



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E CIÊNCIAS DOS
MATERIAIS

ANDERSON MAIA TEIXEIRA

PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A FOGO: PRINCIPAIS ERROS E SOLUÇÕES NA
ENGENHARIA DE PROJETOS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

FORTALEZA

2019

ANDERSON MAIA TEIXEIRA

PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A FOGO: PRINCIPAIS ERROS E SOLUÇÕES NA
ENGENHARIA DE PROJETOS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica e Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA
NOVEMBRO 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T264p Teixeira, Anderson Maia.

Processo de galvanização a fogo : principais erros e soluções na engenharia de projetos das estruturas metálicas / Anderson Maia Teixeira. – 2019.
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

1. Galvanização a fogo. 2. Engenharia de projetos. 3. Revestimento de zinco. 4. Recobrimento. I. Título.
CDD 669

ANDERSON MAIA TEIXEIRA

PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A FOGO: PRINCIPAIS ERROS E SOLUÇÕES NA
ENGENHARIA DE PROJETOS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica e Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr^ª. Janaina Gonçalves Maria da Silva Machado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr^ª. Adriana de Oliveira Sousa Leite
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

A Deus por ter me dado saúde e força para
superar as dificuldades.

Aos meus pais, Antônio e Francinete.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais agradeço:

Ao professor orientador que durante 04 meses me acompanhou pontualmente, dando todo o auxílio necessário para a elaboração do trabalho de conclusão de curso.

Aos professores do curso de Engenharia Metalúrgica e Ciências dos Materiais que através de seus ensinamentos permitiram que pudesse hoje estar concluindo este trabalho.

Aos amigos construídos durante o período de graduação, pois o caminho foi trilhado com ajuda mútua e superação a cada semestre.

Aos meus pais, que me incentivaram a cada momento e não permitiram que eu desistisse.

A minha esposa Lauridia e minhas filhas Lara e Andressa pelo apoio e compreensão do tempo de convívio muitas vezes sacrificado para a realização deste trabalho e a conclusão do curso de graduação. Por todo o carinho, felicidade, apoio e incentivo encontrado na minha família que sempre farão parte de cada vitória.

E a empresa Zanatta Estufas Agrícolas, que me proporcionou experiências profissionais únicas e o material de pesquisa necessário para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

“ No processo de galvanização, é formada uma barreira que isola todas as superfícies internas e externas do aço do meio ambiente. ”

Guia de galvanização por imersão a quente -
ICZ

RESUMO

O aço carbono é um produto usado amplamente na indústria e construção civil. É um material composto por ligas de ferro e carbono e é utilizado na fabricação de diversos produtos. As suas propriedades mecânicas, soldabilidade, adesão a pintura, fácil moldagem, reciclagem e baixo custo comparados a outras ligas metálicas fazem com que tenham grande aplicabilidade. Contudo, devido a exposição ao próprio ambiente, como também o solo, a água, o ar e atmosfera industrial, ocorre reações químicas e eletroquímicas fazendo com que o aço sofra um desgaste gradual, dando origem a oxidação na superfície do material. Esta oxidação é chamada de corrosão resultando na formação de produtos de corrosão. Existem vários processos de proteção do aço contra a corrosão, neste trabalho será explicado o processo de Galvanização por Imersão a Quente (*HDG – Hot Dip Galvanizing*), que consiste no recobrimento do metal base com zinco líquido, com o objetivo de aumentar a resistência à corrosão, pois na maioria dos ambientes naturais a velocidade de degradação do zinco é bastante inferior àquelas observadas para o aço carbono. A qualidade do processo de galvanização é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o sucesso desta qualificação está associada entre a união de informações do galvanizador, fabricante e projetista, pois as características do projeto da estrutura ou peça metálica pode melhorar ou desqualificar o revestimento de zinco. Este trabalho de conclusão de curso visa apresentar os principais erros de projeto e métodos de correção para que as peças metálicas atendam todas as normas de qualificação da ABNT.

Palavras-chave: Galvanização, Corrosão, Recobrimento, Zinco.

ABSTRACT

Carbon steel is a product widely used in industry and construction. It is a material composed of iron and carbon alloys and is used in the manufacture of various products. Their mechanical properties, weldability, paint adhesion, easy shaping, recycling and low cost are compared to other metal alloys which make them highly applicable. However, due to exposure to the environment itself, as well as soil, water, or the industrial atmosphere, chemical and electrochemical occur that cause the steel to wear out gradually, causing oxidation on the surface of the material. This oxidation is called corrosion, resulting in the formation of corrosion products. There are several corrosion protection processes in steel, this work will explain the hot dip galvanizing (HDG) process, which consists of not recovering the base metal with liquid zinc, in order to increase the corrosion resistance, as in most natural environments the rate of zinc degradation is much lower than the temperatures observed for carbon steel. The Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) standardizes the quality of the galvanizing process and the success of this classification is associated with a combination of galvanizer, manufacturer and designer information, as the structure or metal part design characteristics may improve. Or disqualify the zinc coating. This course completion paper aims to present major design errors and correction methods so that metal parts meet all ABNT qualification standards.

Keywords: Galvanization, Corrosion, Coating, Zinc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de galvanização a fogo [2]	14
Figura 2 – Taxas indicativas de corrosão para ambientes diferentes [4]	15
Figura 3 – Posição do zinco na série galvânica [4]	16
Figura 4 – Consequência do dano em diferentes tipos de revestimento [4]	16
Figura 5 – Durabilidade do revestimento de acordo com a espessura e o ambiente [10].	22
Figura 6 - Microestrutura de um típico revestimento Galvanizado a fogo mostrando as camadas intermetálicas e as variações de rigidez [11].	22
Figura 7- Amostra de tubo metalon	24
Figura 8 – Amostra de chapa de aço	25
Figura 9 – Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm	25
Figura 10 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm	26
Figura 11– Amostra de tubo metalon com regiões sem revestimento de zinco fundido	28
Figura 12 - Amostra de tubo metalon com regiões sem revestimento de zinco fundido	28
Figura 13 – Amostra de tubo metalon com furos para drenagem e ventilação	29
Figura 14 - Amostra de tubo metalon com furos para drenagem e ventilação	30
Figura 15 - Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm com regiões revestidas de tinta epóxi	30
Figura 16 - Amostra de chapa de aço apresentando regiões sem revestimento de zinco fundido	31
Figura 17 – Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm com regiões sem revestimento de zinco fundido	31
Figura 18 – Amostra de chapa de aço com alta qualidade no revestimento de zinco fundido	32
Figura 19 - Amostra de perfil enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, sem furos de ventilação	32
Figura 20 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, sem furos de ventilação, apresentando manchas e pequenos pontos de acúmulo de cinzas	33
Figura 21 – Armadilha de zinco na estrutura a ser galvanizada [adaptado de 17]	33
Figura 22 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, com furos de ventilação	34
Figura 23 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, com furos de ventilação e apresentando alta qualidade no produto final galvanizado	34
Figura 24 – Localização dos furos nas peças metálicas para o zinco fundido fluir sem resistência [adaptado de 20]	35

