

PRINCÍPIOS DO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO À QUENTE

OSMAR BARBOZA DE SOUSA JÚNIOR¹, LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL²,
ROGER ANDRÉ HACKENHAAR³

RESUMO

Galvanização à quente ou à fogo é o processo de aplicação de revestimento de zinco a componentes de aço ou ferro fundido, através da imersão do componente em um banho de zinco fundido. O presente trabalho apresenta os princípios básicos da galvanização à quente, desde as vantagens do processo até a determinação da espessura ideal depositada. Diferentes processos podem ser utilizados no revestimento de superfícies metálicas com zinco: a galvanização por imersão a quente ou zincagem a fogo, a eletrodeposição ou zincagem a frio e, também a metalização ou aspersão térmica, sendo o primeiro mais utilizado por ser o mais econômico. O revestimento de chapas de aço por imersão a quente cresceu significativamente, impulsionado pelas necessidades da indústria automotiva, de construção civil e linha branca. Estes segmentos utilizam os aços galvanizados por imersão à quente para a fabricação de carrocerias, longarinas, barras de reforço lateral e de teto, refrigeradores, freezers, fogões, máquinas de lavar e outros. As características do produto dependem da presença e distribuição desses compostos intermediários zinco/ferro no revestimento e o desenvolvimento de cada um dos compostos podem ser afetados pelo tempo de imersão, temperatura, taxa de resfriamento e composição química do banho e do substrato de aço.

PALAVRA-CHAVES: Fragilização. Galvanização a fogo. Revestimento. Zinco.

PRINCIPLES OF PROCESS TO HOT GALVANIZED

ABSTRACT

Hot dip galvanizing is the process of applying zinc coating to components of steel or cast iron, immersing the component in a bath of molten zinc. This paper presents the basic principles of the hot galvanizing, since the advantages of the process to determine the optimal thickness deposited. Different processes can be used to coat metal surfaces with zinc: a hot dip galvanizing galvanizing or fire, electroplating or galvanizing cold and also the plating or thermal spraying, being the most used because it is the most economical. The coated sheet steel hot dip in the continuous galvanizing process called, has grown significantly, driven by the needs of the automotive, construction and white goods. These segments using steels hot dip galvanized for manufacturing truck bodies, stringers, reinforcing bars and lateral ceiling, refrigerators, freezers, stoves, washing machines and others. Product features dependent on the presence and distribution of these intermediates zinc / iron coating and development of each of the compounds can

¹Escola de Engenharia, Prominp - Rio Grande do Sul, Brasil; Mestre em Engenharia Mecânica; Email: osmar_barboza@yahoo.com.br

²Escola de Engenharia, Grupo de Estudos em Fabricação e Materiais da FURG/RS; Prof. Doutor em Ciências dos Materiais; Email:lucianobiehl@furg.br

³Aluno do Curso de Engenharia Mecânica Naval da FURG/RS; Email: rogerhbvb@gmail.com

be adversely affected by immersion time, temperature, cooling rate and chemical composition of the bath and the steel substrate.

KEYWORDS: Hot-dip Galvanizing. Coating. Zinc. Thickness. Embrittlement.

1. INTRODUÇÃO

A galvanização a fogo (também chamada de galvanização à quente) é um processo de aplicação de revestimento de zinco a componentes de aço ou ferro fundido através da imersão do componente em um banho de zinco fundido a temperatura aproximada de 450°C, para que haja uma boa interação entre os elementos envolvidos. A simplicidade do processo de galvanização a fogo é uma vantagem sobre outros métodos de proteção contra corrosão, tendo o primeiro registro do uso do zinco na construção datado de 79 D.C. [1-4].

A história da galvanização à quente tem início no ano de 1741, quando um químico francês chamado P.J. Melouin descobriu que o zinco era capaz de proteger o aço da corrosão. Ele apresentou os fundamentos do método em uma reunião na Academia Real Francesa. Em 1829, Michael Faraday descobriu a capacidade de sacrifício do zinco. Entretanto, o método não foi muito utilizado até que outro químico francês, Sorel, obteve a patente, em 10 de maio de 1837, introduzindo a decapagem sulfúrica e fluxagem com cloreto de amônio como etapas anteriores e fundamentais do processo. A principal parte do processo patenteado por Sorel é ainda atualmente utilizada. Em um apêndice a sua patente, datado de julho de 1837, Sorel denominou o método de “galvanização”, referindo-se a cela galvânica que é criada quando o revestimento de zinco é danificado [1,2].

Uma patente inglesa para um processo similar foi depositada em 1837. Em 1850, a indústria de galvanização inglesa já utilizava 10.000 ton de zinco por ano na proteção do aço. A primeira planta de galvanização dos Estados Unidos foi aberta em 1870 [1,2].

O termo foi subsequentemente adotado a outros métodos de revestimento do aço pelo zinco e, algumas vezes, é utilizado para a deposição metálica eletrolítica em geral. Para evitar confusão, a imersão do aço em zinco líquido deve ser referida como galvanização a fogo ou, alternativamente, galvanização à quente [1].

Neste artigo foi feita uma revisão do processo de galvanização à quente, apresentando-se suas diversas vantagens, desvantagens e características.

2. TIPOS DE PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO

O processo de imersão a quente consiste na imersão do aço em um banho de zinco fundido (445°C a 465°C). Durante a imersão ocorre um processo de difusão atômica, de modo

a formar uma camada de liga na superfície do aço, cuja composição varia através da espessura da camada, tornando-se progressivamente mais rica em zinco a medida que aumenta a espessura que varia entre 5 e 55 micra quando o processo é contínuo (por exemplo, chapas que entram e saem do banho a velocidade constante) e entre 35 e 400 micra quando descontínuo. A forma do revestimento, assim como a espessura da camada é diretamente ligada à velocidade da linha e à cinética de deposição dos principais elementos envolvidos, tais como Fe, Zn e Al [3,4].

