revestimento Galvalume®. O Silício é um elemento presente na liga dos aços Galvalume®, em média utiliza-se 1,5% em peso, mas não foi encontrado em todas as amostras analisadas com este material.

Figura 51 - EDS para a amostra de aço revestido com Galvalume® após imersão (amostra da área A1)



4.2.3 RESULTADOS ENSAIOS DE PERFILOMETRIA EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME

O parâmetro de rugosidade empregado para avaliar foi “Ra” que corresponde à média dos desvios absolutos das irregularidades da superfície. Este resultado fornece a descrição geral das variações de altura das imperfeições da superfície das amostras analisadas.

A tabela 15 ilustra os valores encontrados, para a rugosidade (Ra) em determinadas áreas. Quanto maior a rugosidade, menor tenderá a ser a resistência a corrosão, em função da maior área superficial e da maior tendência ao acúmulo de umidade na camada superficial mais rugosa. Em revestimentos anticorrosivos, o aumento da rugosidade pode levar o material a um maior aumento da taxa de corrosão devido ao aumento da área superficial. Sendo que materiais com menor rugosidade possível, em acabamentos superficiais, este desgaste tende a ser reduzido. De modo geral as amostras de aço galvanizado não apresentaram diferença de rugosidade independentemente da região analisada no painel, sendo a área de tracionada (T), comprimida (C) ou plana (P).

Tabela 15 - Resultados do ensaio de perfilometria em aços Galvanizados (GI) e aços Galvalume® (GA)

Amostra	Rugosidade (Ra) Média (µm)	Desvio Padrão
GIA1C	0,51	0,06
GIA1T	0,58	0,13
GIA3P	0,49	0,03
GAA1T	0,52	0,13
GAA2T	0,44	0,14
GAA3P	0,49	0,22

As amostras dos aços revestidos com Galvalume® apresentaram valores de rugosidade mostrados na tabela 15. De forma semelhante ao que foi observado para o aço Galvanizado NBR 7008, não foi possível verificar uma variação importante da rugosidade em função da região em que as amostras foram retiradas

da chapa de aço revestido com Galvalume[®]. Além disso, os valores de rugosidade para o Galvalume[®] e para o aço Galvanizado NBR7008, ficaram na mesma ordem.

4.2.4 ENVELHECIMENTO EM AÇOS GALVANIZADOS E AÇOS GALVALUME[®]

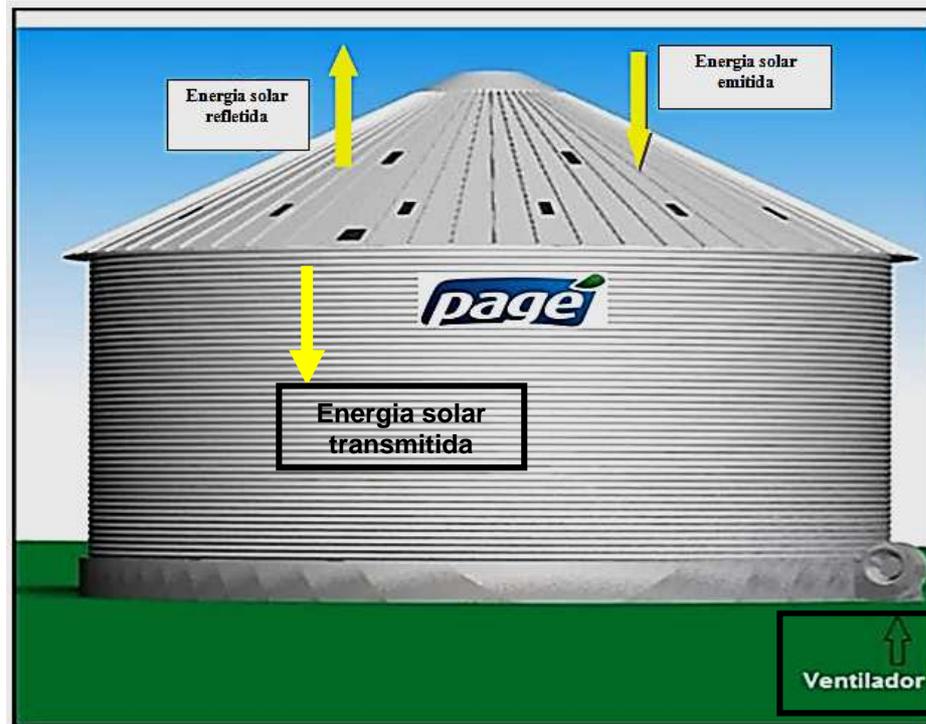
Na figura 52 é ilustrado o aspecto visual da chapa com revestimento Galvalume[®] e com o revestimento galvanizado após 3 anos de exposição em atmosfera rural, esta foto foi tirada no início de 2015, não obtendo outras fotografias ao longo dos anos. É possível observar claramente a diferença de aspecto entra as duas chapas. As chapas claras são o Galvalume[®] ASTM A792 e a chapa escura é a chapa de aço Galvanizado. As chapas de aço Galvalume[®] da tampa de silo apresenta um aspecto claro e brilhante em relação à chapa com aço Galvanizado, e não são observados sinais de envelhecimento do revestimento Galvalume[®] na tampa o silo, ao contrário da chapa galvanizada que se apresentou escurecida e sem brilho.