Figura 25 – Abertura na mão francesa ou reforços para maior fluidez do zinco [20]	35
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Galvanização a fogo em peças de aço	14
2.2	Fatores importantes para galvanizar	17
2.3	Vantagens e desvantagens da galvanização a fogo	17
2.4	Etapas do processo de galvanização a fogo	19
2.4.1	Desengraxe	19
2.4.2	Lavagem	19
2.4.3	Decapagem ácida	19
2.4.4	Fluxagem	21
2.4.5	Imersão a Quente – “Zincagem a Quente”	21
2.4.6	Resfriamento	23
2.4.7	Passivação	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Materiais	24
3.2	Métodos	26
3.2.1	Preparação da superfície	26
3.2.2	Galvanização a fogo e passivação das amostras	27
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	28
4.1	Galvanização a fogo das amostras 1	28
4.2	Galvanização a fogo das amostras 2 e 3	30
4.3	Galvanização a fogo das amostras 4	32
5	CONCLUSÃO	36
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Embora a corrosão seja um fenômeno natural e nunca possa ser totalmente eliminado. A utilização de sistemas adequados de proteção contra a corrosão pode reduzir drasticamente os custos de degradação dos materiais. A galvanização por imersão a quente após a fabricação é econômico e sem manutenção, que dura décadas mesmo nos ambientes mais adversos. Por mais de 100 anos, o aço galvanizado a quente tem sido utilizado para combater a corrosão nos principais ambientes industriais, incluindo o petroquímico, transporte e serviços públicos [1].

O presente trabalho tem como objetivo mostrar os principais erros de design de projetos das estruturas e peças metálicas que afetam a qualidade do revestimento na proteção contra a corrosão, segurança durante o processo e estética. Estes erros são falta de furos para drenagem e escoamento, substrato contaminado com tinta epóxi e a formação de bolsas de ar no interior da peça ou estrutura metálica. Estes erros de projeto foram demonstrados através de amostras preparadas na empresa Zanatta Estufas Agrícolas, simulando erros que são presentes na linha de galvanização a fogo das maiores das indústrias. Adicionalmente, fornecer informações gerais sobre as melhores práticas de galvanização a fogo, garantindo segurança e qualidade no revestimento das peças ou estruturas metálicas.

Além do interesse do pesquisador pela temática, o estudo justifica-se pelas seguintes razões:

- Importância econômica - pois a qualidade superior do revestimento promoverá a maior durabilidade contra os ambientes corrosivos e a interrupção ou repetição desnecessária do processo de galvanização a fogo gerando custos desnecessários no serviço.
- Importância da segurança no trabalho – durante o serviço de galvanização a fogo, quaisquer erros no design da peça ou estrutura pode acarretar acidentes de trabalho, afetando a integridade e capacidade dos funcionários da empresa.
- Importância ambiental – a repetição do processo devido o design de projeto com falhas, acarreta na rápida saturação dos produtos químicos de desengraxe e decapagem do aço, excesso de consumo do zinco como recurso natural e a emissão de fumos de óxido de zinco na atmosfera.

Assim, este trabalho de conclusão de curso pretende analisar, entender e verificar as melhores práticas na engenharia de projetos para a produção de uma estrutura revestida com zinco fundido de maneira sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Galvanização a fogo em peças de aço

A galvanização a fogo compreende a imersão de um componente metálico em um banho de zinco líquido, após limpeza cuidadosa e preparação adequada do componente a ser tratado. O rápido ataque da superfície do componente pelo zinco líquido produz uma camada composta por diferentes ligas zinco/ferro (conhecidas como intermetálicos), que desenvolvem uma ligação muito forte com a superfície do componente. Alguns autores chamam esta união de “ligação metalúrgica”, que, de fato, ocorre. Após a remoção do componente estrutural do banho líquido, uma camada de zinco relativamente puro passa a recobrir a superfície do componente e as camadas de intermetálicos, produzindo uma coloração brilhante, acinzentada ou prateada, bastante característica [2].

A camada de intermetálicos Zn-Fe é dura e relativamente frágil, fornecendo tanto uma barreira protetora quanto proteção galvânica eficiente, protegendo o componente da corrosão. Em adição, a camada externa, macia, de zinco, protege o componente da abrasão e impacto acidentais durante o período de serviço [2].

A figura 1 descreve o processo de galvanização a fogo onde as peças passam por várias etapas até receberem o revestimento de zinco e estarem adequadas ao uso.

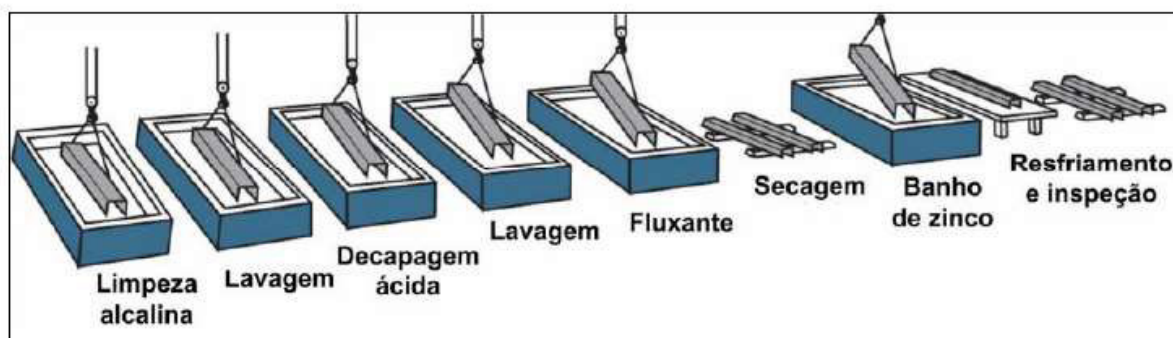


Figura 1 - Etapas do processo de galvanização a fogo [2]

Uma das formas de evitar a corrosão do metal base é a Galvanização que consiste em revestir uma superfície metálica com um material (zinco) a fim de preservá-lo do meio corrosivo. O zinco protege a peça de três formas.

a) por barreira contínua e impermeável que não permite que a umidade tenha contato com o aço. Sem umidade não há corrosão, exceto em determinadas atmosferas químicas

é diretamente proporcional à espessura do recobrimento. A vida útil do revestimento é determinada pela taxa de corrosão do revestimento, ela mesma é uma função de muitos fatores como tempo, composição da atmosfera e tipo de revestimento [3].

Em situações de exposição ao ar livre, o nível de acidez da chuva influencia a taxa de corrosão do zinco. Com exposição interna - dutos de ventilação, revestimento de piso e estrutura metálica, por exemplo – a umidade pode também estar presente. Em situações internas industriais, a atmosfera pode ser corrosiva. Portanto, o tipo e o peso do revestimento necessário dependem tanto da vida útil necessária quanto das condições da exposição [3].

A resistência à corrosão dos revestimentos pode também ser incrementada pelo uso de um revestimento de liga de zinco, como Galfan® ou Galvalume®, ou pela aplicação de cobertura de topo pintada. Estes dois métodos são recomendados isoladamente ou em conjunto, para aplicações de chapas nas quais se requer uma grande proteção contra a corrosão [3].

A taxa de corrosão para o zinco é geralmente linear em um determinado ambiente, permitindo, portanto, estimar o tempo de vida do revestimento com base em avaliações da sua espessura [3].

