

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **Estudo comparativo entre a galvanização por imersão a quente – processo contínuo e por batelada – e a galvanização contínua**

Luiza Abdala<sup>a</sup>, Daniele Albagli<sup>b</sup>

### ***Abstract***

Galvanizing is the process of applying, on the surface of the steel, a zinc coating which protects the steel against corrosion. This technique has been used for many years and it is standardized by ABNT. The galvanized steel is obtained through two different processes: hot dip galvanizing and electrolytic galvanizing. Hot dip galvanizing is the process of dipping fabricated steel into a kettle containing molten zinc at 450 °C. While the steel is in the kettle, the iron metallurgically reacts with the molten zinc to form a tightly-bonded alloy coating that provides superior corrosion protection to steel. This intermetallic bond grants a protection coat that varies from 40 µm, through a continuous galvanizing process, to approximately 200 µm, through a batch process. The electrolytic galvanizing is a process in which steel to be zinc coated is passed through an acid electrolyte solution containing zinc ions and it is used as a cathode, while the electrolyte solution is made to flow in the space between the cathode and the anode, in a cell having flat parallel electrodes. This process also forms a zinc coat but only superficial, there are not any metallurgical reactions between steel and zinc. This superficial coating varies from 2 µm up to 20 µm – which diminishes the performance against corrosion, compared to hot dip galvanized steel.

**Keywords:** hot dip galvanizing, electrolytic galvanizing, corrosion, protection, zinc coating.

### **Resumo**

A galvanização, proteção do aço contra a corrosão por meio de uma camada de zinco, é uma técnica utilizada há muitos anos, sendo normatizada pela ABNT. Existem dois processos através dos quais se obtém o aço galvanizado: galvanização por imersão a quente e galvanização eletrolítica. A galvanização por imersão a quente consiste na imersão de uma peça de aço em um banho de zinco fundido mantido a 450 °C. Durante a imersão, ocorre uma reação metalúrgica entre o zinco e o ferro formando uma camada intermetálica de ferro/zinco bastante aderente ao aço seguida de uma camada de zinco puro o que proporciona uma proteção à corrosão ao substrato de aço, A espessura da camada protetora varia de 40 µm, através processo contínuo de galvanização, até aproximadamente 200 µm, através do processo por bateladas. Já a galvanização eletrolítica consiste na imersão da peça de aço em uma solução contendo íons de zinco e, através da imposição de uma corrente elétrica, ocorre a eletrodeposição do zinco sobre a peça, formando uma camada de zinco puro na superfície do aço. Nesse caso, não ocorrem reações metalúrgicas entre ferro e zinco para formação de

<sup>a</sup> Engenheira Química – VOTORANTIM METAIS

<sup>b</sup> Engenheira Química – VOTORANTIM METAIS

intermetálicos, sendo a camada constituída de zinco puro, com espessura variando de 2 µm até 20 µm - o que diferencia o desempenho contra a corrosão deste aço, em relação ao aço galvanizado por imersão a quente.

**Palavras-chave:** galvanização por imersão, galvanização eletrolítica, zinco, proteção, corrosão, revestimento.

## **Introdução**

---

A corrosão é um processo natural decorrente da tendência que os materiais têm a retornarem ao seu estado natural, ou seja, no caso do aço, minério de ferro. O aço, em contato com o oxigênio e agentes de corrosão (cloretos, sulfetos, entre outros), sofre oxidação e se transforma em óxido de ferro, ocasionando a deterioração da estrutura. Estima-se que aproximadamente 20 % da produção anual de aço sejam perdidas por razão de corrosão. Existem alguns sistemas eficientes para proteger estruturas de aço e ferro fundido contra a oxidação, e estes são indicados de acordo com o tamanho da estrutura, a agressividade do ambiente em que estará exposta e as condições de acesso em caso de necessidade de manutenções. A galvanização é o processo através do qual se forma uma camada de zinco na superfície do aço, com o objetivo de proporcionar uma proteção contra a ação da corrosão no aço. Para ambientes mais severos, recomenda-se a utilização da galvanização por imersão a quente. Já a galvanização eletrolítica pode ser utilizada quando se deseja apenas ter uma proteção superficial da peça.

