

RESUMO TÉCNICO BIBLIOGRÁFICO
DISCIPLINA PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES/IFS

TEMA

**DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO CONVENCIONAIS e PROTENDIDAS**

ASSUNTO

RESISTÊNCIA DO CONCRETO AO INGRESSO DE CLORETOS

RTB/02

PROFESSOR CARLOS HENRIQUE DE CARVALHO
COEC/ ENGENHARIA CIVIL/IFS/CAMPUS ARACAJU

2018

1. INTRODUÇÃO

O ingresso de cloretos em concreto armado é um grande problema, induzindo a corrosão e conseqüente redução e/ou comprometimento o desempenho e a durabilidade estrutural. Ocorre no mundo inteiro impondo custos enormes. A fim de garantir a integridade das estruturas de concreto e mantê-las adequadamente para alcançar sua vida útil projetada, são necessários métodos de teste e modelos relevantes para a previsão da vida útil. Considera-se que os países mais desenvolvidos gastam mais de 50% do seu orçamento de infraestruturas na restauração de estruturas que sofrem de deterioração prematura. Isso ocorre por vários motivos, sendo o principal deles a corrosão de aço induzida por cloreto em estruturas de concreto armado. Assim, se mais investimentos forem feitos em novos projetos de infraestrutura, há uma necessidade de reduzir esses custos onerosos de reparos e recuperações através da garantia da durabilidade dos concretos nesses ambientes agressivos.

No interior do concreto o aço está protegido por uma camada passivadora que envolve o aço, esta camada é formada e mantida devido ao elevado pH na solução dos poros do concreto.

O aço-carbono embutido em concreto de boa qualidade assume um estado termodinâmico estável em razão da elevada alcalinidade da solução aquosa contida em seus poros, que propicia a formação de uma camada de óxidos/hidróxidos de caráter protetor (filme insolúvel, compacto e aderente) denominada de camada passiva. A composição dessa camada não é fixa, variando com as condições da superfície do aço-carbono, quando da concretagem (aço corroído e/ou contaminado), e com as características da interface aço/concreto ao longo do tempo, como composição, pH e oxigênio disponível na água de poro.

Estudo de Huet et al. (2005) mostrou que a camada passiva é muito fina (< 10 nm), sendo composta principalmente de óxidos de ferro III (Fe_2O_3). Isso foi verificado para barra de aço-carbono com carepa de laminação, imersa em soluções simuladas de água de poro. Estudo de Chomat et al. (2014) confirmou a mencionada alteração de composição da camada passivante ao longo do tempo. Isso foi verificado por meio de avaliações periódicas (três anos) de barras corroídas embutidas em argamassa de cimento Portland exposta à atmosfera com umidade relativa elevada (80% a 95%). Os mesmos autores verificaram a presença de uma camada externa à de passivação, rica em oxigênio, cálcio, silício e ferro. Segundo outros estudos, essa camada externa pode conferir proteção adicional, atuando como barreira ao acesso de agentes à superfície do aço e

Como reserva alcalina, em razão da deposição local de produtos hidratados de cimento (HORNE et al., 2007; YONEZAWA et al., 1988; PAGE, 1975).

Em atmosfera rica em íons cloreto (Cl^-), como o ambiente marinho, predomina a contaminação do concreto com esses íons dissolvidos em água. Geralmente, locais de acúmulo de água pluvial contaminada, água de condensação e, *especialmente, sujeitas a ciclos de molhagem e secagem são mais suscetíveis à corrosão intensa decorrente do ataque desse agente*. A corrosão é desencadeada quando um valor limite de concentração de Cl^- é atingido na interface aço/concreto. Com isso, a estabilidade da camada passiva é alterada, com quebra localizada e formação de pites de corrosão. Cita-se que o limite de íons cloreto não é fixo, sendo dependente de inúmeros fatores, como concentração de íons hidroxila (OH^-) na solução aquosa junto à armadura, potencial eletroquímico da armadura e sua limpeza e rugosidade, grau de carbonatação do concreto e presença de vazios junto à superfície, como bolhas de ar, microfissuras e frestas (BERTOLINI et al., 2004). Apesar da importância desses fatores, é comum a adoção da condição crítica com base somente no teor de Cl^- , sendo que a NBR 12.655:2015 apresenta valores limites de cloreto entre 0,15% e 0,40% para concreto armado e de 0,05% para o concreto protendido, ambos em relação à massa de cimento. (Adriana Araújo, IPT).

Célula de corrosão - Define-se como célula de corrosão o sistema formado por um ânodo (A) e um cátodo (C) em contato elétrico eletrônico e iônico, sendo que o primeiro ocorre no metal (condução eletrônica) e o segundo, no meio aquoso (condução iônica). Essa última condução é função da movimentação de íons livres (partículas com carga elétrica) no meio aquoso. O fluxo de corrente elétrica (I) é estabelecido pela diferença de potencial eletroquímico (tensão elétrica) existente entre o ânodo (onde ocorre a reação de oxidação do metal) e o cátodo (onde ocorre a reação de redução de oxigênio). *A célula de corrosão também é usualmente denominada de célula galvânica e célula eletroquímica de corrosão.*

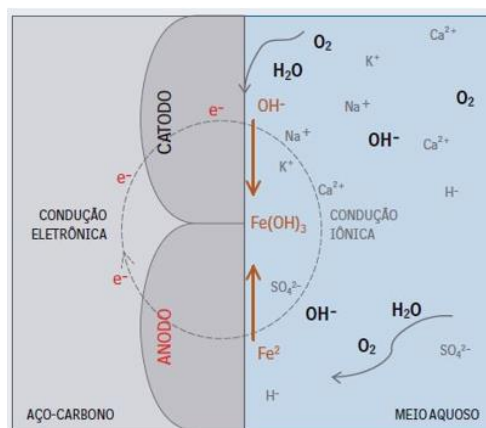


Fig. 1. Croquis de uma célula de corrosão (IPT)

A *figura 1* apresenta desenho esquemático de uma célula de corrosão. A superfície do aço-carbono atua como eletrodo misto, apresentando, na interface aço/meio, área onde ocorre a reação catódica ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$) e área onde ocorre a reação anódica ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$), ambas ocorrendo simultaneamente. Como mostra a figura 1, em A, os elétrons (e^-) liberados pela reação de oxidação do ferro fluem (por condução eletrônica) para C e são consumidos localmente pela reação de redução do oxigênio dissolvido na solução aquosa ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$). Os íons hidroxilas (OH^-), resultantes dessa reação, reagem com os íons de ferro (Fe^{2+}), liberados para a solução em A, levando à formação de hidróxido de ferro ($Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$) a meio caminho entre A e C. Dependendo da disponibilidade de oxigênio, pH do meio e da diferença de potencial estabelecida entre A e C, há formações de produtos de corrosão, como exemplo, óxido de ferro III hidratado ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) e magnetita hidratada ($Fe_3O_4 \cdot H_2O$) (QIAN et al., 2006).

Formação de microcélula de corrosão e de macrocélula de corrosão

Na prática, a natural heterogeneidade do concreto de cobrimento da armadura e do seu filme passivante leva a corrosão (induzida por carbonatação ou por íons cloreto) a iniciar-se em zonas descontínuas ao longo de barra ou malha do plano superficial da armadura, concentrando-se no semicírculo mais externo (CAO, CHEUNG, 2014; HANSSON et al., 2006). Destacam-se elementos de seção retangular ou quadrada em que a corrosão inicia-se em zonas descontínuas de armadura superficial localizada próxima às quinas. Nessas zonas, há tendência de formação de camada não uniforme de produtos de corrosão, com trecho adjacente sem corrosão (passivada).



Fig. 2. Armadura com corrosão generalizada em quinas de viga e pilar.