Uma estimativa da vida útil do revestimento também pode ser calculada através das taxas de corrosão para uma determinada categoria de corrosividade, de acordo com a norma ABNT NBR 14643, indicadas na figura 2.

Categoria de corrosividade	Taxa média anual de corrosão do zinco (um/ano)	Taxa média anual de corrosão do aço carbono (um/ano)
C1 interior: seco	<0,1	<1,3
C2 interior: condensação ocasional exterior: rural	0,1 a 0,7	1,3 a 25
C3 interior: alta umidade, pouca poluição no ar exterior: interior urbano ou costa urbana	0,7 a 2,1	25 a 50
C4 interior: piscinas, plantas químicas exterior: interior industrial ou costa urbana	2,1 a 4,2	50 a 80
C5 exterior: industrial com alta umidade ou alta salinidade costal	4,2 a 8,4	80 a 200

Figura 2 – Taxas indicativas de corrosão para ambientes diferentes [4]

b) por proteção catódica, pois o zinco apresenta maior potencial de oxidação que o ferro, como mostrado na figura 3, que é a principal matéria prima do produto galvanizado. Assim, se os dois forem colocados em contato em meio eletrolítico, o zinco atua como ânodo e o ferro como cátodo. Essa característica é usada para prevenir a corrosão dos aços e nela baseia-se o método de proteção pelo uso do mesmo. Se este revestimento se mantiver contínuo, sem

qualquer grande dano, a mesma atua como uma barreira evitando que o oxigênio e a água entrem em contato com o aço, inibindo, assim, a sua oxidação.

Caso a camada tenha qualquer descontinuidade que permita a entrada do ar atmosférico com umidade, o ferro passa a atuar como ânodo, sofrendo corrosão [5].

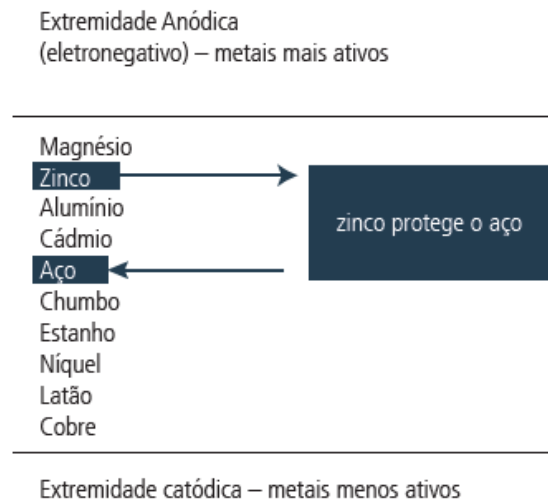


Figura 3 – Posição do zinco na série galvânica [4]

c) protege o aço se uma pequena parte do revestimento for danificada, impedindo que a corrosão se propague. O zinco em volta do ponto de danificação sofre corrosão. Produtos da corrosão precipitam-se na superfície de aço e ela fica protegida. O aço também é protegido pois ele é catódico em relação ao de zinco. O aço sofre corrosão onde o filme de tinta foi danificado. A corrosão se propaga entre o filme de tinta e a superfície do aço, ocasionando seu desprendimento, como mostrado na figura 3. O processo corrosivo continua até seu dano ser reparado [4].

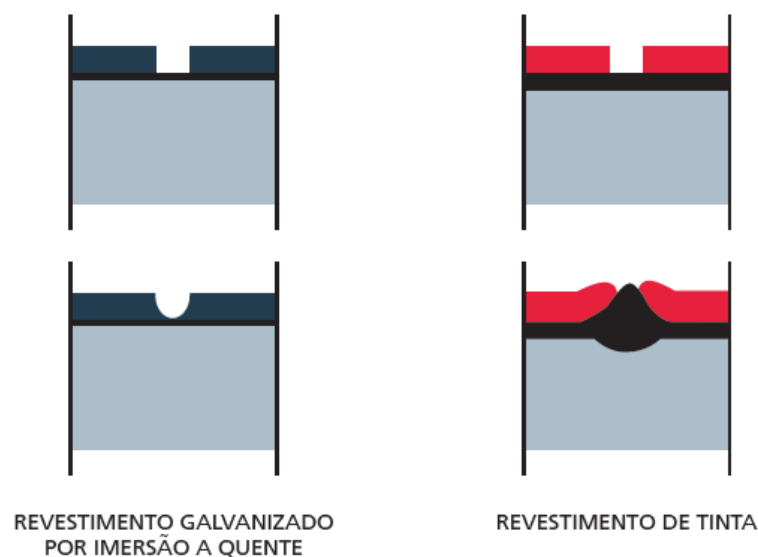


Figura 4 – Consequência do dano em diferentes tipos de revestimento [4]

2.2 Fatores importantes para galvanizar

Alguns fatores devem ser levados em conta para decisão de galvanizar, como:

- a) Custo de aplicação do revestimento;
- b) Vida útil antes da primeira manutenção;
- c) Custo da manutenção do revestimento;
- d) Custo de paralisação para manutenção;

Levando-se em conta esses quatro itens, verifica-se que o sistema de galvanização a fogo muitas vezes é o mais econômico se comparado a outros processos de revestimento (eletrodeposição do zinco, metalização e pintura com tintas à base de zinco ou de outros pigmentos protetores contra a corrosão). É possível fazer uma rápida comparação entre os sistemas de revestimento, examinando-se o custo inicial de aplicação do revestimento e o custo de manutenção do revestimento a ser realizada no futuro. Existem sistemas que têm custo inicial menor, como alguns processos de pintura sem adequada limpeza do metal-base, que, no entanto, apresentam um custo de manutenção maior no futuro [6].

O custo de manutenção pode ser mais ou menos elevado em função de fatores como localização da estrutura ou peça protegida, dificuldade de acesso e a suas várias partes e, ainda, exigências de desmontagem para a aplicação do tratamento de manutenção [6].

A avaliação dos custos deve ser cuidadosa, pois algumas informações são obtidas com precisão enquanto outras só podem ser estimadas de maneira aproximada. Além dos custos, na seleção do melhor sistema de proteção, problemas de aparência, disponibilidade de mão-de-obra e de material, e disponibilidade de fornecedores de serviços de aplicação do revestimento também contam. Para a maioria das estruturas e peças que precisam ser protegidas da corrosão, costuma-se dar preferência a um sistema que tenha o menor custo de manutenção possível, mesmo porque, com frequência, não há possibilidade de acesso para a realização da mesma [6].

2.3 Vantagens e Desvantagens da Galvanização a Fogo

As principais vantagens da galvanização a fogo são apresentadas abaixo:

- Custo inicial inferior. A galvanização a fogo, de modo geral, possui custos muito competitivos quando comparados a outras formas de proteção especificadas na proteção do aço. O custo de aplicação de revestimentos que requerem mão de obra intensiva, como a pintura, tem crescido mais do que os custos de aplicação (em fábrica) da galvanização a fogo [7].

- Custo menor de manutenção a longo prazo. Mesmo nos casos onde o custo inicial da galvanização a fogo é maior do que revestimentos alternativos, a galvanização apresenta menores custos de manutenção ao longo da vida útil do componente/estrutura. A manutenção é ainda mais cara quando as estruturas estão localizadas em áreas remotas [7].