Apesar de, tanto a galvanização por imersão a quente, quanto a galvanização eletrolítica envolverem um processo de aplicação de uma camada protetora de zinco, o desempenho dos materiais galvanizados por uma ou outra técnica diferem significativamente. Enquanto a galvanização por imersão promove a difusão do zinco na estrutura metálica da peça, através de reações intermetálicas ferro-zinco, com camadas de proteção de até 200 µm, a galvanização eletrolítica é o depósito do zinco metálico puro na superfície do aço, com camadas protetoras de aproximadamente 15 µm, ou seja, é uma proteção superficial apenas que pode ser comprometida caso ocorra alguma trinca ou dano no revestimento. Portanto, quando se tem a exposição do aço a ambientes de alta agressividade, recomenda-se exclusivamente a utilização da galvanização por imersão a quente, podendo ser complementada com uma pintura como proteção adicional ao sistema, o chamado sistema dúplex.

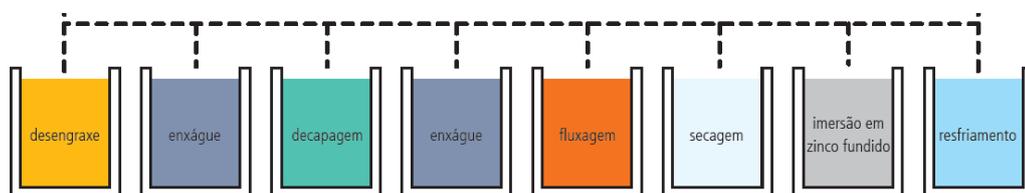
### **Galvanização por imersão a quente**

A galvanização por imersão a quente consiste em um processo com diversas etapas, em que cada uma possui uma função específica na qualidade final da peça galvanizada. Existem duas formas de se galvanizar por imersão a quente: por bateladas, ou de maneira contínua (chapas). Na primeira, as peças do aço já conformado passam por diversas etapas de limpeza, sendo posteriormente imersas no banho de zinco fundido uma a uma. Na segunda, chapas de aço em bobinas são desenroladas no início e depois passam por um processo ininterrupto até a imersão no pote de zinco.

Para o processo por bateladas, a prática mais comumente utilizada no mercado é que segue.

O processo começa com a imersão da peça em uma solução desengraxante alcalina ou ácida (desengraxe). A peça é então lavada em água fria e imersa em ácido clorídrico à temperatura ambiente (decapagem) para remover a oxidação e incrustações de usinagem. Resíduos de soldagem, tinta e graxa pesada devem ser retirados antes de o material ser enviado para o galvanizador. Após uma nova etapa de enxágue, as peças são imersas em uma solução composta geralmente por 30 % de cloreto de amônia e cloreto de zinco entre 65 °C e 80 °C. Esta etapa, chamada fluxagem, remove os últimos resquícios de óxido da superfície e promove a diminuição da tensão superficial do banho de zinco durante a imersão da peça, permitindo uma melhor interação metalúrgica entre o zinco fundido e o aço. Por fim, a peça é mergulhada em um banho de zinco a 450 °C.

Quando a peça de aço é imersa no banho de zinco fundido, camadas intermetálicas são formadas através da reação metalúrgica entre ferro e zinco. A taxa de reação entre o substrato de aço e o zinco é parabólica com o tempo e, por isso, a taxa inicial da reação é muito alta e se observa muita agitação no banho. A espessura principal da camada é formada nesse primeiro momento. Em seguida, a reação fica um pouco mais lenta e a espessura do revestimento não aumenta significativamente, mesmo se a peça permanecer imersa por mais tempo. A duração típica de uma imersão é de 4 min a 5 min, mas pode ser mais longa ou mais curta, dependendo da composição química do aço e das dimensões da peça. Na retirada da peça da cuba de galvanização, uma camada de zinco praticamente puro é formada por arraste do banho. Após o resfriamento, frequentemente pode-se observar a aparência brilhante associada aos produtos galvanizados. O tratamento pós-galvanização pode incluir o resfriamento em água ou ar. A Figura 1 ilustra as etapas do processo de galvanização por batelada.



