



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Vergalhão Galvanizado: Vantagens, Aplicações e Desempenho em Estruturas de Concreto Armado.

Luiza Abdala¹, Daniele Albagli²

¹ Votorantim Metais / Desenvolvimento de Mercado / luiza.abdala@vmetais.com.br

² Votorantim Metais / Desenvolvimento de Mercado / daniele.albagli@vmetais.com.br

Resumo

A galvanização por imersão a quente de estruturas metálicas é uma técnica de proteção contra a corrosão que consiste na imersão da peça metálica em banho de zinco fundido a 450°C, formando ligações intermetálicas entre o aço e o zinco, conferindo proteção catódica e por barreira ao material. A proteção de vergalhões de aço através da galvanização por imersão a quente já é utilizada nos Estados Unidos e Europa, principalmente em obras de concreto armado, como pontes e viadutos. No Brasil, a proteção dos vergalhões de aço contra a corrosão ainda é pouco difundida. Isto ocorre porque ainda se tem uma visão de curto prazo na relação custo inicial e durabilidade das obras. O custo inicial adicional na utilização do vergalhão galvanizado em obras de arte especiais é aproximadamente 4% em relação ao valor total da obra, custo que é facilmente compensado quando se leva em conta os ganhos em durabilidade e redução nos custos de manutenção das estruturas ao longo da sua vida útil. Estima-se que a primeira manutenção em uma estrutura com vergalhão galvanizado aconteça, no mínimo, 30 anos após a conclusão da obra, enquanto uma estrutura em vergalhão comum costuma demandar manutenção já a partir do décimo ano. Ainda que aumente a durabilidade das estruturas, a galvanização de vergalhões não altera suas propriedades mecânicas, portanto, as barras galvanizadas podem ser aplicadas nas mesmas condições da barra comum. Este trabalho visa comprovar a igualdade de performance entre o vergalhão de aço comum e o vergalhão galvanizado, quanto às propriedades mecânicas através da apresentação dos resultados de ensaios de tração e dobramento do vergalhão e aderência, espessura e uniformidade do revestimento realizados em vergalhões comuns e galvanizados de diâmetros 10 e 25 mm, e divulgar as vantagens deste material no aumento da vida útil das estruturas de concreto armado.

Palavras-chave

Vergalhão; Galvanização; Proteção; Corrosão; Zinco;

Introdução

Foram realizadas inspeções em 16 obras de arte especiais para análise da incidência de tipos de anomalias mais frequentes e observou-se que 76% das anomalias estavam relacionadas à exposição das armaduras de aço, que corresponde a 31% do total dos custos destinados à manutenção. Estas anomalias devem-se, principalmente, ao cobrimento de concreto insuficiente sobre as barras de aço. A corrosão do aço no concreto armado inicia e se mantém, principalmente, devido à redução da alcalinidade com a presença de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e/ou outros elementos ácidos e ação de íons despassivantes como cloretos



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



(Cl⁻) na presença de oxigênio, o que resulta na oxidação do aço, formando óxido de ferro, que é mais volumoso que o aço, o que pode resultar em tensões de tração no concreto que provocam fissuras e o seu desprendimento da estrutura. Usado principalmente em obras de pontes e viadutos, onde as manutenções são, na maioria das vezes, de difícil acesso e trazem grandes consequências à sociedade pela necessidade de desvios de estradas para reformas no pavimento, o vergalhão galvanizado é um “case” de sucesso de aplicação da galvanização.

Mecanismo de corrosão das armaduras

Em condições ideais, o próprio concreto confere ao aço uma dupla proteção: é uma barreira física que separa o substrato de aço do ambiente externo, e a natureza altamente alcalina do cimento hidratado forma uma película protetora para as barras de aço. No entanto, nem sempre as condições de execução do cobrimento de concreto e do ambiente em que a estrutura está inserida são ideais. A corrosão do vergalhão de aço se deve à redução da alcalinidade devido à presença de dióxido de carbono atmosférico e/ou outros elementos ácidos e também à ação de íons despассивantes, como Cloretos (Cl⁻), na presença do oxigênio. Isso resulta em um processo destrutivo contínuo.

