
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).

Extensão da vida útil das estruturas de concreto com uso de armaduras de aço-carbono revestidas ou de aço inoxidável

Adriana de Araujo^a, Anna Ramus Moreira^b, Zehbour Panossian^c

Abstract

The durability of Brazilian concrete structures depends almost exclusively on the specification of a concrete of good quality and on an adequate thickness of the concrete that covers the reinforcement. However, other measures can be taken to secure and/or extend the life of these structures, such as the use of coated carbon steel or stainless steel rebars. These protection techniques have been used successfully overseas, being especially applied in works of great responsibility and/or maintenance restrictions and exposed to an environment of medium to strong aggressiveness. In Brazil, these and other already established protection technologies to reinforced concrete are very little known and applied. Therefore, it is very important disseminate them. The purpose of this paper is just that: to discuss the main features and scope of usage of coated carbon steel rebars (galvanized or epoxy painted) and the stainless steel rebars.

Keywords: durability; concrete; reinforcement; galvanizing; epoxy paint; stainless steel

Resumo

A durabilidade das estruturas de concreto brasileiras é função quase que exclusivamente da especificação de um concreto de qualidade e de uma adequada espessura de cobrimento das armaduras. Entretanto, outras medidas podem ser tomadas para garantir e/ou estender a vida útil dessas estruturas, como o uso de armaduras de aço-carbono revestidas ou de aço inoxidável. Essas técnicas de proteção vêm sendo usadas com sucesso no exterior, sendo especialmente aplicadas em obras de grande responsabilidade, e/ou com restrições manutenções, expostas a um ambiente de média à forte agressividade. No Brasil, essas e outras tecnologias já consagradas de proteção do concreto armado, são muito pouco conhecidas e aplicadas. Assim sendo, é de fundamental importância a sua divulgação. O objetivo do presente artigo é justamente esse: discute as características principais e o campo de aplicação de armaduras revestidas (zincagem ou pintura epoxídica) e de armaduras de aço inoxidável.

^a Mestre em Habitação, Pesquisadora do Laboratório de Corrosão e Proteção - LCP do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (e-mail: aaraujo@ipt.br).

^b Mestre em engenharia, Pesquisadora do LCP do IPT (e-mail: anna@uol.com.br).

^c Doutora em Ciências, Diretora de Inovação do IPT e professora convidada do Departamento de Metalurgia e Materiais da EPUSP (e-mail: zep@ipt.br).

Palavra chave: durabilidade; concreto; armadura; zincagem; pintura epoxídica; aço inoxidável

Introdução

Nas construções brasileiras, não é raro observar a sua depreciação devido ao aparecimento prematuro de patologias. Dentre as patologias mais comuns e mais deletérias, cita-se a corrosão do aço-carbono da armadura das estruturas de concreto armado. A corrosão ocorre, principalmente, devido à ação agressiva do dióxido de carbono (CO_2) e dos íons cloreto (Cl^-), sendo que, a corrosão desencadeada pelo CO_2 ocorre em qualquer tipo de atmosfera, enquanto a corrosão por Cl^- ocorre quase que exclusivamente em atmosfera marinha. Além da ação agressiva desses agentes, a ocorrência da corrosão está relacionada a uma variedade de fatores, o que justifica a preocupação mundial constante com a durabilidade das estruturas.

No Brasil, a mesma preocupação existe, tendo como agravante um histórico de estruturas debilitadas prematuramente. A experiência mostra que isso está associado à presença de anomalias na superfície do concreto, como fissuração e áreas de vazios. Quanto maior a presença de anomalias no concreto menor será o tempo necessário para o estabelecimento de processo corrosivo na armadura embutida no mesmo.

Outro problema constantemente relacionado à degradação das estruturas de concreto é a ausência de uma manutenção periódica eficiente. Segundo a NBR 5674 [1], é frequente a omissão de manutenção, sendo que algumas estruturas brasileiras são retiradas de serviço antes do cumprimento de sua vida útil estimada, ou acabam por requerer manutenção com custo muito elevado.

Visando o aumento da durabilidade das estruturas de concreto frente à corrosão de suas armaduras, as seguintes estratégias podem ser adotadas [2]:

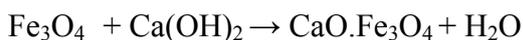
- **aplicar um potencial externo (proteção catódica):** redução do potencial da interface aço/concreto para valores mais negativos do que o potencial natural do sistema;
- **modificar o meio de exposição que as armaduras estão expostas:** adição de inibidores de corrosão no concreto fresco ou na sua superfície (no caso de elementos existentes);
- **substituir o concreto por outro mais resistente:** desenvolvimento de concretos mais densos e resistentes ao ingresso de substâncias potencialmente corrosivas às armaduras, combinado com espessura suficiente do concreto de seu cobrimento;
- **interpor barreiras entre o meio e o metal:** revestimento da superfície do concreto ou da armadura (particularmente por meio de sua zincagem ou pintura epoxídica);
- **substituir a armadura por outra mais resistente:** desenvolvimento de ligas especiais, incluindo de aços inoxidáveis, e de armaduras de material não metálico.

Dentre essas estratégias, este trabalho aborda o revestimento das armaduras por zincagem e por pintura epoxídica e, também, o uso de armaduras de aço inoxidável. Todas essas são muito pouco conhecidas no Brasil e, portanto, é de fundamental importância a divulgação das características principais de cada uma delas e o campo de aplicação.