A eletrodeposição é o processo pelo qual um revestimento de zinco é aplicado sobre a superfície do aço em uma célula eletroquímica contendo uma solução aquosa de sais de zinco. A deposição é feita mediante aplicação de uma diferença de potencial entre a peça de aço (catodo) e um anodo de zinco, que garante a passagem de uma corrente contínua (0,5 a 50 A/cm²). Os eletrodepósitos são constituídos praticamente de zinco puro, não havendo reação significativa entre o aço e o zinco a baixas temperaturas. A vantagem deste método reside na obtenção de revestimentos leves com espessuras geralmente menores que 40 micra e mais dúcteis que na galvanização a quente, onde ocorre a formação de camadas de compostos intermetálicos frágeis de zinco e ferro[1,3].

As velocidades de corrosão dos dois revestimentos são comparáveis, com exceção de que os revestimentos obtidos por imersão a quente tendem a apresentar menos pites do que aqueles obtidos por eletrodeposição. Esta diferença sugere que o potencial específico dos compostos intermetálicos favoreça a corrosão uniforme ou que a existência de ferro nas camadas de intermetálicos seja benéfica. Estudos demonstram que o zinco ligado com 5% ou 8% de ferro desenvolve menos pites do que o zinco puro, em água [1].

A metalização consiste na aspersão do zinco fundido sobre o aço através de uma pistola com um sistema de aquecimento por chama oxiacetilênica ou por arco elétrico. Nestes processos, o zinco é fundido no bocal da pistola e impulsionado por um jato de ar comprimido. No impacto, as partículas metálicas se deformam formando plaquetas finas que aderem ao substrato, produzindo uma camada rugosa e porosa. Com este processo não é possível a obtenção de revestimentos muito finos e suas espessuras variam entre 50 e 200 micra [3].

A galvanização a fogo pode ser encontrada em quase todo tipo de aplicação e indústria onde o aço é empregado. As indústrias de utilidades domésticas, processos químicos, papel e celulose, construção civil, automotiva e de transporte, para numerar algumas poucas tem feito grande uso histórico da galvanização no controle da corrosão. E elas continuam a fazer uso da técnica ainda hoje. Por mais de 140 anos, a galvanização a fogo tem sido um sucesso comercial como método de proteção frente à corrosão de uma grande variedade de aplicações por todo o mundo [1].

No processo de galvanização comum o banho é composto de 99,6% Zn e outras pequenas contaminações, como o Fe arrastado na passagem da chapa de aço, conduzindo

a formação de compostos intermetálicos de Fe–Zn, prejudiciais às propriedades de estampabilidade, resistência à corrosão e aspecto geral. Não existe uma separação definida entre o substrato (ferro, aço, etc) e o zinco, mas uma transição gradual através de uma série de camadas de liga (FIGURA 1) [1,4].

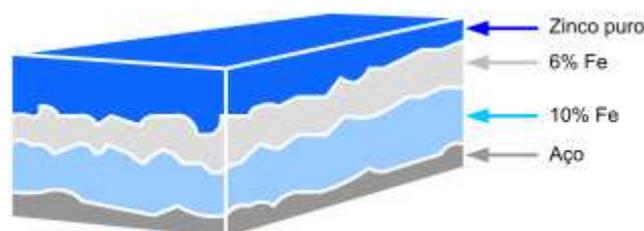


Figura 1 – Seção esquemática de um revestimento galvanizado típico, mostrando as camadas de intermetálicos [1].

O revestimento de chapas de aço por imersão a quente, no processo chamado galvanização contínua, cresceu significativamente na última década, impulsionado pelas necessidades da indústria automotiva, de construção civil e linha branca. Estes segmentos utilizam os aços galvanizados por imersão à quente para a fabricação de carrocerias, longarinas, barras de reforço lateral e de teto, refrigeradores, freezers, fogões, máquinas de lavar, microondas, telhas, engradamento metálico, calhas e fechamentos laterais de galpões. Existem rigorosos requisitos de qualidade para estes produtos, particularmente de qualidade superficial. Abrasões, rugosidade não uniforme e partículas aderidas ao revestimento resultam, normalmente, na rejeição de produtos e, conseqüentemente, em grandes prejuízos para a siderurgia nacional, o que é refletido em redução da competitividade no mercado globalizado. A galvanização pode ser convencional, quando trata da produção de aços revestidos com zinco puro ou galvanização com liga Al-Zn, quando são aplicadas ligas de revestimento. Dentre as ligas de zinco/alumínio, a mais conhecida é o galvalume, com 55% de alumínio e 1,5% de silício e o restante de zinco. Esta liga é comercializada com diversos outros nomes, como: Zincalume[®], Alugalve[®], Aluzink[®], Zincalite[®] e Zalutite[®], tendo sido desenvolvida pela *Bethlehem Steel Corporation* a partir de 1960. Sua produção em escala comercial iniciou-se em 1972, sendo que a concessão de licença para produção em outros países foi iniciada em 1976 [5].

Galvalume são chapas produzidas pelo processo de imersão a quente em liga 55% Al-Zn após terem sido recozidas em atmosfera não-oxidante. Dentro do pote de aplicação do zinco existe um rolo que guia a chapa na passagem pelo zinco ou ligas fundidas, chamado *sink roll*, sustentado lateralmente por mancais dotados de buchas. Estas buchas metálicas são, em geral, fabricadas a partir da fundição de superligas a base de cobalto, denominadas comercialmente de *Triballoy[®] T800*, *Triballoy[®] T400* e *Stellite[®]* [6]. As duas primeiras são ligas

reforçadas por fases de Laves (intermetálicos molibdênio-silício), enquanto a *Stellite*^R é uma liga reforçada por carbonetos. A liga *Triballoy*^R T800 é processada pelo processo PTA na forma de revestimento sobre substrato de aço inoxidável AISI 316L.