A corrosão do vergalhão resulta na diminuição da seção do aço, ou até mesmo sua completa conversão em óxido e a aderência entre o aço e o concreto reduz significativamente. Além disso, os produtos de corrosão do aço (óxido de ferro) são altamente volumosos e, portanto, provocam fissuras e trincas no concreto, que podem resultar até mesmo no seu desprendimento da estrutura, causando problemas de segurança. As trincas e fissuras no concreto podem tornar-se porta de entrada para elementos agressivos, o que pode levar ao comprometimento total da estrutura.

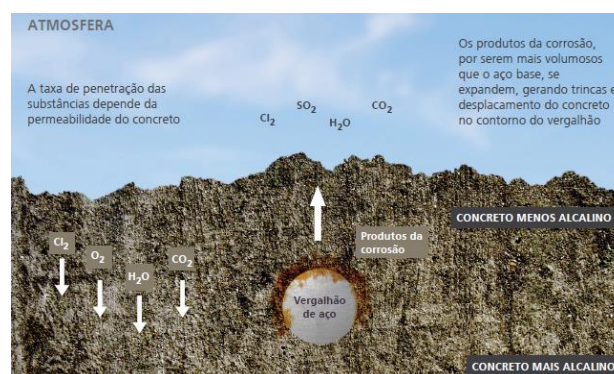


Figura 1 – Mecanismo de corrosão no concreto armado.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Uma maneira econômica e simples de minimizar a incidência da corrosão na armadura é garantir uma espessura adequada no revestimento de concreto. Porém, apesar desse conhecimento, sabe-se que, apesar de os projetos de engenharia especificarem espessuras adequadas, dificilmente esse revestimento é reproduzido no local da obra. Para atenuar as consequências do revestimento insuficiente, ou porosidade e fissuras no concreto, o revestimento do aço com uma camada de zinco é uma solução que vem sendo adotada e oferece diversas vantagens como a proteção do aço antes mesmo da sua imersão no concreto. O zinco possui maior tolerância a variações de pH do concreto, o início da corrosão é retardado e as taxas de corrosão do zinco são inferiores às taxas de corrosão do aço, conferindo maior vida útil às estruturas e redução na frequência das manutenções.

Galvanização por imersão a quente

A Galvanização por imersão a quente é um processo de revestimento do aço com zinco visando preservar a plenitude de suas qualidades e aperfeiçoar seu desempenho contra a corrosão. Existem também no mercado outras técnicas de aplicação de zinco sobre o aço como, por exemplo, a galvanização eletrolítica (eletrodeposição). A galvanização a quente deposita camadas muito mais espessas que aquelas obtidas pela eletrodeposição. Um revestimento típico obtido em vigas e pilares cujas espessuras de alma sejam superiores a 6 mm é superior a 80 μm . Este é o valor mínimo de camada prescrito pelas normas brasileira e internacional. Um revestimento típico de zinco obtido por eletrodeposição não supera os 20 μm . Camadas mais espessas implicam em maior durabilidade da proteção, portanto, para utilização em vergalhões, recomenda-se apenas a galvanização por imersão a quente.

O processo consiste na imersão dos vergalhões em diversos banhos de limpeza da superfície do aço e posterior imersão em um banho de zinco fundido a 450 °C. O rápido ataque da superfície da estrutura pelo zinco fundido produz uma camada de revestimento composta por diferentes ligas zinco-ferro (Figura 1), que desenvolvem uma forte ligação com o substrato de aço. Esta união é chamada interação metalúrgica. Após a remoção das barras de aço do banho de zinco fundido, uma camada de zinco puro passa a recobrir sua superfície. As camadas de liga mais próximas do aço são mais rígidas, às vezes até mais rígidas do que a própria base do aço. Essa combinação oferece um revestimento rígido e resistente à abrasão.