**Figura 1 – Fluxograma do processo de galvanização por imersão a quente por bateladas.**

O processo de galvanização contínua aplica um revestimento de zinco na superfície de uma tira contínua da chapa de aço à medida que ela passa por um banho de zinco ininterruptamente. As bobinas de chapas revestidas são diretamente conformadas por cilindros ou alimentadas em prensas para estampagem. A espessura das chapas varia entre 0,25 mm e 6,3 mm. Neste processo, a chapa de aço passa pelo banho de zinco fundido com velocidade de aproximadamente 200 m/min. À medida que as chapas em movimento saem do banho de revestimento, elas levam consigo zinco fundido. A espessura de revestimento desejada é alcançada pela utilização das “navalhas de ar”. Essas navalhas normalmente são posicionadas em ambos os lados da chapa para remover o excesso de zinco na retirada da chapa da cuba de metal fundido. O aço revestido é então resfriado e o zinco é solidificado na superfície da chapa.

Uma das características mais importantes do processo de galvanização contínua é a formação de uma forte ligação entre o aço e seu revestimento de zinco, que permita a conformação posterior da chapa. A chapa de aço fica no banho de zinco somente de 2 s a 4 s. Durante este breve período de tempo, o zinco fundido e o aço devem reagir para formar uma ligação metalúrgica forte, porém que seja fina e com a composição correta. Essa fina zona de ligação,

que possui normalmente uma espessura de 1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$ , é muito importante e é atingida através da adição de uma quantidade controlada de alumínio (entre 0,15 % e 0,20 %) no banho de zinco.

A adição do alumínio no banho influencia nas características da liga intermetálica formada. O alumínio tem mais afinidade ao aço do que o zinco, então imediatamente após a entrada do aço no banho de revestimento, o composto intermetálico que se forma não é um composto zinco-ferro, mas um composto alumínio-ferro, isto é,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Esta camada de liga (também conhecida como camada de inibição) é extremamente fina e retarda a reação entre zinco e ferro. Quando a tira sai do banho (de 2 s a 4 s depois) um pouco de zinco é arrastado sobre a esta camada de liga, mas sua natureza é completamente diferente daquela que é formada na falta do alumínio. É uma camada de liga ternária muito fina, composta por aproximadamente 45 % de alumínio, 35 % de ferro e 20 % - 35 % de zinco. O resultado é que a espessura final da camada de liga é muito menor e a chapa revestida pode ser moldada em muitos formatos, sem que a camada da liga trinque e sem resultar em perda de adesão do revestimento. A espessura total do revestimento formado é de, em média 40  $\mu\text{m}$ . A Figura 2 ilustra as etapas do processo contínuo de galvanização.