A camada protetiva é composta de revestimento externo de zinco e uma camada interfacial entre o revestimento externo e o substrato de aço contendo uma série de compostos intermetálicos. Estes compostos e o seu desenvolvimento são afetados pelo tempo e temperatura de imersão, taxa de resfriamento e composição química do banho e substrato. O desenvolvimento destes compostos intermetálicos é governado pelo fenômeno de difusão do zinco puro no substrato de aço e a formação da camada mais externa, composta praticamente de zinco puro, é função da tensão superficial do banho [3,7].

3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GALVANIZAÇÃO À QUENTE

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 [1,8,9]. As principais vantagens da galvanização à quente, de modo geral são:

a) Pequena manutenção/custo a longo prazo. Mesmo nos casos onde o custo inicial da galvanização a quente 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. Estima-se que o custo anual com corrosão nos EUA seja de US\$ 423 bilhões (3% do PIB) [1,2,8,9].

b) Vida longa. A expectativa de vida de revestimentos galvanizados aplicados sobre componentes estruturais, tais como aço de baixa liga, baixo carbono e ferro fundido, 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, conforme estimativa da norma ISO12944-2 de 1998 [1,2,8,9].

c) Preparo superficial. A imersão em ácido, como pré-tratamento, garante a limpeza uniforme das superfícies de aço. Em contraste, revestimentos orgânicos tradicionais (tintas) devem ser aplicados sobre superfícies limpas com jato abrasivo 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 [1,2,8].

d) Adesão. O revestimento obtido através da galvanização a fogo está ligado metalurgicamente ao substrato de aço, proporcionando alta aderência, tenacidade e confiabilidade no processo. Interessante notar que, diferentemente do processo de pintura,

certas condições operacionais como temperatura, umidade ou qualidade do ar não influenciam no processo de galvanização [1,2,8].

e) Contaminação ambiental. O revestimento não é tóxico e não contém substâncias voláteis [1,2].

f) Velocidade na aplicação do revestimento. Um revestimento protetor é aplicado em minutos. Um sistema de pintura tradicional pode levar vários dias. Como mencionado, a aplicação do revestimento galvanizado não depende das condições do tempo [1,8].

g) 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. A peça a ser zincada pode ser de várias formas e tamanhos, só havendo limitação pelo tamanho da cuba de imersão. Os revestimentos orgânicos (tintas) apresentam, de modo geral, menor espessura nos cantos vivos, devido à tensão superficial. Revestimentos obtidos pela galvanização à quente, por outro lado, são, no mínimo, tão espessos (ou mais) nestes locais, variando uniformemente de 75 a 125 micra, dependendo da aspereza da superfície e composição do metal base [1-3,8].

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

a) A galvanização a fogo não pode ser feita no canteiro de obras. O processo só pode ser feito em uma unidade industrial, a galvanizadora [1].

b) A coloração do zinco somente pode ser alterada através da pintura [1].

c) As dimensões dos componentes ou estrutura a galvanizar são limitadas pelas dimensões da cuba de zinco líquido [1,8].

d) 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/mesa. Um bom projeto aliado à boa prática de galvanização previne as distorções [1].

Em ambientes altamente corrosivos, utiliza-se o sistema *duplex*, uma combinação entre os processos de galvanização e pintura, nesta ordem. Este mecanismo é a solução mais eficiente e econômica, promovendo uma ótima sinergia entre os dois tipos de revestimento, pois a vida útil deste revestimento combinado é maior do que separados [10].

4. PROCESSOS DE FRAGILIZAÇÃO

Sob certas circunstâncias, alguns aços podem perder sua ductilidade e fragilizar. Existem três tipos básicos de mecanismos de fragilização observados que podem acarretar a falha dos aços estruturais galvanizados a quente [11,12]:

a) Fragilização do metal líquido;

- b) Fragilização por hidrogênio;
- c) Fragilização por envelhecimento.

Foi identificado que o metal líquido influencia a plasticidade do aço. A ductilidade diminui com o aumento da quantidade de Zn, principalmente em estruturas soldadas após a galvanização, pois a temperatura do arco elétrico ou maçarico de corte são superiores as temperaturas de fusão (419°C) e vaporização (907°C) do zinco, danificando as zonas recobertas próximas ao cordão de solda e bordas de corte. A mudança da plasticidade foi associada com o mecanismo de fratura da estrutura transcristalina e intercristalina. Foi também observado que a fratura associada com fragilização acontece quando o nível mínimo de deformação e/ou tensão é aplicado [2,11,12].

Hidrogênio pode ser absorvido pelo aço durante o processo de decapagem, não sendo um problema em componentes que não apresentem tensões ou deformações internas, pois serão expelidos rapidamente durante a exposição à temperatura da galvanização [13].

O processo de produção do aço, soldagem e decapagem são possíveis fontes de difusão do hidrogênio, ocasionando o processo de fragilização do metal líquido, que é esperada para aços com tensão de escoamento maior que 335 MPa, e que são utilizados em estruturas soldadas [11].

O processo de fragilização por envelhecimento é causado pelo trabalho a frio (abaixo de 600°C) que certos aços podem ter sofrido, principalmente os de baixo carbono. O nível de fragilização dependerá da composição do aço (presença de N₂) e do tempo de exposição à temperatura de fragilização. De todas as possibilidades de fragilização que podem ocorrer, o processo de fragilização por envelhecimento é o único que pode ser agravado pela galvanização [13].