Figura 1 - Imagem do corte da camada de Zinco sobre o aço após galvanização.

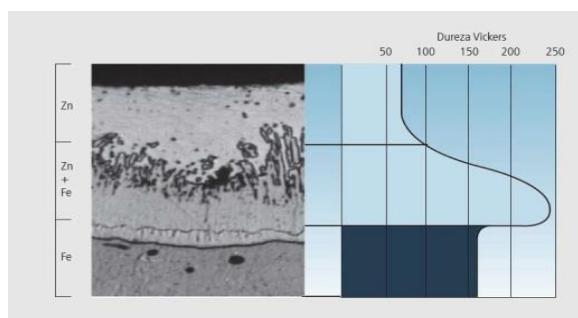


Figura 2 - Microseção da camada galvanizada por imersão a quente, mostrando as variações da rigidez através do revestimento. As ligas de zinco-ferro são mais rígidas do que a base do aço.

Através desse sistema, a proteção contra corrosão do aço é garantida por meio de dois mecanismos: a proteção por barreira exercida pela camada de revestimento e a proteção catódica da camada zinco-ferro. O zinco, por ser mais eletronegativo que o aço, sofre corrosão preferencial e sacrifica-se para protegê-lo, portanto, a galvanização por imersão a quente oferece essa proteção catódica. Os produtos de corrosão do zinco são aderentes e insolúveis, e se depositam sobre a superfície do aço, isolando-o da atmosfera, evitando assim a corrosão, em um processo semelhante à cicatrização. O tempo de execução de um processo de galvanização típico é extremamente rápido, é possível revestir a peça em alguns minutos. No caso do concreto armado, a galvanização oferece proteção contra as causas mais frequentes da corrosão. Ao penetrar na estrutura do concreto, o CO_2 reduz o pH do meio, o que acelera rapidamente a corrosão do aço exposto, cuja perda de passivação se inicia abaixo de pH 12. Em contrapartida, o aço galvanizado não sofrerá esses efeitos produzidos pela carbonatação à medida que o concreto envelhece, pois o zinco tem bom comportamento em



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



uma faixa de pH muito maior que o aço (entre 4 e 12). O aço galvanizado pode suportar exposição a concentrações superiores às suportadas pelo aço sem proteção. Quando utilizado o aço sem proteção, deve-se considerar 0,4% como limiar superior de íons de cloreto (Cl-) por massa de cimento. Já para o aço galvanizado, esse limite se eleva a 1,0%. Adicionalmente, a galvanização mantém a integridade do concreto. O zinco sofre corrosão a taxas entre 10-30 vezes inferiores ao aço, dissolvendo-se gradualmente e formando produtos de corrosão que são menos volumosos que os óxidos de ferro equivalentes, não têm uma fase expansiva volumosa, migram, distanciando-se do contato com o vergalhão, e preenchem as fissuras e vazios no concreto. Como resultado, o concreto não sofre deterioração.

Propriedades mecânicas do vergalhão galvanizado

Para evidenciar que a galvanização não altera as propriedades mecânicas do aço, foram realizados ensaios, em Agosto de 2013, no laboratório Falcão Bauer, sob números 236.758/1/13 e 236.758/2/13, seguindo as normas ABNT, conforme Tabela 1. Os ensaios são comparativos, portanto, o número de amostras e os tipos de ensaios foram iguais e realizados com vergalhões com e sem revestimento de zinco, para as bitolas de 10 mm e 25 mm.

Tabela 1 – Ensaios realizados com vergalhões de aço comum e aço galvanizado.

