

# Restauração do Pentágono Americano

MATHEUS ROCHA DA SILVA – DIRETOR TÉCNICO

CORR SOLUTIONS BRASIL

JESSICA JACKSON MEYER – VICE-PRESIDENTE MCI/ASIA

CORTEC CORPORATION

## I. INTRODUÇÃO

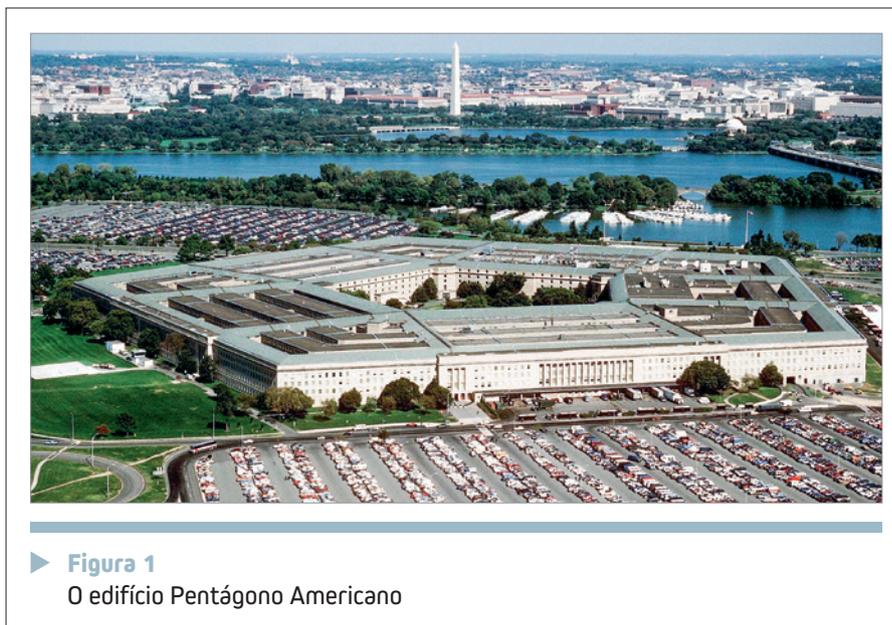
O edifício Pentágono Americano (Figura 1), sede do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, é o maior edifício de escritórios do mundo, com mais de 600.000 m<sup>2</sup> de área construída. Sua construção foi finalizada no ano de 1943 e ocorreu de forma bastante acelerada, levou apenas 16 meses para ser concluída, contando com mais de 15.000 trabalhadores.

O PENREN (Programa de Renovação do Pentágono) foi um projeto que levou mais de 10 anos para ser concluído. Muitos componentes e elementos foram renovados ou substituídos, como pisos, janelas, sistemas elétricos, telhados, paredes, entre outros. O maior componente que passou por reparos e renovação foi o concreto, material que compõe todos os elementos estruturais do Pentágono, com apenas uma exceção, a fachada externa, de calcário dolomítico.

Este artigo é sobre a reabilitação estrutural e restauração das paredes externas da parte de dentro dos 5 anéis que compõem o Pentágono, projeto que foi executado e finalizado no ano de 2011 e foi ganhador do prêmio de projeto do ano em 2009 pela ICRI (Instituto Internacional de Reparos em Concreto).

## 2. PROBLEMA

A principal manifestação patológica



nas paredes maciças de concreto armado foi a corrosão de armaduras, causada por processo de carbonatação associada a alta permeabilidade do concreto. O ingresso de dióxido de carbono através dos poros do concreto o contamina com CO<sub>2</sub>, que, de forma simplificada, reage com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)<sub>2</sub>, formando carbonato de cálcio e água, CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O.

O problema é que a carbonatação reduz o pH do concreto, pois o hidróxido de cálcio, que tem alta alcalinidade, é consumido nesta reação gerando o carbonato de cálcio, que tem um pH mais próximo ao neutro. Esta redução de pH cria um ambiente propício para a despassivação das armaduras, que, se estiverem na presença de água e oxi-

gênio, poderão ter seu processo corrosivo iniciado.

A presença da água se deu por conta da elevada permeabilidade, causada pela alta porosidade do concreto, agravado pelo sistema de formas utilizado na construção, de tábuas de madeira serradas de forma grosseira que gerou uma superfície externa na qual a umidade era facilmente absorvida toda vez que chovia. Testes realizados antes do início do programa de renovação confirmaram que o concreto existente tem resistência à compressão de aproximadamente 25 MPa.