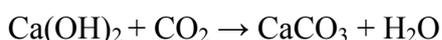
Corrosão no concreto armado

O aço-carbono é reconhecido como material que tem desempenho adequado em concreto armado, por conferir melhores propriedades ao mesmo, essencialmente resistência a esforços de tração. Quando embutido no concreto íntegro, o aço fica protegido, física e eletroquimicamente, contra corrosão. A proteção física é conferida pela camada de concreto que recobre o aço (concreto de cobertura), isolando-o da exposição direta a agentes agressivos. A eficiência desta proteção é bastante dependente das características do concreto executado e da espessura efetiva do concreto de cobertura. A proteção eletroquímica é conferida pela alcalinidade do meio (solução aquosa contida nos poros do concreto com pH entre 12 e 14), que estabelece condições propícias para a formação de um filme de óxidos compacto e aderente sobre o aço. Este filme pode reduzir a taxa de corrosão do aço a níveis insignificantes, o que justifica ser denominado filme passivante [3].

Dependendo do potencial da armadura, o filme passivante é uma película de magnetita (Fe_3O_4) ou maghemita, ou hematita, (Fe_2O_3), ou ainda uma mistura desses óxidos. Também é possível a formação do filme passivante pela reação entre a magnetita e o hidróxido de cálcio [4]:



A integridade do filme passivante pode ser afetada pela diminuição do pH da solução aquosa contida nos poros do concreto de cobertura e, com isto, ser estabelecido um processo de corrosão. Em geral, a diminuição do pH do concreto ocorre por reações do CO_2 , vindo do ambiente, com componentes alcalinos da pasta de cimento. A reação principal que representa esta diminuição, denominada carbonatação, é a seguinte [4]:



O íon cloreto é outro agente que está relacionado, constantemente, ao estabelecimento de um processo de corrosão nas estruturas de concreto. É de conhecimento geral que sua presença desestabiliza o filme passivante, além de baixar a resistividade elétrica do concreto¹. As pesquisas mostram que a corrosão pelo ataque por esse íon é dependente da sua concentração e da sua relação com os íons hidroxila (OH^-) presentes no meio (relação $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$) [3].

Embora a ação dos íons Cl^- no concreto não esteja perfeitamente estabelecida [3], há teorias que explicam a desestabilização do filme de óxidos passivante, quando da presença de teores críticos, sendo as três teorias mais aceitas as seguintes:

- em filmes espessos de óxidos, os íons cloreto são incorporados na sua camada, em sítios heterogêneos, criando defeitos os quais facilitam o transporte iônico através do filme;
- em filmes de camada muito fina, os íons cloreto competem com os íons hidroxila nos locais mais ativos da superfície metálica, impedindo a passivação na região;

¹ A resistividade elétrica é uma grandeza que controla a difusão de íons na solução de água de poros no concreto. O concreto é caracterizado como condutivo, quanto a sua resistividade elétrica é baixa. Neste caso, é facilitado o desenvolvimento de reações eletroquímicas inerentes ao processo de corrosão.

- os íons cloreto formam complexos solúveis com os íons ferrosos que se afastam das regiões anódicas (onde se formaram). Quando estes complexos alcançam locais de pH elevados, são quebrados pela ação dos íons hidroxila, com consequente precipitação de hidróxido ferroso e liberação dos íons cloreto.

A corrosão da armadura de aço-carbono pode ser localizada ou generalizada. Em concreto carbonatado, normalmente, a corrosão é generalizada. Nesse caso, as reações anódicas (área onde está ocorrendo corrosão, perda de elétrons) e as reações catódicas (área de redução do oxigênio, ganho de elétrons) são imediatamente adjacentes, o que caracteriza uma microcélula de corrosão. Em concreto contaminado com cloretos, normalmente, a corrosão começa de forma localizada (corrosão por pite), sendo as áreas de reações anódicas bem menores do que as áreas de regiões catódicas. No entanto, rapidamente a corrosão se generaliza, o que é devido à tendência natural da quebra do filme passivante nas áreas adjacentes, também contaminadas com cloretos.

No caso da carbonatação ou da contaminação por cloretos não ser homogênea no concreto, o que em geral ocorre em área fissurada ou com concentração de vazios, os mesmos mecanismos descritos ocorrem, entretanto, a corrosão (generalizada) limita-se somente à região afetada. Nesta condição, podem ser obtidas taxas de corrosão elevadas que podem diminuir a seção do aço em um curto intervalo de tempo.

Finalmente, citam-se as reações anódicas e a catódica que ocorrem no aço-carbono embutido em concreto:

- $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}$ (*reação de oxidação ou anódica em meios alcalinos até pH em torno de 9, comum em concreto carbonatado*)
- $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}$ (*reação de oxidação ou anódica em meios alcalinos, por exemplo, em pH em torno de 13,5, comum em concreto não carbonatado, porém contaminado com cloretos*)
- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ (*reação de redução ou catódica em meios neutros ou alcalinos aerados*).

Armaduras revestidas por zincagem

A aplicação de armaduras revestidas por zinco pelo processo de imersão a quente é uma técnica de proteção particularmente adequada para estruturas com risco de carbonatação [3]. Isto porque, o revestimento é uma barreira eficiente à despassivação do aço-carbono resultante da diminuição do pH do meio. Segundo estudo de Yeomans [5], o revestimento de zinco mantém-se estável em concreto com valores de pH até aproximadamente 9,5, enquanto o aço-carbono, sem revestimento, pode despassivar-se em pH por volta de 10,5 e apresentar aceleração da corrosão abaixo de 9,5 [6].