A *figura 2* apresenta um exemplo de corrosão generalizada desencadeada por carbonatação do concreto de cobrimento da armadura. A figura 2a mostra um trecho de armadura corroída em uma quina de viga, num local de deslocamento do concreto

de cobertura. A figura 2b mostra detalhe de outro trecho de armadura corroída em quina de um pilar da mesma estrutura, sendo possível observar a corrosão intensa do aço-carbono exposto. Nessa estrutura, constatou-se uma variação da espessura de cobertura da armadura e ausência de manutenção periódica, o que resultou no avanço da frente de carbonatação com corrosão intensa em zonas dispersas, especialmente quinas e face inferior de lajes.

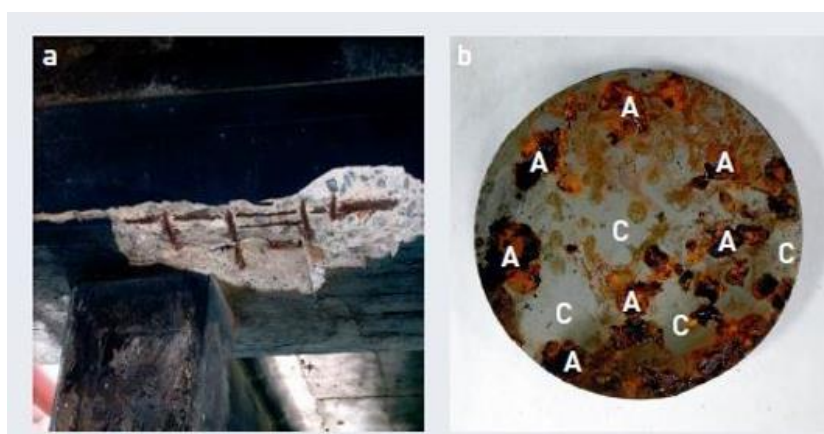


Fig. 3. Armadura com corrosão generalizada (pites já coalescidos) na quina e na face inferior de uma viga, em concreto contaminado com íons cloretos e deslocado (a). Detalhe da superfície de um corpo de prova mantido em contato com concreto contaminado com íons cloretos. Observa-se a presença de área de corrosão ativa (A) e passiva (C), caracterizando macrocélula de corrosão (b).

A *figura 3* apresenta exemplo de corrosão desencadeada por formação de macrocélulas em razão do ataque de íons cloreto (Cl^-). A *figura 3a* mostra área de armadura com intensa corrosão generalizada (pites já coalescidos) em uma quina de viga e sua face inferior em área de concreto deslocado. A *figura 3b* mostra a superfície de um corpo de prova de aço-carbono que foi mantida em contato com concreto contaminado com Cl^- . Pode-se observar o estabelecimento da corrosão por formação de macrocélula, tendo-se áreas de intensa corrosão (A) e áreas passivadas (C) nas quais foi preservado o aspecto original da superfície do aço.

Na prática dos estudos das autoras (Ana Lúcia Souza pela recuperação dos artigos), a corrosão nas estruturas de concreto tende a se iniciar em regiões mais susceptíveis das armaduras do plano mais superficial do elemento de concreto, como locais de menor espessura do concreto de cobertura, locais de concentração de vazios e, ainda, locais com anomalias, especialmente em área fissurada ou segregada. Nesses locais, pode ser formada uma macrocélula de corrosão a qual, na prática, nem sempre é de fácil identificação. ***Cita-se que essa identificação é feita pelo mapeamento do potencial eletroquímico (denominado também de potencial de corrosão ou potencial***

de circuito aberto) com uso de eletrodo de referência posicionado na superfície do concreto. Também é possível a formação de macrocélula entre armadura despassivada do plano superficial e armadura mais interna (plano paralelo) que está passivada ou com menor taxa de corrosão (HANSSON et al., 2006; ANDRADE et. al, 1992).

Como exemplos de elementos usuais de formação de macrocélula, citam-se lajes de garagem de edifícios e de pontes expostas ao sal de degelo, paredes de contenção em contato com solo contaminado, estacas de pontes e píeres. Nesses casos, tem-se uma região com livre acesso ao ingresso de O₂ e outra com livre acesso ao ingresso de agentes agressivos (RAUPACH, 1996). Incluem-se também elementos em solo ou em água que estão em contato elétrico com metal mais nobre, como contato da armadura com fio de cobre de sistema de aterramento (Bertolini et al., 2004).

É importante também mencionar a formação de macrocélula em zona de concreto recuperado, em que um trecho da armadura foi repassivado por meio da remoção dos produtos de corrosão e da recomposição do concreto local, enquanto, na adjacência, outro trecho da armadura permaneceu embutido no concreto original (contaminado com Cl⁻ ou carbonatado). Nesse caso específico, a área anódica (A) é limitada a um pequeno trecho da barra embutida no concreto original, sendo esta denominada de ânodo incipiente. Barkey (2004) e Andrade et al. (1992) observaram que essa área de corrosão ativa (área anódica – A) ocorre até poucos centímetros (± 20 cm) de distância da área de concreto recuperado (área catódica – C). Estudo de Cusson et al. (2004 apud ZHANG; MAILVAGANAM, 2006) mostrou que há uma diferença de potencial de corrosão entre A e C de 100 mV a 150 mV, para corrosão decorrente de ataque de Cl⁻

A Fig. 4 ilustra a formação de uma macrocélula de corrosão em concreto fissurado.

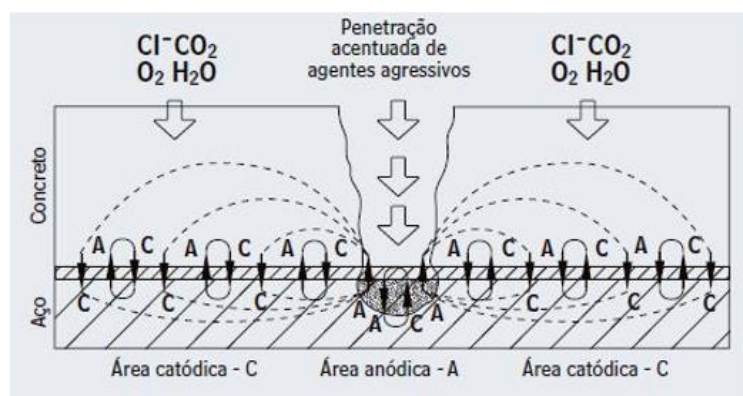


Fig. 4

A *figura 4*, adaptada de Subramaniam e BI (2010), apresenta uma macrocélula de corrosão em região de concreto fissurado. Nesse caso, embora ambas as áreas estejam com corrosão em curso, no trecho fissurado a corrosão ocorre com maior intensidade, predominando a reação de oxidação (em A), enquanto na adjacência predomina a reação de redução (em C). A coexistência de A e C em cada área indica a formação de uma micro célula de corrosão, que ocorre independentemente da existência ou não de macrocélula, sendo que essa última célula se soma à microcélula, intensificando a corrosão sob a fissura na área A (QIAN et al., 2006; ANDRADE et al., 2008; ANDRADE et al., 1992). Isso justifica Raupach (1996) descrever o mecanismo de corrosão em área fissurada como sendo um decisivo parâmetro para a taxa de corrosão da armadura, podendo a área ativa de corrosão apresentar uma taxa extremamente alta. Em seu estudo, a área fora da fissura atuou como cátodo até distância um pouco mais de 20 cm. Isso para concreto de relação água cimento de 0,60 e fissura com abertura de 0,5 mm.

A **Fig. 5** apresenta um exemplo de concreto fissurado com manchas de corrosão na superfície de uma viga de concreto armado em ambiente marinho **(a)** e, no mesmo local, após fratura do concreto, mostrando armadura com corrosão generalizada **(b)**. A foto **5 (c)** mostra caso real de corrosão adjacente (macrocélula) em região recuperada.