- Vida longa. A expectativa de vida de revestimentos galvanizados aplicados sobre componentes estruturais excede os 40 anos na maior parte dos ambientes rurais, e se situa entre 10 a 30 anos na maior parte dos ambientes agressivos, urbanos e costeiros [7].

- Preparo superficial. A imersão em ácido, como pré-tratamento, garante a limpeza uniforme das superfícies de aço. Em contraste, revestimentos orgânicos tradicionais devem ser aplicados sobre superfícies limpas com jato abrasivo (em geral, de acordo com a Norma ISO 8501-17, em grau Sa 2 ½, ou superior) e inspecionadas. Adicionalmente, a aplicação de revestimentos orgânicos é limitada em termos das condições ambientais e umidade relativa na época da aplicação. Isto adiciona custo na aplicação de um sistema de pintura robusto [7].

- Adesão. O revestimento obtido através da galvanização a fogo está ligado metalurgicamente ao substrato de aço [7].

- Contaminação ambiental. O revestimento não é tóxico e não contém substâncias voláteis [7].

- Velocidade na aplicação do revestimento. Um revestimento protetor é aplicado em minutos. Um sistema de pintura tradicional pode levar vários dias. A aplicação do revestimento galvanizado não depende das condições do tempo [7].

- Proteção uniforme. Todas as superfícies de um componente galvanizado a fogo são protegidas tanto internamente quanto externamente, incluindo rebaixos, cantos-vivos e áreas inacessíveis à aplicação de outros métodos de revestimento [7].

- Proteção de sacrifício em áreas danificadas. Como dito anteriormente, o revestimento de sacrifício fornece proteção catódica às pequenas áreas de aço expostas à atmosfera, como poros e riscos. Diferentemente dos revestimentos orgânicos, pequenas áreas danificadas não necessitam de retoques; a corrosão sob o revestimento não é possível quando se utilizam revestimentos de sacrifício [7].

A técnica, entretanto, também possui algumas desvantagens. As principais podem ser descritas como:

- A galvanização a fogo não pode ser feita no canteiro de obras. O processo só pode ser feito em uma unidade industrial, a galvanizadora [2].

- A coloração do zinco somente pode ser alterada através da pintura [2].
- As dimensões dos componentes ou estrutura a galvanizar são limitadas pelas dimensões da cuba de zinco líquido [2].
- A alta temperatura do banho pode causar distorções em certos componentes. Existe o risco de que, painéis grandes e planos, não enrijecidos, possam sofrer distorções, assim como o empenamento de perfis I, H ou U, de grandes dimensões e pequena espessura de alma/mesas. Um bom projeto aliado à boa prática de galvanização previne as distorções [2].
- A soldagem de componentes de aço galvanizados a fogo pode demandar procedimentos diferentes daqueles demandados pelos aços não revestidos. A soldagem de componentes galvanizados resultará na perda, em algum nível, de parte da camada de revestimento. A camada é volatilizada durante o processo. Torna-se necessário, assim, o condicionamento do revestimento ao longo do cordão de solda e áreas adjacentes, através da metalização, da utilização de tintas ricas em zinco ou outro método [2].

2.4 Etapas do processo de galvanização a fogo

2.4.1 Desengraxe

Durante o processo de desengraxe, a estrutura de aço é submersa em uma solução alcalina quente, como soda caustica em torno de 70 – 90°C. Esse processo remove graxa, sujeira, incrustações e outros contaminantes da superfície do material. A duração da imersão depende do grau de contaminação. No entanto, a duração típica do processo de desengraxe é de 5 a 10 minutos. Além disso uma leve agitação da solução de limpeza durante a imersão pode aumentar a eficiência do processo [8].

2.4.2 Lavagem

O material é imerso no tanque de água para lavagem, com o objetivo de remover qualquer resíduo sobre a peça para evitar a contaminação dos tratamentos subsequentes [8].

2.4.3 Decapagem ácida

Esta etapa da preparação da superfície envolve a imersão do material em um banho

de solução de Ácido Sulfúrico diluído a quente (60 – 70 °C) ou solução de Ácido Clorídrico a temperatura ambiente para remover incrustações e a ferrugem [8].

Vale ressaltar que uma etapa de decapagem inadequada pode reduzir significativamente a qualidade do revestimento protetor. Além disso, a quantidade excessiva de incrustações e ferrugem, que não são removidas durante o processo de decapagem, entra no banho de galvanização e aumenta a quantidade de cinzas / escória de zinco, aumentando o consumo de zinco e diminuindo a eficiência do processo de galvanização [8].

Uma camada típica de oxidação apresenta os seguintes elementos e compostos:

- Fe (Ferro Base)
- FeO (Óxido de ferro em um estado menos oxidado)
- Fe₃O₄ (Óxido de ferro em um estado intermediário de oxidação)
- Fe₂O₃ (Óxido de ferro em seu estado mais oxidado)

Características:

- Camada de FeO contribui com 80% da espessura da camada total e é o elemento mais solúvel em ácidos;
- Camada de Fe₃O₄ contribui com cerca de 18% e é menos solúvel do que a anterior;
- A camada de Fe₂O₃ contribui com o restante de 2% e corresponde ao estado mais estável e menos solúvel destes óxidos.

Aspecto prático: o ácido clorídrico é o mais comumente usado nas galvanizações brasileiras, nas concentrações de 6 a 12% [9].

Ataque do ácido: através das rachaduras e poros existentes na camada de oxidação, até atingir o substrato de FeO, promovendo sua dissolução e propiciando o destacamento da camada de óxido [9].

Quimicamente, o elemento mais solúvel nestas circunstâncias é o Fe Base através da reação:



Cuidado especial: Ocorre a geração de hidrogênio nesta reação que, se por um lado auxilia mecanicamente a remoção da camada, por outro, dissolve-se no Ferro Base fragilizando a peça (fragilização por hidrogênio) [9].

Utilizam-se então:

- Inibidores (reduzem o ataque do ácido ao Ferro Base)

- Substâncias que promovam redução da tensão superficial entre o ácido decapante e a peça (ação umectante, facilitando seu “molhamento”);
- Agitação e aquecimento aumentam a velocidade de decapagem [9].

2.4.4 Fluxagem

A ação do fluxante processa-se sob duas formas:

- Parte é consumida na dissolução e escorificação dos resíduos remanescentes
- O restante exerce a função umectante (ou mordente) proporcionando um eficiente molhamento da peça pelo zinco fundido [9].

Principais componentes de um fluxante

- São compostos químicos de cloreto de zinco (ZnCl_2) e cloreto de amônio (NH_4Cl), formando sais duplos;
- A grande vantagem de utilização de fluxos baseados em cloretos duplos de zinco e amônia é a redução drástica na formação de borra e a melhor qualidade do acabamento;
- Concentrações variáveis de sal duplo entre 5 a 30%, dependendo do tipo de peças tratadas, em temperaturas de 65°C a 100°C [9].

2.4.5 Imersão a Quente – “Zincagem a Quente”

Imersão do substrato de aço, limpo e adequadamente preparado em um banho de zinco líquido, dentro de uma cuba metálica ou cerâmica, a uma temperatura em torno de 445°C até 460°C, oferecendo uma espessura de camada de zinco de 25 até 250µm [10]. A figura 5 ilustra o tempo de vida esperado do revestimento de acordo com sua espessura e o ambiente onde está inserido [10].