Além do pH, outros fatores interferem no estabelecimento da corrosão da armadura e na sua evolução (taxa de corrosão), em destaque a resistividade elétrica do concreto, a disponibilidade de oxigênio dissolvido na solução de água de poros e, também, o tipo de camada do revestimento em contato com esta solução. Cita-se que o zinco puro apresenta

menor taxa de corrosão em relação às ligas de zinco e ferro, pois apresenta maior estabilidade em relação à diminuição do pH do meio.

Segundo ensaios de laboratório de Yeomans [5] o revestimento pode resistir a níveis de contaminação com cloretos de até 2,5 vezes maiores do que o aço não revestido. Com isto, o início da corrosão pode ser retardado em tempo maior, possivelmente entre 4 a 5 vezes. Esse autor [7] referencia muitos estudos realizados no passado, nos quais o revestimento apresentou um bom desempenho em estruturas com concreto de qualidade variável (diferentes a/c^2 e espessura de cobrimento), expostas ao ataque de cloretos.

A eficiência do revestimento contra este íon também é descrita por Andrade e Macias [8] embora estes autores citem a existência de resultados contraditórios, os quais nem sempre são fáceis de serem analisados devido a variedade de técnicas adotadas na avaliação da proteção conferida pelo revestimento e, ainda, pela variedade das condições de exposição aos íons cloreto. Além disto, muito dos estudos foram feitos em laboratório, o que muitas vezes não reflete o desempenho real da proteção em campo. Um fator bastante relevante no desempenho do revestimento em meio com íons cloreto é a estrutura do revestimento, especialmente a comentada presença de zinco puro na camada externa [9].

O aço-carbono pode ser revestido com zinco (Zn) por diferentes processos, como eletrodeposição, pintura com tinta rica em zinco ou aspersão térmica e, ainda, zincagem por imersão a quente. Essa última técnica é tradicionalmente usada para o revestimento de armaduras, dentre outros elementos metálicos, sendo também denominada galvanização a fogo e, no exterior, *hot-dip galvanizing*.

A zincagem por imersão a quente é um processo industrial que consiste de um pré-tratamento do aço e de sua imersão em um banho de zinco fundido, em temperatura em torno de 450 °C. Como resultado, é obtido um revestimento com a comentada presença de zinco puro (camada externa do revestimento) e camadas de zinco e ferro (intermetálicos), formadas por reações metalúrgicas entre os dois metais. A camada externa de zinco puro é decorrente do arraste do zinco fundido, porém a sua permanência no revestimento é dependente da composição do aço e do tempo de resfriamento (quanto mais rápido, maior é a camada de zinco puro remanescente). A espessura final do revestimento depende da composição do banho, da composição do aço e das condições de operação de zincagem [10].

A zincagem por imersão a quente pode ser feita por processo contínuo ou por batelada. De maneira simples, este último é feito pela imersão no banho de zinco de uma quantidade de barras, fios de aço, armaduras prontas, telas soldadas etc. O processo contínuo se diferencia por ser aplicado para bobinas, barras ou fios de aço que passam continuamente pelos diferentes estágios da zincagem. Este último processo tem limitações, sendo aplicado somente para produtos de baixa espessura ou baixo diâmetro e que sejam flexíveis.

O processo de imersão a quente por batelada se aplica tanto para barras retas como para barras conformadas (dobradas) e, também, para armaduras montadas, telas soldadas, estribos etc. Cita-se a norma ASTM A767 [11] para a execução e o controle da qualidade da zincagem de

² Relação água/cimento.

barras e, para zincagem de armaduras já montadas, a norma ASTM A123 [12]. No caso de zincagem de telas eletrossoldadas, a norma ASTM A1064 [13] determina que a zincagem seja feita conforme a ASTM A614 [14]. Com exceção da norma ASTM A1064 [13] todas referenciam a ASTM 780 [14] para a realização de reparos no revestimento. No caso de zincagem de barras previamente conformadas (dobragem a frio), a ASTM A767 [11] estabelece o diâmetro mínimo de dobramento como sendo de 6 a 10 vezes maior do o diâmetro nominal da barra. Tal medida visa evitar a danificação por encruamento do aço durante o processo de zincagem.

Em geral, o tempo de imersão por batelada é entre 20 segundos e 120 segundos, o que resulta em um revestimento com espessura entre 80 μm e 200 μm , respectivamente. O primeiro valor se refere à imersão no banho de barra de 8 mm de diâmetro e, o segundo, de barra de 25 mm de diâmetro. Espessuras maiores do que 200 μm não são recomendadas, pois podem resultar em uma inadequada aderência da barra ao concreto ou intensificar a fissuração do revestimento durante a etapa de dobragem [15].

A ASTM A767 [11] define duas classes (I e II) para a espessura do revestimento das barras. A Classe I determina a espessura de 153 μm^3 , para barra de diâmetro (\emptyset) ≥ 13 mm, e a espessura de 130 μm^4 , para barra de $\emptyset = 10$ mm. Cita-se que nos Estados Unidos só existem barras com $\emptyset \geq 10$ mm. A Classe II determina a espessura de 86 μm para barra de $\emptyset \geq 13$ mm⁵. Segundo Yeomans [5], a Classe I é aplicada para peças estruturais e a Classe II para as peças não estruturais e arquitetônicas.

Para barras a serem conformadas após a zincagem, a norma ASTM A767 [11] cita que defeitos (fissuração e destacamento localizado) podem ocorrer no revestimento, no entanto, estes podem ser minimizados com uso de um maior diâmetro de dobramento, além de um controle da severidade e da velocidade de sua execução. A presença da camada externa de zinco puro é outro fator que interfere na ocorrência de defeitos durante o dobramento. Isto porque, essa camada é mais dúctil (deformação plástica sem muita perda de resistência) que as demais, podendo deste modo contribuir na diminuição do aparecimento de fissuras no revestimento durante o dobramento. Ainda sobre a mesma norma, ela limita a presença de defeitos reparados em 1 % da área a cada 0,3 m do comprimento da barra, o que exclui o reparo executado nas extremidades cortadas.

