

A Reparação do Betão Armado

Os mais recentes desenvolvimentos na reparação do betão armado incluem técnicas electroquímicas modernas que conseguem minimizar as interferências com a estrutura, factor importante no restauro de edifícios.

Dr John Broomfield ()*

Tradução por António de Borja Araújo, Engenheiro Civil, I.S.T.

Nós geralmente pensamos no betão como sendo um material moderno, mas na realidade ele é um dos mais antigos e duráveis materiais de construção. O emprego mais antigo que se conhece para o betão é em pavimentos de cabanas na antiga Jugoslávia, datando de 5600 AC; mais tarde, encontram-se exemplos notáveis incluídos na Grande Pirâmide de Gizé e no Partenon em Atenas.

Apesar de os Romanos terem experimentado armá-lo com bronze, o betão armado, tal como hoje o conhecemos, data de cerca de meados do século XIX, na sequência da introdução do cimento Portland em 1854, quando este foi patenteado por Joseph Aspeden em Wakefield. Foram construídos barcos em betão armado e chaminés de fábricas, na década de 1850, por William Wilkinson, por meio de um procedimento para construção de edifícios à prova de fogo que usava barras de aço embebidas numa massa de betão. Wilkinson demonstrou que tinha compreendido onde o aço traccionado era necessário nas suas coberturas planas, nas faces superiores das vigas por cima dos suportes e nas faces inferiores a meio vão.

O aço tinha a vantagem de ter a resistência à tracção que faltava ao betão, e de ser elevadamente compatível nas suas características físicas e químicas, conforme veremos adiante. O acerto na dilatação térmica é crítico para a versatilidade do betão armado.

MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Tal como a alvenarias e o tijolo, as estruturas de betão armado degradam-se pelo ataque de elementos externos, tais como os danos por congelamento – descongelamento (a dilatação da humidade congelada dentro da estrutura conforme esta descongela), e a erosão. Num material composto e artificial, como é o betão, existem mecanismos adicionais causados pela grande complexidade da sua composição. Hoje em dia é muito preocupante a reacção alcali sílica do betão e a corrosão do aço, ambas afectadas pela alcalinidade do betão de cimento Portland. O cimento Portland é fabricado pela cozedura de diversos constituintes num forno, os quais incluem cal, e pela sua trituração, da qual resulta um pó fino. Esta fabricação produz um material altamente alcalino que reage com a água, endurecendo. Quando é adicionado a agregados finos e grosseiros, e misturado com água, o cimento combina-se com os agregados para formar betão. O seu processo de endurecimento (reacção de hidratação) é complexo e continua durante muitos meses ou anos, dependendo da quantidade de água na mistura. Pode haver excesso de água por razões de

trabalhabilidade, desenvolvendo-se uma rede de poros durante a secagem. Um eventual excesso de hidróxido de cálcio, e de outros hidróxidos alcalinos, fica retido nos poros, pelo que neles se desenvolve uma solução de pH 12,0 a 14,0 (o pH 7,0 é neutro; valores abaixo indicam acidez, e alcalinidade acima). São esta rede de porosidade e as soluções que ela contém que se tornam críticas para a durabilidade do betão.

REACTIVIDADE ALCALI SÍLICA (ASR)

A ASR ocorre se forem usados agregados inadequados na mistura. Alguns minerais siliciosos, entre os quais se incluem o quartzo e as opalas, reagem com a água, em ambiente altamente alcalino, para formarem gel de sílica, um material que é usado para se absorver humidade. Como o gel de sílica expande quando absorve humidade, este material pode causar a fractura do betão, aparecendo depósitos brancos de sílica com a aparência de escorrimentos. Em muitos casos a ASR é superficial e inofensiva, mas é feia e difícil de tratar. O remédio mais eficiente para ela, é a secagem da estrutura.

Muitos, senão a maioria, dos tipos de betão incorporam alguns materiais que são susceptíveis de produzirem ASR. No entanto muito poucas estruturas mostram sinais significativos de danos por ASR, já que os agregados reactivos que causam este problema são consumidos no processo. As áreas do Reino Unido em que surge a ASR são bem conhecidas e as pedreiras responsáveis estão bem identificadas.

CORROSÃO DA ARMADURA DE AÇO

Apesar de a alcalinidade dentro da estrutura porosa do betão poder levar à ASR, o seu elevado pH também proporciona uma camada de cobertura, constituída por óxidos e por hidróxidos, sobre a superfície da armadura de aço. Sem esta camada, que é conhecida por filme "passivo", o aço ficaria exposto ao ar e à humidade dos poros, sofrendo uma rápida corrosão. Esta é a principal razão química pela qual o betão armado é um material de construção durável. Essa camada é durável e auto reparadora, e pode durar durante séculos se a sua alcalinidade for mantida. No entanto, a própria camada passiva pode ser atacada pelos cloretos do sal, e a alcalinidade do betão pode ficar reduzida por reacção com o dióxido carbónico atmosférico, por meio de um processo conhecido como "carbonatação".