5. FORMAÇÃO DE TRINCAS

A experiência prática tem mostrado que não há fadiga dos aços devido à galvanização, principalmente para aços de tensão de escoamento entre 235 e 460 MPa galvanizados. Para aços com tensão de escoamento maior que 460 MPa, é recomendado usar um tempo de decapagem (*pickling*) menor, a fim de evitar a fragilização por hidrogênio. Aços rápidos com tensões de escoamento acima de 1000 Mpa podem apresentar micro trincas nas áreas soldadas, principalmente se forem expostos a aquecimento e rápido resfriamento. Interessante notar que caso o material a ser galvanizado trabalhe em condições severas, o resfriamento durante o processo de galvanização das áreas soldadas deve ser feito por ar e não água [11,13].

O limite de dureza da Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou aço com baixo carbono equivalente podem ser variáveis úteis para evitar a ocorrência de fraturas. Espera-se fratura (FIGURA 2) quando a dureza exceda o nível de 34 HRC ou 340 HV, também devido ao hidrogênio. Outro fator que também influencia na formação de trincas é a rigidez estrutural da peça, a qual é responsável por tensões localizadas durante a galvanização à quente [11].

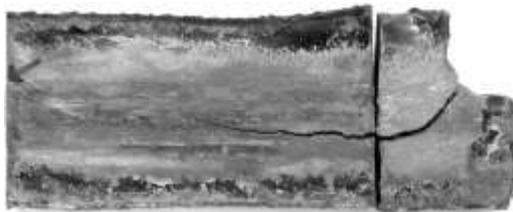


Figura 2 – Fratura em estrutura soldada revestida com zinco [5].

6. ADIÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS DURANTE A GALVANIZAÇÃO

Além da eliminação da reatividade do silício, adições especiais de elementos químicos reduzem a espessura do revestimento, aumentam a ductilidade, melhoram as propriedades mecânicas, influenciam no comportamento em condições corrosivas e no ataque das cubas de galvanização e reduzem o consumo do zinco [7].

O chumbo é um elemento químico freqüentemente adicionado aos banhos de galvanização (FIGURA 3). A sua adição é realizada para aumentar a fluidez do banho (devido à redução da tensão superficial), reduzir o ataque do zinco ao substrato de aço e proteger a cuba contra ataque excessivo do zinco, impedindo o seu desgaste prematuro. O chumbo ainda favorece a formação de espessuras de camada menores, auxiliando no controle do crescimento dos compostos intermetálicos nos aços reativos e reduzindo o consumo de zinco, levando assim a benefícios financeiros importantes para a indústria de galvanização. Entretanto, o chumbo é considerado nocivo ao meio ambiente, sendo, além disso, um elemento acumulativo no organismo humano, aumentando sua concentração até alcançar níveis tóxicos. Em alguns países, o seu uso não é permitido e a pressão de legislações quanto à proibição do chumbo vem crescendo, a fim de estimular o estudo de alternativas melhores para o meio ambiente e saúde do ser humano [7].

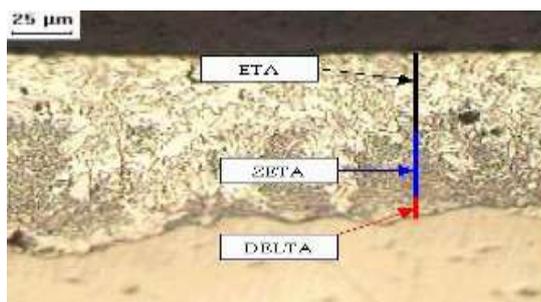


Figura 3: Metalografia de ferro fundido maleável preto galvanizado contendo 1,0% de chumbo. Espessura média: 109 micra [7].

O banho de zinco com pequenas adições de bismuto tem a mesma propriedade de tensão superficial de um banho de zinco com adições de chumbo. Portanto, o bismuto está sendo proposto para substituir o uso de chumbo na galvanização. O bismuto aumenta a fluidez do banho proporcionando peças galvanizadas sem excesso de zinco e tem a vantagem de não ser nocivo ao meio ambiente [7].

O níquel é adicionado ao banho de zinco por proporcionar um revestimento liso e brilhante. Com a utilização de níquel não é obtido grande espessura de revestimento, resultando em uma economia de zinco e tornando as fases contínuas e compactas. A adição de níquel retarda o crescimento da fase DELTA e promove o rápido crescimento da fase ZETA, inibindo assim, a formação das fases intermetálicas zinco/ferro e reduzindo a espessura de camada. É importante observar que para conseguir-se estas baixas espessuras de revestimento, a concentração de bismuto deverá estar abaixo de 600 ppm. Com adições de níquel a camada ZETA torna-se enriquecida, porém sem a formação da camada ETA, o que reduz a espessura final do revestimento, devido ao fato de que o mesmo não apresentará todas as três camadas formadas. Adições de níquel ainda podem levar a formação de siliceto de níquel pela substituição do ferro no composto siliceto de ferro, reduzindo, portanto, a influência do silício no crescimento da fase ZETA [7].

O objetivo da adição de estanho acima de 5000 ppm é obter cristais de zinco maiores e aumentar o brilho. Os cristais da camada ZETA apresentam-se maiores que o usual tornando esta camada menos espessa e mais compacta. Entretanto, o estanho não afeta a formação da fase DELTA. A fase ETA não é formada [7].