Geralmente, é mais conveniente e econômico que a conformação de barras ocorra após o seu revestimento [5]. Segundo o Boletim de informação nº 211 do CEB [16], esta prática é mais usual, mesmo sabendo-se que o dobramento pode resultar nos defeitos mencionados.

O dobramento antes da zincagem é uma alternativa adequada para peças como estribos, ganchos e armaduras prontas, como de pilares em espiral e painéis pré-moldados. A sua realização evita a presença de reparos nas áreas de dobras, nas extremidades das barras cortadas e em áreas de soldas. Além disto, evita a exposição das pessoas aos gases de óxido de zinco, liberados na queima do revestimento durante a soldagem [10].

³ Massa de zinco por unidade de área de 1070 g/m².

⁴ Massa de zinco por unidade de área de 915 g/m².

⁵ Massa de zinco por unidade de área de 610 g/m².

Ao término do processo industrial de zincagem por imersão a quente, as normas ASTM A1060 [13] e ASTM A767 [11] recomendam que o revestimento seja cromatizado (passivado). Isto é necessário para evitar a desestabilização do revestimento por reações com hidróxidos da pasta de cimento. Em pH até 13,3, estas reações podem passivar o revestimento $\{Ca[Zn(OH)_3]_2 \cdot 2H_2O\}$, no entanto, nestas reações há formação do gás hidrogênio, que se acumula na região e pode impactar na aderência inicial do aço revestido ao concreto. Além disto, o consumo do revestimento nestas reações de passivação resulta em uma diminuição da espessura total, tendo-se uma perda de aproximadamente 10 μm da camada externa de zinco puro [8,17].

Kayali [18] cita que o filme passivante resultante da cromatização do revestimento, pode não estar mais presente no momento da concretagem, especialmente quando as armaduras são armazenadas a céu aberto em períodos de alto índice pluviométrico, isto porque a camada de cromatização é lixiviada pela chuva. Como alternativa prática, o autor menciona que os cromatos podem ser adicionados na massa de concreto. Segundo o ACI 201.2R [19], isto é feito com a adição na água de amassamento de 400 ppm de cromato. Cita-se que tal prática não é muito recomendada, devido ao fato dos cromatos serem muito prejudiciais à saúde humana.

Em complemento ao exposto, citam-se as considerações feitas pelo CEB [16] quanto à aplicação de barras zincadas:

- propriedades mecânicas da armadura: não há efeito significativo quando do seu revestimento;
- cromatização do revestimento: resulta em um melhor desempenho da proteção;
- taxa de corrosão: é menos intensa e menos extensa do que a corrosão do aço-carbono;
- limite de íons cloreto: o revestimento tolera uma maior concentração do que o aço-carbono;
- patologias no concreto: a ocorrência de fissuras e o destacamento do concreto de cobertura são menos prováveis ou retardadas. A presença do revestimento pode postergar os serviços de recuperação estrutural, podendo ser também mais facilmente aceitáveis falhas de execução e variações na espessura do concreto de cobertura;
- concreto: com uso de armaduras revestidas, o concreto pode ser exposto à ambientes mais agressivos do que o previsto. A maior compatibilidade do revestimento em concreto é atingida com cimento de baixa alcalinidade.

Quanto ao campo de aplicação, Yeomans [5,20] cita que o revestimento é utilizado amplamente para resguardar as estruturas de uma ação agressiva inesperada ou previamente ao prazo estipulado, podendo ser aplicada em:

- elementos estruturais: externos (fachada) e imersos (sujeitos à água do solo);
- elementos arquitetônicos e outros decorativos;
- módulos e elementos pré-fabricados em geral, como condutores de água, painéis de fachadas e pisos, tanques, vigas, pilares etc;
- infraestrutura de transportes (pontes, elementos de barreira etc.) e outras sujeitas a um ambiente agressivo, como torres de resfriamento e chaminés, reservatórios e tanques; postes de iluminação, áreas químicas na indústria, plataformas etc.

Armaduras revestidas com pintura epoxídica

Devido inicialmente à aplicação de armaduras revestidas por pintura ter sido feita em pontes e viadutos sujeitos ao ataque de íons cloreto, há um grande número de publicações no exterior avaliando a sua eficiência nestes tipos de construção. Quanto ao risco de corrosão por carbonatação do concreto, nenhuma avaliação específica foi encontrada na literatura consultada. Tal fato é mencionado pelo CEB [16] como sendo, possivelmente, decorrente da ausência de pesquisas e da não verificação de problemas de sua aplicação nessa situação de risco.

O instituto CRSI [21] apresenta um resumo de avaliação de estruturas de pontes em diferentes regiões dos Estados Unidos e no Canadá, em Ontário, expostas aos íons cloreto. De modo geral, foi verificada a eficiência do revestimento na proteção das armaduras dessas estruturas, embora tenha sido constatado um impacto negativo de defeitos no revestimento. Os defeitos no revestimento são um dos principais fatores relacionados à perda da eficiência de proteção conferida pelo revestimento.

