

2. Processos de Revestimento e Tratamentos de Superfície	
GalvInfoNote	<b>O Papel do Alumínio na Galvanização Contínua por imersão a quente</b>
<b>2.4</b>	
Rev1.1mar 09	

## Introdução

A chapa de galvanização contínua por imersão a quente é fabricada quase que exclusivamente em linhas de revestimento onde o zinco fundido contém uma pequena quantidade de alumínio. Tem sido dessa maneira por muitos anos e isso é, na realidade, a razão mais básica pela qual a chapa galvanizada é utilizada hoje numa grande variedade de produtos de muita demanda.

A adição de alumínio não é feita para aumentar o desempenho à corrosão, mas para garantir uma boa adesão durante a conformação do aço. Esta GalvInfoNote explica a influência do alumínio e por que ele é tão importante para o sucesso na fabricação e utilização de chapa de galvanização contínua por imersão a quente.

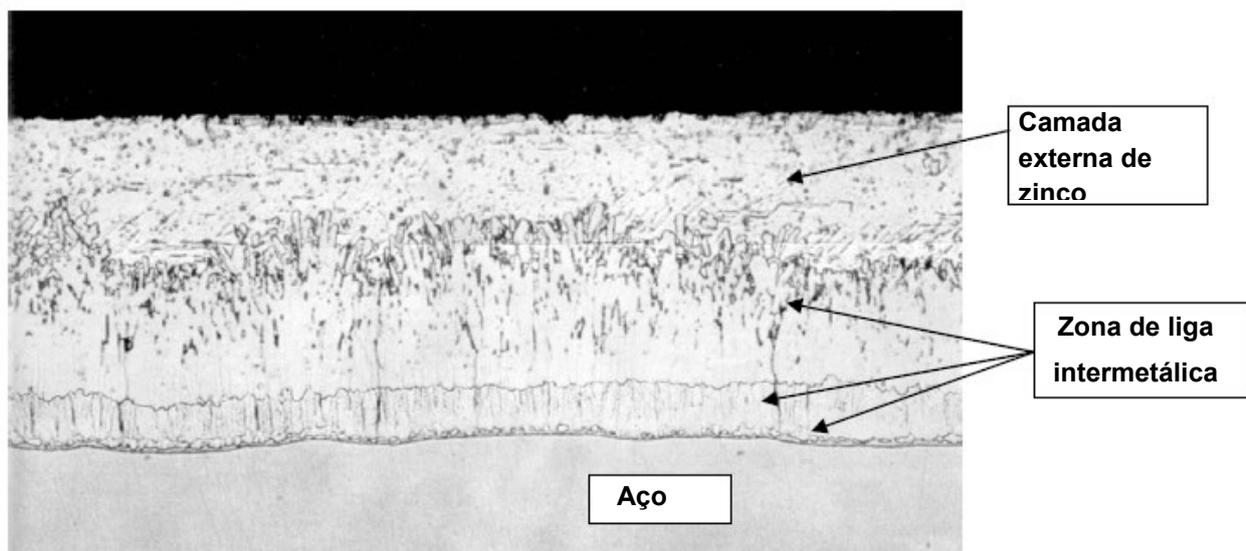
## Metalurgia do Revestimento

A chapa galvanizada contínua por imersão a quente é obtida através da imersão da chapa de aço, como uma fita contínua, em um banho (cuba) de zinco fundido. O processo é explicado em detalhes na GalvInfoNote 2.1 e novamente na GalvInfoNote 2.3. Os dois lados da chapa de aço são muito limpos e livres de óxidos na superfície ao ser introduzida num banho de revestimento. Normalmente, a chapa é de aço laminado a frio que recebe um recozimento em linha a temperaturas acima de 1200°F [650°C] antes da cuba; depois, ela é resfriada para aproximadamente 875-925°F [470-490°C] antes de entrar no banho. O zinco, que funde a 787°F [419°C], está normalmente a uma temperatura de 870°F [465°C]. A chapa de aço possui resistência suficiente a altas temperaturas; por isso, ela pode ser arrastada no forno de recozimento e no banho de zinco sem rachaduras ou deformações.