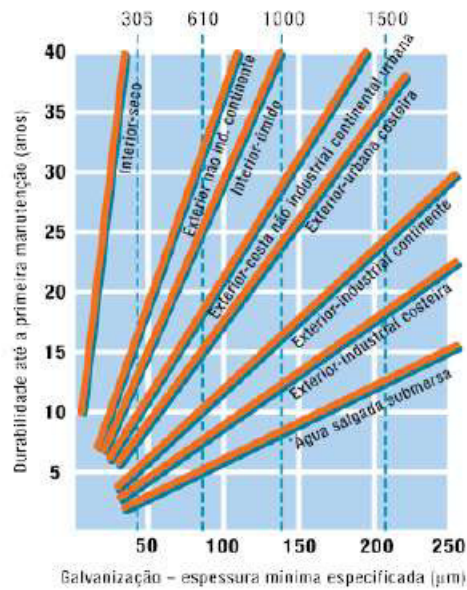


Figura 5 – Durabilidade do revestimento de acordo com a espessura e o ambiente [10].

Explicação físico-química metalúrgica

- Durante a imersão, ocorre difusão do zinco no substrato de aço, havendo uma reação metalúrgica com formação de intermetálicos (compostos Fe-Zn) cuja composição varia na espessura da camada, sendo que a porção mais externa é constituída basicamente de zinco puro;
- Para o aço baixo-carbono revestido em banho de zinco fundido, sem nenhum elemento de adição e para as condições de operação comumente utilizadas, obtém-se um revestimento constituído por quatro fases [9].

Características principais das fases intermetálicas, explicadas na figura 6.

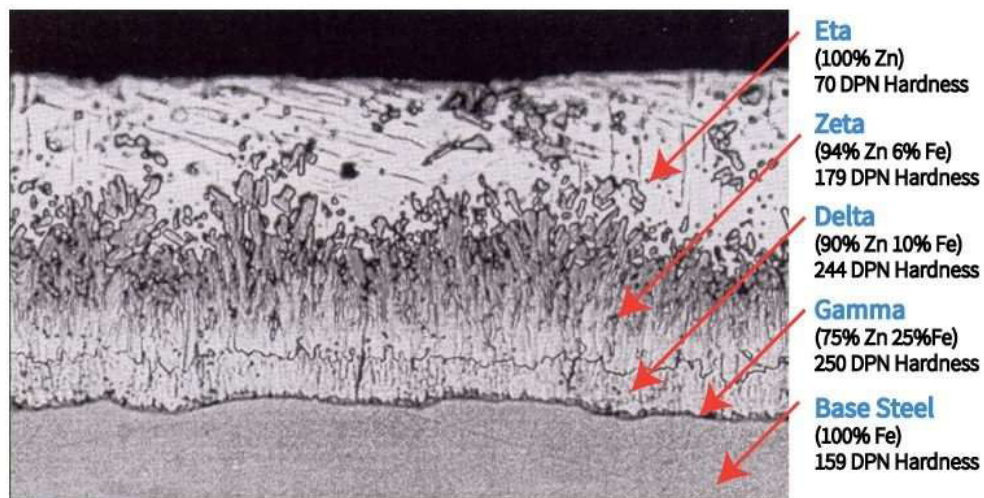


Figura 6 - Microestrutura de um típico revestimento Galvanizado a fogo mostrando as camadas intermetálicas e as variações de rigidez [11].

- As três primeiras fases são formadas devido a reação entre o zinco fundido e o aço, chamadas de fases intermetálicas, denominadas de: γ (gama), δ (delta) e ξ (zeta);
- Esta reação pode continuar após a retirada do aço de dentro da cuba, se a velocidade de resfriamento for baixa;
- A última fase, denominada Eta (de zinco puro) é formada pela solidificação do zinco fundido aderido à peça por arraste.
- A micrografia também mostra a Dureza Vickers (DPN); quanto maior o número maior a dureza. A dureza dessas camadas internas oferece excepcional resistência a abrasão. Por fora, essa camada é bastante dúctil, o que fornece alguma resistência ao impacto, que juntamente com as camadas internas, torna muito difícil danificar o revestimento por Galvanização a fogo [9].

2.4.6 Resfriamento

Aconselha-se um resfriamento rápido em água, para que cesse o crescimento das camadas de liga, evitando-se uma cristalização grosseira e frágil [9].

2.4.7 Passivação

Trata-se de um banho rápido em soluções cromatizantes, à base de ácido crômico e bicromato de sódio, com a finalidade de retardar o aparecimento da “corrosão branca” (capa protetora em torno de 0,5 μm de cromato de zinco insolúvel) [9].

Esta passivação confere ao zincado um aspecto ligeiramente amarelado; sendo mais claro quanto menor a concentração da solução ou menor o tempo de imersão [9].

Quando houver preocupações com as condições ambientais e / ou de armazenamento às quais o aço galvanizado será exposto, tratamento de passivação podem ser usados para evitar a formação de manchas de armazenamento úmidas. Geralmente, os revestimentos de passivação duram cerca de seis semanas antes de serem consumidos. Nesse momento, o aço galvanizado começará a resistir naturalmente [12].

A passivação deve ser evitada se a peça for revestida em duplex (pintura ou revestimento em pó sobre o aço galvanizado), pois pode afetar a adesão do sistema de revestimento superior [9].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Amostras 1 - No presente estudo foi utilizado duas amostra de um tubo quadrado metalon de lados 40 x 40mm, espessura de 2,0mm e comprimento de 150mm, uma das amostras contendo um furo na parte inferior de uma face da tampa de vedação e outro furo na parte superior da face oposta para a ventilação de ar, sendo produzidos a partir de bobinas de aço de baixo teor de carbono SAE/ABNT 1008/1012, fornecida pela empresa Aço Cearense; a outra amostra, semelhante a primeira, mas não contendo os furos de ventilação e escoamento; possuindo uma pequena alça para suspensão no processo de galvanização a fogo; como demonstrado na figura 7. Estas amostras foram produzidas na oficina da empresa Zanatta Estufas Agrícolas, para reproduzir uma situação vivenciada na indústria de uma estrutura metálica sem furos de ventilação e escoamento de zinco fundido, e analisarmos a qualidade do recobrimento após todo o processo de limpeza química da superfície e imersão no zinco fundido.