Devido à velocidade da construção, o cobrimento das armaduras foi impróprio, pois não foi coordenado com o sistema de formas, que eram cortadas de



▶ **Figura 2**  
Aspersão de fenolftaleína para avaliação da profundidade de carbonatação

forma irregular. Testes destrutivos mostraram que a camada mais externa das armaduras chegava a ter uma espessura de cobrimento menor que 13 mm.

Combinando a alta permeabilidade, o baixo cobrimento e quase 60 anos de processo de carbonatação que, conforme mostrado na Figura 2, tinha contaminado o concreto a profundidades de 3 a 4 polegadas (76 a 102 mm), se desenvolveu um ambiente muito favorável à corrosão de armaduras. Para se ter uma ideia, havia uma área de mais de 23.000 m<sup>2</sup> de concreto com deslocamentos e armaduras expostas, como a da Figura 3.

### 3. DESAFIOS

A restauração do Edifício Pentágono



▶ **Figura 3**  
Armaduras expostas e deslocamentos

Americano foi bastante desafiadora, com critérios e especificações bem definidos. Os principais desafios encontrados foram:

- ▶ O Programa de Renovação do Pentágono determinou que a vida útil mínima da reabilitação deveria ser de 50 anos;
- ▶ Desejável que as empresas envolvidas assinassem em conjunto uma garantia de 20 anos;
- ▶ O projeto deveria atender às diretrizes técnicas do Instituto Internacional de Reparos em Concreto (ICRI);
- ▶ O resultado deveria parar ou reduzir a corrosão existente e prevenir novas ocorrências;
- ▶ O Pentágono continuaria funcionando durante a execução, o que limitava os locais e horários de trabalho;
- ▶ Trabalhos barulhentos poderiam ser feitos somente no turno noturno;
- ▶ Após finalizado o trabalho, a aparência original de cor e textura deveria ser modificada o mínimo possível, com preferência que se mantivesse idêntica;
- ▶ Uma pessoa olhando a uma distância de 9 metros não deveria perceber que houve um reparo nas paredes de concreto, ou seja, a superfície deveria ficar uniforme;
- ▶ Determinação de que a restauração deveria recuar as armaduras para atender ao novo cobrimento mínimo de 38 mm.

Por conta desses desafios, programa de reabilitação ou restauração usualmente existente não funcionaria neste caso. Foi preciso criar um projeto totalmente inovador que se adaptasse aos desafios de execução e de desempenho.

### 4. RESTAURAÇÃO

O programa de restauração nas



▶ **Figura 4**  
Sistema de andaimes

paredes de concreto teve abrangência em mais de 93.000 m<sup>2</sup> de superfície, que tinha mais de 23.000 m<sup>2</sup> de áreas com deslocamentos por conta da corrosão de armaduras. Para contornar as restrições de trabalho e dificuldades de acesso, os trabalhos barulhentos foram feitos à noite, enquanto a colocação de formas e as concretagens eram feitas de dia, ganhando em agilidade e permitindo a utilização dos mesmos andaimes, apresentados na Figura 4, para as duas equipes.

Para atender às especificações da restauração, dentre elas a de que a superfície deveria manter o aspecto original e de que não fossem percebidos os reparos a uma distância de 9 metros, o empreiteiro utilizou o mesmo sistema de formas serradas grosseiramente



▶ **Figura 5**  
Sistema de formas de tábuas utilizado para que a superfície fosse similar à original

utilizado na construção original do Pentágono, sistema demonstrado na Figura 5. Ainda, o fornecedor de material desenvolveu junto ao empreiteiro dois traços de concreto para os reparos localizados que teriam a mesma aparência e resistência do material existente, um para grandes áreas, onde o concreto seria bombeado, e outro para pequenas áreas, que seriam concretadas manualmente.

Os reparos localizados consistiram em escarificar o concreto até uma profundidade que liberasse completamente toda a superfície das armaduras para limpeza nas áreas onde o concreto estava com deslocamentos, fissuras ou não apresentava mais uma boa aderência, exemplificados pela Figura 6. Feito isso, as armaduras foram limpas por meio de jateamento de areia, as que tiveram perda de seção foram substituídas e as que tinham cobertura inferior ao da especificação da restauração tiveram o concreto à sua volta demolido, de forma que permitisse recuar as armaduras para atender à nova determinação de cobertura mínimo de 38 mm.

