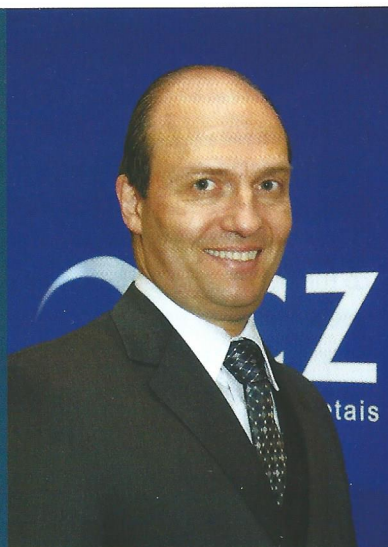


BARRA DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADA POR IMERSÃO A QUENTE



Ricardo Suplicy Goes

Gerente Executivo do ICZ – Instituto de Metais Não Ferrosos

ricardo.goes@icz.org.br

A barra de aço para armadura de concreto galvanizada por imersão a quente, que protege o aço contra a corrosão, é uma alternativa que resolve o problema na raiz, com eficácia e baixo custo

ABSTRACT

The corrosion of the reinforcing steel bar embedded in the concrete is considered one of the greatest pathologies. And most of the time it is caused by the high density of the reinforcing steel bar with insufficient concrete cover. This article intends to demonstrate that it can extend the service life of the reinforcing steel bar embedded in the concrete, even occurring the causes cited above, with the technology of hot-dip galvanizing, which zinc coating in the reinforcing steel bar. It is a treatment of the surface of the steel, which by a metallurgical reaction, protects the steel against corrosion, with efficacy and low cost. Hot Dip Galvanizing is a consolidated process with its tenacious, durable zinc coating, is uniquely suited to withstand these rigors without causing detriment to the concrete. It is used by the world for over 60 years and Brazil is already using, as we present here.

INTRODUÇÃO

O concreto armado (reforçado) é um dos materiais de construção mais amplamente usado. Tem custo razoavelmente baixo, facilmente disponível, possui uma gama de propriedades e características adequadas para diversas aplicações na construção civil.

O concreto armado é resultado da união entre concreto simples e armadura de reforço em seu interior. A armadura de reforço constitui-se de barras de aço adicionadas na zona onde o concreto é solicitado à tração. Desse modo, o concreto e o aço trabalham em conjunto, uma vez que, o concreto, resiste aos esforços de compressão, e o aço, absorve os esforços à tração cujo concreto apresenta baixa resistência.

Porém, um dos principais pontos a ser observado, é garantir a plenitude da barra de aço destinada à armadura de concreto armado, pelo aumento de sua vida útil e assim manter a eficiência do concreto armado.

Atualmente no Brasil temos presenciado com mais frequência os colapsos de estruturas de concreto armado em edificações e obras de arte (pontes/viadutos) em função da corrosão das armaduras, diagnosticado pela falta da manutenção, que gera custos. Esta falta de manutenção pode ser mitigada pela galvanização por imersão a quente das barras de aço destinada à armadura de concreto armado.

Por mais de 50 anos, os revestimentos de zinco obtidos através de galvanização por imersão a quente têm sido usados ao redor do mundo para proteger da corrosão as barras de aço destinadas à armadura de concreto armado, de modo econômico, pois diminui o custo de manutenção e eficaz, pelo aumento a vida útil das mesmas mesmo que ocorram falhas no cobrimento do concreto. Assim a integridade do concreto armado está garantida por mais tempo.

O PROBLEMA DA CORROSÃO DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO

O concreto é um material poroso constituído de pequenos poros e capilares, através dos quais os elementos corrosivos como a água, os íons de cloreto, o oxigênio, o dióxido de carbono e outros gases se infiltram na matriz de concreto, eventualmente atingindo as barras de aço destinadas à armadura de concreto armado, conforme ilustrado na figura 1.