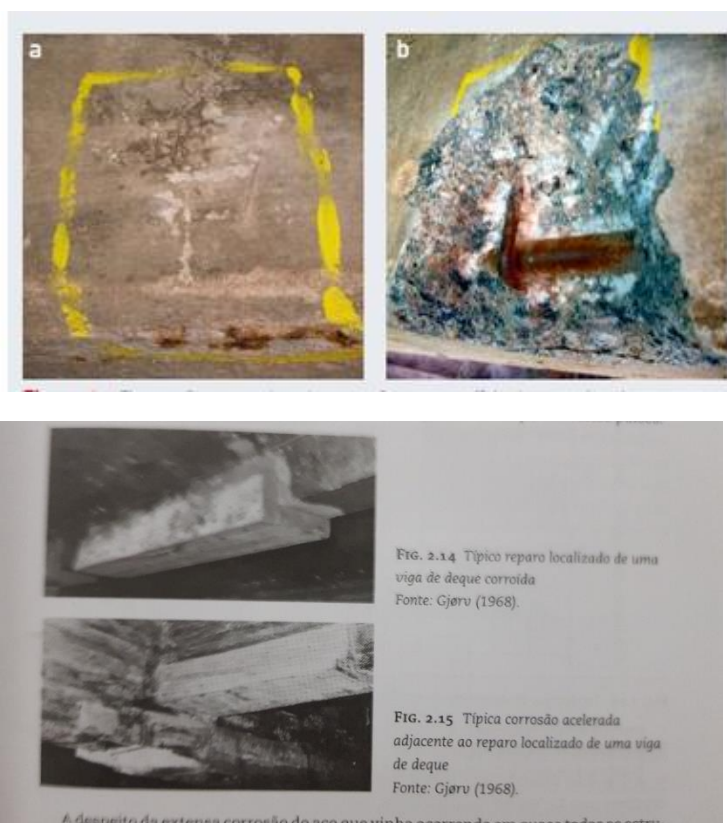


Fig. 5 (c)

A **Foto 5a** apresenta um exemplo de concreto fissurado com manchas de corrosão na superfície de uma viga de estrutura em ambiente marinho. A **Foto 5b** mostra o estado da armadura após a fratura local do concreto, evidenciando a ocorrência de corrosão generalizada. Embora não seja claramente visível na **Foto 5b**, a fissura atingia a armadura e o concreto no entorno da fissura estava bastante umedecido, indicando a penetração de água contaminada com Cl⁻. O exame detalhado da armadura mostrou que a corrosão era mais intensa no semicírculo externo da área exposta da armadura, o que pode ser devido à formação de macrocélula de corrosão; a **foto 5 (c)** mostra a consequência da pilha de corrosão instalada depois de um recuperação localizada em armadura corroída provocando corrosão acelerada adjacente.

Taxa de corrosão

Independente do agente desencadeador da corrosão e da predominância de corrosão por microcélula ou por macrocélula, ou ainda, a coexistência de ambas, a severidade do ataque é dependente da taxa da corrosão ao longo do tempo. **Os fatores principais que controlam a taxa de corrosão são a resistividade elétrica do concreto e a disponibilidade de oxigênio dissolvido no meio aquoso junto à superfície do aço.** *A resistividade elétrica do concreto controla a condução iônica entre a área anódica (A) e a catódica (C) do processo corrosivo, enquanto a presença de oxigênio (O₂) controla a cinética da reação catódica.*

*A resistividade elétrica do concreto está relacionada com o seu grau de umidade/saturação, sendo a **condição ideal para a evolução do processo corrosivo aquela em que a rede de poros comunicantes não está totalmente preenchida com solução aquosa, possibilitando, além do livre fluxo de corrente iônica na água de poro, a difusão do O₂ através de camada de ar nos poros não preenchidos (TUUTTI, 1982).** Explica-se que embora a condição de total saturação do concreto facilite o fluxo de corrente iônica no meio, essa torna muito lenta o transporte de gases na água de poro que ocorre por difusão. Isso justifica que as estruturas expostas às intempéries (denominadas de estruturas externas ou atmosféricas) e, especialmente, as partes de elementos submetidas a períodos de umedecimento intermitente, sejam consideradas altamente suscetíveis à corrosão.*

É conhecido que a contaminação com íons cloreto determina a diminuição e a carbonatação, o aumento da resistividade do concreto. A primeira é decorrente do aumento da mobilidade de íons no meio aquoso e, conseqüentemente, a condução iônica. A segunda ocorre devido à precipitação de carbonatos insolúveis, o que diminui a mobilidade de íons.

A **figura 6**, adaptada de Bertolini et al. (2004), apresenta esquema representativo de valores de taxa de corrosão da armadura (convertidos para perda de espessura por ano). Na figura, é considerada tanto a corrosão desencadeada pela

contaminação do concreto com íons cloreto (Cl^-) como pela sua carbonatação (CO_2). Isso para diferentes graus de umidade relativa atmosférica (UR), os quais usualmente admitem-se como sendo também representativos da umidade interna do concreto, que tende a entrar em equilíbrio com o ambiente externo. Como mostra a figura, a corrosão é desprezível quando a perda da seção do aço é $< 2 \mu\text{m}/\text{ano}$. A partir desse valor, a gravidade do ataque aumenta gradualmente, sendo usualmente definido como ataque severo às armaduras quando a perda de espessura é superior a $100 \mu\text{m}/\text{ano}$.

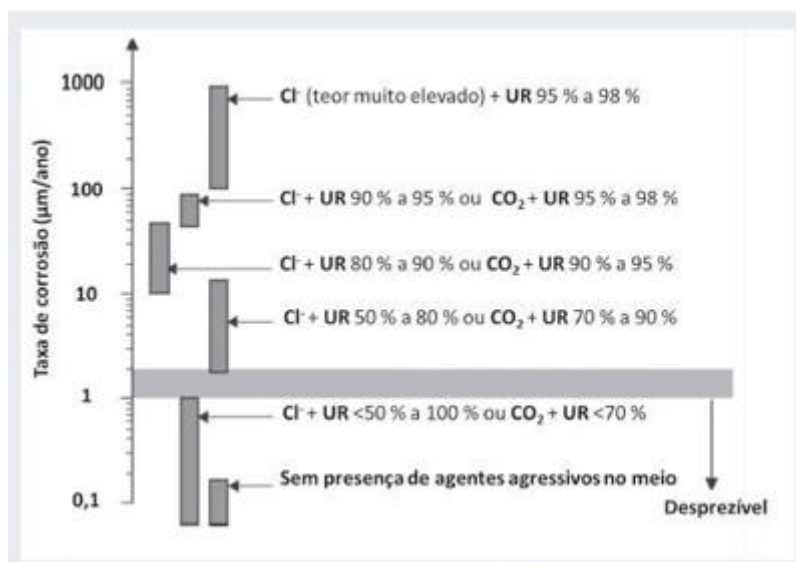


Fig.6. Croquis representativo da taxa de corrosão em concreto contaminado por íons cloretos ou carbonatado considerando a umidade relativa atmosférica (UR).

O cloro está presente em toda parte. No entanto, o conhecimento de que o cloreto (por exemplo, no ambiente marítimo) é muito agressivo contra barras de aço de reforço não tem sido um obstáculo para o desenvolvimento de estruturas de concreto armado em ambientes de agressividade do tipo marinho. No início da história das estruturas de concreto armado, o concreto foi aplicado em ambientes marinhos e outras exposições, como, por exemplo, molhes, quebra-mares, pontes, pavimentos, navios, plataformas flutuantes e estruturas off-shore.

De acordo com documentos técnicos anteriores sobre as estruturas marinhas RC (concreto armado), é visto que, mesmo que o mecanismo de transporte de cloreto no concreto não fosse conhecido, o ataque da água do mar tornou-se uma instituição. Vários estudos de campo e exames de estruturas de concreto armado expostos a cloreto foram realizados e relatados na literatura, por exemplo, Atoo et al. (1924) e Field (1968). O conhecimento na época sobre as consequências do ataque da água do mar sobre as estruturas do RC (concreto armado) foi muito prático e baseado nas experiências

práticas dos engenheiros, algo de que precisamos hoje. A ilustração a seguir enfatiza zonas de ataque aos concretos dentro do ambiente marinho.