Número norma ABNT	Ensaio
ABNT NBR 6153	Ensaio de dobramento semi-guiado
ABNT NBR 7477	Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado
ABNT NBR 7398	Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente – verificação da aderência do revestimento – método de ensaio
ABNT NBR 7399	Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente – verificação da espessura do revestimento por processo não destrutivo – método de ensaio
ABNT NBR 7400	Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido por imersão a quente – verificação da uniformidade do revestimento.
ABNT ISO 6892:2013	Materiais metálicos - ensaio de tração – parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente
ABNT NBR 8094	Corrosão por exposição à névoa salina – Câmara de salt spray
ABNT NBR 8095	Corrosão por atmosfera úmida saturada
ABNT NBR 8096	Corrosão por exposição ao dióxido de enxofre

Em relação aos ensaios de tração, dobramento e escoamento foram encontrados os resultados descritos na Tabela 2, a seguir.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Tabela 2 - Resultados encontrados nos testes de tração, dobramento e escoamento para vergalhões de aço comum e de aço galvanizado

Parâmetro Determinado	Especificado* (mínimo)	Resultados Obtidos			
		Bitola 10 mm Aço Comum	Bitola 10 mm Aço Galvanizado	Bitola 25 mm Aço Comum	Bitola 25 mm Aço Galvanizado
Limite de Escoamento (Mpa)	500	664	627	563	566
Limite de Resistência (Mpa)	540	846	763	713	683
Relação LE/LR	1,08	1,27	1,21	1,26	1,21
Alongamento após ruptura	8	14,1	13,6	16,7	16,4

* Valores estabelecidos pela Norma NBR 7480:2007

Os resultados da tabela acima mostram que todos os exemplares atendem às especificações da NBR 7480:2007, quanto ao escoamento, resistência à tração, relação limite de resistência por limite de escoamento (LR/LE) e alongamento após a ruptura. Destaca-se nesta série de ensaios o comportamento das barras galvanizadas que, quando submetidas ao ensaio de dobramento, não apresentaram fissuras na zona tracionada, o que evidencia a forte aderência entre a camada de zinco e o substrato aço, decorrência da formação das camadas intermetálicas. Este ensaio exige muito do aço e é comum o aparecimento de fissuras.

Em relação à caracterização do revestimento de zinco, as 9 amostras foram ensaiadas para determinar a espessura e uniformidade da camada de zinco, a fim de comprovar a qualidade da galvanização dos vergalhões. Os valores médios obtidos para a espessura da camada de zinco constam na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Resultados encontrados nos testes de espessura da camada zinco para vergalhões de aço galvanizado

Parâmetro Determinado	Bitola 10 mm Espessura média	Resultados Obtidos		
		Bitola 10 mm Desvio padrão	Bitola 25 mm Espessura média	Bitola 25 mm Desvio padrão
Espessura do revestimento de zinco (μm)	319	45,64	254,8	36,57

As espessuras encontradas atendem à norma internacional ASTM A767: Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Quanto à uniformidade, as figuras a seguir mostram o aspecto das barras antes do ensaio e após 06 imersões de 01 minuto cada, em solução de cobre. Nenhuma amostra apresentou depósito de Cobre aderente e brilhante, comprovando a uniformidade do revestimento de zinco.



Figura 3 – Vergalhões galvanizados (bitola 10 mm) antes do ensaio.



Figura 4 – Vergalhões galvanizados (bitola 10 mm) após ensaio – Não apresentou depósito.

Por fim, foram realizados ensaios de exposição à névoa salina, em câmara de salt spray. Este processo simula a situação de agressividade média em ambientes com altos teores de cloretos, como ambientes marinhos e regiões costeiras. Os ensaios foram comparativos e tiveram a duração total de 28 dias na câmara salina, com medição de perda de massa. Verificou-se que já com 24 horas de exposição, as barras não galvanizadas apresentaram corrosão vermelha. As barras galvanizadas, tanto de 10 mm de bitola, quanto de 25 mm, não apresentaram corrosão vermelha até o término do ensaio com 672 horas, ou seja, 28 dias. A corrosão branca indica oxidação no revestimento de zinco e, somente após totalmente corroído o revestimento é que se observa a corrosão vermelha, que indica a oxidação do substrato de aço. O ensaio comprova que a corrosão do aço galvanizado é muito mais lenta em relação à corrosão do aço comum. A Figura 5 e a Figura 6 ilustram as barras ensaiadas após 672 horas de exposição.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Figura 5 – Barras de aço comum após exposição de 672 horas à névoa salina, com intensa corrosão vermelha.