Figura 52 - Amostras expostas aço Galvanizado e Galvalume[®]



Outro fator importante salientar, que quanto mais escura a chapa apresentar, maior absortividade vai causar, e menor refletividade, ocasionando temperaturas internas superiores, aumentando o custo de energia com atuação da aeração (Ventilador) e podendo até mesmo gerar focos de calor na massa do grão, conforme ilustra a imagem 53, a relação direta da refletividade na tampa do silo.

Figura 53 - Energia Solar refletida e absorvida



Uma forma de levantar estes dados em relação a temperatura interna em ambos os materiais, seria um monitoramento remoto, via sensores de temperatura, gerando gráficos a cada hora da temperatura externa e interna de cada silo, fazendo está pesquisa ao longo dos anos, fazendo uma correlação direta com o envelhecimento do material, sendo quanto maior a chapa apresentar envelhecida, maior será ação da absorção pela chapa e maior transmissão de calor para o interno do silo.

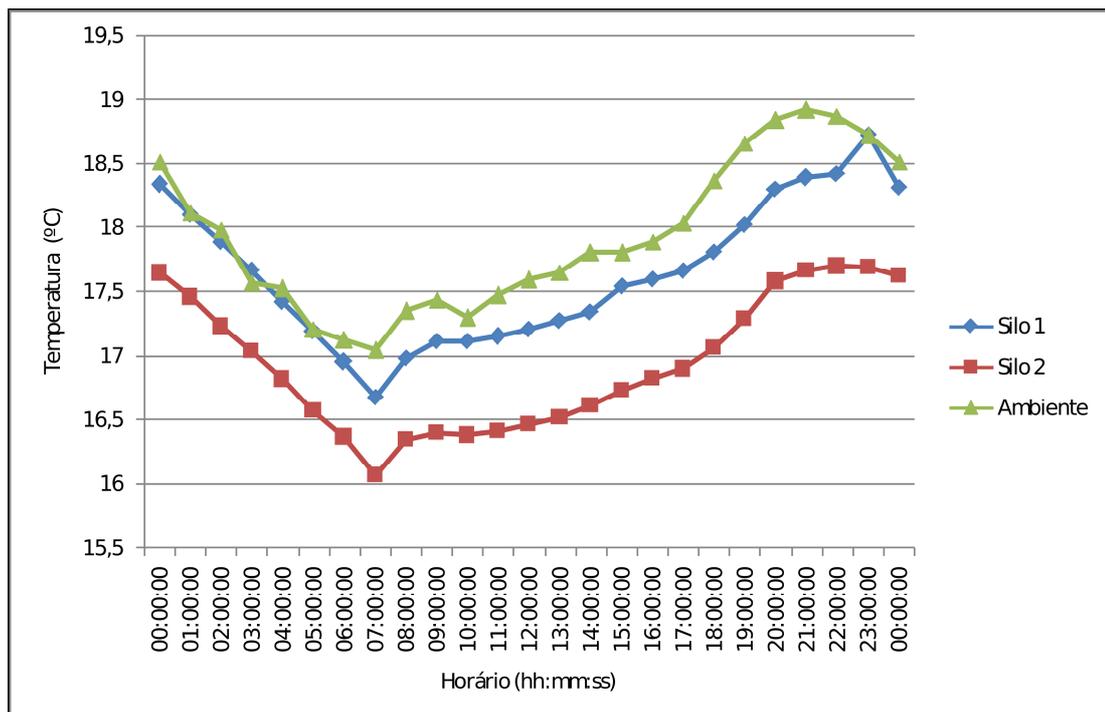
A figura 54 ilustra a imagem dos protótipos da pesquisa em andamento, utilizando silos (protótipos) um com tampa Galvanizada NBR7008 (SILO 2), e outra em aço Galvalume® (SILO 1), com utilização de sensores de temperatura interno e externo e monitoramento remoto, para verificação da diferença de temperaturas em relação a maior refletividade e menor absortividade dos materiais [26,27].