A adição de alumínio ao zinco, em quantidades acima de 1400 ppm, inibe o ataque deste sobre o ferro e resulta em um revestimento menos espesso, possuindo pouca ou nenhuma camada de fases intermetálicas. Basicamente, a ação do alumínio é de produzir inicialmente sobre a superfície do aço uma fina camada de uma fase ferro-alumínio, que atuará no controle de crescimento das fases ZETA e ETA, sem formação da fase DELTA. Uma camada de Fe_2Al_5 aparecerá nas camadas próximas ao ferro e $FeAl_3$ mais próxima da parte galvanizada [7].

O bismuto influencia as três fases no revestimento (ETA, ZETA e DELTA), estando presente nas mesmas. Devido à baixa tensão superficial deste elemento (TABELA 1), o mesmo proporciona melhor fluidez ao banho, proporcionando espessuras de revestimentos mais uniformes.

Os revestimentos em aços com alto silício são caracterizados por uma espessa e descontínua fase ZETA e esta descontinuidade é a causa básica para o rápido crescimento.

Ocorre ainda a formação de um grande número de pequenos cristais da fase ETA, livres no revestimento e estes cristais livres permitem o contato da fase desta com o líquido. Estas duas fases são termodinamicamente incompatíveis, resultando, portanto, em aumento da velocidade de reação. Dois métodos são adotados para eliminar a reatividade do silício: um método é galvanizar a temperaturas acima da temperatura peritética de ZETA, onde a fase delta entra em equilíbrio de fase com o líquido e por isso cresce a uma taxa normal. A alternativa é adicionar elementos químicos ao banho de zinco que diminuam a reatividade deste com o aço. A primeira alternativa possui um inconveniente, pois ao utilizar temperaturas altas há um aumento do ataque a cuba de zinco devido ao superaquecimento, favorecendo a formação de trincas e falhas prematuras [7].

Tabela 1: Tensão superficial de elementos de revestimento [7].

Elemento químico	Tensão superficial (N/m)
Bismuto	376
Chumbo	440
Zinco	824

Elementos de liga adicionados durante a galvanização causam efeitos sobre o revestimento. Um exemplo disso é o carbono, que estando abaixo de 0,2%, não afeta o revestimento, em temperaturas normais de galvanização. Entre 0,2% e 0,3%, faz com que as camadas de Zn-Fe tornam-se mais espessas. Já percentuais acima de 0,3% de carbono, ocorre um aumento na velocidade da reação [1].

7. METALIZAÇÃO POR PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA)

O desenvolvimento de ligas reforçadas por compostos intermetálicos a base de alumínio na forma de revestimentos soldados, obtidos pelo processo de PTA, com o intuito de atender solicitações específicas de desgaste como, por exemplo, o desgaste abrasivo agravado por processos de corrosão em metal líquido [5].

Neste sentido, sugere a possibilidade de produzir componentes revestidos pelo processo de PTA, que apresenta a facilidade de controle micro estrutural das ligas depositadas, controle do refinamento das estruturas formadas e reduzida diluição (em relação a outros processos de soldagem). Os revestimentos podem ser produzidos pela mistura de elementos posteriormente depositados ou pela adição de elementos específicos, como alumínio, a ligas comerciais. Em ambos os casos, a deposição é feita pelo processo PTA e o desenvolvimento dos intermetálicos de elevada dureza e resistência ao desgaste ocorre *in situ*, ou seja, durante a deposição [5].

Espera-se obter revestimentos com propriedades mecânicas otimizadas para a aplicação direta em buchas revestidas para componentes usados na produção de chapas galvanizadas por imersão a quente que atendem os setores automobilísticos, de linha branca e de construção civil [5].

8. TIPOS DE REVESTIMENTOS METÁLICOS

Do ponto de vista da resistência a corrosão, os revestimentos metálicos podem ser divididos em duas categorias: revestimentos nobres e de sacrifício [1].

Como o próprio nome diz, os revestimentos nobres (níquel, prata, cobre, chumbo ou cromo), aplicados sobre o aço, são mais nobres do que o metal base. Isto pode ser verificado na série galvânica de metais e ligas na TABELA 2 [1,8].

Tabela 2 – Série galvânica dos principais metais [8].

	Metal	E0/V	
	Magnésio	- 2,34	
	Alumínio	- 1,67	
Menos nobres	Zinco	-0,762	Anódicos
	Cromo	-0,710	
	Ferro	-0,440	
Mais nobres	Cobre	+0,345	Catódicos
	Prata	+0,800	

Nos poros expostos, a direção da corrente galvânica causará o ataque do metal base e, eventualmente, levará à completa deteriorização do substrato (FIGURA 4) [1,2].

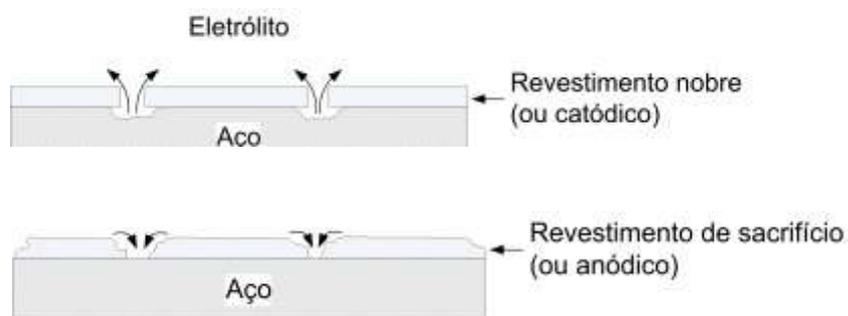


Figura 4: Esquema do fluxo de corrente nos defeitos de revestimento nobres e revestimentos de sacrifício [1].