Embora o novo revestimento desempenhe papel importante para aumento da vida útil da estrutura, não seria o bastante para atender



▶ **Figura 6**  
Escarificação do  
concreto contaminado

à exigência de vida útil mínima de 50 anos após a restauração. Dessa forma, com intuito de fornecer uma proteção adicional às armaduras, um sistema de proteção foi especificado buscando neutralizar ou reduzir a corrosão e evitar sua reincidência.

O escolhido sistema protetivo consistiu na utilização de um inibidor de corrosão aplicado na superfície, que deveria penetrar e proteger as armaduras, além de um revestimento composto por dois diferentes materiais aplicados posteriormente. A especificação do inibidor de corrosão deveria atender ao fato de que o problema em questão era a corrosão por carbonatação.

Foi escolhido um inibidor migratório de corrosão à base de carboxilatos de amina e amino-álcoois, para proteção das armaduras no edifício Pentágono, por conta de sua capacidade de proteger as armaduras e reduzir as taxas de corrosão em um concreto carbonatado. Este tipo de inibidor migratório de corrosão é aplicado na superfície externa e penetra no concreto como um líquido através da capilaridade e, uma vez dentro do concreto, as moléculas do inibidor têm pressão de vapor, possibilitando que, através do processo de difusão, elas migrem das áreas de alta para as de baixa concentração.

Uma vez próximas das armaduras, as moléculas deste tipo de inibidor têm atração física ao metal. Isso faz com que a armadura seja completamente envolvida por uma camada monomolecular de íons catódicos e anódicos do material, formando um filme protetor hidrofóbico. Ainda, a redução na velocidade de corrosão se justifica também pelo aumento da resistência à polarização linear que

este tipo de inibidor de corrosão gera na armadura, comprovado pelo teste da norma ASTM G-180.

Uma vez aplicado o inibidor na superfície, foi desenvolvido e aplicado um sistema de revestimento composto de 2 diferentes materiais, a fim de evitar o futuro ingresso de dióxido de carbono e umidade. Para reduzir a absorção e repelir a água, um hidrofugante com 100% de sólidos à base de silano foi escolhido, porém, silano é apenas hidro-repelente e não é resistente a raios ultravioleta.

Para atender ao requisito mínimo de 50 anos de durabilidade, uma solução mais durável e que resistisse aos raios ultravioletas seria necessária, por isso um revestimento composto por silicato de potássio foi escolhido para ser aplicado por cima do hidrofugante à base de silano, por ter altíssima durabilidade e por também ser resistente à água. Juntando o silicato de potássio e o silano, a água não penetra no concreto e, ainda, com os pigmentos



▶ **Figura 7**  
Ligação com armadura e janela  
de inspeção sem revestimento



► **Figura 8**  
Medição das taxas de corrosão anteriores aos reparos

adicionados ao silicato de potássio, pode-se alcançar uma cor uniforme e que correspondia a especificação do programa de renovação.

## 5. RESULTADOS

Para verificar o desempenho dos procedimentos com relação à corrosão, algumas janelas de inspeção foram planejadas, compostas de pequenas superfícies deixadas propositalmente sem revestimento juntamente a uma fiação previamente colocada junto às armaduras, conforme a Figura 7. Com um equipamento que mede a taxa de corrosão, pode-se avaliar, em 6 diferentes pontos estratégicos, a redução velocidade de corrosão causada pelos reparos. Este procedimento é demonstrado pela Figura 8.



► **Figura 9**  
Antes e depois da aplicação do sistema de revestimentos

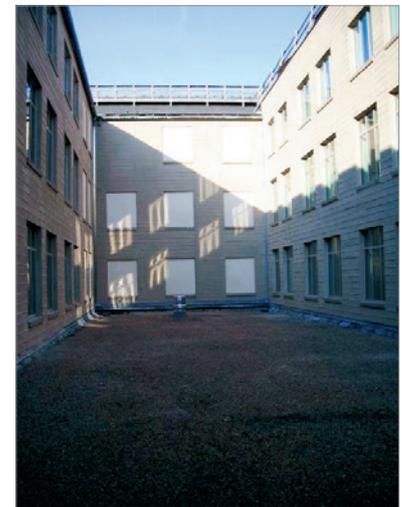
► **Tabela 1 – Faixas de taxa de corrosão com suas respectivas expectativas de vida útil**

Corrente de corrosão $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Taxa de corrosão $\mu\text{m}/\text{ano}$	Nível de corrosão	Tempo para deterioração visível
< 0.5	< 5.8	Passivo	N/A
0.5 a 5	5.8 a 58	Baixo	> 10 anos
5 a 15	58 a 174	Moderado	3 a 10 anos
> 15	> 174	Alto	< 2 anos

O intuito dessas medições era provar que de fato as armaduras novamente tinham atingido um estado de passivação e que, portanto, levariam mais do que os 20 anos de garantia estabelecidos para que houvesse qualquer tipo de dano. A Tabela 1, retirada do manual do equipamento utilizado, mostra as faixas de taxa de corrosão com suas respectivas expectativas de vida útil. Já a Tabela 2 exhibe os resultados das medições espaçadas de 3 meses, antes e depois do tratamento.