Figura 54 - Visão frontal do experimento



Neste experimento de monitoração e aquisição de dados, o mais importante é a avaliação do comportamento ao longo do tempo. No experimento em questão as temperaturas internas dos silos e o ambiente são coletadas no intervalo de 15 minutos. Para uma análise mais inteligível do comportamento gerou-se gráficos (figura 55) onde os dados plotados são divididos de hora em hora e que compreendem um período de 24 horas, sendo em média a diferença de temperatura interna de 1 C° inferior para o silo 2 com tampa em aço Galvalume® [26,27].

Figura 55 - Gráfico das temperaturas em um período de 24 horas, obtido dia 01 junho de 2014



5 CUSTOS DOS MATERIAIS E DEMANDA DE CONSUMO

Os custos dos materiais estudados possuem diferenças de valores bem importantes. O custo do aço Galvalume® sem impostos é de R\$ 2,77 o quilograma e o aço Galvanizado NBR 7008 de R\$ 2,42 o quilograma, uma diferença em média de R\$ 0,30 por Kg de aço adquirido, conforme ilustra a tabela 16.

Tabela 16 - Custo e demanda Galvalume®

Ano	Descrição	Qtde (Kg)	Qtde (ton)	Custo Médio R\$	Diferença %	Total (R\$)	Diferença
2011	Galvalume®	825.000,00	825,00	2,773	12,6	2.287.725,00	292.828,00
2012	Galvalume®	350.335,00	350,00	2,773	12,6	971.478,00	124.349,00
2013	Galvalume®	450.000,00	450,00	2,773	12,6	1.247.850,00	159.724,00
2014	Galvalume®	240.000,00	240,00	2,773	12,6	665.520,00	83.856,00
Total:		1.865.335,00	1.865,00			5.172.573,00	660.757,00

Esta diferença de custos dos materiais resultou em um acréscimo sobre o produto em 4 anos de consumo do aço Galvalume® de **R\$ 660.757,00**, ou seja, **12,6%** mais caro, e uma diferença anual em média de **R\$ 165.189,00**, este custo elevado se deve pelo grande consumo deste material na confecção dos silos armazenadores de grãos.

Por possuir histórico na empresa, que em média depois de 15 anos é feita uma troca de alguns painéis danificados em função da corrosão em atmosfera rural e industrial, podemos afirmar que os painéis das tampas dos silos armazenadores em aço Galvalume®, após 15 anos o mesmo já viabiliza a sua aquisição. Trata-se de uma matéria-prima com um preço mais elevado, mas que possui uma vida útil maior em relação a tampa dos silos fabricadas em aços Galvanizados. É importante salientar que as características quanto ao aspecto visual brilhante e claro são determinantes para a aceitação dos silos pelos clientes.