Conseqüentemente, é fundamental que o revestimento nobre seja preparado com um mínimo de poros e que qualquer poro existente possa ser tão pequeno quão possível, impedindo ou dificultando o acesso da água (eletrólito) ao metal base. O revestimento deve ser denso. Isto significa, em termos práticos, aumento da espessura do revestimento. Algumas vezes os poros são preenchidos com um verniz orgânico ou um segundo metal, de baixo ponto de fusão, que é difundido para dentro do revestimento em temperaturas elevadas (ex. zinco ou estanho para dentro do níquel) [1,8].

Para revestimentos de sacrifício, com zinco ou cádmio e, em certos ambientes, também o alumínio e o estanho sobre o aço, a direção da corrente galvânica é inversa ao que acontece para os revestimentos nobres, como resultado, o metal base é catodicamente protegido. Uma proteção adicional deve-se ao fato de que, com a corrosão do elemento formador do anodo, haverá a formação de sais, que ajudam a tampar a cavidade formada. Enquanto a corrente flui e o revestimento estiver em contato elétrico com o substrato, a corrosão do aço não ocorrerá. O grau de porosidade no revestimento de sacrifício, assim, não é de grande importância, contrária a situação encontrada nos revestimentos nobres. Naturalmente, quanto mais espesso for o revestimento, por mais tempo a proteção catódica acontecerá [1,2,8,14].

Como dito anteriormente, o revestimento de sacrifício fornece proteção catódica para as pequenas áreas de aço expostas a 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 [1,2].

A aplicação de um revestimento metálico menos nobre que o metal base, além de oferecer proteção catódica, também fornece proteção por barreira. Uma maneira de utilizar este tipo de proteção na prática é através da aplicação de tintas com pigmentos a base de zinco, que formarão uma célula galvânica entre o metal base e o pigmento metálico da tinta. A velocidade de corrosão do zinco é, de forma geral, muito menor do que aquela observada para os aços estruturais expostos ao mesmo ambiente [1,2,8].

É importante ressaltar que, em águas quentes e aeradas, poderá acontecer a reversão de polaridade entre o zinco e o ferro. Este fenômeno ocorre em temperaturas ao redor de 600°C ou acima. Isto faz com que o zinco passe a apresentar características de revestimento nobre ao invés de revestimento de sacrifício. Nestas condições, o revestimento galvanizado induzirá o ataque por pites no aço [1].

A área do metal base que estará protegida pela proteção catódica depende da condutividade no ambiente. Para revestimentos de zinco sobre o aço, em águas de baixa condutividade (ex. água destilada ou águas “moles”), um defeito no revestimento de aproximadamente 3 mm de largura já permite o início da corrosão do aço (chamada “corrosão

vermelha”) no centro do defeito. Entretanto, em água do mar, que é um bom condutor, o zinco protege o aço por vários centímetros (5 a 10 cm) do ponto em que o zinco foi removido [1].

Esta diferença de comportamento é resultante de densidades de corrente adequadas para a proteção catódica, estendendo-se por uma distância considerável em águas de alta condutividade, enquanto que, em águas de baixa condutividade, as densidades de corrente catódicas decaem rapidamente com a distância do anodo [1].

9. PRÉ-TRATAMENTO DO METAL

A reação de galvanização somente ocorrerá sobre uma superfície quimicamente limpa. Assim, a maior parte do trabalho inicial é feita tendo este objetivo em mente, em comum com a maior parte dos processos em que revestimentos protetores são aplicados, o segredo para o atendimento de uma boa qualidade do revestimento reside em um bom preparo da superfície. É essencial que a superfície esteja isenta de óleo, graxa, sujeira, carepa e ferrugem antes do processo. Esses tipos de contaminação podem ser removidos através de uma variedade de processos. Uma prática comum, utilizada em limpeza, é o desengraxe alcalino. O componente é, a seguir, lavado em água fria e então mergulhado em ácido (tipicamente ácido clorídrico), em temperatura ambiente (ou mesmo aquecido), de modo a remover a ferrugem e a carepa de laminação. Escórias de soldagem, tintas e grandes quantidades de graxa não serão removidos nestas etapas de limpeza e devem ser removidos antes do envio dos componentes ao galvanizador. Após a lavagem em água fria, os componentes sofrerão um processo conhecido como fluxagem. Este processo envolve a imersão do componente em uma solução de cloreto de zinco-cloreto de amônia 30%, em temperaturas entre 65°C a 80°C, com posterior secagem ao ar (este é o chamado processo “seco”) [1].

O processo de galvanização consiste em recobrir um metal com outro, no caso o zinco, a fim de proteger a peça contra a corrosão, aumentando a sua durabilidade quando exposta a ação de intempéries. Para que se obtenha um resultado perfeito, a peça deve estar totalmente isenta de substâncias estranhas a reação ferro-zinco, o que poderia resultar em um recobrimento indesejado. Sabe-se, porém, que muitos desses elementos estranhos têm sua origem no processamento da matéria-prima, nos processos de fabricação das peças. Outras vezes, no próprio manuseio, transporte e estocagem. Um exemplo deste tipo de partículas intermetálicas em suspensão aparece no banho de galvalume (55% Al-Zn a 600°C), chamadas *dross*, provocando abrasão e forte degradação das buchas fundidas das esteiras que conduzem as chapas de substrato a serem galvanizadas. Variações na temperatura dos banhos de galvanização também induzem e aceleram a formação destas partículas [1,5,6,15].