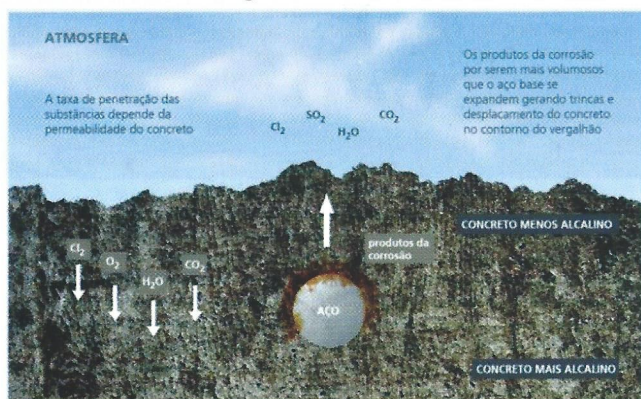


Figura 1: Penetração de elementos corrosivos no concreto



Figuras 2 e 3: Efeito da corrosão nas armaduras de aço dentro do concreto

Para cada mistura de concreto, em alguns níveis críticos de elementos corrosivos, o aço despassa-se e a corrosão se inicia. O concreto por si só, exibe boa resistência de compactação, mas possui pouca resistência de tensão, geralmente cerca de um décimo da resistência de compactação. Quando o ferro se oxida, ocorre uma diminuição da seção da armadura e os produtos resultantes da corrosão são de 2-10 vezes mais volumosos do que o aço original, o que gera tensão que excede a ca-

pacidade de tensão do concreto ao seu redor, fazendo-o rachar e fragmentar-se, conforme ilustrado nas figuras 2 e 3. Após a rachadura ter ocorrido, a capacidade estrutural do elemento pode ser comprometida, podendo ser necessários reparos, caros, para ampliar sua vida útil.

COMO PREVENIR A CORROSÃO DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO

O método mais comum é assegurar que o concreto que cobre o reforço (a barra) seja da espessura adequada e que o concreto em si seja denso e impermeável.

Como muitas vezes a realidade em campo não condiz ao que foi projetado, uma linha de defesa importante é proteger da corrosão a própria barra, por galvanização por imersão a quente, que consiste no revestimento do zinco no aço/ferro. O aço é imerso em um banho de zinco fundido a uma temperatura entre 440 °C a 480 °C, o que resulta em uma reação metalúrgica entre o zinco e o ferro, isto é, o zinco penetra na rede cristalina do metal base, resultando em uma difusão intermetálica, ou seja, na formação de ligas de Fe-Zn, camadas intermetálicas, na superfície de contato do substrato.

Este processo torna o revestimento integrado desde o metal base até a superfície, onde a camada formada é de zinco puro, isolando as barras de aço do concreto ao redor.

As barras galvanizadas por imersão a quente oferecem muitas vantagens sobre as barras convencionais sem proteção, incluindo:

- O aço fica protegido contra a corrosão antes de ser imerso no concreto;
- O zinco possui limite de concentração de cloreto mais alto para corrosão que o aço descoberto. Isso retarda significativamente o início da corrosão, a partir da infiltração de cloretos, na superfície das barras por galvanização por imersão a quente;
- A velocidade de corrosão do zinco no concreto é menor que a do aço, e os produtos de corrosão que o zinco forma não provocam tensões internas tão prejudiciais como as que o aço produz, quando sofre corrosão dentro do concreto. Como resultado o concreto não sofre deterioração;
- Os revestimentos de zinco proporcionam, além da barreira, uma proteção catódica, isto é, o zinco apresenta um potencial de redução menor que o ferro, se oxidando preferencialmente ao aço, o que significa que se ocorrer alguma imperfeição ou rachadura no revestimento, expondo o aço, a corrosão se concentrará preferencialmente na camada do zinco circundante, proporcionando assim uma proteção eletroquímica ao aço exposto. Desta forma, o revestimento galvanizado não pode ser debilitado pelos produtos resultantes da corrosão do aço, como

ocorre no caso de outros revestimentos tipo barreira, como por exemplo, o epóxi.

- A maior resistência à corrosão das barras por galvanização por imersão a quente permite uma maior tolerância à diversidade e aplicações do concreto;
- Sua aplicação está padronizada de acordo com normas internacionais (ASTM A767, ISO 14657) que asseguram a qualidade e as características de aplicação;
- No Brasil existe a norma ABNT NBR 16300:2016 - Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio;
- As barras de aço para armadura de concreto armado galvanizadas por imersão a quente atendem aos requisitos da norma NBR 7480:2007 - Aço destinado a armaduras de concreto armado.
- Aumenta a vida útil da estrutura.

Essas características das barras galvanizadas reduzem sensivelmente o risco de que sejam afetadas pela corrosão, que é a responsável pelo aparecimento de manchas de óxido, de rachaduras e de fragmentação do concreto. O uso de barras de aço galvanizadas prolonga os intervalos de manutenção das estruturas de concreto e reduz substancialmente o custo de manutenção como um todo.