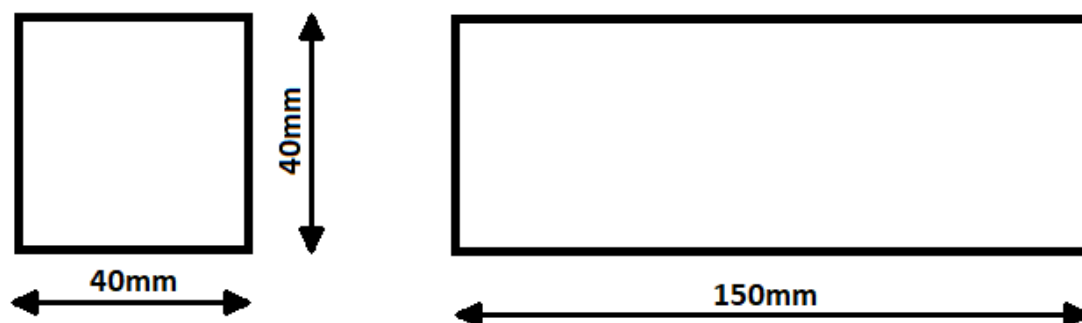


Figura 7- Amostra de tubo metálico

Amostras 2 – Duas amostras de chapa de aço laminada a quente retangular de medidas 100mm X 150mm com espessura de 4,25mm, com um furo na parte superior para suspensão no processo de galvanização a fogo, produzidas na oficina da empresa Zanatta Estufas Agrícolas, uma destas amostras estava com tinta epóxi em sua superfície simulando uma situação real vivenciada a indústria e a outra não continha respingos de tinta, após o processo de galvanização foi analisada a qualidade do recobrimento, a peça é mostrada na figura 8.

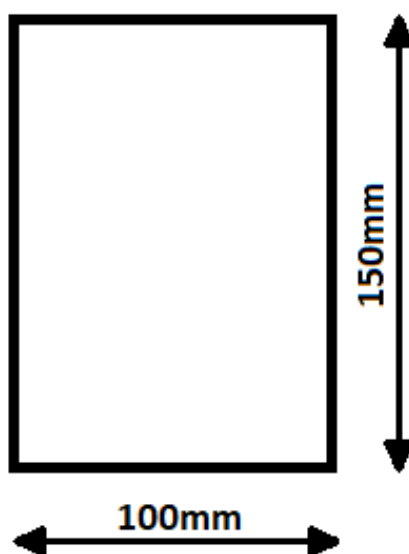


Figura 8 – Amostra de chapa de aço

Amostra 3 - Uma peça de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 90 X 60 X 10 mm, espessura de 2,00mm e comprimento de 2,0m, com um furo para sustentação no processo de galvanização a fogo, e foi produzida com chapa laminada a frio fornecida pela empresa ArcelorMittal, todo o processo de corte e dobra foi realizado pela empresa Zanatta Estruturas Agrícolas, com a superfície com tinta epóxi para teste de qualidade após o processo de Galvanização a Fogo, o desenho técnico é mostrado na figura 9.

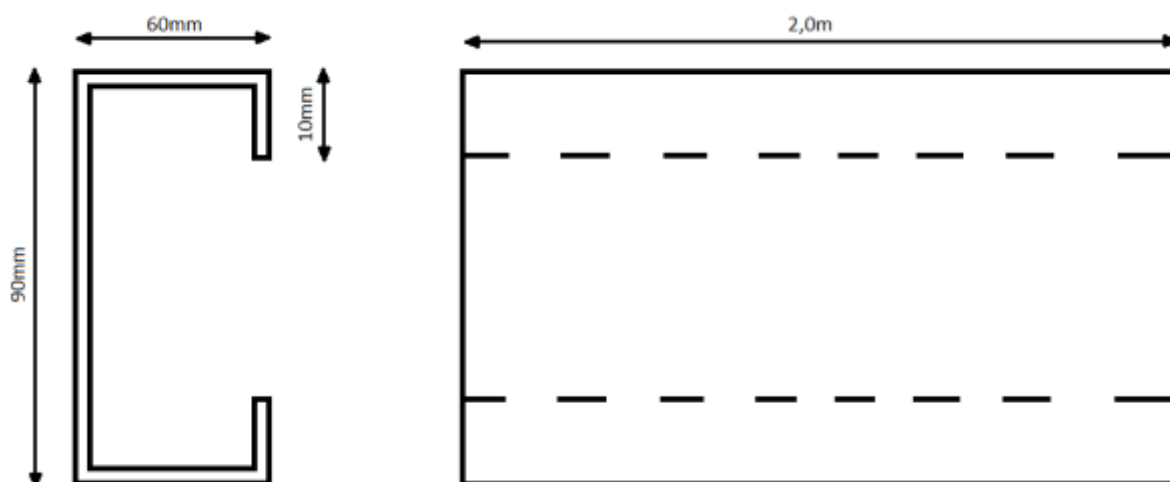


Figura 9 – Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm

Amostras 4 – Na figura 10 mostra duas amostras de peças de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm na espessura de 2,00mm e comprimento de 150mm, com uma pequena chapa soldada na extremidade para efeito de testes e sustentação no processo de galvanização a fogo, uma destas amostras contendo um furo para ventilação de ar para evitar a formação de uma bolha de ar, sendo produzida com chapa laminada a frio fornecida pela empresa ArcelorMittal, todo o processo de corte e dobra foi realizado pela empresa Zanatta Estruturas Agrícolas.

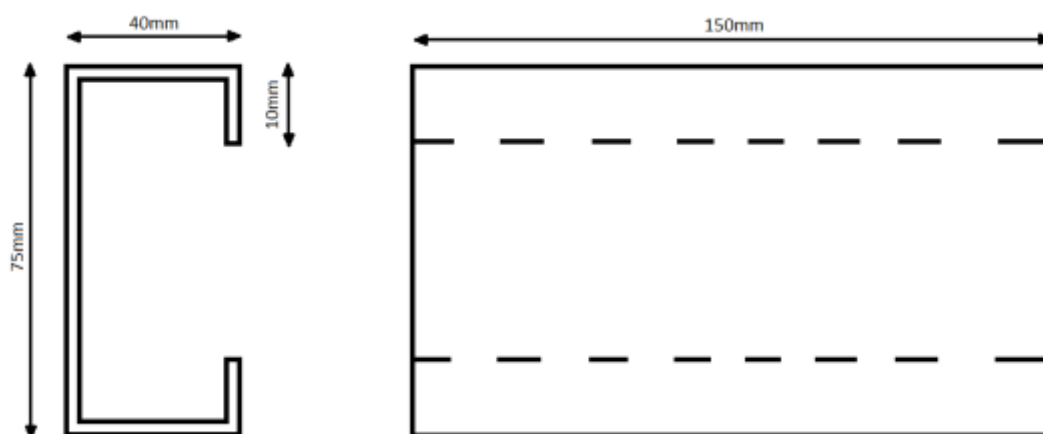


Figura 10 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação da superfície

Todas as peças foram submetidas a limpeza de superfície seguindo todos os procedimentos padrão seguidos na indústria de galvanização a fogo, o desengraxe foi realizado na estrutura da empresa Zanatta Estufas Agrícolas, onde é eliminada todos os contaminantes orgânicos como terra, graxa e óleos. O desengraxante é constituído de Hidróxido de sódio a uma temperatura de 80°C, com uma concentração de 3.8% (ideal 3,0% – 6,0%) e um pH de 13.0 (ideal pH 11,0 - 15,0), com a duração de 5 minutos.

Após o processo de desengraxe, todas as peças foram lavadas no tanque de enxague.

Posteriormente as amostras foram para o tanque de decapagem ácida, com uma solução de ácido clorídrico com uma concentração de 12.42% na temperatura ambiente, para a eliminação de toda a camada de óxido de ferro na superfície das peças, com a duração de 6 minutos.