DEGRADAÇÃO POR CARBONATAÇÃO

O dióxido carbónico, que está presente no ar em proporções ao redor dos 0,3% em volume, dissolve-se em água para formar uma solução ácida fraca. Ao contrário de outros ácidos que podem atacar quimicamente e descamar a superfície do betão, este ácido forma-se dentro dos poros do próprio betão, onde o dióxido carbónico se dissolve em qualquer humidade que esteja presente. Vai então reagir com o hidróxido de cálcio alcalino, formando-se carbonato de cálcio insolúvel. O valor do pH cai de mais que 12,5 para cerca de 8,5. O processo de carbonatação move-se como uma frente através do betão, com queda do pH ao longo dessa frente. Quando atinge a armadura de aço, a camada passiva decai logo que o valor do pH desce abaixo dos 10,5. O aço fica assim exposto à humidade e ao oxigénio, e susceptível à corrosão.

O betão no interior do edifício carbonata frequentemente na sua totalidade sem quaisquer sinais de degradação, já que o betão seca completamente, deixando o aço exposto ao ar mas não à humidade. Estes problemas são mais visíveis exteriormente, onde o betão está exposto aos elementos e em certas situações interiores, tais como em cozinhas e casas de banho, onde o betão

está sujeito à condensação ou a roturas de canalizações. As fachadas exteriores são particularmente vulneráveis, especialmente onde os painéis de revestimento tenham peças de ligação em aço mal posicionadas, perto da superfície. A carbonatação não precisa de penetrar muito fundo e a qualidade do betão pode ser mais fraca.

DEGRADAÇÃO PELOS CLORETOS

O sal provoca corrosão por um mecanismo diferente. Quando está dissolvido em água, o cloreto de sódio forma uma solução versátil e altamente corrosiva de iões de sódio (Na^+) e de cloro (Cl^-). O sal é usado para descongelar as estradas e a sua presença na água do mar é um problema maior para as estruturas de betão armado. Os muito móveis iões de cloreto dispersam-se, em dissolução, através dos poros do betão, e quando entram em contacto com a armadura de aço atacam a camada passiva. O aço oxida na presença do ar e da água para formar ferrugem, cujo volume é cerca de 10 vezes superior à do aço consumido. Como o betão tem uma fraca resistência à tracção, ele vai fracturar logo que tenha sido consumido tão pouco como 1/10 de milímetro de aço. Formam-se fissuras horizontais, fazendo as arestas "estalarem" e as superfícies "delaminarem" conforme o betão do recobrimento se vai destacando e caindo em lascas. Estas consequências podem ser vistas na face inferior das pontes rodoviárias e de muitos edifícios e estruturas situados perto do mar.

O MECANISMO DA CORROSÃO

A corrosão da armadura de aço ocorre por um processo electroquímico que envolve trocas de electrões semelhantes às que ocorrem numa bateria. A parte mais importante deste mecanismo é a separação de áreas de metal negativamente carregadas, ou "ânodos", onde a corrosão ocorre, e a carga de áreas positivamente carregadas, ou "cátodos", onde ocorre uma carga inofensiva que equilibra a reacção (Figura 1). No ânodo, o aço dissolve-se e reage para formar o produto sólido da corrosão, a ferrugem. A ferrugem é formada no interface metal / óxido, forçando outra ferrugem previamente formada a afastar-se do aço, comprimindo o betão, fazendo-o fracturar.

TÉCNICAS DE REPARAÇÃO

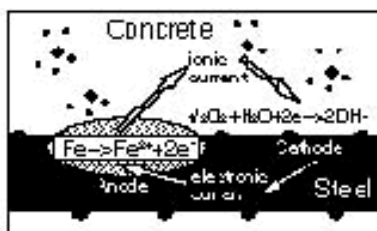


Figura 1: Reacções anódicas e catódicas

Caso se suspeite de corrosão no aço do betão, deve ser efectuada uma observação para se determinarem as causas, os mecanismos e a extensão da corrosão. Uma observação inadequada pode conduzir a custos mais elevados e a reparações inúteis. Existem alguns ensaios que são específicos para a determinação da corrosão do aço no betão, relacionados com a natureza electroquímica do processo de corrosão. São as medições de potencial em meia célula, as medições de resistividade e a medição da taxa de corrosão. Não está nos objectivos deste artigo uma exposição mais avançada destas técnicas, mas é fornecida uma bibliografia de referência.