6 CONCLUSÕES GERAIS

O ensaio de névoa salina “Salt Spray”, evidenciou que a chapa sem conformação possui uma melhor resistência à corrosão para aço revestido com Galvalume[®], que não apresentou corrosão branca até 120 horas de exposição. Enquanto o Galvanizado NBR7008 apresentou corrosão branca com 96 horas de exposição em câmara de névoa salina.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de imersão após a conformação mecânica, ficou evidenciada a influencia do processo de conformação sobre a resistência à corrosão do aço Galvanizado NBR7008. Observou-se que as áreas (A1) submetidas dobra mais profunda, e a área (A2) ondulação de enrijecimento do material, tiveram a taxa de corrosão aumentada. O mesmo não ocorreu para o aço revestido com Galvalume[®], o qual apresentou menor taxa de corrosão do que o aço Galvanizado NBR7008, a região (A2) ondulada em sentido da (A3), área plana central foi as áreas que mais sofreram agressão e redução da resistência a corrosão do aço Galvalume[®], principalmente pelos vários arranhões na área central promovido pelo processo de ondulação do painel.

Portanto, em relação ao processo de dobra dos aços para a fabricação das tampas dos silos armazenadores, ficou evidenciado a superioridade quanto à resistência à corrosão para os aços revestidos com Galvalume[®] em relação aos aços Galvanizados NBR7008 nos ensaios de imersão, sendo resultados diferentes de outras pesquisas, indicando a superioridade em quatro vezes maior, onde esta pesquisa evidenciou no mínimo duas vezes maior é sua resistência a meios agressivos.

Quanto ao ensaio de envelhecimento, não foram observados sinais de envelhecimento para o revestimento Galvalume[®] na tampa do silo exposto em atmosfera rural por três anos, ao contrário da chapa de aço Galvanizado NBR7008, a qual se apresentou escurecida e sem brilho. Quanto mais escura ficar a chapa maior será absorvidade de calor para dentro do silo, prejudicando o sistema de conservação e até mesmo aumentando o custo de energia com atuação dos aeradores. É importante salientar que essas características quanto ao aspecto visual brilhante e claro, são determinantes para a aceitação dos silos pelos clientes e futuras aquisições.

Um dos maiores causadores da redução da resistência a corrosão, foram os defeitos causados pelo processo de conformação, causados nos revestimentos, com arranhões, esmagamento e esfolamento, podendo ser reduzido estes defeitos com emborrachamento nos rolos conformadores, ou lubrificação em todo o processo de conformação, para diminuição dos defeitos causados pelo atrito das ferramentas conformadoras sobre a camada revestida de ambos os aços estudados.

Dessa forma, que o aço revestido com Galvalume[®] tenha um custo 12% mais elevado que aço Galvanizado NBR7008, ainda assim a aplicação do aço revestido com Galvalume[®] é mais indicada quando deseja-se resistência em meios agressivos e quando o componente necessita ser submetido à conformação mecânica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando complementar o estudo, referente à resistência à corrosão dos aços Galvanizados NBR 7008, em relação aos aços Galvalume[®], após a conformação mecânica, é possível sugerir novas linhas de pesquisa com os seguintes temas:

- ✓ Aplicar ensaio de salt spray, em amostras já conformadas, e analisando o tempo exposto no momento que gerou a corrosão branca nas amostras, para melhor validação dos resultados, quanto à resistência das amostras nestas condições;
- ✓ Monitoramento dos painéis dos silos ao longo dos anos, em outras atmosferas, como por exemplo: atmosfera marítima e industrial;
- ✓ Completar o estudo de resistência à corrosão empregando ensaios de caracterização eletroquímica (potencial de circuito aberto, curvas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica).
- ✓ Monitoramento remoto em campo ou em protótipo, em relação as temperaturas internas das tampas fabricadas com Galvalume[®] e aço Galvanizado em função da maior refletividade e menor absorvidade.