Durante o tempo que a chapa está imersa no banho (em algumas linhas de revestimento, tão rápido quanto ~2 segundos), o aço e o zinco fundido sofrem uma reação metalúrgica. O que acontece? Os átomos da superfície da chapa de aço, que estão em um estado sólido, interagem com os átomos de zinco no banho, que estão no estado fundido. Esta interação é chamada de **difusão**. Os átomos do zinco se movem na direção dos átomos de aço e átomos de ferro no aço migram em direção ao zinco fundido. O resultado é a formação de uma camada "mista" sólida entre o aço e o zinco fundido. Esta camada contém átomos de ferro e zinco em proporções específicas e é chamada de um composto **intermetálico**. A mistura dos átomos de diferentes metais é conhecida como **liga** e a zona de difusão que é formada durante a galvanização é uma **liga intermetálica**. É esta zona de liga, quando devidamente formada, que proporciona uma excelente ligação entre o aço e o revestimento de zinco.

As forças de tensão da superfície fazem com que uma camada externa de zinco fundido se ligue à chapa quando ela deixa o banho fundido. Após a remoção do excesso de zinco, o líquido remanescente solidifica quando resfriado abaixo de 787°F [419°C]. O produto final (chapa galvanizada) consiste de um centro de aço, com uma camada de liga intermetálica e uma camada externa de zinco em ambas as superfícies.

Caso o banho de zinco seja livre de alumínio, o corte transversal do revestimento pode parecer semelhante ao que aparece na Figura 1.



**Figura 1: Corte transversal do revestimento produzido em um banho de galvanização livre de alumínio**

As camadas de liga intermetálica mostradas na Figura 1 são uma mistura de átomos de ferro e zinco. Eles proporcionam um alto grau de ligação entre o aço e o revestimento externo de zinco. Infelizmente, essas ligas têm uma ductilidade muito ruim, isto é, elas são muito duras e quebradiças. Quando o aço é conformado em um formato, há uma alta probabilidade de que fendas de cisalhamento se desenvolvam na liga e de que o revestimento de zinco descasque. Este comportamento limita seriamente a habilidade de conformar chapas em formas tais como copos de estampagem, painéis para telhados, pregas de junção apertadas ou pára-lamas automotivos altamente expandidos.

### Superando a Camada de Liga Quebradiça

Uma camada de liga é vital para alcançar uma boa ligação entre aço e zinco. Esta camada deve ser contínua (por toda a superfície da chapa) para que o revestimento seja livre de poros. Sem interferir na formação da zona de ligação da liga, como pode a natureza da liga ser modificada, de modo que a conformação de formatos complexos seja possível?

Há mais de 75 anos, foi descoberto que a adição de baixas quantidades de alumínio no banho de revestimento é uma resposta perfeita para esse problema. Inicialmente, a razão pela qual isso funcionou tão efetivamente não foi compreendida, mas foi observado que quando havia alumínio no banho de zinco, isso fazia com que a camada de liga fosse muito fina comparada àquela formada pelo banho livre de alumínio. O alumínio é um inibidor que diminui consideravelmente o índice da reação zinco-ferro. Esta camada de liga mais fina, portanto mais dúctil, permite que a chapa revestida seja conformada em muitos formatos complexos, sem perda de aderência do revestimento, já que não tende ao desenvolvimento de grandes fendas de cisalhamento internas.

A utilização de alumínio, em um nível aproximado de 0,15%, tornou-se o padrão para banhos galvanizados em linhas contínuas. Até hoje, a prática de adição de alumínio é utilizada; entretanto, hoje há uma compreensão muito melhor da metalurgia do alumínio no zinco; como resultado, a concentração de alumínio é controlada mais de perto. Alguns fabricantes utilizam entre 0,20 e 0,25% de alumínio, mas a prática padrão envolve a utilização de cerca de 0,15 a 0,19%. Ao fabricar revestimentos de zinco-ferro (galvanneal), o nível de alumínio é diminuído para cerca de 0,12 a 0,14%.