Após o processo de decapagem ácida, todas as peças foram lavadas no tanque de

enxague.

A próxima etapa do qual as amostras foram submetidas foi a Fluxagem, que é a última etapa de preparação da superfície para a galvanização a fogo, em um tanque com a solução de cloreto de zinco e amônia com pH de 4.0 (ideal pH 3,0 - 6,0) e a concentração de ferro igual a 3.8 g/L (ideal até 5,0 g/L), com o objetivo de eliminar qualquer camada de óxido de ferro restante e impedir a formação de mais óxidos até a imersão no zinco fundido.

3.2.2 Galvanização a fogo e passivação das amostras

Todas as amostras foram imersas em um tanque com zinco fundido na empresa Zanatta Estufas Agrícolas, com pureza de 98% a uma temperatura de 461°C, com a duração de 2 minutos e posteriormente retirado o excesso de zinco com a vibração mecânica da correia transportadora.

Após o revestimento com zinco, as amostras foram para o tanque de passivação com uma solução de ácido crômico com pH de 5.6 (ideal pH 5,0 - 7,0) e concentração de 7.88 g/L (ideal até 8,0 g/L), para evitar a corrosão branca.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Galvanização a fogo das amostras 1

A peça mostrada nas figuras 11 e 12, mostra que a superfície externa permaneceu sem revestimento de zinco fundido, expondo o metal base a umidade atmosférica e como consequência apresentou corrosão generalizada em toda a superfície. A falta da camada protetora ocorreu devido a peça não conter furos para drenagem e escoamento de zinco líquido, reproduzindo uma situação vivenciada na indústria, o volume de ar contido na peça fez com que a estrutura permanecesse boiando na cuba de galvanização, fazendo que o zinco fundido não fluísse livremente dentro e ao redor da amostra. Afetando a qualidade e segurança do processo de galvanização a fogo na referida amostra.



Figura 11– Amostra de tubo metálico com regiões sem revestimento de zinco fundido



Figura 12 - Amostra de tubo metálico com regiões sem revestimento de zinco fundido

A imersão de uma peça selada em zinco fundido resultará em vapor superaquecido preso no interior devido a umidade, levando a explosão. Qualquer fluido preso do pré-tratamento, expandirá rapidamente quando mergulhado em zinco fundido e também é uma preocupação de segurança [13].

O ar preso devido a ventilação inadequada na peça tem dois efeitos na Galvanização:

1) Impedirá que as soluções de pré-tratamento limpem a superfície da peça e / ou impedi que o zinco entre em contato com a superfície, não formando o revestimento galvanizado.

2) Pode fazer com que a peça flutue no banho de zinco, devido às densidades semelhantes do zinco fundido e do aço. Para seções ocas, a regra geral é que se a peça contém mais de 15% de seu volume interno com ar, ela não afundará no zinco fundido.

Portanto, os orifícios de ventilação e drenagem precisam ser fornecidos para permitir que o ar e a umidade escapem e o zinco escoe normalmente no exterior e interior da peça.

A densidade e viscosidade do zinco fundido também são fatores importantes para permitir a drenagem adequada de zinco fundido nas peças [13].

A peça mostrada nas figuras 13 e 14 continham os furos necessários para drenagem e ventilação, fazendo com que o zinco fluísse sem resistência dentro e fora da peça, resultando em uma galvanização de alta qualidade, reduzindo os custos dos revestimentos e garantindo a segurança do pessoal da galvanização.



Figura 13 – Amostra de tubo metalon com furos para drenagem e ventilação



Figura 14 - Amostra de tubo metalon com furos para drenagem e ventilação

4.2 Galvanização a fogo das amostras 2 e 3

A amostra 3 continha tinta epóxi em pequenos lugares em sua superfície, como mostrado na figura 15, sendo considerado como contaminante da peça a ser galvanizada, pois a mesma após a sua aplicação, secagem e / ou cura converte-se em um filme sólido depositado sobre o substrato metálico, apresentando resistência a maioria dos solventes e ao ataque químico [14].



Figura 15 - Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm com regiões revestidas de tinta epóxi

A amostra 2 e 3 nas figuras 16 e 17, após o processo de galvanização a fogo apresentaram falta de recobrimento de zinco em sua superfície, os banhos de desengraxe e decapagem ácida não são capazes de remover a tinta epóxi, e a mesma tornou-se uma barreira para a difusão do zinco no substrato metálico. A insistência de submeter a peça aos banhos de pré-tratamento serve apenas para espalhar a contaminação [15].



Figura 16 - Amostra de chapa de aço apresentando regiões sem revestimento de zinco fundido



Figura 17 – Amostra perfil estrutural enrijecido 90 X 60 X 10mm com regiões sem revestimento de zinco fundido

A amostra 2 na figura 18, apresenta alta qualidade no processo de galvanização a fogo, pois a tinta epóxi foi retirada pelo processo de jateamento abrasivo, que consiste no lançamento de partículas sólidas em alta velocidade contra a superfície, promovendo o desgaste e remoção de camada superficial desta, geralmente de baixa tenacidade, tais como óxidos e revestimentos. Ao contrário de processo como o lixamento, o emprego de uma distribuição granulométrica adequada no abrasivo permite a obtenção de um substrato isento de oxidação visível e rugoso, excelente para a aderência de revestimentos anticorrosivos. Diversos tipos de

abrasivos são empregados no jateamento, podendo-se citar os metálicos como granalha de aço, ferro maleável, ferro fundido, alumínio, latão e cobre, os sintéticos como a alumina, o carboneto de silício, as escórias metalúrgicas e siderúrgicas [16].



Figura 18 – Amostra de chapa de aço com alta qualidade no revestimento de zinco fundido

4.3 Galvanização a fogo das amostras 4

A amostra 4 é visualizada na figura 19, apresentando uma região com manchas escuras, onde possivelmente apresentou falhas no processo de recobrimento com zinco fundido mostrado na figura 20, este problema é ocasionado pelo bloqueio e aprisionamento de ar, fazendo com que o zinco fundido não entre em contato com o metal base. Este ar aprisionamento pode superaquecer e causar pequenas explosões, podendo causar acidentes de trabalho para os operadores da linha de galvanização.



Figura 19 - Amostra de perfil enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, sem furos de ventilação



Figura 20 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, sem furos de ventilação, apresentando manchas e pequenos pontos de acúmulo de cinzas

Mudando o posicionamento da peça que não contém furos de ventilação e drenagem é criado uma armadilha de zinco, este acúmulo desnecessário de metal de recobrimento aumenta o peso final da estrutura e aumenta o desperdício de matéria prima da galvanização a fogo, como demonstrado na figura 21.



Figura 21 – Armadilha de zinco na estrutura a ser galvanizada [adaptado de 17]

A amostra 4 mostrada na figura 22, apresenta o furo necessário para a ventilação e escoamento na parte mais alta da seção, impedindo o bloqueio de ar. Consequentemente o zinco fundido recobriu toda a superfície da peça, e o revestimento apresentou uma qualidade superior, comparada com a amostra que não continha os furos de ventilação, mostrada na figura 23.