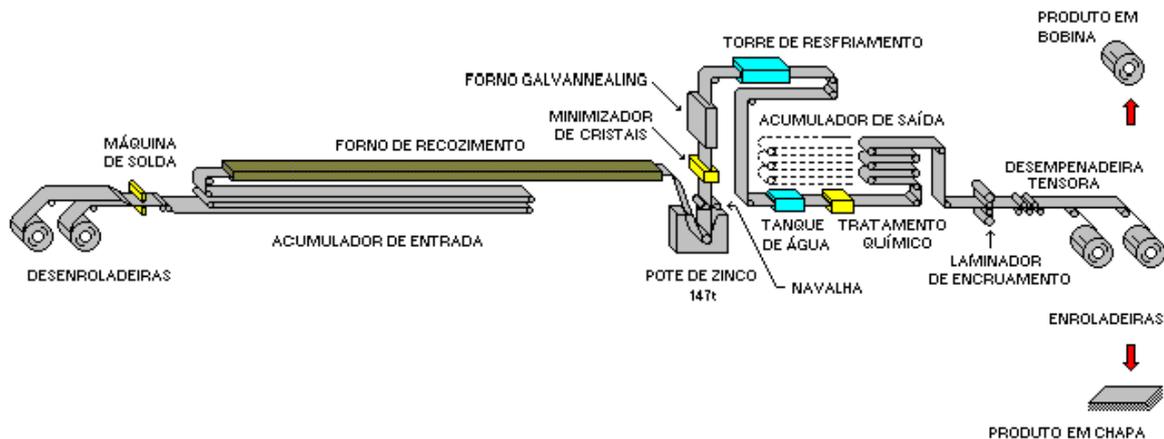


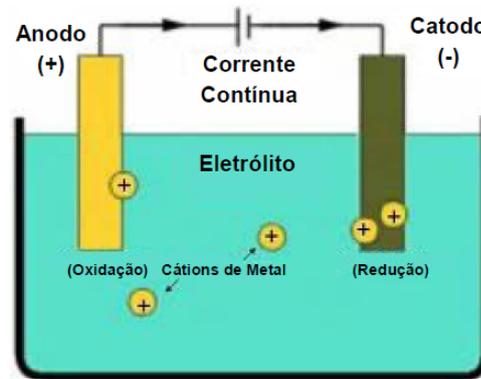
Figura 2 – Fluxograma do processo de galvanização por imersão a quente contínuo.

### Galvanização Eletrolítica

A galvanização eletrolítica, ou eletrodeposição de zinco, é um processo através do qual uma camada de zinco de baixa espessura é depositada sobre o substrato de aço. Anterior à imersão da peça de aço no banho eletrolítico, existem etapas para a preparação deste aço. Primeiramente, a peça passa por um pré-tratamento mecânico, que pode ser uma limpeza por jato abrasivo, esmerilhamento ou polimento ou tamboreamento. Em seguida, passa por um pré-tratamento químico e/ou eletrolítico (desengraxe) que visa remover sujeiras ou materiais estranhos da superfície das peças para permitir a perfeita deposição nos tratamentos galvânicos posteriores. Por fim, o aço passa por uma etapa de decapagem, que pode ser feita utilizando diversos ácidos (clorídrico, sulfúrico, entre outros). Após estas etapas de preparação, o aço passa para a eletrodeposição.

A peça é imersa em uma cuba eletrolítica que contém um eletrólito no qual estão dissolvidos sais do metal que se deseja depositar sobre o substrato de aço. A Figura 3 representa uma

célula de eletrogalvanização. O anodo é o zinco, o catodo é o aço e o eletrólito é uma solução de sulfato de zinco (outro processo semelhante utiliza cloreto de zinco). A energia elétrica é fornecida pela fonte de corrente contínua. No anodo, o zinco é oxidado (libera dois elétrons) e se dissolve como cátion no eletrólito. No catodo de aço, cátions de zinco se combinam com dois elétrons (redução) e formam o zinco elementar, que se deposita sobre a superfície do aço.



**Figura 3 – Representação de uma célula de eletrogalvanização.**

Após a eletrodeposição, a peça de aço pode passar por uma etapa final de passivação, também conhecida por cromatização. A função da passivação é melhorar a aparência dos depósitos de zinco nas peças galvanizadas e aumentar a proteção contra a corrosão, retardando a chamada "corrosão branca". Para tal, após a zincagem eletrolítica, as peças passam por uma lavagem dupla e são ativadas, geralmente através da imersão em soluções de ácido nítrico durante 10 s a 20 s. Em seguida, após nova lavagem simples, as peças são imersas no banho cromatizante, permanecendo de 10 s a 60 s, dependendo da formulação do banho.

O revestimento produzido é constituído de zinco metálico puro firmemente aderente ao aço, porém, sem a formação de ligações intermetálicas ferro-zinco. Além disso, pelo fato de se ter correntes elétricas envolvidas, a camada de revestimento não é uniforme ao longo da superfície, isto é, têm-se espessuras maiores nas pontas, bordas e saliências e espessuras menores nas depressões. A eletrodeposição para fins de proteção contra corrosão é vantajosa somente para espessuras relativamente baixas e a espessura típica que se costuma depositar é de 15  $\mu\text{m}$ . Este revestimento é altamente dúctil, permitindo deformação após eletrodeposição.