Na avaliação de pontes, Sagues e colaboradores [22] verificaram que uma das causas principais da corrosão prematura das armaduras era consequência da presença de defeitos no revestimento. Além disto, estes autores observaram que o ambiente local era muito agressivo (ambiente marinho) e que o concreto executado apresentava uma alta permeabilidade. Ambos também têm grande impacto no desempenho do revestimento ao longo dos anos. Cabe mencionar que o código de durabilidade do departamento de transporte da Inglaterra – DMRB BA75/01 [23] não recomenda o uso de barras revestidas por pintura em estruturas de transporte rodoviário exatamente devido a sua propensão do revestimento a apresentar defeitos, nos quais pode correr corrosão localizada (pite).

Segundo a NACE RP0187 [6], a eficiência da pintura é muito dependente da sua resistência ao ingresso de íons, do oxigênio e da água. Além disto, a sua eficiência é dependente da boa aderência ao aço e da capacidade de restringir o avanço da corrosão na comentada região de defeitos (aço exposto) [3]. Em geral, a eficiência da proteção também está relacionada à qualidade da produção das barras revestidas e a aplicação do revestimento em todos os componentes da armadura⁶.

Kleper, Darwin e Locke [24] citam que inicialmente o revestimento das armaduras era parcial, restrito às armações superiores de lajes de pavimentos das pontes e viadutos. Desse modo, havia condições de formação de macrocélula de corrosão, tendo-se uma corrosão intensa em áreas com defeitos. Esses autores citam que estudos realizados em 1980 pelo Departamento de Transporte dos Estados Unidos (FHWA) indicaram que a corrosão era reduzida em 11,5 vezes, no caso de proteção parcial da armadura, enquanto na proteção total (revestimento de todo o conjunto de armadura) havia redução da ordem de 41 vezes.

Como consequência do uso de armaduras revestidas, a literatura consultada indica que é esperada uma diminuição da aderência ao concreto. Kayali e Yeomans [25] avaliaram vigas de concreto com armadura zincada e com pintura epoxídica e armadura sem revestimento. Estes autores concluíram que a capacidade máxima na flexão das vigas é similar para os três

⁶ Os suportes da armadura na forma e os arames de amarração têm a opção de serem revestidos com outro produto, desde que este seja isolante elétrico. Isto também se aplica ao revestimento de zinco.

tipos de armadura. No entanto, as vigas com armadura pintada, apresentaram uma diminuição de 15 % a 20 % dos valores de capacidade de carga obtidos para as vigas com armadura zincagem e com armadura não revestida, respectivamente.

Para o revestimento das barras utiliza-se a tinta epóxi em pó, denominada no exterior como *Fusion Bond Epoxy* (FBE). A sua aplicação sobre o aço-carbono é feita por meio de pistola, sendo em seguida de aquecimento para a fusão da tinta. Segundo a ISO 14654 [26], este processo é aplicado para barras, arames e tela soldada, podendo ser adotado dois tipos de tinta, uma não flexível e outra com a característica de permitir o dobramento das barras após o seu revestimento, sem que, ao final, sejam visualizados defeitos em sua superfície.

A norma ASTM A775 [27], que se refere somente a pintura de barras, apresenta uma única tinta, que deve ter a característica de ser flexível. Nesta norma, a flexibilidade é avaliada por ensaio de dobramento, devendo ser rejeitados os lotes em que as barras selecionadas para avaliação apresentarem fissuras ou deslocamento do revestimento em seu raio externo. Explica-se que a pintura de arames e telas soldadas e, também, de armação montada, tem normalização específica, o que justifica não serem contempladas na norma.

A mesma norma, define que a espessura do revestimento após a sua cura deve estar entre 175 μm e 300 μm , para barras de diâmetro entre 7 mm e 16 mm, e entre 175 μm e 400 μm , para barras de diâmetro entre 19 mm e 57 mm. Ao final da produção, os defeitos verificados no revestimento devem ser reparados, o que é feito por uma tinta epóxi específica. Segundo a ASTM A775 [27], o limite de área reparada no revestimento é de 1 % em cada 0,3 m de comprimento da barra, o que exclui o reparo executado nas extremidades de barras cortadas.

Quanto ao campo de aplicação da proteção, a literatura consultada indica que, inicialmente, o revestimento só foi utilizado na América do Norte em pontes e viadutos, especificamente no pavimento de concreto. No decorrer dos anos, sua aplicação foi disseminada para outras construções e, também, outras localidades. As principais aplicações são as seguintes:

- portos e outras construções sujeitas à névoa salina e à variação de maré, como exemplo: marinas, hotéis a beira mar etc;
- indústrias e outras construções sujeitas a agentes agressivos, como exemplo: torres de resfriamento, depósitos e garagens confinadas onde são feitas lavagens constantes e onde há emissão de gases etc.;
- estação de tratamento de efluentes e outras construções sujeitas ao contato constante e/ou direto com agentes agressivos, exemplo: silos e tanques de armazenamento de produtos químicos etc;
- pavimentos de concreto e outros tipos de pisos de concreto, sendo usual na pintura epóxi de barras de transição das juntas de construção.

Quanto a outras possibilidades de aplicação, podem ser citadas:

- edifícios com estrutura de concreto colorido e obras de arte, com o objetivo de manter por um período maior de tempo o seu acabamento, em especial quanto à coloração inicial;
- reservatórios, piscinas e torres em geral, com o objetivo de retardar o ataque das armaduras pelos agentes agressivos presentes no meio;
- estruturas esbeltas e outras com baixa espessura de cobrimento, com o objetivo de retardar o ataque de agentes nas armaduras.