No quesito estético, o requisito era de que os reparos não fossem visíveis a uma distância de 9 metros. Para isso, foi importante a utilização do revestimento à base de silicato de potássio, que deu uniformidade ao acabamento, demonstrado pela

Figura 9. Uma outra visão pode ser percebida na Figura 10, que mostra a distância de 9 metros entre janelas.



► **Figura 10**  
Paredes de concreto após a restauração

► **Tabela 2 – Resultados das medições antes e depois da aplicação do inibidor migratório de corrosão**

7 de Junho de 2005, 14h00 a 15h30 Temperatura ~ 26 °C		27 de Setembro de 2005, 13h00 a 14h00 Temperatura ~ 24 °C	
Corrente de corrosão $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Taxa de corrosão $\mu\text{m}/\text{ano}$	Corrente de corrosão $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Taxa de corrosão $\mu\text{m}/\text{ano}$
10.9000	126.44	0.0957	1.11
2.8133	32.63	0.0808	0.94
0.1552	1.80	0.0927	1.08
0.9165	10.63	0.1130	1.31
0.6977	8.09	–	–
3.10	35.92	0.10	1.11
Média Junho:	32.41	Média Setembro:	1.11





► **Figura 11**  
Resultado final do trabalho nas paredes externas

## 6. CONCLUSÃO

Este projeto teve que triunfar sobre vários desafios e isso foi possível devido ao uso de um planejamento estratégico e de tecnologias e técnicas inovadoras. Todos os critérios especificados foram atingidos de acordo com as expectativas, que eram bastante elevadas.

Ao longo dos 10 anos trabalhados neste projeto, nenhuma leitura de taxa

de corrosão ultrapassou a faixa de passivação. Já em relação ao quesito estético, as paredes do edifício Pentágono foram renovadas, preservando suas características originais, o que pode ser visualizado na Figura 11. Este resultado foi bastante satisfatório visto que se trata de um edifício histórico.

Pode-se dizer, portanto, que o projeto foi um grande sucesso! 🏗️

## ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SALES, A. et al.; RIBEIRO, D (org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- [2] BAVARIAN, B.; REINER, L. Improving durability of reinforced concrete structures using migrating corrosion inhibitors. Corrosion 2004, Paper No. 04558, New Orleans, NACE, 2004.
- [3] Concrete Protection and Restoration Inc., Pentagon renovations - exterior wall repair and interior structural repair. Concrete Repair Bulletin, v. 22, n. 6, p. 10-14, 2009.
- [4] EDELSON, R. The Pentagon Lightwell Walls: Repair, Rehabilitation and Protection for the Next 50 Years. Structure Magazine. p. 34-36, January, 2007.
- [5] YONGMO, X.; HAILONG, S.; MIKSIC, B. Comparison of Inhibitors MCI and in Carbonation-Induced Corrosion, Materials Performance. p. 42-46, January/2004.



### GUIA DE PREVENÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON



COMITÊ TÉCNICO - CT 201  
Coordenador: Cláudio Sbrighi Neto  
Secretário: Eduardo Brandau Quitete

## Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado

### COORDENADORES

Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Brandau Quitete  
e Arnaldo Forti Battagin

Apresenta de forma didática a sequência de ações necessárias para a prevenção da reação álcali-agregado (RAA). São abordadas generalidades da RAA, avaliação de risco de sua ocorrência, medidas preventivas, classificação da ação preventiva, ensaios laboratoriais, medidas de mitigação e a tomada de decisão.

O trabalho é resultado das discussões ocorridas no **Comitê Técnico de Reação Álcali-Agregado do IBRACON (CT-201)** e seu lançamento segue a recente publicação das sete partes da norma **ABNT NBR 15577 Agregados – Reatividade álcali-agregado**.

### DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-31-2  
Formato: 18,6 x 23,3cm  
Páginas: 32

### PATROCÍNIO



**Aquisição: Acesse a Loja Virtual do IBRACON.**

[www.ibracon.org.br](http://www.ibracon.org.br)