Embora a adição de uma quantidade de alumínio tão pequena tenha um efeito declarado na habilidade de moldar uma chapa galvanizada, isso não tem muito efeito nos outros atributos do produto. Por exemplo, sua influência no comportamento da corrosão aparente é insignificante. Devido ao fato de que o alumínio tende a se concentrar na camada de liga, e de alguma maneira na superfície do zinco, isso pode afetar adversamente questões como ponto de solda, soldagem e ocorrência de ferrugem branca. No entanto, esses defeitos são

insignificantes se comparados ao efeito benéfico que o alumínio exerce na habilidade de conformar a chapa sem perda de aderência do revestimento.

## Porque o Alumínio Muda a Camada de Liga

Como pode essa pequena quantidade de alumínio ter uma influência tão forte no índice de crescimento da camada de liga? Isso ocorre porque, quando o alumínio está presente no banho de revestimento neste nível, o composto de liga de zinco-ferro normal,  $FeZn_7$ , que se forma na superfície do aço (e cresce rapidamente), não é mais o composto de maior estabilidade. O alumínio tem uma maior afinidade com o ferro do que com o zinco, então imediatamente (dentro de 0,15 segundos) após a entrada do aço no banho de revestimento, o composto intermetálico estável que se forma não é um composto zinco-ferro, mas um composto alumínio-ferro, isto é,  $Fe_2Al_5$ . Esta camada de liga (também conhecida como **barreira** ou **camada de inibição**) é extremamente fina e retarda a reação entre zinco e ferro. Quando a tira sai do banho (~2-4 segundos depois) um pouco de zinco é levado a esta camada de liga, mas sua natureza é completamente diferente daquela que ocorre na falta do alumínio. É uma camada de liga ternária muito fina, composta por aproximadamente 45% Al, 35% Fe e 20-35% Zn ( $Fe_2Al_5 \cdot xZn_x$ ). Em vez do alto índice de difusão que ocorre quando o zinco líquido e o ferro sólido de uma liga binária  $FeZn_7$  em um banhos livres de alumínio, a taxa de difusão agora depende das características de transporte de zinco através da barreira criada pelo composto alumínio-ferro. A reação entre o zinco e o ferro é retardada e o resultado líquido é que a espessura final da camada de liga é muito menor do que quando depende do índice de difusão através de uma zona de liga de zinco-ferro crescente.

A natureza da camada de liga, quando o alumínio é adicionado ao banho de galvanização, é mostrada na Figura 2. A camada de liga é a camada fina vista perto da parte de baixo da figura. Quando a camada de liga é fina assim, a chapa revestida pode ser dobrada ou moldada em muitos formatos úteis sem que a camada da liga trinque e sem resultar em perda de adesão do revestimento.