Para uma perfeita galvanização e proteção contra a corrosão, o material deve ser cuidadosamente preparado. A fim de eliminar essas substâncias existem hoje diversos processos e técnicas de pré-tratamento do metal, que constituem as etapas principais do processo de galvanização. São elas [15,16]:

a) Inspeção de recebimento do material: a fim de garantir que o zinco fundido possa ter um contato com toda a superfície das peças a serem galvanizadas, evitando enclausuramento do ar ou zinco [16].

b) Desengraxe: é a etapa de limpeza que visa a remoção de resíduos orgânicos e provenientes de seu processo produtivo, realizadas em banho alcalino em solução aquosa a quente, cujos componentes são quase sempre carbonatos, fosfatos, silicatos, hidróxidos alcalinos inorgânicos e alguns compostos orgânicos. Nessa etapa, as peças sofrem inspeção, o que serve como forma de controle para que o operador decida pelo término da operação [14-16].

c) Lavagem: É importante que as peças sofram lavagem em água, principalmente, entre as etapas de desengraxe e decapagem, para que não haja contaminação nos tanques. Em alguns casos, dependendo do material, a etapa de desengraxe não se faz necessária no processo inicial da decapagem. Importante lembrar que deve-se evitar cantos vivos, furos cegos e rebaixos profundos, frestas. Componentes de diferentes ligas devem ser galvanizados separadamente e depois montados no conjunto, assim como evitar caixas seladas devido ao risco de explosão devido à alta temperatura do processo de galvanização [1,14,15].

d) Decapagem: é a operação que corresponde à imersão das peças em banhos de soluções ácidas para a remoção de óxidos metálicos, cascas de óxidos e carepas. De forma semelhante ao desengraxe, as peças também sofrem inspeção durante o processo, que é finalizado após a decisão do operador [14-16].

e) Fluxagem: é a operação que proporciona a peça uma superfície quimicamente pura, através da remoção dos resíduos não totalmente retirados nas etapas anteriores. São utilizados sais que diminuem a tensão superficial entre o aço e o zinco, uniformizando a adesão da camada de zinco [9,14,15].

f) Enxágue: Remoção de materiais particulados, resíduos de ácido [14,16].

g) Secagem: é uma operação de grande importância, pois diminui o choque térmico das peças, prevenindo contra respingos de zinco que ocorrem durante a imersão da peça no zinco fundido caso haja umidade [14-16].

h) Galvanização: com o aço totalmente limpo, inicia-se a etapa do processo na qual a peça recebe o banho de zinco. A temperatura normal de galvanização é de 445°C a 465°C e o período normal de imersão é de 1 a 4 min. Haverá a formação de uma série de compostos

intermetálicos Fe-Zn, entre o substrato e a camada externa de revestimento de zinco [1, 14-16].

i) Resfriamento/passivação: após o banho de zinco as peças passam por um banho para resfriar o material e protegê-lo contra a corrosão inicial através de um processo de passivação [14,15].

Com a retirada do componente imerso do banho, o excesso da camada de zinco líquido sobre o topo das camadas de intermetálicos será retirado. Após o resfriamento do componente, o mesmo exibirá uma aparência brilhante característica de produtos galvanizados [1].

Quando a reação entre o ferro e o zinco tiver virtualmente cessado e o componente retirado do banho de galvanização estiver recoberto por uma camada de zinco livre, o processo estará completo. Na realidade não existe uma demarcação clara entre o aço e o zinco, mas uma transição gradual através de uma série de camadas de liga, que fornecem a ligação metalúrgica mencionada anteriormente [1].

10. ESPESSURAS DE REVESTIMENTO

As espessuras do revestimento são normalmente determinadas pelas espessuras do substrato de aço. Assim, condições operacionais uniformes levam a constância na espessura dos revestimentos obtidos sobre substratos de diferentes espessuras. Entretanto, uma forma prática de determinação da espessura de revestimento é dada pela Equação 1 [1,17]:

$$e = \frac{ma}{\rho} \quad [1]$$

onde “e” é a espessura do revestimento de zinco (mm); “ma” é a massa do revestimento de zinco por unidade de área (g/m²), ρ é a massa específica do zinco (g/cm³).

Espessuras maiores podem ser obtidas através de processos específicos de galvanização, tais como galvanização por centrifugação (peças que contenham roscas, como parafusos), por jateamento abrasivo (FIGURA 5), que aumenta a rugosidade superficial e conseqüentemente, a superfície de contato entre o substrato e o zinco e por galvanização de aços reativos, que possuem silício ou fósforo em sua composição [1].

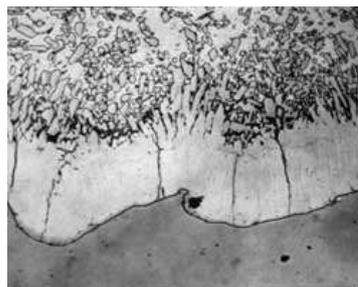


Figura 5 – Microestrutura de camada espessa, obtida por jateamento abrasivo do aço anterior à galvanização [1].

11. CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentou-se uma breve descrição do processo de galvanização a quente. Destacam-se as vantagens e desvantagens do processo, os mecanismos de formação de trincas, as conseqüências devido à adição de diversos elementos químicos que influenciam diretamente a espessura do revestimento obtido. Apresentaram-se também os diversos tipos de revestimento metálico e os métodos de preparação do metal para recebimento do revestimento de zinco.

Considerando-se que 20% da produção mundial de ferro e aço produzido no mundo é destruída anualmente devido a corrosão, a galvanização à quente tem demonstrado diversas vantagens quando comparada a outros processos de proteção por revestimento, tais como pequeno custo de manutenção, longa durabilidade do revestimento devido à alta adesão do zinco ao substrato, rápida velocidade de aplicação e uniformidade da camada protetora. O processo demonstra como principal desvantagem a alta temperatura de aplicação do zinco, que pode distorcer as peças a serem tratadas.