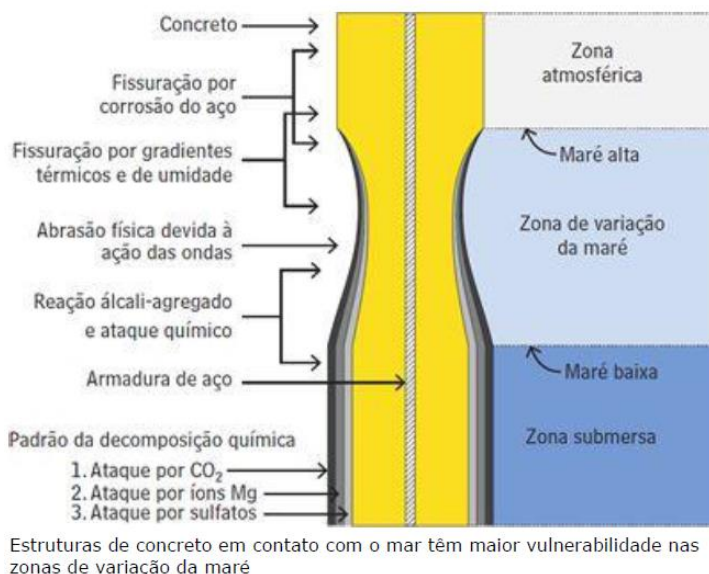


Fig. 7. Fonte: Pini. *Téchne*, 196, julho/2013, Rodnei Corsini.

Muitas estruturas RC (reinforcement concrete) estão expostas ao cloreto. Não são apenas estruturas RC marinhas que são expostas ao cloreto (da água do mar), mas também estruturas RC rodoviárias sofrem ataques de cloretos devido ao degelo com agentes carregados de cloretos. Em algumas áreas geográficas, o solo pode conter cloreto (solo marinho elevado) e em um solo carregado, o cloreto pode penetrar no concreto através do contato.

Acrescentando à área de ataques conhecidas, várias das nossas indústrias aplicam cloretos na sua produção (por exemplo, matadouros). Idem, a exposição de uma estrutura RC aos produtos resultantes de PVC que durante o incêndio desenvolvem cloretos na forma de ácido clorídrico (HCL).

1.1 Tipos de Fontes de Cloretos nos concretos

O cloreto das várias fontes é dividido em dois grupos principais:

CLORETO INCORPORADO no concreto (fresco) quando foi misturado, e. de agregados salgados, água de mistura salgada e misturas contendo cloreto.

CLORETO QUE PENETRA no concreto (endurecido) do ambiente, e. da água do mar, águas pobres salgadas, águas subterrâneas salgadas, maresia, sais de degelo, de processamento ou armazenamento de haletos, e de outras indústrias, como as indústrias alimentícias (matadouros, osterias, etc.).

Apenas duas décadas atrás, acreditava-se que os cloretos incorporados ao concreto quando este era misturado eram cloretos ligados (ou seja, insolúveis) e, portanto, não deveriam ser arriscados, desde que o teor de cloreto fosse mantido no máximo em dois por cento por massa. Agora, vários casos mostraram (testes de laboratório e inspeções de campo) que os cloretos ligados serão liberados pela carbonatação e lixiviação, levando à corrosão do reforço. Assim, é agora especificado por códigos, exemplo do Eurocódigo ENV 1992-1-1 e EN 206-1 (1999) que deve haver um limite superior de cloreto em concreto reforçado e protendido. Este limite é uma certa fração do valor limite do cloreto no concreto (**Diffusion of Chloride in Concrete: Theory and Application; Pulsen and Mejlbro, 2006**).

O concreto é um tipo de material ao qual os líquidos podem penetrar. Quando o concreto é exposto ao cloreto, a penetração do cloreto ocorre através do sistema de poros capilares, rachaduras e defeitos do concreto.

1.2 Mecanismos de Transporte de Cloretos

Os mecanismos de transporte são usualmente divididos nos seguintes grupos:

1.DIFUSÃO, onde o transporte de cloreto é impulsionado pela diferença da concentração de cloreto em várias zonas. O cloreto sempre se difunde em zonas com menor concentração de cloreto.

2.PERMEABILIDADE, onde o transporte de cloreto é acionado por uma diferença da pressão hidráulica em várias zonas. O cloreto sempre se move para zonas com menor pressão hidráulica. O transporte de cloreto no concreto por permeabilidade pode ocorrer em concreto com alta intensidade de trincas e defeitos.

3.MIGRAÇÃO, onde o transporte de cloreto é impulsionado por uma diferença no potencial elétrico. O cloreto sempre se move para zonas com menos potencial elétrico, conforme Mays et al. (1992). A migração de cloretos no concreto pode ocorrer quando exposta a corrente perdida, exemplo dos túneis do Metrô, conforme Kirsh (1981). Os íons de cloreto negativos (por exemplo, do solo em ligação com o concreto) irão migrar para as zonas de ânodo (positivas) do reforço e aumentam a taxa de corrosão e causam corrosão por pite. A migração pode ser aplicada por extração de cloreto eletroquímico, conforme NCT (1991), e por vários métodos de teste para a determinação do coeficiente de difusão de cloreto, conforme o método de teste ASTM C 1202-94.

4.CONVECÇÃO, onde o transporte de cloreto é conduzido por uma diferença no conteúdo de umidade (pressão). A água com cloreto sempre se move para zonas com menor teor de umidade, sendo todos os outros parâmetros iguais. Então o líquido dos poros do concreto se move em direção a uma superfície exposta à evaporação. No caso

do concreto conter cloreto, a evaporação envolve concentração de cloreto na superfície onde ocorre a evaporação, a chamada ação de pavio. Outro caso especial é o molhamento e a secagem repetidos, que podem envolver concentrações muito altas de cloreto na superfície.

Para garantir a qualidade de estruturas de concreto caras e para mantê-las adequadamente durante a vida útil projetada, uma boa compreensão dos mecanismos de transporte de cloreto, métodos de teste e modelos relevantes para prever a vida útil são necessários. Futuramente, haverá a necessidade de verificar a validade dos testes e modelos de transporte nas estruturas em serviço.

1.3 Manifestações Patológicas por Cloretos

A corrosão de armaduras dos concretos é uma das manifestações patológicas mais perigosas nas estruturas prediais e nas obras infraestruturais, tanto nos concretos convencionais como, mais ainda, nos concretos de armaduras pretensionadas. Compromete sobremaneira a vida útil bem como uma durabilidade final. Proporciona custos elevados à inspeção e manutenção de estruturas deterioradas. Portanto, a qualidade do projeto, da produção e da manutenção possuem importância significativas para prevenir falhas prematuras comprometedoras do desempenho estrutural.

Além das deteriorações acentuadas nas edificações correntes, o ataque na infraestrutura civil, a espinha dorsal de qualquer sociedade, demanda enormes investimentos nas restaurações e/ou reforços. Quando a economia de um país é forte os investimentos em infraestrutura se desenvolvem e vice versa, porque o progresso de uma sociedade está coligado à infraestrutura. Normalmente, é considerado que os países mais desenvolvidos gastam mais de 50% do seu orçamento de infraestrutura na restauração de estruturas que sofrem deterioração prematura a qual ocorre por uma série de razões, sendo a principal delas a corrosão induzida por cloretos nos aços das estruturas. Assim, diante da necessidade imperiosa de mais investimentos em novos projetos de infraestrutura, as fases da gestão da concepção, da produção e da manutenção

Dos ativos a empreender devem ser competentes com o objetivo principal de aumentar a durabilidade para um pleno desempenho projetado (vida útil).

O cloreto em si não resulta, em circunstâncias normais, diretamente em qualquer dano ao concreto, mas pode induzir a corrosão do aço dentro do concreto. Isso tem consequências econômicas e sociais muito importantes, devido à necessidade de desviar fundos para a reparação de áreas danificadas e, por vezes, interditar infraestrutura e/ou edificações para o trabalho de reparação e reabilitação. O custo do investimento de uma infraestrutura deve ser analisado globalmente, tanto pelo custo

de construção propriamente dito, como também dos custos de manutenção e interdição.