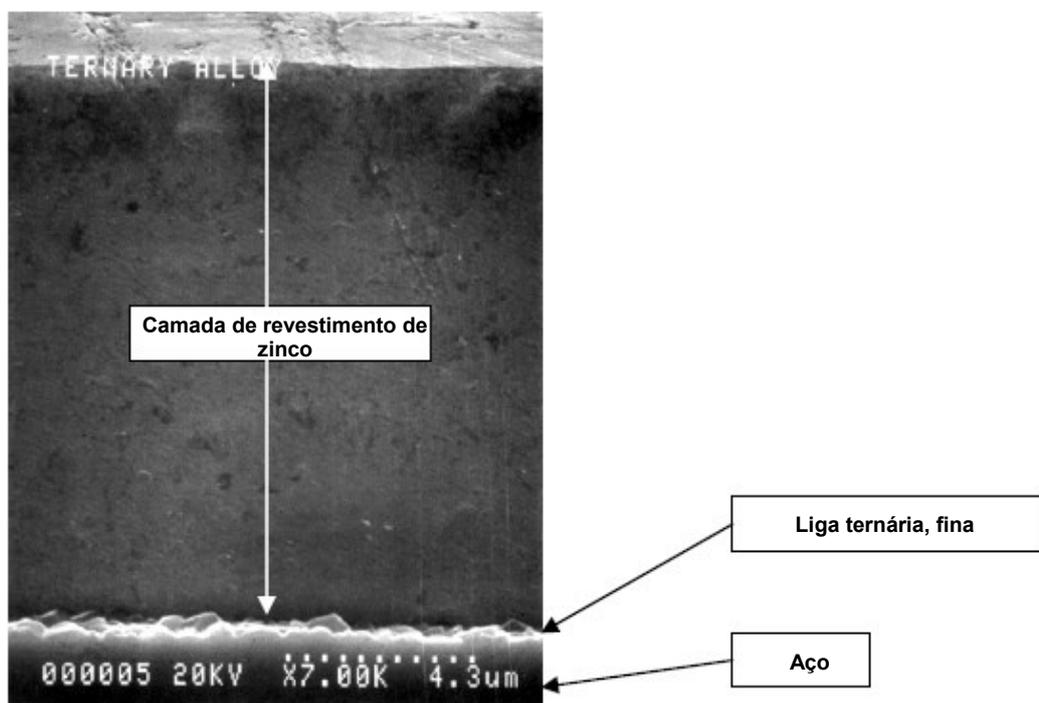


Figura 2: Corte transversal de revestimento galvanizado num banho contendo alumínio (zoom de 7000x)

Que descoberta! Este desenvolvimento por si só permitiu o crescimento da grande indústria de galvanização contínua, que agora produz mais de 25 milhões de toneladas por ano de galvanizados e galvaneals só na América do Norte. O produto destas linhas é utilizado em muitas aplicações, incluindo aquelas que necessitam conformações muito rígidas.

## Quantidade de Alumínio no Revestimento

Lembre-se que, para a produção de galvanizado, o banho do revestimento deve conter entre 0,15 e 0,17% de alumínio. Quando um revestimento produzido com este tipo de banho é analisado posteriormente, descobre-se um volume de alumínio de 0,25 a 0,40%. Como este aumento aparente ocorre? A resposta está na grande afinidade que o alumínio tem com o ferro. A liga inicial que se forma é  $Fe_2Al_5$  – com mais de 55% de alumínio em seu peso. O alumínio realmente se concentra na interface entre zinco e aço e é removido do banho com a tira. A espessura da camada de inibição é independente do peso (massa) do revestimento. Esta é a razão pela qual um peso (massa) de revestimento mais leve contém um percentual geral de alumínio mais alto. O índice e o método de adição do alumínio ao banho devem levar em consideração as situações que fazem com que seu índice de remoção varie, por exemplo: revestir uma chapa de bitola leve (grande área de superfície) com um revestimento fino de zinco remove o alumínio a uma velocidade muito mais alta do que a produção de uma chapa de bitola pesada com um revestimento mais espesso. Há outros fatores que controlam a quantidade de alumínio no revestimento, como tempo de imersão, índice de adição de alumínio, temperatura do banho de zinco e tipo de aço. Fossen e outros discutem esses tópicos em um artigo apresentadona Galvatech '95ii. Todos esses fatores devem ser considerados ao planejar como repor o alumínio no banho. A maioria dos produtores de galvanizados, com o auxílio de seus fornecedores de zinco, desenvolveu um algoritmo de adição de alumínio para seus tanques de zinco. Esses modelos de prognósticos preveem os níveis de alumínio dependendo da mistura de produtos e estipulam como adicionar alumínio que contém zinco para manter o alumínio no banho na concentração desejada.

Além da alta porcentagem de alumínio na camada de inibição, as camadas atômicas mais externas da superfície de zinco contém uma quantidade significativa de alumínio, a maioria sob a forma de óxido de alumínio. Isso ocorre devido à rejeição soluta durante a solidificação do revestimento de zinco, que força o alumínio à superfície. A fim de que possam ser ligados ao zinco, tratamentos de pré-pintura e passivação química são designados para remover as poucas camadas atômicas com alto nível de alumínio na superfície.