De uma forma geral, de barras de aço galvanizadas, podem ser tratadas do mesmo modo que as barras sem revestimento e não exigem precauções especiais para proteger o revestimento durante o manuseio, transporte e instalação na obra. Veja Figura 4. Abaixo).



Figura 4: Barras galvanizadas no canteiro de obras

PERFORMANCE DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADAS POR IMERSÃO A QUENTE NO CONCRETO

- Relação água/cimento: entre 0,4 e 0,5 para concreto armado em ambiente marinho é a recomendação de norma ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.
- Quanto menor esta relação, menor a porosidade do concreto, portanto menos permeável;

- Embora o hidroxizincato de cálcio não evite a penetração do íon cloreto, a superfície do vergalhão galvanizado é 2,5 vezes mais tolerante a cloretos do que vergalhão sem proteção.
- Zinco em soluções fortemente alcalinas ($> \text{pH} 12,5$) é passivado por formação de camada de cristais aderentes - Hidroxizincato de Cálcio (CaHZn).
- A formação do Hidroxizincato de Cálcio (CaHZn) começa imediatamente em contato com a solução de cimento molhado, reduzindo assim o valor do pH ao redor de 9,0, levando o zinco ao seu estado passivado, portanto cessando sua oxidação, estabilizando o mesmo e isolando-o do ambiente circundante. A reação com zinco cessa logo que o concreto endurece.
- As barras de aço galvanizadas não sofreram com os efeitos de elementos ácidos produzidos pela carbonatação à medida que o concreto envelhece, pois, o zinco tem uma faixa de pH de passivação, Ph entre 06 e 12) muito maior que o aço.
- O hidroxizincato de cálcio é um produto fibroso, apresenta uma elevada adesão química ao concreto, o que resulta na elevada aderência ao concreto.
- Há evidências que sugerem que a difusão dos produtos resultantes da corrosão do zinco ajuda a preencher os espaços porosos na interface concreto/vergalhão, tornando essa área menos permeável e ajudando a reduzir o transporte de substâncias agressivas (como os cloretos) através desta interface, que dá acesso ao revestimento de zinco.

Aderência da barra de aço galvanizado por imersão a quente ao concreto

- A aderência das barras galvanizadas ao concreto não é menor do que a dos vergalhões sem revestimento, e, em muitos casos, é ainda melhor. A média do coeficiente de conformação superficial, $\eta = 1,8$ atende aos requisitos da norma ABNT NBR 7480 - Aço destinado às armaduras de concreto armado (mínimo $\eta = 1,5$ para $\varnothing \geq 10\text{mm}$ para categorias CA50 e CA60). Isso permite utilizar as mesmas especificações de projeto no concreto armado (tamanho das barras, comprimentos das sobreposições, etc.), que se aplicam no caso das barras sem proteção. Os dados acima são resultados de ensaios realizados, em agosto de 2013, ensaios no laboratório Falcão Bauer, cujos números são: L-236.758/1/13 e L-236.758/2/13.

Evolução do hidrogênio

- Quando o zinco reage com o concreto úmido ocorre a formação de Hidroxizincato de Cálcio, acompanhado pela evolução do hidrogênio. Este produto da corrosão é insolúvel e protege a camada de zinco subjacente - sempre e quando o pH da mistura de concreto circundante esteja abaixo de 13,3 - .As pesquisas têm demonstrado que,

durante este período de reação inicial e até que a passivação do revestimento e o endurecimento do concreto ocorram, parte da camada de zinco puro do revestimento é dissolvida entre 05 a 10 micrometros.

Entretanto, esta reação inicial cessa quando ocorre o endurecimento do concreto e há a formação da camada de hidroxizincato. As análises das barras de aço galvanizadas, recolhidas de estruturas em campo, indicam que o revestimento permanece neste estado de passivação por períodos mais longos, mesmo estando exposto aos altos níveis de cloreto do concreto circundante. No caso de concreto com pH elevado ou quando se espera a presença de uma certa concentração residual de cloretos, a superfície do zinco pode ser passivada, usando-se vários pós-tratamentos comerciais com o intuito de protegê-la contra a evolução excessiva de hidrogênio, o que pode, em casos mais extremos, reduzir a força de aderência dos vergalhões. Quando o concreto se encontra em condições normais, as pesquisas têm demonstrado que não existe nenhuma diferença estatística na força de aderência do vergalhão galvanizado, tanto no caso de ter sido passivado como no caso de não ter sido.