1.4 Corrosão em Estruturas de Concreto Armado Convencionais

É uma manifestação patológica muito frequente em estruturas e infraestruturas usuais de concreto armado convencionais. Demanda um dispêndio relevante para o resgate da vida útil projetada. A NBR 6118/2014 estipula parâmetros técnicos visando a durabilidade, entretanto, recentes considerações de estudos de caso e pesquisas apresentadas em Seminários (exemplos dos Seminários ABECE, Aracaju/Se/2017 e BADUCON/BA, 2016), fomentaram a certeza de que, mesmo se projetando pela citada, a vida útil de projeto não será alcançada.

As normas “fib” usadas na Espanha e outras adotam uma estratégia mais sistêmica, no meu entendimento, ao se exigir dos concretos estruturais em ambientes agressivos também a resistência à penetração de agentes agressivos e não somente as propriedades mecânicas e térmicas requeridas usualmente na nossa cultura de controle de qualidade.

Análise do microclima levadas a efeito em áreas de futuro lançamento imobiliário em Salvador/Ba, por exemplo, durante todas as estações climáticas em um ano, demonstrou que adoção dos parâmetros da NBR 6118/2014 são apenas mínimos sem a garantia da durabilidade subliminarmente presumida. A norma é um mínimo.

Fotos seguintes ilustram ataques de cloretos em estruturas de concreto armado.



*Figura 52 - Pilar P3 - Ponte Godofredo Diniz
Fonte - Laudos de Vistoria de 2015*



FOTO 1. Ponte Godofredo Diniz, construída na década 80, Aracaju/Se



FOTO 2. Estrutura de concreto reticulada sob ataque também de cloretos.



FOTO 3. Ponte no município de Indiaroba/Se. Componentes de infra e superestrutura em concreto armado com corrosão visível instalada.

FOTOS 4, (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) ilustram placas de concreto armado convencional usadas nos revestimentos de fachadas de edifícios em Aracaju, em região de orla marítima sob ação de concentração relevante de cloretos.



(a)



(b) placas de concreto armado soltas



(c) placas de concreto destacada junto caixa de ar condicionado

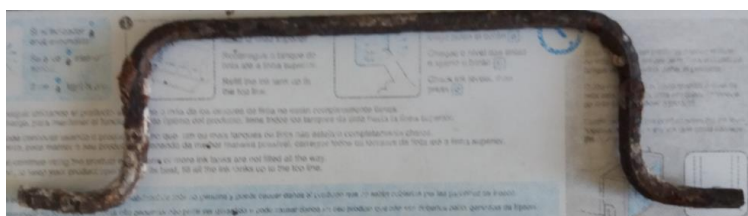


(d) Placas de concreto revestindo fachadas



Gancho em aço carbono comum (armadura de estribos) usado como ancoragem, preso com arame recozido

(e) placa retirada e destruída salientando a armação de aço usada, bem como a armadura de ancoragem (ganchos) sem corrosão após 40 (quarenta) anos de exposição na fachada



(f) gancho de ferro comum usado na ancoragem com pouca corrosão superficial após 40 anos de desempenho.



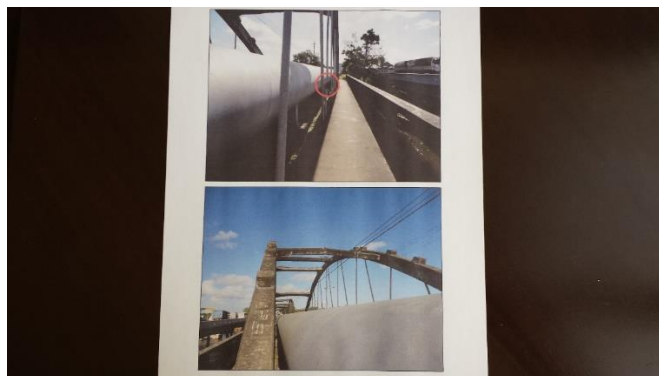
Armação corroída na superfície sem cobertura adequado

Armação coberta sem corrosão

(g) ferragens de armação da placa em aço carbono comum corroídas nas faces que não possuíam recobrimentos adequados, mas inteiras nas regiões devidamente cobertas.

Observação: placas estão sendo objetos de avaliação do pH do revestimento, absorção, permeabilidade, etc.

FOTOS 5. (A), (b) e (c). Ponte José Américo de Almeida no Povoado de Pedra Branca separando os municípios sergipanos de Laranjeiras e Maruim de Sergipe.



(a)



(b)

(a) Tirantes, Estrutura de concreto em arco e transversinas da ponte com corrosão instalada;

(b) Tirante rompido dois anos antes motivado pela corrosão sob tensão em ambiente agressivo de cloretos. Os tirantes suportavam o tabuleiro da ponte construída em 1933 na BR 101. Posteriormente, no século passado, foi delegada à administração do Estado, face a duplicação daquela BR, sendo implantada uma nova finalidade em lugar de rodoviária. O Estado colocou adutoras sobre a ponte;

(c) Fotos da ponte na inauguração e no pós-desabamento. O Desabamento ocorreu no dia nove de maio de 2015. Com a queda, duas tubulações da adutora do São Francisco, instaladas no seu tabuleiro, foram destruídas deixando a capital sergipana e a grande Aracaju sem água. Além das adutoras, a ponte permitia passagens de pedestres e eventualmente carros pequenos.

P
O
N
T
E

P
E
D
R
A

B
R
A
N
C
A

(c)



O Laudo do Creia-se recomendou que as escolas de Engenharia Civil insiram em seus projetos pedagógicos as disciplinas pertinentes à corrosão de estruturas de concreto armado, concreto protendido e metálicas.

A ação dos cloretos também se faz presente em outros sinistros tais como na indústria aeronáutica.

O exemplo da falha no motor em avião da TAP causada por corrosão foi a conclusão para o acidente em 2016. O relatório apresentou fatores que contribuíram para o fato, entre eles a exposição dos motores a elementos corrosivos tais como: pó, areia, poluição, SAL (operações próximas à ambientes Marítimos) etc. No caso a corrosão foi agravada pelo carregamento cíclico (fadiga) em ambiente agressivo.

1.5 Corrosão em Estruturas de Concreto Protendidos ou Pretendidas

Acidentes nas estruturas devido corrosão nos cabos de aço dos concretos protendidos ou pretendidos provocados pela ação de cloretos e outros acontecem com relativa frequência. Nas pontes, viadutos e outras estruturas protendidas, a situação se agrava diante da característica do tipo de corrosão sob tensão com carregamento dinâmico e cíclico (fadiga) além da agressividade ambiental conjugada com a falta da cultura de manutenção no nosso país.

A **FOTO 5** se refere a cobertura atual do **BATISTÃO (inaugurado em 1969)** salientando o módulo de marquise que desabou.



Módulo que caiu

O **Estádio Estadual Lourival Baptista**, mais conhecido como **Batistão**, é um estádio de futebol localizado em Aracaju/Se. O desabamento de um módulo marquise com 30 m de frente, conforme destacado na **Foto 5**, foi em 18 de dezembro de 1998.



FOTO 6. Foto das arquibancadas cobertas pelas marquises após recuperação na última copa do mundo no Brasil.



FOTOS 7. Jornal a Gazeta de Sergipe em dezembro/1998.

Texto da PINI na época:

O Estádio Batistão sofreu um colapso estrutural num trecho periférico de cerca de 30 m no final de 1998 após um domingo festivo onde se encontravam presentes centenas de crianças, filhos de pais carentes, que recebiam seus presentes em comemoração ao Dia das Crianças. Na segunda-feira seguinte, próximo às 10:30 horas, os funcionários de uma Divisão da Secretaria da Educação que se encontravam, juntamente com docentes (60 professores) realizando um treinamento, observaram paredes trincando e deixaram o local. Por pouco uma tragédia teria acontecido. A marquise que servia de cobertura para as arquibancadas desabou danificando toda essa parte da construção. Felizmente não havia ninguém no local que comportava em torno de 600 (seiscentas) pessoas. Segundo a arquiteta Roberta Albuquerque da Compacta (empresa encarregada da recuperação), o primeiro levantamento mostrou que a área afetada sofreu uma *fadiga estrutural e foi abalada na totalidade*. "A análise demonstrou que as fundações do local foram danificadas", explica a arquiteta. Os trabalhos começaram com a demolição completa das arquibancadas e a reconstrução dos blocos de fundações dispostos entre as estacas e a estrutura. Em seguida, foi realizada a reconstrução das arquibancadas e da marquise.