Armaduras de aço inoxidável

No Brasil, há poucos estudos de corrosão do aço inoxidável em concreto, enquanto no exterior, além do avançado conhecimento, este metal já vem sendo utilizado há décadas como armadura de estruturas de concreto, especialmente daquelas expostas à ação deletéria dos íons cloreto. Assim como as demais técnicas descritas anteriormente, o uso de armaduras de aço inoxidável tem como objetivo principal estender a vida útil das estruturas, sendo bastante restringidos os períodos de intervenções de manutenções corretivas e os períodos de inatividade causados por elas.

Segundo Bautista [28], o uso de armaduras aço inoxidável só tem desempenho comparável com a técnica de proteção catódica, que é a única que tem sua eficiência inquestionável na proteção de estruturas contra corrosão. No entanto, a proteção catódica exige monitoramento constante da estrutura, o que tem de ser feito por pessoal especializado. Sabendo-se que os aços inoxidáveis podem conferir elevada proteção contra corrosão, o autor argumenta que é importante conhecer a fundo suas vantagens e limitações.

Uma das principais limitações do uso do aço inoxidável é o seu impacto no custo inicial da construção, que aumenta até em torno de 15 % [28, 29]. Em geral, os custos são menores quando o uso das armaduras de aço inoxidável se restringe aos elementos de concreto armado que estão expostos a condições bastante agressivas, ou ainda, por meio da diminuição da espessura do concreto de seu cobrimento [2, 30].

Com exemplo de custo, cita-se o levantamento feito em projeto de pontes na costa marinha do estado do Oregon, nos Estados Unidos, em que foi previsto o uso de armaduras de aço inoxidável em áreas críticas da estrutura exposta a ação deletéria dos íons cloreto [31]. Embora o custo de barras de aço inoxidável era no mínimo três vezes maior do que as barras de aço-carbono, o seu uso representou somente um aumento de 10 % do custo do projeto. Segundo os autores, essa substituição pode dobrar a vida útil das pontes, tendo-se redução dos custos acumulativos (de manutenção) por volta de 50 % considerando a vida útil mínima estimada das estruturas de 120 anos.

De uma maneira geral, a restrição de manutenções nas estruturas de concreto justifica o crescente uso de armaduras de aço inoxidável, especialmente nas estruturas expostas a ação dos íons cloreto, sendo isto mais evidente nos Estados Unidos, Canadá e Europa [32]. Os exemplos mais frequentes de utilização são estruturas de pontes, estradas, túneis, píeres, muros de contenção e portos [28]. Segundo o código de durabilidade do departamento de transporte da Inglaterra – DMRB BA75/01 [23], o seu uso deve ser considerado particularmente nas áreas mais vulneráveis à corrosão das estruturas, como juntas de dilatação, vigas de parapeitos, em subestruturas em ambiente marinho etc.

Explica-se que os aços inoxidáveis são ligas que contêm predominantemente Fe e uma porcentagem de Cr não inferior a 12 %. Além do Cr, outros elementos também podem ser introduzidos sempre que se pretender melhorar suas características, tanto do ponto de vista de resistência à corrosão, como das propriedades mecânicas. Os aços inoxidáveis distinguem-se, principalmente, dos aços-carbono pelo seu comportamento frente à corrosão, pois

normalmente na presença de oxigênio, ocorre formação de uma camada passiva de óxidos de Cr de natureza contínua, insolúvel e não porosa. Essa camada protege o metal da ação do ambiente agressivo, tornando o aço resistente à corrosão, especialmente à corrosão por pite.

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco famílias distintas, definidas pela estrutura cristalográfica e pela presença de precipitados endurecedores na camada passiva, quais sejam: aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos, ferríticos, endurecíveis por precipitação e dúplex. Dentre esses, somente os aços austeníticos e aços inoxidáveis dúplex tem sido de real interesse para a indústria da construção civil [33-35], especialmente de estruturas localizadas em ambiente marinho, as quais estão expostas a ação deletéria dos íons cloreto.

O uso do aço inoxidável em armaduras de concreto teve início com o austenítico. Como exemplo de obra pioneira, cita-se a construção em 1941 do píer Progreso (Península de Yucatán, Golfo do México) que está localizado em ambiente de forte agressividade. Após aproximadamente 70 anos de operação, verificou-se que ainda não havia sinais de corrosão em sua estrutura [2]. Cabe salientar que em sua construção foi usada água salobra na composição do concreto [30].

Embora não há dúvidas quanto à importância histórica do aço inoxidável austenítico na construção civil, atualmente é crescente o uso de armaduras de aços inoxidáveis dúplex [28, 30, 36]. Segundo Bautista [28], recentes pesquisas tem mostrado que a resistência à corrosão desse último aço em concreto é similar ou superior ao dos aços austeníticos. No caso dos aços ferríticos, os quais são tradicionalmente os de menor custo de aquisição, as pesquisas apontam para uma maior suscetibilidade à corrosão por pite, isto ocorrendo em ambiente de severa agressividade.

A resistência à corrosão superior dos aços inoxidáveis dúplex, em relação aos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, já é reconhecida em outros meios, devido a maior resistência à corrosão sobtensão, corrosão por pite e corrosão em frestas. Além disso, o mesmo apresenta a vantagem de conter cerca de 50 % do teor de Ni dos aços austeníticos, o que torna seu preço menos sensível à flutuação constante do preço deste produto [37].

A norma ASTM A955 [38], que se refere a barras de aço inoxidável em concreto, faz uma serie de considerações quanto a este uso específico, em destaque a necessária de avaliação da resistência à corrosão, não podendo nenhuma barra avaliada apresentar taxa de corrosão maior do que 0,50 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Essa avaliação é feita em ensaio de imersão em solução padronizada (simulando a água de poros de concreto) ou em viga de concreto com uma fissura no alinhamento de barra superior embutida neste elemento. Em ambos, adota-se a concentração de 15 % de NaCl como condição agressiva de ensaio.