- Algum hidrogênio nascente ocorre por reação do zinco com a pasta de cimento alcalina, sendo mais uma reação catódica do processo. A evolução cessa quando a pasta endurece.

O hidrogênio nascente sobre o zinco, neste caso, não migra para dentro, não atingindo o aço, pois a difusibilidade do hidrogênio nascente no zinco é bastante pequena, em torno de três vezes menor que o valor observado sobre o aço. Assim o aço permanecerá íntegro.

Presença de outros metais no concreto

- Uma consideração adicional ao usar o aço galvanizado é a possibilidade de estabelecer conexões bimetálicas entre o zinco e o aço sem revestimento. O aço galvanizado não deve ser unido a grandes áreas de aço sem revestimento, cobre ou outros metais, a menos que se aplique isolamento adequado. Arames para amarração, suportes e outras barras também devem ser galvanizados.

PRÁTICAS NO CAMPO DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADAS POR IMERSÃO A QUENTE NO CONCRETO

É recomendado consultar a diretriz para a prática no campo, da ABNT NBR 16300:2016 - Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio.

Dobra das barras de aço para armaduras de concreto galvanizadas por imersão a quente

As barras de aço para armaduras de concreto galvanizadas por imersão a quente, conforme norma americana ASTM A767:

- Apresentam desempenho aos esforços de tração similar aos das barras nuas. O processo da galvanização por imersão a quente não afeta as propriedades mecânicas do aço para o concreto armado;
- Dobra a frio antes da galvanização, deverão ser fabricadas com um diâmetro igual ou superior aos especificados na tabela 2 abaixo;

TABLE 2 Minimum Finished Bend Diameters

Bar No.	Grade 280 [40]	Grade 350 [50]	Grade 420 [60]	Grade 520 [75]
10,13,16 [3,4,5]	6d ^A	6d	6d	...
19 [6]	6d	6d	6d	6d
22,25 [7,8]	6d	8d	8d	8d
29,32 [9,10]	...	...	8d	8d
36 [11]	...	...	8d	8d
43,57 [14,18]	...	...	10d	10d

^A d = nominal diameter of the bar.

- Dobra após a galvanização, a presença de rachaduras e descamação do revestimento do zinco na área de curvatura não deve ser motivo de rejeição. A tendência de rachaduras do revestimento de zinco aumenta com o diâmetro da barra e com a intensidade e taxa de curvatura;
- Eventuais danos podem ser reparados com tinta rica em zinco (mín. de 85% de zinco) ou pelo processo de metalização de zinco.

Manuseio e armazenamento

Os vergalhões galvanizados podem ser armazenados na intempérie sem afetar seu desempenho anticorrosivo. Isso permite o armazenamento de tamanhos-padrão de modo que estejam disponíveis segundo a demanda. Outra característica do vergalhão galvanizado é que pode ser manipulado e disposto da mesma maneira que o vergalhão sem revestimento. Isso devido à alta resistência à abrasão que possui o material galvanizado por imersão a quente.

Soldagem durante a instalação

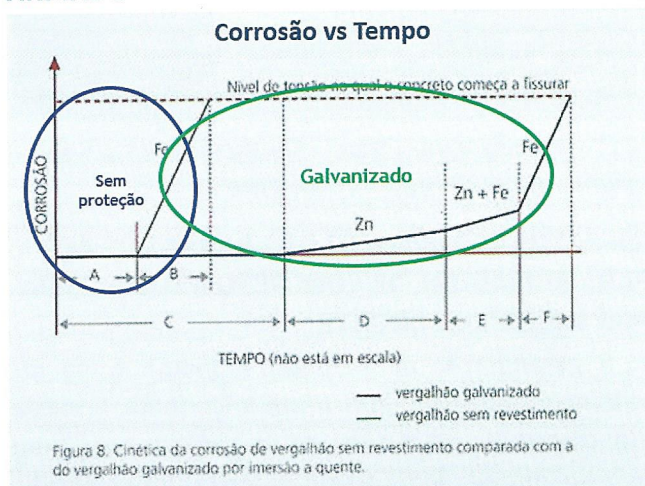
Soldar vergalhões galvanizados não é um problema desde que sejam tomadas as precauções necessárias, como aplicar na região da solda tinta com teor mínimo de 85% de zinco ou aspersão térmica de zinco – metalização. O procedimento inclui utilizar velocidades de solda mais lentas e manter uma ventilação adequada.