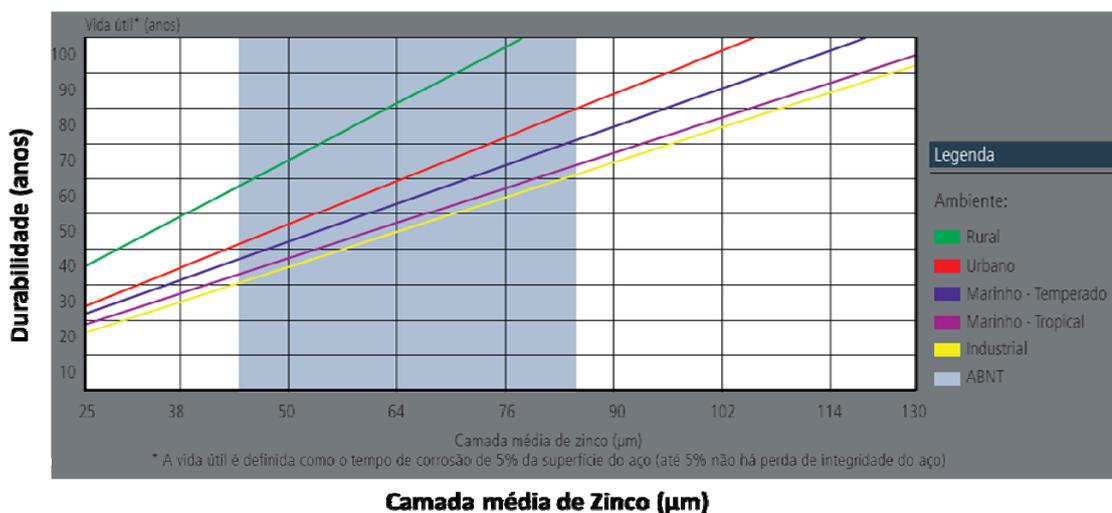
### **Considerações gerais**

O ferro e o aço sofrem corrosão rapidamente quando expostos ao meio ambiente e o produto de corrosão, que é basicamente óxido de ferro, não protege o substrato, assim, a corrosão se espalha até que a estrutura ou peça seja totalmente consumida. Revestimentos de zinco promovem uma proteção efetiva e econômica contra a corrosão. Utiliza-se o zinco como metal de proteção, pois, por ser mais eletronegativo que o aço, sofre corrosão preferencial e sacrifica-se para protegê-lo. Além disso, a taxa de corrosão do zinco é mais lenta que a taxa de corrosão do aço. A taxa de corrosão do zinco é geralmente linear em um determinado ambiente, permitindo, portanto, estimar o tempo de vida do revestimento com base em avaliações da sua espessura e através das taxas de corrosão para uma determinada categoria

de corrosividade, de acordo com a norma ABNT NBR 14643 “Corrosão atmosférica – Classificação da corrosividade de atmosferas”, indicadas na Tabela 1 e na Figura 4.

**Tabela 1 – Taxas indicativas de corrosão para ambientes diferentes (categorias de corrosividade de acordo com a ABNT NBR 14643).**

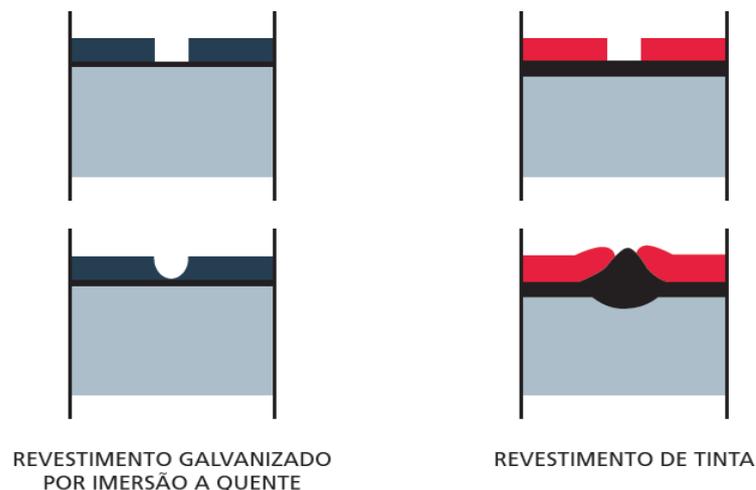
Categoria de corrosividade	Taxa média anual de corrosão do zinco ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	Taxa média anual de corrosão do aço carbono ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )
C1   interior: seco	< 0,1	< 1,3
C2   interior: condensação ocasional exterior: rural	0,1 a 0,7	1,3 a 25
C3   interior: alta umidade, pouca 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 4 – Efeito das condições ambientais na vida útil das estruturas zincadas.**