Recentemente, há um grande interesse em ligas de aços inoxidáveis dúplex com menor teor de elementos de custo elevado, as quais são denominadas de *lean* dúplex [39]. Frequentemente, há redução do teor de Ni, o que é compensado pela adição de Mn e N [39]. Essas alterações não devem ter grande impacto nas características dos aços inoxidáveis. Segundo Magee e Schnell [32], os aços *lean* dúplex possuem resistência mecânica equivalente a dos aços dúplex convencionais, mas menor resistência à corrosão localizada, no entanto, esta é comparável a dos aços austeníticos largamente utilizados (AISI 304 e AISI 316).

Finalmente, cabe mencionar que há poucos estudos de avaliação do risco de corrosão galvânica pelo contato elétrico, no meio condutivo (o concreto), entre barra de aço-carbono e barra de aço inoxidável. Segundo Qian e Qu [40], os estudos disponíveis sobre essa corrosão são contraditórios, o que torna a questão controversa. O estudo desses pesquisadores mostrou que essa corrosão ocorre, no entanto, a taxa de corrosão entre esses aços dissimilares é menor do que no caso do contato entre barras de aço-carbono no estado passivo e em estado ativo de corrosão. Klinghoffer [2] cita que a corrente galvânica estabelecida entre barras o aço-carbono e o aço inoxidável é aproximadamente 15 vezes menor do que a que ocorre no caso de ambas serem de aço-carbono.

Sendo assim, o mesmo autor argumenta que o aço inoxidável é adequado para uso em área a ser recuperada em estrutura convencional, sendo minimiza a ocorrência de corrosão nas áreas adjacentes em que o concreto está íntegro (armadura de aço-carbono passivada). Outro uso seria em estribos das armaduras, já que estes estão embutidos mais externamente nos elementos de concreto, sendo assim, estão mais sujeitos a corrosão prematura [41].

Conclusões

A deterioração do concreto armado pode ocorrer por fatores físicos, mecânicos ou químicos e, ainda, ser induzida por fatores internos e externos da estrutura de concreto. Entre os processos de deterioração, a corrosão das armaduras de aço-carbono é uma das principais ameaças para a durabilidade de estruturas de concreto.

Uma forma eficaz de mitigar a corrosão das armaduras das estruturas é o seu revestimento ou a sua substituição por barras de aço inoxidável. A pesquisa bibliográfica permitiu verificar que essas técnicas têm sido aplicadas com sucesso no exterior.

O sucesso da proteção conferida por essas técnicas às estruturas de concreto é dependente do conhecimento das limitações de cada uma delas, bem como de outros fatores, como agressividade do ambiente de exposição e as características do concreto. Portanto, no Brasil, a sua aplicação deve ocorrer baseada na consulta tanto aos critérios das normalizações disponíveis, bem como às pesquisas acadêmicas que discutem o tema e avaliam, na prática, sua eficiência em diferentes condições de exposição e em concreto com diferentes características. Além disto, a sua aplicação deve ser baseada em pesquisas nacionais, as quais considerem as condições climáticas e as práticas brasileiras de construção.

Atualmente, a aplicação do revestimento por zincagem parece ser a melhor opção para a proteção das estruturas brasileiras de concreto, pois exige poucas alterações no projeto e nas atividades de montagem e instalação das armaduras e, ainda, não exige uma linha de produção específica, como é o caso da pintura epoxídica. No Brasil, não há produção tanto de barras com pintura epoxídica como de barras de aço inoxidável, o que se foi feito considerando o atual desenvolvimento de aços de custo mais acessível.

Referência bibliográfica

-
- [1] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674**: manutenção de edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 1999. 6p.
 - [2] Klinghoffer, O. **Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures**. Gro Markeset, Steen Rostam and. 405 Project report 2006. Disponível em <<http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prrapp%20405.pdf>> Acesso em 15 mar. 2014.
 - [3] ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222R-01**: protection of metals in concrete against corrosion. Michigan: ACI, 2010. 41p. (reapproved 2010).
 - [4] GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1996. 345p.
 - [5] YEOMANS, S.R. Applications of galvanized rebar in reinforced concrete structures. In: NACE CORROSION 2001, NACE INTERNATIONAL CONFERENCE. Houston. 2001. **Proceedings...** 2002 (Paper, 01638.).
 - [6] NACE – NACE INTERNATIONAL. **NACE RP0187**: design considerations for corrosion control of reinforcing steel in concrete. Houston, 2008. 22p.
 - [7] YEOMANS, S.R. Electrochemical aspects of galvanized reinforcement corrosion. In: YEOMANS, S.R. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. London: E & FN Spon, 2004 316p. (Chapter 1).
 - [8] ANDRADE, M. C.; MACÍAS, A. Galvanized reinforcements in concrete In: WILSON, A. et al. **Surface coatings**. s.l.: s.n. 1988. cap.5, p.137-182.
 - [9] ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Pini, 1992.
 - [10] LANGIL T. J.; DUGAN, B. Zinc materials for use in concrete. In: YEOMANS, S.R. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. E & FN Spon, 2004.
 - [11] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A767**: standard specification for zinc-coated, galvanized, steel bars for concrete reinforcement. Pennsylvania, 2009. 4p.
 - [12] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A123**: standard specification for zinc, hot-dip galvanized, coatings on iron and steel products. Pennsylvania. 2001. 8p.
 - [13] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1064**: steel wire and welded wire reinforcement, plain and deformed, for concrete. Pennsylvania. 2009. 8p.
 - [14] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A641**: specification for zinc-coated (galvanized) carbon steel products. Pennsylvania. 2009. 8p.
 - [15] SWAMY, N. R. Design for durability with galvanized reinforcement. In: YEOMANS, S.R. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. E & FN Spon, 2004.
 - [16] CEB – COMMITTEE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Bolletín D'Information, No 211**: coating protection for reinforcement. 1992. 82p. (State of the art report).