Figura 22 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, com furos de ventilação



Figura 23 - Amostra de perfil estrutural enrijecido de aço carbono 75 X 40 X 10mm, com furos de ventilação e apresentando alta qualidade no produto final galvanizado

Para uma galvanização eficaz, as soluções de limpeza e o zinco fundido devem fluir sem resistência indevida dentro, sobre, através e fora da peça fabricada. Falhas ao fornecer o fluxo livre e sem impedimentos pode resultar em complicações para o galvanizador e o cliente.

O projeto inadequado resulta em aparência ruim, manchas e acúmulo excessivo de zinco. Todos estes são desnecessários e caros, isto é um ótimo exemplo de como a comunicação ao longo do projeto é necessária.

Algumas fabricações comuns em que a drenagem é importante são: placas de reforço, reforço, placas finais e mão francesa. Seguindo, estas são as melhores práticas de design que ajudarão a garantir revestimentos da mais alta qualidade [18].

1) Onde placas de reforço são usadas, deve-se cortar generosamente os cantos para fornecer uma drenagem livre. Se não for possível realizar estes cortes, furos de 1/2 polegada (13mm) de diâmetro devem ser colocadas nas placas, o mais próximo possível dos cantos, ver figura 24. [18]

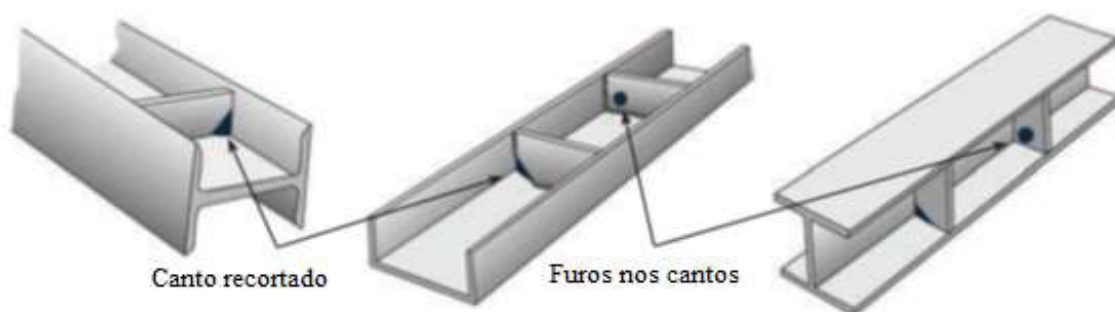


Figura 24 – Localização dos furos nas peças metálicas para o zinco fundido fluir sem resistência [adaptado de 20]

2) Para garantir um fluxo desimpedido de soluções de limpeza, todos os reforços e mão francesa, devem ser cortadas com um mínimo de 3/4 polegadas (19mm), ver na figura 25. Forneça orifícios de 13mm em placas terminais em forma de aço laminado para permitir o acesso de zinco fundido durante a imersão no banho de galvanização e drenagem durante a retirada [18].



Figura 25 – Abertura na mão francesa ou reforços para maior fluidez do zinco [20]

5 CONCLUSÃO

A amostra 1 apresentou falhas no revestimento devido a peça não conter furos para drenagem e ventilação de ar, fazendo com que a peça boiasse na cuba de zinco fundido. Para solucionar este problema de design de projeto é necessário a presença de furos de diâmetro mínimo de 10,0 mm nas faces opostas das peças, diretamente na parte inferior de uma face e na parte superior da face oposta. Tal solução proporcionou uma galvanização de alta qualidade.

A amostra 2 e 3 apresentou tinta epóxi em sua superfície, sendo considerado como um contaminante pois converte-se como um filme sólido sobre o substrato metálico, apresentando resistência a remoção nas cubas de limpeza alcalina e ácida. Para solucionar o problema é necessário a remoção por jateamento abrasivo, para a retirada total da tinta epóxi na superfície, promovendo um substrato limpo de contaminantes e apresentando alta qualidade da galvanização após o processo de revestimento de zinco líquido.

A amostra 4 apresentou erros de projeto, pois em sua estrutura havia uma região onde ocorreu a formação de uma bolsa de ar aprisionado, impedindo a aderência do revestimento de zinco no substrato metálico. Para solucionar este erro de projeto é necessário um furo de ventilação e escoamento na parte superior da peça, impedindo o bloqueio de ar. Tal medida resultou num revestimento de alta qualidade no interior e exterior da amostra.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS

- Inspeção de qualidade de acordo com as normas ABNT em amostras de indústrias de galvanização.
- Estudo sobre pintura sobre o aço galvanizado – Sistema Duplex.
- Análise de dureza nas camadas intermetálicas obtidas na galvanização a fogo.
- Efeitos da escória de soldagem na aderência do zinco fundido

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION – **Performance of hot dip galvanized steel products in the atmosphere, soil, water concrete and more** (2010).
- [2] PANNONI, Fabio Domingos; **Princípios da Galvanização a Fogo**, Centro Brasileiro da Construção em aço, (2008)
- [3] ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DO ZINCO – **Revestimento de zinco que protege o aço**, p 6 – 7 (2000).
- [4] INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSSOS - **Guia de galvanização por imersão a quente** (2019).
- [5] DATTILO, M., Cole, E.R., JR., O'Keefe, T.J.; **Electrogalvanizing using zinc recovered from nonferrous smelter dusts**, Conservation & Recycling:. p. 55 – 56 (1984).
- [6] INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSSOS. **Página Institucional**. Disponível em: <<http://www.icz.org.br/porque-galvanizar.php>>. Acesso 11 setembro 2019
- [7] INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSSOS – **Dez boas razões para galvanizar por imersão a quente** (2016).
- [8] ARK NOVIN – HOT DIP GALVANIZING. **Página institucional**. Disponível em: <<http://www.arknovin.com/en/Technical-Information/hot-dip-galvanizing-process.html>>. Acesso 10 setembro 2019
- [9] INSTITUTO DOS METAIS NÃO FERROSSOS. **Página institucional**. Disponível em: <<http://www.icz.org.br/fluxograma-de-um-processo-de-galvanizacao-a-fogo.php>>. Acesso 15 setembro 2019
- [10] LUMEGAL INDUSTRIA E COMÉRCIO – **Manual de zincagem por imersão a quente** (2007).
- [11] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION - **Página institucional**. Disponível em: <<https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/the-hdg-coating>> Acesso 17 setembro 2019
- [12] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. **Página institucional**. Disponível em: <<http://galvanizeit.org/specification-and-inspection/post-hdg-considerations/passivation>>. Acesso em 2 outubro 2019
- [13] GALVANIZERS ASSOCIATION OF AUSTRALIA – **Design guide for hot dip galvanizing – best practice for venting and draining** (2015).
- [14] MANO, E. B. – **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1985.

- [15] GALVANIZERS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Página institucional.** Disponível em: <<http://gaa.com.au/surface-preparation>>. Acesso em 5 outubro 2019
- [16] ATAMAN, N. – **Utilization of industrial wastes of Turkey as abrasive in surface preparation technologies.** Turkey, School of Natural and Applied Sciences of middle East Technical University, 2005.
- [17] GALVANIZERS ASSOCIATION OF AUSTRALIA – **Design guide for hot dip galvanizing – best practice for venting and draining** (2015).
- [18] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION – **The design of products to be hot dip galvanized after fabrication** (2018).