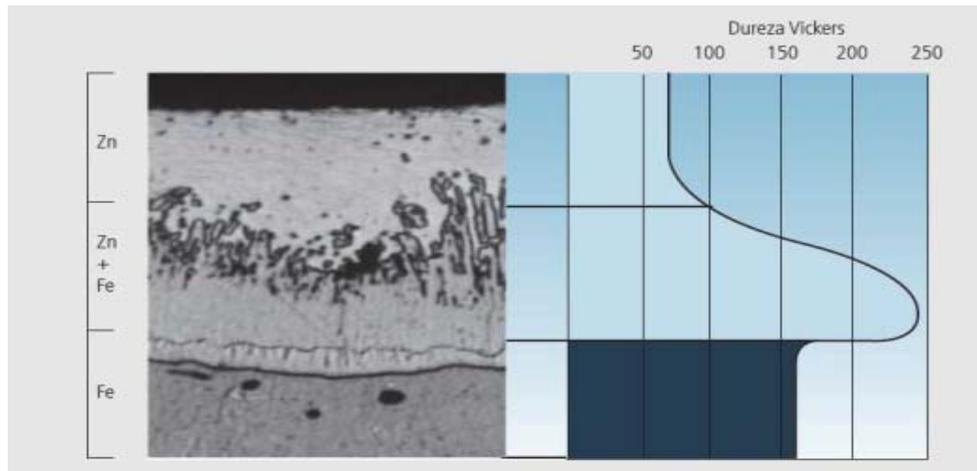
O processo de galvanização por imersão a quente promove, além da proteção por barreira, que isola todas as superfícies do substrato de aço do ambiente externo, a proteção catódica, pois o zinco sofre corrosão preferencial ao aço. Os produtos de corrosão do zinco são aderentes e insolúveis e se depositam sobre a superfície do aço, isolando-o do ambiente agressivo, evitando a sua corrosão. Esse processo é chamado de “cicatrização”. Esta é a principal característica que diferencia o revestimento de zinco obtido pela galvanização por imersão a quente ou por eletrodeposição dos demais sistemas de proteção contra a corrosão. No caso de

um aço pintado, por exemplo, caso ocorra alguma fissura no revestimento, por ser uma proteção superficial, esse ponto se torna um ponto foco de corrosão, que pode se alastrar embaixo da camada e pode se tornar visível somente quando a estrutura já está seriamente corroída. A Figura 5 ilustra como se comportam as proteções contra a corrosão no caso de uma fissura no revestimento. No caso da galvanização por imersão a quente, uma célula galvânica é formada e o zinco em volta do ponto de danificação sofre corrosão. Os produtos de corrosão do zinco precipitam-se na superfície do aço, que fica protegido. Já no caso da proteção através da pintura, o aço sofre corrosão na região onde o filme de tinta foi danificado. A corrosão se propaga entre o filme de tinta e a superfície do aço, causando seu desprendimento. A corrosão continua até que o dano seja reparado e o aço novamente isolado com a aplicação da nova camada de tinta.



**Figura 5 – Esquema ilustrativo: Consequência do dano em diferentes tipos de revestimento que oferecem proteção contra a corrosão.**