Entretanto, a estrutura da marquise possuía um significativo balanço sobre as arquibancadas, além do trecho contíguo apoiado em pilar interno rotulado sob esforços de compressão e pilares da fachada, protendidos, sob esforços de tração. As águas de chuvas eram coletadas pelas marquises e drenadas para calhas sobre a linha de pilares protendidos. A Fig.8 seguinte ilustra o esquema isostático estrutural.

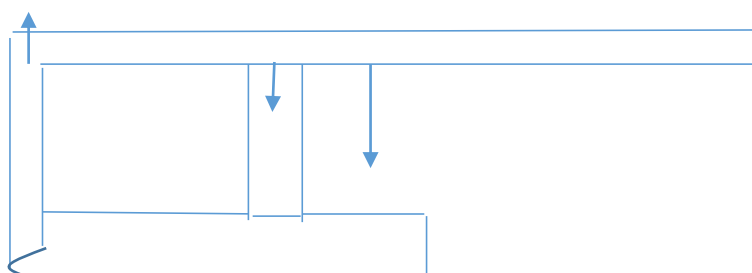


Fig. 8. Croquis do modelo isostático da marquise

Nexo Causal

Na perícia realizada, verificou-se que o nexos causal do desabamento foi a ruptura, face corrosão eletroquímica, dos cabos de protensão inseridos nesses pilares tracionados. É denominada corrosão sob tensão, bastante perigosa e

Conhecida no meio técnico como o tipo de corrosão que causa ruptura abrupta, não dando tempo de sair debaixo. A cidade de Aracaju está situada ao longo de orla marítima Atlântica onde existe o "spray salino" composto de cloretos do mar dissolvidos no ar atmosférico, além do CO₂. A corrosão sob tensão fragiliza os cabos pela ação de

pites dos cloretos. Como era uma região que propiciava, com relativa frequência, a presença de águas de chuvas salinas, além da umidade atmosférica, CO₂, oxigênio e falta de manutenção adequada, criou as condições eletrolíticas necessárias para o processo corrosivo dessas armações.

Destaca-se ainda que a falta da cultura de manutenção pela nossa sociedade, da falta de vontade política dos nossos governantes na alocação de recursos em obras que não dão resultados eleitoreiros, da falta de conhecimento especializado da Engenharia Civil e de instrumentação adequada no Estado à uma inspeção pericial imperiosa, continua até hoje potencializando dúvidas sobre os riscos reais nas demais estruturas protendidas existentes. Destarte, a Engenharia Civil da época, nas suas normas técnicas, pouco enfatizava, como hoje, os parâmetros de durabilidade requeridos para estruturas em ambientes agressivos. O projeto estrutural foi absolutamente primoroso, com desempenho pleno nos seus trinta (30) anos que se passaram para um único módulo ruir diante dos agentes externos agressivos e ausência de manutenção. Ainda hoje, a Engenharia Civil Diagnóstica tem pouca expertise nas avaliações dos riscos de corrosão presentes em estruturas protendidas.

Quando se utilizam tensores aderentes, a inspeção competente é imperiosa face os riscos de corrosão dessas armaduras tensionadas cujos sinais sintomáticos não são visíveis ao olho nu. Detectando-se múltiplas fissuras e não sendo evidente que um cabo esteja comprometido, situação muito pouco frequente, convém extrair-se amostras e realizar ensaios especializados com o foco de corrosão sob tensão. O prudente é realizar ensaios não destrutivos com a frequência recomendada pela experiência pericial. Foto 8 e Fig. 9 ilustram corrosão nos cabos aderentes.



FOTO 8 – Cabos de protensão corroídos

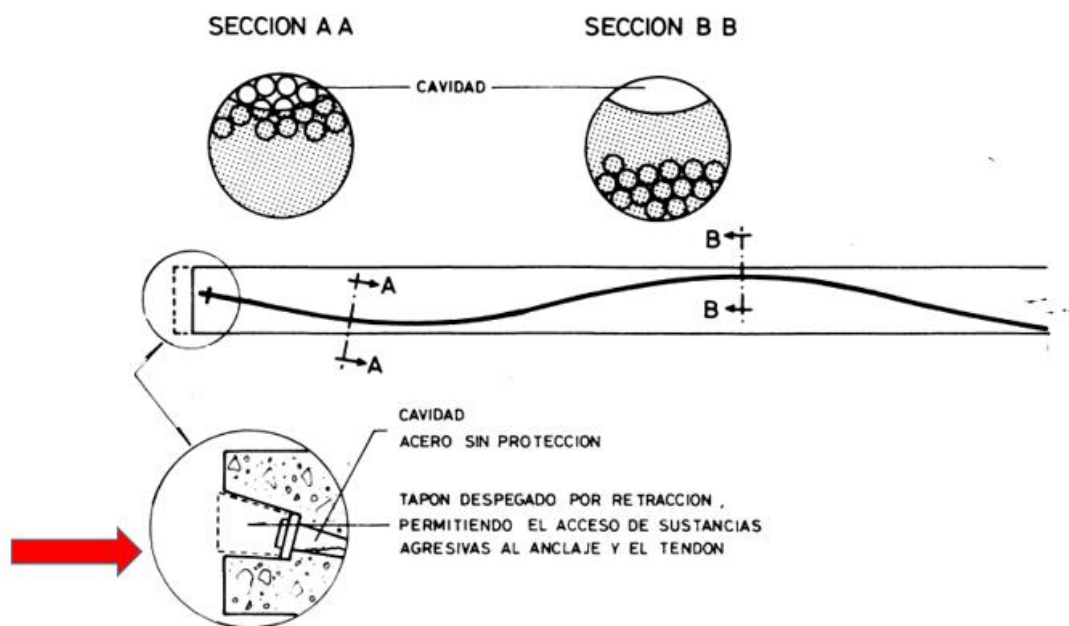


Fig. 9. Possibilidade de penetração de agentes agressivos nas ancoragens da protensão

A **FOTO 9** seguinte destaca as ancoragens de uma fundação em radier para um edifício com seis pavimentos em alvenaria estrutural do programa social Minha Casa, Minha Vida, no município de São Cristóvão, Bairro Rosa Elze, Sergipe. Observou-se um pouco de desleixo com essas ancoragens realizadas face exposição direta às ações de águas de chuvas salinas e outros agentes agressivos presentes, já durante o processo construtivo. Além dos cuidados para se evitar esse tipo de exposição potencialmente danoso, também se deve ter cuidados no processo de grauteamento dessas ancoragens face retração das argamassas grauteadas com a formação de caminhos para a penetração de agentes agressivos, conforme ilustrado na Fig. 9 anterior.



FOTO 9. Exposição agressiva desnecessária dos cabos protendidos nas ancoragens de uma fundação em radier protendido.

Dois técnicas ilustrados na **FOTO 10** são usadas na avaliação da probabilidade de corrosão dos cabos protendidos engraxados ou dentro de bainhas, porém, por razões

de desconhecimento da Engenharia Civil e dos seus custos, são muito pouco utilizadas.

RESSONÂNCIA MAGNÉTICA



TOMOGRAFIA (gamagrafia)

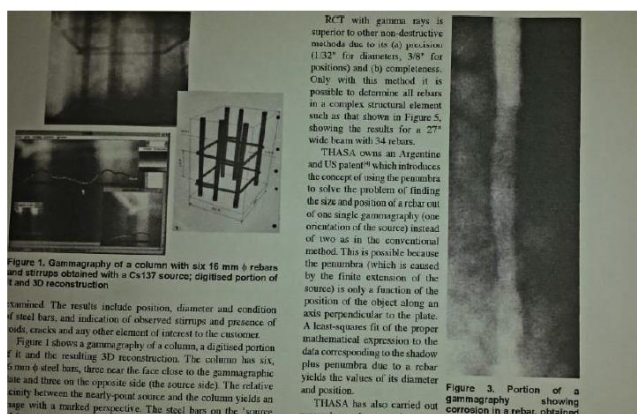


FOTO 10. Ensaios não destrutivos para avaliação dos riscos de corrosão em cabos protendidos.