O fenômeno de fragilização devido à difusão de hidrogênio é o principal fator responsável pela fratura do revestimento de zinco das peças de aço, ocorrendo em estruturas de alta dureza (dependente da composição química e da fração volumétrica da fase de Laves) e que apresentam tensões externas ou residuais (peças soldadas pelo processo MIG/MAG). Tais peças apresentaram trincas mesmo antes de serem colocadas em operação, diminuindo a confiabilidade dos produtos soldados e que passaram pelo processo de galvanização. A difusão de hidrogênio aparece principalmente no processo de decapagem (*pickling*), o qual é usado para limpar previamente a peça de aço durante o processo de galvanização. O LME é supostamente o mecanismo para propagação de trinca em estruturas soldadas de aço. Tensões localizadas, alta dureza e difusividade de hidrogênio são os principais fatores responsáveis pelas falhas do revestimento do zinco em geral.

Adições combinadas de bismuto, níquel, estanho e alumínio aos banhos de galvanização proporcionam espessuras médias de revestimentos de 90 a 100 micra, podendo-se chegar a 70 micra. Este controle no crescimento dos compostos intermetálicos zinco-ferro proporciona uma economia de zinco durante o processo de galvanização, reduzindo o custo do processo.

A análise de falha de estruturas de aço após a galvanização à quente tem demonstrado que o início da fratura se inicia sempre próximo as soldas. A presença de fratura transgranular sugere que, a fragilização por hidrogênio na região da ZTA é o principal

responsável pelo início da trinca e pela fragilização do metal líquido (fratura intergranular) e pela posterior propagação da trinca no metal base, combinado com a presença de uma microestrutura de alta dureza e tensões externas ou residuais

O processo de deposição por Plasma com Arco Transferido (PTA) promove forte refinamento da microestrutura da liga Tribaloy T800 que eleva a resistência de desgaste da mesma, desenvolvendo microestruturas com resistência ao desgaste quando expostas a temperatura de 600°C do banho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PANNONI, F. D. **Princípios da Galvanização a Fogo**. Centro Brasileiro da Construção em aço. São Paulo. 2008. Disponível em: < <http://www.cbca-acobrasil.org.br/artigos-tecnicos-ler.php?cod=2935&bsc=>> Acesso em: mai. 2013.
- [2] AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, **Hot-Dip Galvanizing for Corrosion, Protection: A specifier's Guide**. Colorado, USA, 2012.
- [3] BIDEI, B. B. et al. Uma experiência didática de corrosão usando colorimetria visual. **Química Nova**, v. 35, n. 3, p. 634-637, 2012
- [4] BEE, F. H.; BREPOHL, D. C. C.; SILVA, BORGES, P. C. Caracterização da camada intermetálica rica em alumínio formada no processo de galvanização à quente sobre uma chapa IF. 2012. In: **20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS – CBCIMAT**. Anais. Joinville, SC, Brasil.
- [5] SCHEID, A.; ADOLPH, M.; NELSON, O. Buchas de mancais de rolos de galvanização por imersão a quente: um desafio para o desenvolvimento de ligas de engenharia. **Ciência e Cultura**, Curitiba, n. 40, p. 217-267, 2009.
- [6] SCHEID, A. Otimização do Desempenho de Buchas de Rolos de Galvanização por imersão a quente. 2007. In: **VII 2007 Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial – CONEMI**. Curitiba, PR, Brasil.
- [7] DE LIMA, G.; GUESSER, W. L.; MASIERO, L. Influência do bismuto, estanho e alumínio na espessura da camada dos revestimentos galvanizados. **Revista Matéria**, v. 12, n. 4, p. 549-567, 2007.
- [8] SILVA, F. CRISTINA D. A.; FALDINI, S. B.. **Galvanização a quente: processo por batelada**. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista_on_line/Galvanizacao_a_Quente.pdf>. Acesso em: mai. 2013.
- [9] BBOSCH GALVANIZADOS DO BRASIL. **Aços galvanizados por imersão a quente x aços pintados**. Disponível em <www.bbosch.com.br/artigos.sap>. Acesso em: mai. 2013.
- [10] GALVANIZERS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Why galvanize?** Melbourne, 2013.
- [11] MRAZ, L.; LESAY, J. **Problems with reliability and safety of hot dip galvanized steel structures**, Soldag. insp. (Impr.) v. 14, n. 2, São Paulo. Apr./June 2009 <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242009000200011>.

[12] BBOSCH GALVANIZAÇÃO DO BRASIL, Artigos técnicos, **A solda e a galvanização**. Disponível em <www.bbosch.com.br/artigos.sap>. Acesso em: mai. 2013.

[13] GALVANIZERS ASSOCIATION OF AUSTRALIA, **mechanical properties of galvanized steels**. Disponível em:< www.gaa.com> Acesso em: mai. 2013.

[14] ALMEIDA, M. Galvanização por imersão a quente. **Revista Tratamento de Superfície**, São Paulo, n. 163, p. 34-40, 2010.

[15] MOREIRA BORGES, ELIANNE AUXILIADORA, COSTA, NELSON DOS SANTOS, MACHADO, RICARDO LUIZ. Análise do uso do DFP no diagnóstico de sistemas de produção: estudo de caso em uma metalúrgica. In: **XXIII Encontro de Engenharia de Produção**, Ouro Preto, MG, Brasil, outubro de 2003.

[16] BBOSCH GALVANIZADOS DO BRASIL. **Descrição do processo e proteção da galvanização a fogo**. Disponível em <www.bbosch.com.br/artigos.sap>. Acesso em: mai. 2013.

[17] BBOSCH GALVANIZADOS DO BRASIL, **Tabela de espessura para revestimento de zinco**. Disponível em www.bbosch.com.br/artigos.sap. Acesso em: mai. 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande e à Coordenação do Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural – Prominp que contribuíram para a elaboração deste artigo.