Em função da formação das ligas intermetálicas, o revestimento formado pela galvanização por imersão a quente é mais espesso e muito mais resistente a danos físicos do que revestimentos superficiais. A camada protetora formada com a galvanização por imersão a quente é composta, basicamente, de uma camada de ligas metálicas, em contato com o substrato de aço, e uma camada externa de zinco puro. Ambas as camadas contribuem para a proteção do aço contra a corrosão. A camada de ligas intermetálicas é mais dura e menos maleável que a camada de zinco puro, conforme mostra a Figura 6, e a sua espessura depende de alguns fatores como: teores de silício e fósforo contidos na composição do aço, rugosidade da superfície do aço, temperatura do banho de galvanização, tempo de imersão e taxa de resfriamento. A espessura da camada de zinco puro depende da drenagem do zinco fundido na retirada da peça do banho. O escorrimento do zinco da peça pode depender das suas dimensões, porém, em geral, uma rápida retirada da peça do banho resulta em uma camada mais espessa, e uma retirada mais lenta do banho implica em uma camada mais fina e uniforme de revestimento, com uma melhor drenagem do zinco.



**Figura 6 - Microseção da camada galvanizada por imersão a quente, mostrando as variações da dureza ao longo do revestimento. As ligas de zinco-ferro são mais duras do que a base do aço.**

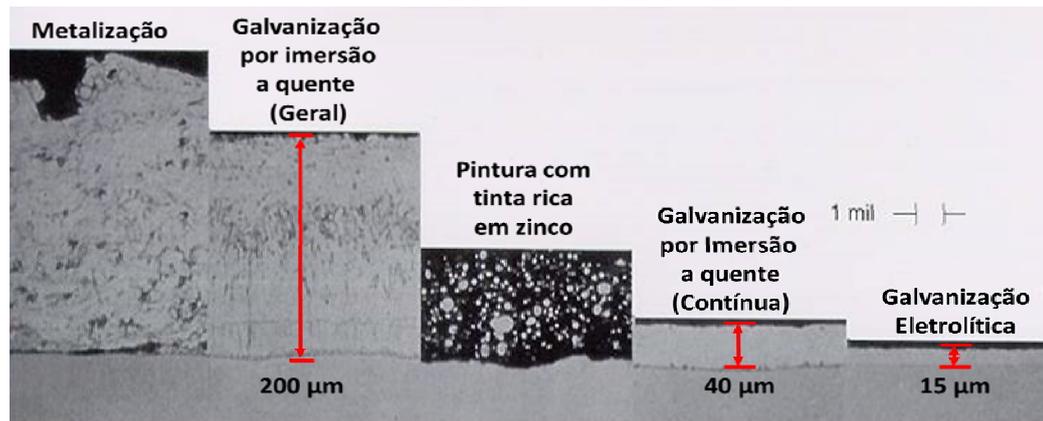
Estruturas de aço galvanizadas por imersão a quente são amplamente utilizadas em diversas aplicações, desde estruturas de transmissão de energia até obras de arte. Variando de peças pequenas como porcas, parafusos e pregos até peças estruturais de grande porte, a galvanização por imersão está presente na infraestrutura do país. Usualmente, a galvanização por imersão é recomendada para aços expostos à atmosfera, no entanto, é também utilizada em aplicações de água doce e salgada, enterrados em solo, embutidos em concreto, entre outros. O tamanho da peça ou estrutura de aço pode ser uma limitação para a aplicação da galvanização por imersão. Atualmente, a maior cuba de zinco do Brasil tem 13 m de comprimento. Utilizando imersão progressiva (imersão de uma metade do produto e, em seguida, a outra), aumenta-se o tamanho máximo que pode ser acomodado para quase o dobro do tamanho da cuba de zinco, ou seja, no Brasil é possível galvanizar peças de até 26 m de comprimento aproximadamente.

## Conclusões

Com base na discussão apresentada de galvanização eletrolítica e por imersão a quente, nota-se que o processo por imersão a quente promove uma maior proteção ao aço, quando comparado com a galvanização eletrolítica, em ambientes de alta agressividade. A principal diferença entre os dois processos é que no processo de galvanização por imersão a quente são formadas ligações intermetálicas entre o ferro e o zinco, ou seja, o revestimento não é apenas superficial, há a difusão do zinco na estrutura do aço e, dessa forma, o revestimento é fortemente aderente ao substrato, além de ser mais resistente a avarias mecânicas.