Reparos no revestimento durante a instalação

Danos ao revestimento em áreas soldadas, dobradas ou de bordas cortadas não afetarão significativamente a proteção oferecida pela galvanização se a área exposta for pequena em relação à área galvanizada.

Atualmente as siderúrgicas oferecem o fornecimento das barras de aço para armaduras de concreto armado já dobrado e cortado nas dimensões do projeto. É recomendado realizar a galvanização por imersão a quente nestas condições para aumentar a eficiência do revestimento do zinco nas barras.

EXPECTATIVA DE DURABILIDADE DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO ARMADO



A – Concreto é exposto aos agentes agressivos (CO_2 , cloretos e outros);

B – Período de oxidação destrutiva do aço sem revestimento (linear) até o limite aceitável de deterioração do concreto;

C – Iniciação da oxidação do zinco. Extensão da durabilidade devido à maior tolerância dos íons cloretos e ao pH;

D – Período de proteção enquanto se dissolve uma pequena parcela da camada de zinco puro na superfície do aço;

E – Período de proteção adicional enquanto se dissolvem as camadas de liga Zn+Fe do Revestimento;

F – Ataque do aço exposto idêntico ao B.

APLICAÇÕES DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADA POR IMERSÃO A QUENTE

O uso das barras de aço para armadura de concreto galvanizada por imersão a quente galvanizadas e outros acessórios (incluindo parafusos, amarras, âncoras, barras de segurança e tubulações) está amplamente generalizado em diversas estruturas e elementos de concreto reforçado. Algumas das aplicações em que a galvanização das estruturas leva a uma decisão de engenharia rentável são as seguintes:

- infraestrutura de transporte, incluindo pisos de pontes, pavimentos de estradas e barreiras de segurança;
- os elementos de proteção pré-moldados leves para fachadas e outros elementos arquitetônicos de construção;
- vigas e pilares exteriores e forjados, expostos às intempéries;

- construções pré-fabricadas incluindo elementos tais como módulos de cozinhas e banheiros e barracões móveis;
- elementos submersos ou enterrados sujeitos aos efeitos da água subterrânea e às flutuações das marés;
- estruturas costeiras e marítimas;
- estruturas de alto risco instaladas em ambientes agressivos.

Existem muitos exemplos ao redor do mundo onde as barras galvanizadas têm sido usadas com sucesso em diversos tipos de edificações, estruturas e construções de concreto reforçado, incluindo:

- pisos e pavimentos de pontes em concreto reforçado;
- torres de resfriamento e chaminés;
- armazéns para armazenagem de carvão;
- revestimentos de túneis, tanques e instalações para armazenagem de água;
- cais, quebra-mares e plataformas marítimas;
- marinas e ancoradouros flutuantes;
- diques e balaustradas costeiras;
- fabricas de papel, plantas de saneamento e tratamento de águas residuais;
- instalações industriais e plantas de produtos químicos;
- equipamentos, fixações para autoestradas e barreiras de proteção;
- postes e torres de transmissão de energia feitos em concreto.

Alguns exemplos de países que possuem estruturas importantes utilizando o vergalhão galvanizado são: Austrália, Nova Zelândia, Índia, Japão, Estados Unidos, Canadá, Londres, Itália, Holanda.

CASE - PONTE ROUTE 66, KITTANNING PA (PENNSYLVANIA) - 1973



Após 30 anos de exposição a altas concentrações de cloreto não houve evidência de corrosão apesar do teor de cloreto encontrado na superfície ser 5x o limite de corrosão para a moldura nu.

Não houve necessidade de renovação do pavimento, e a nova barreira foi preenchida com concreto em torno da estrutura com moldura galvanizada existente.

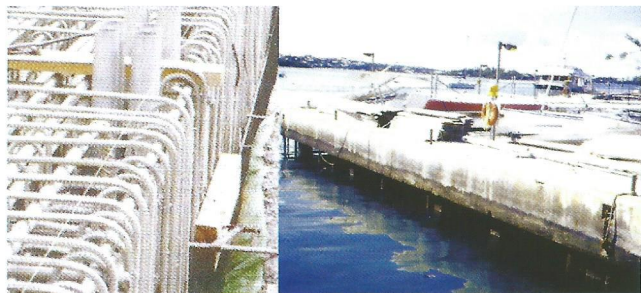
Dados:

- Teor de cloreto na superfície do vergalhão 3.0 kg/m³ – 5x o limite do vergalhão nu.
- Espessura média da camada de zinco: 247-270 micrometros.