FÍSICAS

A coisa mais óbvia que se pode fazer quando nos confrontamos com os danos por corrosão, é demolirem-se as áreas danificadas, substituir todo o aço debilitado por perda de secção e repor betão de boa qualidade. No entanto existem alguns problemas com esta abordagem :

A demolição das áreas danificadas pode deixar intactas muitas áreas que estão prestes a fendilharem e a delaminarem.

Como consequência da natureza electroquímica do processo de corrosão, as reparações podem levar efectivamente a uma aceleração da corrosão em áreas adjacentes, especialmente no caso da corrosão induzida por cloretos, já que a remoção do ânodo em curso de corrosão também provoca a perda do cátodo protector em seu redor, formando-se novos ânodos, quando o material é renovado.

As reparações podem ser visualmente intrusivas, já que é muito difícil acertar-se a cor e a textura do betão usado na reparação com o original, e é quase impossível fazer-se com que o novo material ganhe o mesmo tipo de vestígios de exposição ao clima.

Demolições extensas de betão necessitam de suportes provisórios, aumentando a complexidade e o custo do projecto ao mesmo tempo.

Os revestimentos e as barreiras podem ser muito eficientes, se as quantidades de cloretos à profundidade da armadura estiverem abaixo do limiar de cloretos, ou se a profundidade da carbonatação for menor do que a espessura do recobrimento. Os selantes penetrantes, tais como os siloxi silanos, têm demonstrado poderem ajudar a secar o betão se as fugas forem reparadas e a quantidade de água directa no betão for reduzida. São incolores e penetram na superfície, deixando a sua aparência intacta.

No entanto, os silanos não são apropriados para o betão carbonatado. Os revestimentos anti carbonatação têm que ser películas superficiais que recubram as fendas, para poderem manter o dióxido carbónico fora do betão. Contudo, as membranas de revestimento e os selantes são ambos inúteis se a corrosão já tiver começado e se a incidência directa da água não tiver sido minimizada. Os revestimentos, os revestimentos penetrantes e as barreiras também podem ser eficientes no amortecimento e na detenção da ASR por secagem do betão.

ELECTROQUÍMICA

O movimento dos iões carregados e a separação entre ânodos e cátodos, ao longo do aço, criam alguns dos problemas, mas também nos oferece algumas das soluções para a corrosão do aço no betão, já que a corrosão pode ser detida, transformando-se todo o aço num cátodo (Figura 1). Isto é conseguido pela colocação de um ânodo externo sobre a superfície ou embebido no betão (Figura 2). Uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC), conhecida como transformador rectificador, vai fazer passar uma corrente eléctrica entre este ânodo e a armadura em aço.

Esta abordagem electroquímica da reabilitação pode ser usada sob três formas diferentes: protecção catódica; migração electroquímica dos cloretos, ou "dessalinização"; e re-alkalinização.

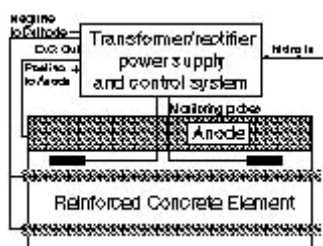


Figura 2: Esquema da Protecção Electroquímica

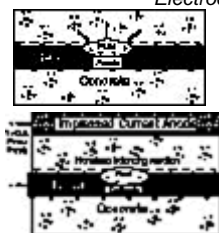


Figura 3: Forma de detenção da corrosão pela corrente catódica imposta



Figura 4a: Ânodo em malha expandida de titânio

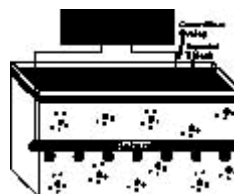


Figura 4b: Sistema de ânodo encaixado

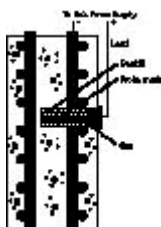


Figura 4c: Sistema de ânodo por sonda embebida

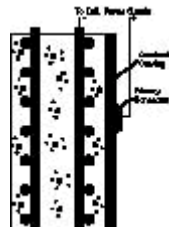


Figura 4d: Sistema de ânodo por revestimento condutor

Figura 4: Protecção catódica da armadura de aço. As sondas estão ligadas à superfície do aço e é mantida uma voltagem muito baixa..

PROTECÇÃO CATÓDICA (CP)

Neste processo, os ânodos, fonte de alimentação e sistema de controlo são permanentes, podendo ser usada uma gama de ânodos diferentes (Figuras 3 e 4). A reacção anódica agressiva fica isolada num ânodo resistente à corrosão, enquanto que a inofensiva reacção catódica ocorre em toda a superfície da armadura de aço. Este processo cria iões hidróxido adicionais, reconstitui a camada passiva alcalina e repele os iões cloreto.