A espessura do revestimento obtido através da zincagem por imersão a quente por bateladas é de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ , entre camadas ferro/zinco e a camada zinco puro. Além disso, a camada obtida é uniforme ao longo de toda dimensão da peça. Através da galvanização por imersão, processo contínuo, são obtidas camadas de revestimento uniformes de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ , com a formação de uma fina camada de inibição, composta de ferro, alumínio e zinco, altamente aderente ao substrato, e uma camada substancial de zinco

puro na superfície do revestimento. Já a galvanização eletrolítica proporciona uma camada de, no máximo, 40  $\mu\text{m}$ , sendo 15  $\mu\text{m}$  a espessura típica, e a uniformidade da camada obtida não é garantida - é comum que se obtenha maiores espessuras nas pontas, bordas e saliências e menores espessuras nas depressões. O aumento da durabilidade do aço é função da espessura da camada de zinco, sendo esta a razão da vida útil superior dos produtos galvanizados por imersão a quente em relação aos produtos zincados por eletrodeposição. A Figura 8 mostra a diferença nas espessuras de camada de revestimento acordo com a técnica de proteção contra a corrosão.



**Figura 8 - Microseção das camadas de revestimento de acordo com o método de proteção contra corrosão utilizado.**

Outro ponto de diferenciação entre as duas técnicas é o recobrimento da área total da peça. A eletrodeposição do zinco ocorre somente nas partes expostas, ou seja, quando se está eletrogalvanizando um tubo, por exemplo, a parte interna não é galvanizada, ou no caso de uma peça de aço de geometria complexa, há chance de que uma parte da peça não seja revestida. Já na galvanização por imersão a quente, há a total imersão da peça no zinco fundido e toda a área da peça, tanto interna quanto externa, recebe revestimento independente da complexidade da geometria do aço em questão.

Por fim, conclui-se que a galvanização por eletrodeposição é indicada somente para peças de geometria simples, que estejam expostas a ambientes de baixa agressividade, por ser camada de baixa espessura. A eletrogalvanização também pode ser indicada quando se tem o objetivo de galvanizar somente o exterior, ou apenas um lado da peça, no caso de chapas. Já a galvanização por imersão a quente é uma proteção muito eficiente e segura contra a corrosão, que pode ser utilizada mesmo em ambientes de alta corrosividade, como áreas costeiras ou com alta concentração de cloretos, e é especialmente indicada para ambientes de difícil acesso para manutenção, em que se objetiva maximizar a vida útil. Ambas as técnicas podem ser associadas à pintura como acabamento.

A Tabela 2 evidencia as características técnicas e principais diferenças entre os revestimentos de zinco por imersão a quente e por processo de eletrodeposição.

Tabela 2 – Características técnicas dos revestimentos de zinco

Zincagem a quente	Zincagem a frio (eletrolítica)
O revestimento é obtido através da imersão da peça em um banho de zinco fundido a 450 °C.	O revestimento é obtido por eletrólise em um banho químico a aproximadamente 25 °C.
Ocorrem reações químico-metalúrgicas entre o ferro e o zinco, propiciando a formação de camadas intermetálicas de ferro/zinco com valores crescentes de zinco e uma camada externa de zinco puro.	Não ocorre reação nenhuma e nem formação de camadas intermetálicas de ferro-zinco. Há uma simples deposição de zinco sobre a superfície da peça.
Mesmo que ocorra rompimento na camada externa de zinco, as camadas intermetálicas continuam dando proteção à peça.	Rompida a camada de zinco, a proteção fica comprometida, pois não há formação de camadas intermediárias.
A vida útil é significativamente prolongada. O revestimento tem espessura média de 100 µm.	A vida útil é levemente prolongada. O revestimento tem espessura média de 10 µm.
O zinco recobre todas as partes, tanto interna quanto externa por mais complicada que seja a geometria da peça.	Algumas partes da peça ficam sem revestimento de zinco, principalmente tubos, em que a parte interna não é eletro galvanizada.

### Referências bibliográficas

- (1) GA – GALVANIZERS ASSOCIATION. **General galvanizing practice**. 3. Ed., 1999.
- (2) IZA - INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. **GalvInfo Center**, 2011.
- (3) ICZ – INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS. **Guia de Galvanização por Imersão a Quente**.