-
- [17] ANDRADE, C.; ALONSO, C. Electrochemical aspects of galvanized reinforcement corrosion. In: YEOMANS, S.R. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. London: E & FN Spon, 2004. Chapter 5, 316p.
- [18] KAYALI, O. Bond of steel in concrete and the effect of galvanizing. In: YEOMANS, S.R. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. London: E & FN Spon, 2004. Chapter 8, 316p.
- [19] ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R**: guide to durable concrete. In: ACI manual of concrete practice, 2001
- [20] YEOMANS, S.R. **Use of galvanized rebars in RC structures**. Disponível em http://www.cedd.gov.hk/eng/archives/concreteseminar05/doc/yeomanshkconcrete technology_seminar_paper.pdf Acesso em 08 dez. 2010
- [21] CRSI – CONCRETE REINFORCING STEEL INSTITUTE. **Research Series 5**: performance of epoxy-coated rebars in bridge decks. Disponível em: <<http://www.crsi.org/ECR/pdf/resrch5/rs5.pdf>>. Acesso em 14 de janeiro de 2004
- [22] SAGUES, A. A.; KINGSLEY, L.; POWERS, R.G.; KESSLER, R. J. Corrosion of epoxy-coated rebar in marine bridges – a 30 year perspective. In: NACE CORROSION 2010, nace international corrosion congress. **Proceedings....** Houston: NACE Institute Houston. 2010. 17p.
- [23] THE HIGHWAYS AGENCY. BA 57/01: design for durability. Disponível em <<http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol1/section3/ba5701.pdf>> Acesso em 22 mar. 2014.
- [24] KLEPER, L.K.; DARWIN, D.; LOCKE, C. E. **Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures**. Kansas: U.S. The Kansas Department of Transportation, The National Science Foundation, 2000. 221p. (FHWA Research Report, K-TRAN Project No KU-99-6, Research Grand No CMS-9812716)
- [25] KAYALI, O. A.; YEOMANS, S. R. Bond and slip of coated reinforcement in concrete. **Construction and Building Materials**, v.9, n.4, p.219-226, 1995.
- [26] ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14654**: epoxy-coated steel for the reinforcement of concrete. Switzerland: 1999. 30p.
- [27] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A775**: standard specification for epoxy-coated steel reinforcing bars. Philadelphia: 2007. 10p.
- [28] BAUTISTA, A.; BLANCO, G.; VELASCO, F. Corrosion behaviour of low-nickel austenitic stainless steels reinforcements: a comparative study in simulated pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 36, pp. 1922-1930, 2006.
- [29] [McGURN, J. F. **Stainless steel reinforcing bars in concrete**. Disponível em: <www.americanarminox.com/NiDi_Rpt.-Schaffhausen_Bridge_LCC.pdf> . Acesso em: ago. 2013.
- [30] ANACO STAINLESS EXPERTS IN STAINLESS STEEL FOR ENGINEERING AND CONSTRUCTION. **Stainless steel reinforcing and related accessories**. Disponível em: <<http://www.anacotrading.com/rebar.htm>> . Acesso em: set. 2013.
- [31] CRAMER et.al. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. **Cement and Concrete Research**, v. 24, pp. 101-117, 2002.

-
- [32] MAGEE, J. H.; SCHNELLI, R. E. **Stainless steel rebar for concrete reinforcement: an update and selection guide.** Disponível em: <<http://www.carttech.com/techarticles.aspx?id=1576>> . Acesso em: jul. 2013. (Advanced Materials and Process, oct., 2002)
- [33] WANG, X. et al. **Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure: part 1: mechanisms, practices, modelling and simulations: a Review.** Canberra: CSIRO, 2010.
- [34] GEDGE, G. Structural uses of stainless steel: buildings and civil engineering. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 64, p. 1194-1198, 2008.
- [35] KNUDSEN, A. et al. Cost-effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel. In: CONFERENCE ON CORROSION AND REHABILITATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE, 1998, Florida. **Proceedings...1998**
- [36] THE CARES guide to reinforcing steels: stainless reinforcing steels. Disponível em: <www.ukcares.com/pages/guides/part7.pdf> . Acesso em: ago. 2013.
- [37] R.M. DAVISON; J.D. REDMOND, "A guide to using duplex stainless steels". **Materials & Design**. Michigan, v. 12, n. 4, p. 187-192, Aug. 1991.
- [38] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A955:** deformation and plain stainless bars for concrete reinforcement. Pennsylvania. 2010 11p.
- [39] ARMAS, I. A. Duplex stainless steels: brief history and some recent alloys. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, Bussum, v. 1, n. 1, p. 51-57, 2008.
- [40] QIAN, S.Y.; QU, D. **The influence of galvanic coupling on corrosion of carbon steel coupled with stainless for use in concrete structures (NRCC-52711)** 2010. Disponível em < <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc52711.pdf>> . Acessado em 27 mar. de 2014
- [41] MERCALLI, A. et. al. Intelligent use of stainless steel reinforcement. In: 15th INTERNATIONAL CORROSION CONGRESS. Granada. 2002. **Proceedings... 2002**