A CP tem sido usada em centenas de estruturas de betão armado em todo o mundo e tem potencial para a conservação de alvenarias históricas de tijolo e de pedra, de terracota e de estatuária em que tenham sido usados reforços ou uma estrutura de ferro e de aço.

MIGRAÇÃO ELECTRO-QUÍMICA DOS CLORETOS (DESSALINIZAÇÃO)

Este procedimento usa um ânodo temporário, uma fonte de alimentação e um sistema de monitorização, para aplicar uma corrente de 50 volts directamente no aço. A carga positiva repele os iões cloreto negativamente carregados e reconstitui a camada passiva, durante um período entre as quatro a seis semanas. Apesar de menos comprovada que a CP, esta técnica foi usada em tratamentos com sucesso em mais de 50 estruturas no Reino Unido, na Europa continental e na América do Norte.

RE-ALCALINISAÇÃO

Este sistema é o equivalente à dessalinização, para as estruturas carbonatadas. Está baseado no princípio de que os iões hidróxido produzidos no cátodo re-alkalinizam o betão, a partir da armadura em direcção ao exterior. Utiliza-se um ânodo seco, à superfície, que contém carbonato de cálcio, o qual se desloca sob uma pressão electro-osmótica e re-alkaliniza o betão, desde a superfície para o seu interior.

Existem mais de cem projectos de re-alkalinização concluídos no Reino Unido e no continente. Um dos mais recentes foi a renovação da Hoover Factory junto à M40, em Perivale, NW Londres.

Estes tratamentos especializados requerem acompanhamento por especialistas, para se verificar se a estrutura é adequada e qual é o melhor sistema que lhe pode ser aplicado. Tem que haver continuidade no aço, separação entre o aço e os ânodos, e uma razoável qualidade no betão, antes que estas técnicas possam ser consideradas como económicas e tecnicamente seguras para uma dada estrutura.

TÉCNICAS DE REPARAÇÃO POR INIBIÇÃO DA CORROSÃO

Um desenvolvimento recente é o embeimento do betão com inibidores químicos da corrosão, os quais são largamente usados nas indústrias da produção de electricidade, química e manufacturas. Recentemente, foram feitas tentativas para se introduzirem estes químicos no betão endurecido. Se tiverem sucesso, podem ser bons métodos, relativamente simples, para se aumentar a gama de vida, reduzir a manutenção e proporcionar uma "intervenção mínima" no abrandamento ou mesmo na detenção da corrosão.

RESUMO

A corrosão do aço no betão pode ser um problema significativo para muitas estruturas de betão armado, se houver presença de humidade. Mesmo que não existam sais que provoquem corrosão a curto prazo, a carbonatação pode afectar as estruturas durante séculos. Se não for possível conservar-se a estrutura seca, existe uma gama de técnicas que podem ser usadas conforme a estrutura, a sua condição e a causa e extensão do problema.

As técnicas electro-químicas podem reduzir a quantidade e a extensão das reparações por remendos e deixar a aparência inalterada, com sondas embebidas no betão ou com um revestimento superficial, conforme os requisitos ou as condições. A impregnação química com inibidores de corrosão também está sob investigação como uma opção futura.

A reacção alcali sílica é o ataque químico pelos agregados na presença da alcalinidade do betão e da humidade. Se o betão for mantido seco, a ASR será minimizada. A maioria dos danos por ASR é mais inestética do que estruturalmente perigosa.

BILIOGRAFIA

- Stanley, Christopher C. *Highlights in the History of Concrete*. British Cement Association, Crowthorne, Berks. 1986.
- Cathodic Protection of Reinforced Concrete Status Report*. Report No. SCPRC/001.95 Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, London, 6 February 1995.
- Relatórios Técnicos da Concrete Society:
- No 26 *Repair of Concrete Damaged by Reinforcement Corrosion*, October 1994
- No 36 *Cathodic Protection of Reinforced Concrete*, 1989
- Broomfield, J.P. *Assessing Corrosion Damage on Reinforced Concrete Structures Corrosion and Protection of Steel in Concrete*, Editado por Narayan Swamy, Sheffield Academic Press 1994.

(*) AUTOR

Dr John Broomfield,

como consultor independente, o Dr. Broomfield especializou-se na corrosão do aço no betão. Trabalhou com o Strategic Highway Research Programme (SHRP) em Washington DC (1987 - 1990) e com a Taywood Engineering Limited, com as quais projectou alguns dos sistemas de protecção catódica instalados em estruturas de betão no Reino Unido e no Extremo Oriente. Está em actividade nalguns organismos de normalização sobre corrosão na Europa e nos Estados Unidos, tendo publicado mais de 20 obras sobre este assunto.