Figura 6 – Barras de aço galvanizado após exposição de 672 horas à névoa salina, ausência de corrosão vermelha.

A figura a seguir apresenta a perda de massa dos vergalhões de aço comum e de aço galvanizado, nas bitolas de 10 mm e 25 mm, ao longo do ensaio durante os 28 dias, ou 672 horas.

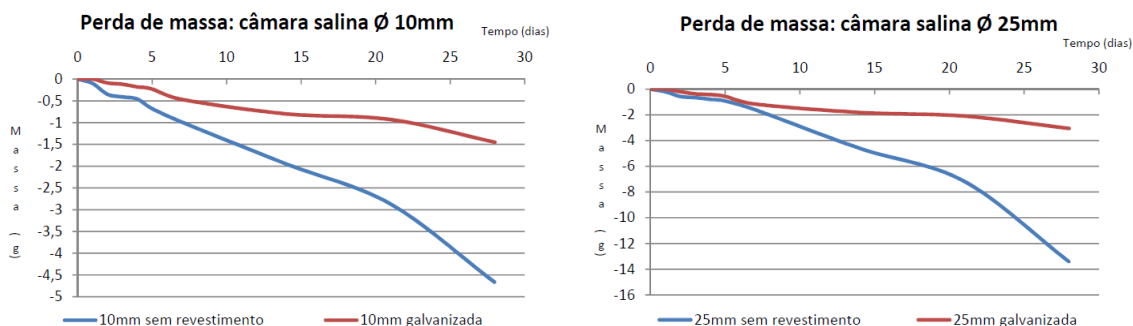


Figura 7 – Perdas de massa durante o ensaio de 672 horas de exposição em câmara salina de vergalhões de aço comum e de aço galvanizado para diâmetros de 10 mm e de 25 mm.

Nota-se nitidamente maior perda de massa nas barras comuns. Na bitola de 10 mm, a perda de massa do galvanizado foi de 1 g, enquanto a perda da barra comum foi de mais de 4,5 g. Para a bitola de 25 mm, a perda de massa da barra galvanizada foi de 2,5g, enquanto a perda de massa para o vergalhão comum foi de mais de 13g. Com isto, nota-se que a taxa de corrosão do zinco foi de 4 a 5 vezes menor que a taxa de corrosão do aço e pode-se estender essa lógica ao conceito de vida útil, ou seja, se um reservatório em aço comum demanda manutenção nas armaduras a partir do 10º ano, o reservatório que utilizar vergalhões galvanizados deverá demandar manutenção somente a partir do 40º ano. Para fins de comparação, foi estimado que



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



o reservatório construído ou recuperado com aço galvanizado demande manutenção, no pior dos casos, a partir do 30º ano.

Custos adicionais com a utilização do aço galvanizado em pontes e viadutos

De acordo com o estudo realizado pelo Eng. Ilo Borba, em 2013, tem-se o adicional de custos envolvido na utilização da galvanização por imersão a quente de vergalhões de aço.

Considerando-se os seguintes dados de construção de pontes e/ou viadutos:

- a) Extensão total: 60 m;
 - b) Largura do tabuleiro: 10 m;
 - c) Super estrutura: concreto protendido;
 - d) Meso e infra estrutura: concreto armado;
 - e) Volume total de concreto da obra: $V_c = 0,55 \times 1,30 \times 60,00 \times 10,00 = 429,00 \text{ m}^3$;
 - f) Peso total da armação em aço CA-50: $P_a = 429,00 \times 130,00 = 55.770,00 \text{ kg}$;
 - g) Custo por m^2 da construção: R\$ 3.000/ m^2 ;
 - h) Custo por kg de galvanização: R\$ 1,50/kg (sem frete);
 - i) Preço total da construção: $P_c = 60,00 \times 10,00 \times 3.000,00 = \text{R\$ } 1.800.000,00$;
 - j) Preço total da galvanização do aço CA-50: $P_g = 55.770,00 \times 1,50 = \text{R\$ } 83.655,00$;
 - k) Percentual do aumento no custo: $P_1 = 83.655,00 \div 1.800.000,00 \times 100 \% = 4,65 \%$;
 - l) Percentual de aumento de preço de venda*: $P_2 = 4,65 \% \times 1,2670 = 3,67 \%$;
- *Considerando BDI (bonificação e despesas indiretas) do DNIT de 26,70%.

Assim, tem-se que o aumento nos custos totais de uma obra de construção de pontes ou viadutos é inferior a 5%. Analisando-se os benefícios que a galvanização traz para as estruturas de concreto armado, nota-se que esse adicional do custo é muito pequeno frente aos grandes ganhos que se tem em redução de custos de manutenção e de custos indiretos.

Conclusões

A galvanização das armaduras é fortemente indicada para casos em que as estruturas de concreto armado estão expostas a ambientes de grande agressividade, com altos níveis de cloretos, principalmente, que são agentes de corrosão e fazem com que as estruturas de concreto armado necessitem de manutenções constantes, conforme descrito também na norma NBR 6118 – item 7.7. Com a utilização do aço galvanizado, há significativa redução na periodicidade das manutenções, e, também, maior segurança nas obras.

Através dos ensaios realizados no laboratório Falcão Bauer, fica evidente que a galvanização dos vergalhões de aço não altera as suas propriedades mecânicas. O vergalhão revestido com zinco pode ser utilizado nas mesmas aplicações que o vergalhão de aço comum, apresenta



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



desempenho mecânico semelhante e atende todas as normas de ensaios para vergalhões. O único ensaio que apresentou significativa diferença no desempenho dos dois vergalhões – comuns e galvanizados – foi o ensaio de corrosão acelerada em *salt spray*, no qual foi evidenciado o efeito positivo da galvanização. A taxa de corrosão das barras galvanizadas foi de 4 a 5 vezes menor que a taxa de corrosão do vergalhão comum de aço e, portanto, contribuiu fortemente para o aumento de vida útil das estruturas.

A galvanização das barras de aço em estruturas de concreto armado gera um aumento nos custos totais de uma obra de construção de pontes ou viadutos inferior a 5% do custo total da obra, valor facilmente recuperado quando se leva em conta a extensão da vida útil das estruturas. Estima-se que a galvanização das armaduras possa promover um aumento de mais de 20 anos na vida útil da estrutura, livre de manutenções, se comparado com a utilização de vergalhões de aço comum. Quando se analisa todos os benefícios que a galvanização traz para as estruturas de concreto armado, esse adicional do custo fica irrisório diante dos ganhos significativos que promove.

Além da redução nos custos de manutenção apresentados, há também significativa diminuição nos custos indiretos, com o menor número de interrupções e desvios de tráfego em estradas e rodovias, decorrentes das manutenções nas estruturas de concreto armado. Assim, o uso de aço galvanizado traz benefícios diretos financeiros e sociais, de qualidade de vida à população. Ainda, a alta durabilidade e baixa frequência de manutenção remetem ao conceito de sustentabilidade, com a utilização responsável das matérias primas e menor consumo desnecessário de recursos naturais para substituições e reparos.

Referências

- ICZ- INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS – Manual do vergalhão galvanizado.
- YEOMANS, S. – Galvanized steel reinforcement in concrete. USA: Elsevier, 2004 293 p.
- BEROLINI, L. - Materiais de Construção: patologia / reabilitação / prevenção, Brasil: tradução Leda Maria Dias Beck, 2010 409 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6118/2007: Projetos de estrutura de concreto armado – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- BORBA, I. – A galvanização nas edificações, pontes e viadutos. 2013.