A EXPERIÊNCIA DAS BERMUDAS

A experiência prática e as pesquisas durante muitos anos demonstram claramente as vantagens da galvanização para a proteção anticorrosão do reforço em aço em muitos tipos de ambientes, incluindo situações de exposição a uma alta concentração de cloreto. A galvanização tem demonstrado retardar o início da corrosão nas armaduras de aço, além de reduzir o risco de danos físicos nas estruturas de concreto, causados por delaminação, rachaduras e fragmentação.

FOTOS PIER NO ROYAL BERMUDA YACHT CLUB, CENTRAL DE ENERGIA DE TYNES BAY, BERMUDAS



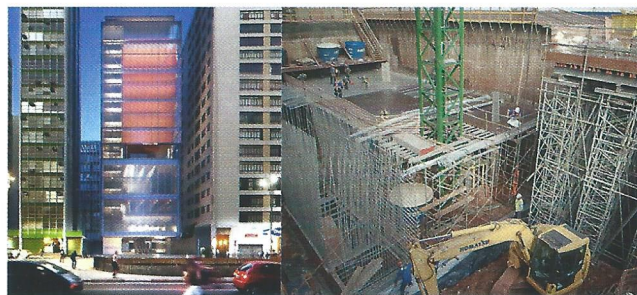
Desempenho similar das barras de aço galvanizadas foi obtido nas Ilhas Bermudas, o que confirma a durabilidade a longo prazo do concreto armado com as armaduras galvanizadas, em ambientes marítimos.

Há mais de 50 anos, todos os cais, quebra-mares, pisos de pontes, subestruturas e outras infraestruturas nas Bermudas são regularmente construídos com barras de aço galvanizadas. Em 1995, uma inspeção com a retirada de material do interior da Ponte Longbird, que na ocasião tinha 42 anos, revelou que as armaduras de aço galvanizadas ainda tinham a espessura do revestimento de zinco muito além dos valores da nova especificação para revestimento galvanizado por imersão a quente, mesmo com níveis de cloreto no concreto entre 3 a 9 libras/jarda cúbica (1 a 4 kg/m³). Além disso, um exame detalhado das amostras do concreto dessas estruturas revelou que os produtos resultantes da corrosão do zinco migraram para uma distância considerável (cerca de 0,4mm), a partir da interface zinco/concreto, para o interior da matriz do concreto circundante, sem produzir nenhum efeito visível no concreto. Os estudos demonstram que em concreto de boa qualidade e que esteja bem compactado, bem conservado e com uma espessura adequada de recobrimento, as armaduras galvanizadas se conservam por períodos mais longos e são um método econômico de proteção à corrosão.

Em concretos de má qualidade, particularmente aqueles que contêm uma elevada proporção de água/cimento e um recobrimento deficiente sobre a armadu-

ra, a galvanização retardará o aparecimento da corrosão do reforço provocada pela presença de cloreto, mas seus efeitos são mais limitados.

A EXPERIÊNCIA NO BRASIL



2017 – Instituto Moreira Sales – São Paulo SP – 100 % em vergalhão galvanizado por imersão a quente

ASPECTOS ECONÔMICOS DAS BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADA POR IMERSÃO A QUENTE

A galvanização por imersão a quente é um investimento pequeno, mas muito importante. É usada exaustivamente em todo o mundo, todos os anos, para proteger milhões de toneladas de aço contra a corrosão. A galvanização por imersão a quente é, portanto, um serviço amplamente disponível, com um custo muito competitivo em relação a outros sistemas de proteção dos vergalhões de aço. Quando comparado ao custo total da construção ou da edificação, e aos enormes custos potenciais associados à manutenção prematura do concreto danificado ou falhas da estrutura, o custo adicional pago pela moldura galvanizada é muito pequeno e plenamente justificado.

Estudos recentes apresentaram que considerando o custo total da obra, o aumento pela utilização de barras de aço para armadura de concreto galvanizadas por imersão a quente é da ordem de 1% a 3%.

FONTES

- *Hot Dip Galvanized Reinforcing Steel: A Concrete Investment* - International Zinc Association (IZA)
- *Catalogo Vergalhão Galvanizado: Durabilidade e segurança para sua obra* – ICZ
- *Biblioteca do ICZ*
- *Norma ASTM A767/A767M:2016: Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement*
- *Norma ABNT NBR 7480: 2007: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação*
- *ABNT NBR 16300:2016: Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio.* ▲