Outro exemplo recente, 19 de agosto de 2018, foi o desabamento da PONTE MORANDI em GÊNVOA na Itália, **Foto 11.**

DESABAMENTO DE PONTE NA ITÁLIA TEM MORTOS E FERIDOS



Trecho de 200 metros caiu na cidade italiana de Gênova; rodovia passa por áreas movimentadas de zona industrial Foto: REUTERS TV / REUTERS

1 de 7 < >

FOTO 11 (a)

DESABAMENTO DE PONTE NA ITÁLIA TEM MORTOS E FERIDOS



Ponte Morani, na cidade Italiana de Gênova, desabou parcialmente de altura de 100 metros; carros que cruzavam trecho caíram Foto: STRINGER / REUTERS

FOTO 11 (b)



Trecho da Ponte Morandi, em Gênova, desmoronou - PIERO CRUCIATTI / AFP

FOTO 11. (c)

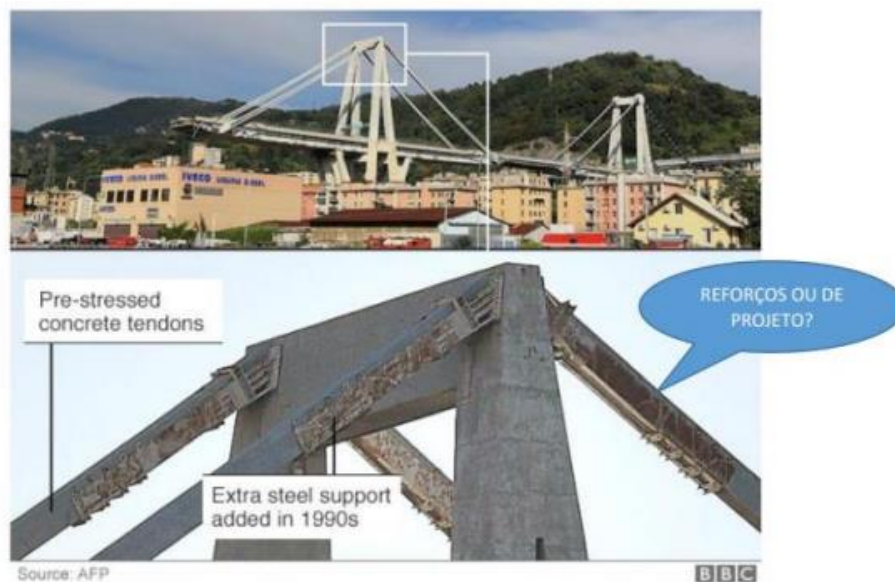
DESABAMENTO DE PONTE NA ITÁLIA TEM MORTOS E FERIDOS



Pedaço da ponte Morandi, em Gênova, após queda; construção dos anos 1960 passava por trabalho de manutenção no momento do acidente Foto: REUTERS IV / REUTERS

FOTO 11. PONTE MORANDI, GÊNOVA/ITÁLIA, agosto 2018 (d)

A estrutura de sustentação dos tabuleiros eram tirantes de concreto protendido conforme divulgado na mídia. Reforços nesses tirantes foram executados em 1990 conforme **Foto 12**.



Obras de recuperação realizadas em 2016.

Foto 12. Adicionados reforços nas junções dos tirantes.

Em face das declarações de professores e técnicos de manutenção à imprensa e do ambiente agressivo de cloretos, CO₂ e sulfatos devido usinas nas vizinhanças deve ter ocorrido rompimento em algum dos tirantes provocando o colapso. A Foto 13 mostra o que restou do sistema de engastes dos tirantes no trecho desabado.



Trecho da Ponte Morandi, em Gênova, desmoronou - PIERO CRUCIATTI / AFP

FOTO 13. Visão do que sobrou da estrutura de suporte dos tirantes e tabuleiros.

A **FOTO 14** ilustra em vermelho o trecho da Ponte Morandi que colapsou salientando a estrutura de apoio dos tirantes da **FOTO 13**.

QUEDA DE 45 METROS

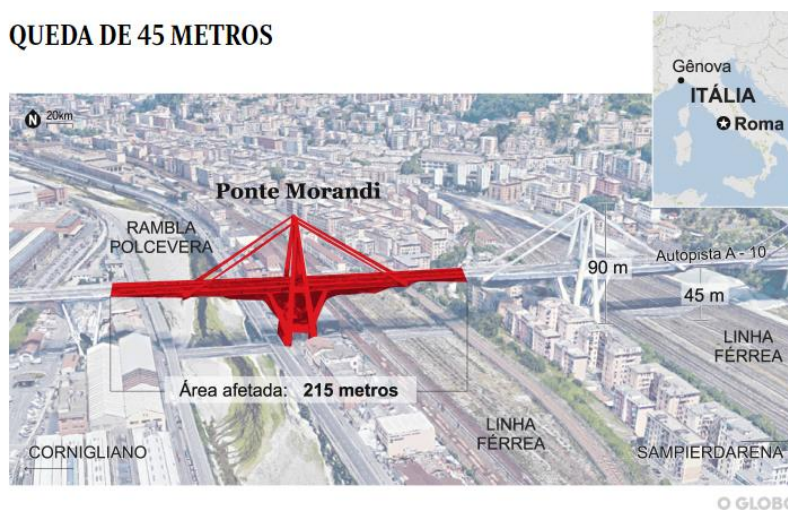


FOTO 14. Ilustração em vermelho do trecho que desabou. (a)

DESABAMENTO DE PONTE NA ITÁLIA TEM MORTOS E FERIDOS



Parte vermelha na imagem representa trecho da ponte que desmoronou Foto: Reprodução

FOTO 14. Foto em vermelho do trecho que caiu. (b)

De acordo com Rossi, então senador, em 2016 as juntas da ponte, construída na década de 1960, estavam cedendo. O fato gerou preocupação nas autoridades, já que o viaduto interliga importantes vias da região e seu fechamento, mesmo que apenas para veículos pesados, seria de grande impacto para o transporte rodoviário da Liguria.

"Recentemente, a ponte foi objeto de um colapso preocupante das juntas, que exigiram um extraordinário trabalho de manutenção sem o qual o risco de fechamento é concreto. Se é verdade que a ponte Morandi, dadas as críticas condições atuais, poderia ser fechada, pelo menos para o tráfego pesado, dentro de alguns anos jogaria a cidade em caos total", escreveu o senador à época.

A rodovia onde ocorreu o desabamento, de 50 metros de altura e mais de 1 quilômetro de comprimento, passou por reformas em 2016. No mesmo ano, o professor Antonio Brencich, da Faculdade de Engenharia da Universidade de Gênova, ressaltara que havia falhas de engenharia na ponte, em entrevista à emissora "Primocanale".

"Mais cedo ou mais tarde, terá que ser substituída. Eu não sei quando. Mas haverá um tempo em que o custo de manutenção será maior do que o de substituição", disse na época.

1.6 Tipos de Corrosão em Armaduras de Aço Carbono em concretos

A corrosão por pites é uma característica da ação dos cloretos podendo também acontecer nas armaduras tensionadas. Esse tipo de corrosão provoca uma redução do diâmetro antes de se espalhar generalizadamente. É uma espécie de "faca" cortando a armadura. O tipo de corrosão causada pela ação do CO₂ do ar atmosférico denominada "carbonatação" é espalhada superficialmente reduzindo também o diâmetro de forma mais lenta.