8 TRABALHOS PUBLICADOS

Trabalhos completos publicados em anais de evento

1. V, GRUBER ; **AMERICO, R.** ; M, CÉLIA . Experimento Didático com a Utilização das NTIC's no Acompanhamento Remoto de Propriedades Térmicas em Silos de Contenção de Grãos. In: REV2014, PORTO, PORTUGAL, 2014.
2. **AMERICO, R.** ; M, CÉLIA ; RODRIGUES, J. S. ; V, GRUBER . ENSAIOS DE IMERSÃO NOS AÇOS NBR 7008 GRAU Z275, AÇO GALVALUME ASTM A792 AZM150, APÓS A CONFORMAÇÃO MECÂNICA, AVALIANDO A RESISTÊNCIA A CORROSÃO.. In: 34° SENAFOR, PORTO ALEGRE, 2014.
3. MARCELINO, R. ; SILVA, J. B. ; FRANCIA, P. A. ; V, GRUBER ; **AMERICO, R.**; M, CÉLIA . Aquisição e acompanhamento remoto das propriedades térmicas em silos de contenção de grãos.. In: 34°SENAFOR, PORTO ALEGRE, 2014.
4. **AMERICO, R.** ; M, CÉLIA ; V, GRUBER . ESTUDOS DOS ENSAIOS QUÍMICOS E MECÂNICOS NO AÇO NBR7008 Z275 E GALVALUME® ASTM A792 AZM150, ANTES DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA A CORROSÃO. In: 33°SENAFOR, PORTO ALEGRE, 2013.

Artigo completo publicado em periódico

1. **AMERICO, R.** ; M, CÉLIA ; V, GRUBER . ANALYSIS OF MECHANICAL ANDE CHEMICAL PROPERTIES OF STEEL GRADE NBR7008 Z275 COMPARED TO GALVALUME® ASTM A792 AZM150 BEFORE FORMING MECHANICS. In: International Journal of Materials Engineerind and Technology, ISSN:0975-444, ÍNDIA, 2015.

Artigo completo publicado em simpósio

1. FRANCIA, P. A. ; CASAGRANDE, L. C. S. ; CROTTI, Y. ; V, GRUBER ; **AMERICO, R.** ; M, CÉLIA . AQUISIÇÃO DE DADOS ONLINE EM SILOS DE CONTENÇÃO, UTILIZANDO AS TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO.. In: 3º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense SICT-Sul, 2014, CRICIÚMA. 3º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense SICT-Sul. CRICIÚMA, 2014.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Industrial Pagé. Manual Técnico Silos, Brasil 2014.
2. ASTM. A 792/A: Standard Specification for Steel Sheet, 55% Aluminum-Zinc Alloy-coated y the Hot Dip Process, 2008.
3. Companhia Siderúrgica Nacional, Manual CSN Galvalume® ,Brasil 2012.
4. Companhia Siderúrgica Nacional, Manual CSN Aços Zincados Imersão a Quente, Brasil 2012.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 7008: Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente. Julho de 2003.
6. AMÉRICO, Éderson, MANUAL DOS AÇOS, 2007.
7. CONI, N. H. S. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e Galvalume[®] produzidos na CSN-PR. Dissertação. PIPE, Universidade Federal do Paraná, 2004.
8. Kunst, S.R. Obtenção e caracterização de revestimentos híbridos a base de precursores alcoóxidos sobre o aço Galvanizado. Dissertação. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
9. Marder AR. The Metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science. 2000; 45: 191 – 271.
10. Instituto dos metais não ferrosos, Disponível em: <http://www.icz.org.br/>, acessado em Nov 2013.
11. Menezes, T.L. Elaboração e caracterização de revestimentos compósitos de zinco com talco e bentonita. Dissertação. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
12. American Galvanizers Association. Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products, 2000. Disponível em: http://www.galvanizeit.org/images/uploads/publicationPDFs/SP_COOR_00.pdf. Acessado em Setembro 2014.
13. CONI, N. H. S., MACHADO, W. F, SILVA, P. C., RAMOS, A. M. G & PINHO, J. G. S, 2002, Linha de galvanização contínua da CISA-CSN, 39º Seminário de laminação, Outubro 23- 25, Ouro Preto, vol.1, pp. 275- 284.
14. Kavitha, P. Santhosh, M. Renukadevi, A. Kalpana, T. Vasudevan, Role of organic additives on zinc coating. Surface & Coatings Technology. Vol. 201, pg. 3438-3442, 2006.

15. ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica. Disponível em: <http://www.abcem.org.br/>, acessado em Mai 2014.
16. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 7013: Chapas e bobinas de aço revestidas pelo processo contínuo de imersão a quente. Setembro de 2013.
17. ASTM. A 90: Standard Test Method for Weight of Coating on Zinc-Coated (Galvanized) Iron or Steel Articles, Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.06, ASTM, 1993.
18. SILVA, J.S.R. Estudo da corrosão de revestimentos de zinco-ligas obtidos por imersão a quente sobre aços baixo carbono. Dissertação. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
19. Paulo S. G. da Silva. Estudo do comportamento eletroquímico do revestimento Zn-55Al. 6ª COTEQ Salvador BA. 2002.
20. SHEILA, NS. Estudo da influência do tratamento térmico sobre a resistência a corrosão do revestimento de liga 55Al-Zn em água do mar sintética. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, 2000.
21. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 15578: Bobinas e chapas de aços revestidas com liga 55% alumínio-zinco pelo processo contínuo de imersão a quente. Maio de 2008.
22. 55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Research and Technology Manual; BIEC International Inc, BHP Steel, Austrália, 1994.
23. TOWNSEND, H. E.; ZOCCOLA, J. C. Materials Performance, Vol 10, 1979, p 13-20, 1979.
24. TOWNSEND, H. E. Continuous Hot Dip Coatings, ASM Handbook, vol 5 - Surface Engineering, pp.339 – 348, 1993.
25. INCROPERA, DEWITT. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa 6ª Edição, 2003.
26. AMERICO, R., M, CÉLIA, V, GRUBER, M, CÉLIA - Aquisição de dados online das temperaturas internas em silos de contenção, utilizando as tecnologias da informação e comunicação. 3º SICT-SUL, 2014, Criciúma SC.
27. AMERICO, R., M, CÉLIA, AUGUSTO, P., V, GRUBER - Experimento Didático com a Utilização das NTIC's no Acompanhamento Remoto de Propriedades Térmicas em Silos de Contenção de Grãos In: 11º REV, 2014, PORTO, POTUGAL.
28. GARCIA A. "Ensaio dos materiais". Livros técnicos e científicos Editora, 2000.

29. TRIDAPALLI, CW. Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço ino AISI 430 e AISI 304. Dissertação. PPEQ Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
30. ALVARENGA, A.P. Processos de Estampagem. Departamento de Mecânica e Energia. UERJ:Universidade Estadual do Rio de Janeiro 2005.
31. ASTM B 117: Standard Method of Salt Spray (FOG), ASTM Standards, 1973.
32. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à névoa salina – Métodos de ensaio. 1983.
33. PARANHOS; R.M.V. Caracterização de fases intermetálicas presentes em aço galvanizado por imersão a quente com tratamento térmico do revestimento metálico. Tese: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
34. SILVA; C.A. Análise de propriedades mecânicas, tribológicas e Metalográficas de material submetido ao processo de erosão corrosão com sulfetação. Dissertação: PIPE. Universidade Federal do Paraná, 2009.
35. XAVIER, H,S. Análise por perfilometria e tomografia de coerência óptica da rugosidade superficial e do desgaste do esmalte bovino microabrasionado. Dissertação. PPCO. Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
36. Zygo Metrology Solutions Division. Disponível em: www.zygo.com, acessado em Mai/2015.
37. ASTM E 8: Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, 2000.
38. ASTM G31: Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, 1972.
39. A. RAMUS MOREIRA, Z. PANOSSIAN, P.L. CAMARGO, M. FERREIRA MOREIRA C, I.C. DA SILVA D, J.E. RIBEIRO DE CARVALHO - Zn/55 Alcoating microstructure and corrosion mechanism. São Paulo 2005.

ANEXOS

ANEXO 3 – UNIDADE ARMAZENADORA DE GRÃOS NÍVEL FAZENDA

ANEXO 4 – UNIDADE ARMAZENADORA DE GRÃOS NÍVEL COOPERATIVA