## O Alumínio nos Revestimentos Galvannealed

A produção de galvanneal envolve a presença crescente de compostos de liga de zinco-ferro ao longo do revestimento, de modo que tenha aproximadamente entre 9 e 10% do conteúdo de massa de ferro. Consulte a GalvInfoNote 1.3 para uma descrição completa sobre como o galvanneal é feito. Já que a presença do alumínio restringe dramaticamente o crescimento de uma camada de liga, como ele afeta a produção do galvanneal?

O reaquecimento da tira, que é necessário para produzir o galvanneal, reinicia a reação de difusão de zinco-ferro. Em segundos, o calor quebra a camada de inibição alumínio-ferro. Para que isso aconteça de maneira constante, é necessário o controle do alumínio, que não era possível nos primeiros dias de galvanização contínua. A produção de galvanneal depende da ligação entre zinco e aço em um índice suficientemente alto, de modo que a difusão completa do aço ao longo do revestimento possa ser realizada em um espaço de tempo razoável (permitindo que a produção seja feita em índices econômicos). As camadas de inibição formadas nos banhos de zinco galvanneal são geralmente mais finas do que aquelas formadas em banhos de galvanização<sup>1</sup>. Na verdade, a camada de inibição formada em banhos de galvanização com teores mais altos de alumínio pode não permitir que a reação galvanneal proceda de maneira adequada no tempo alocado. Quando a concentração de alumínio no banho é reduzida a menos de 0,15% (na variação de 0,12 a 0,14%), a camada de liga ternária é fina o bastante e de composição correta, para que o reaquecimento permita que a quantidade necessária de difusão ocorra em questão de segundos.

Após a conversão do revestimento para galvanneal, a camada de interface de liga de alumínio-ferro não existe mais. Ela, além da pequena quantidade de alumínio extra na superfície, tornam-se difusos no revestimento zinco-ferro.

Um fabricante que faz tanto produtos galvanizados quanto galvanneal na mesma linha de revestimento normalmente utiliza entre 0,15 e 0,19% de alumínio para produção galvanizada, depois permitindo que o nível de alumínio caia para menos que 0,15% para produzir galvanneal. Na prática, isto não é tão fácil quanto parece, já que a transição precisa ser realizada em um curto espaço de tempo. Para isso, um controle preciso do alumínio é necessário, exigindo capacidades de medição precisas.

## Resumo

A ação inibidora do alumínio em banhos de galvanização foi uma descoberta importante. Agora, as linhas de galvanização ao redor do mundo utilizam o alumínio em seus banhos de zinco. Ao longo dos anos, muito tem sido aprendido sobre a metalurgia do alumínio em banhos de galvanização, o que por sua vez tem influenciado amplamente as práticas de processo. A utilização do alumínio para reduzir a espessura da camada de liga é um desenvolvimento que fez com que a galvanização contínua por imersão a quente se tornasse a grande indústria que é hoje. Para informações mais detalhadas sobre o alumínio em banhos de zinco na linha de galvanização contínua, Consulte a GalvInfoNote 2.4.1 sobre Gerenciamento de Banho de Zinco em Linhas de Galvanização Contínua por Imersão a Quente.<sup>1</sup>

Copyright © 2011 – IZA

---

Isenção de Responsabilidade:

Artigos, relatórios de pesquisas e dados técnicos são fornecidos apenas para fins informativos. Embora os editores esforcem-se para fornecer informações precisas e atuais, a Associação Internacional de Zinco não abona os resultados das pesquisas e informações relatadas neste comunicado e se isenta de toda e qualquer responsabilidade por danos resultantes da confiança nos resultados relatados ou outras informações contidas neste comunicado, incluindo, mas não limitando a, danos acidentais ou consequentes.

---

---

<sup>1</sup> Price, S.E., et al, Formation and development of aluminum inhibition layers during galvanizing/galvannealing, La Revue de Metallurgie-CIT, Mars 1999, pp. 381-393

ii Fossen, E., et al, Aluminum Control on Stelco's Z-Line, Proceedings Galvatech '95, pp. 795-800