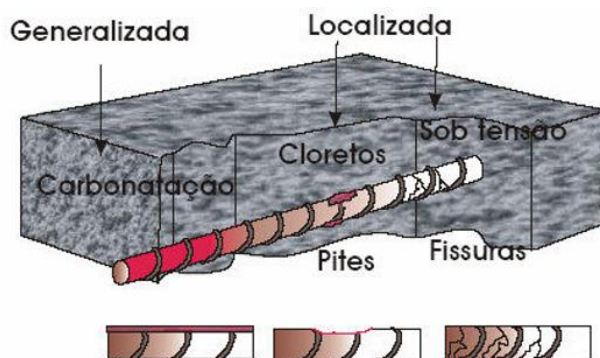


Fig. 10. Tipos de corrosão em armadura de aço carbono comum usado em concreto



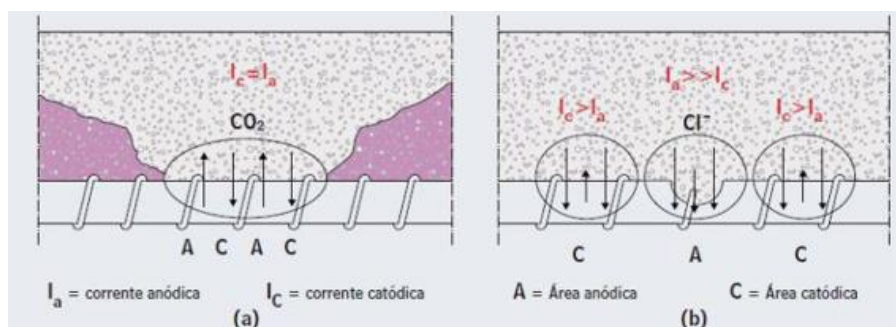
FOTO 11. Armaduras de aço carbono comum corroídas por pites devido ação dos cloretos

A corrosão desencadeada pela carbonatação do concreto resulta usualmente na formação de uma microcélula de corrosão. Nesse tipo de célula, a área anódica (A) e a área catódica (C) da Fig. 11 seguinte são imediatamente adjacentes e em distâncias microscópicas (da ordem de micrômetros) (ANDRADE et al., 2006). Na área A ocorre puramente a reação anódica e na área C, puramente a reação catódica, podendo se alternarem com o avanço da corrosão. A corrosão ocorre de maneira generalizada, estando A e C distribuídas aleatoriamente de maneira dinâmica. A microcélula também é denominada de célula de ação local ou célula de corrosão generalizada.

No caso de corrosão desencadeada por Cl⁻, é usualmente formada uma macrocélula de corrosão. Nesse tipo de célula, a área A está separada da área C em distância macroscópica e ambas são visíveis à vista desarmada, com dimensões em milímetros ou centímetros (ANDRADE et al., 2006). Na área A, há inicialmente uma quebra localizada do filme passivante, com nucleação de pites. Normalmente, há remoção intensa de metal em A, com alta perda de seção da barra de aço, em razão da diferença da relação $A_{\text{área}}/C_{\text{área}}$, especialmente quando $A_{\text{área}}$ é muito pequena (ANDRADE et al., 2006). Dentro do pite ocorre praticamente somente a reação anódica, visto que o acesso de oxigênio é muito restrito. Nas áreas adjacentes aos pites, ocorrem

predominantemente a reação catódica. Com o aumento da concentração de Cl^- , a corrosão se generaliza ao longo da superfície do aço. Isso é devido à propagação gradual dos pites e à nucleação de novos pites, com posterior coalescimento e união em grupos, formando alvéolos de corrosão. **A macrocélula também pode ser denominada de célula de longo alcance e célula de corrosão localizada.**

Embora a formação de macrocélula em concreto seja característica de corrosão por Cl^- , eventualmente pode ocorrer por carbonatação em zona localizada, especialmente em áreas de anomalias, como fissuras. A macrocélula também é usual quando há contato elétrico entre metais dissimilares e impurezas ou tensões no material metálico, todas gerando uma diferença de potencial eletroquímico entre as áreas A e C.



A **figura 11**, adaptada de Cao et al. (2013), apresenta uma microcélula de corrosão decorrente da carbonatação do concreto em zona descontínua (**figura 11a**) e uma macrocélula de corrosão decorrente da contaminação do concreto com íons cloreto (**figura 2b**). Na **figura 11a**, as setas indicam a coexistência de reação anódica (setas saindo do metal) e de reação catódica (setas entrando no metal) e $I_c = I_a$, indicando um fluxo igual de corrente elétrica em A e em C. Na **figura 11b**, há as mesmas setas em cada área, no entanto, o comprimento maior de algumas delas indica a predominância da reação anódica ou da reação catódica. Desse modo, há predominância da corrente elétrica catódica em C ($I_c > I_a$) e, praticamente, somente corrente elétrica anódica em A ($I_a \gg I_c$). Cita-se que, no caso de ser ter uma área anódica muito pequena ou um meio totalmente desauerado, em A ocorrerá somente a reação anódica (ANDRADE et al., 2008).

Para a despassivação dos aços embutidos nos compósitos de concreto armado, os maiores vilões que catalisam esse processo de corrosão são: o CO_2 do ar atmosférico, que reduz o pH alcalino provocando uma corrosão generalizada superficial nas armaduras, bem como os íons cloretos agressivos que atacam o aço despassivando e corroendo por pites a sua seção transversal.

A química da ação dos cloretos ocorre conforme equações ilustradas na **Fig.12** seguinte:

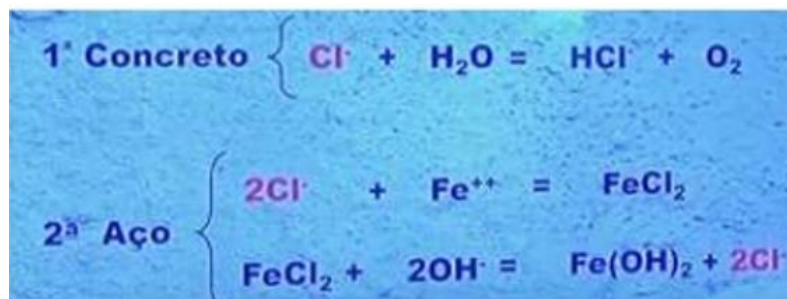


Fig. 12. Química da corrosão por dos aços pelos cloretos

- 2 DESAFIOS PARA PREVER A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.** Fonte: **Resistance of Concrete to Chloride Ingress. Testing and Modelling.** Luping et al. First published 2012 by Spon Press e **Projeto da Durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** Odd E. Gjøv. Oficina de Textos, 2015.

O ingresso de cloretos no concreto envolve processos físicos e químicos complexos. A complexidade vem pelo menos de três fontes:

O ambiente externo não é constante. No meio ambiente marinho, a quantidade de cloretos em contato com o concreto depende se a estrutura está totalmente submersa ou na zona de maré, ou em contato apenas com a névoa marinha, conforme ilustrado na Fig. 7, página 10;

O concreto é composto de diferentes tipos de cimento e ligantes, em diferentes proporções de mistura, e não é um material simples, sendo diferente em diferentes estruturas;

1.Os mecanismos de penetração de cloretos não são confinados para um único processo (tais como a difusão), e podem ser resultantes de combinações de convecção(absorção), química e física ligações (adsorção) e interação dos íons coexistentes. Mudanças de temperatura, chuva e sol introduzem varrições que também devem ser levadas em conta.

Devido ao seu importante papel em relação à durabilidade, muitos métodos e modelos foram propostos para prever a entrada de cloretos no concreto. Métodos de teste ou modelo de previsão tem sido procurados para um acordo geral.

Diversos estudos de métodos e modelos matemáticos para testar a resistência à penetração de cloretos no concreto foram desenvolvidos e normatizados. Entretanto,

face falhas prematuras e discussões em congressos terem indicado que os projetos com tais ferramentas de avaliação não possuíam

A acurácia na relação em laboratório para a sua aplicação no campo, novos projetos surgiram a exemplo do CHLORTEST em meados de 2003/2005, criado pela European Community under the Competitive and Sustainable Growth Programme coordenado pelo Swedish National Testing and Research Institute cujo site pode permitir o Guidelines de forma livre para copiá-lo. O endereço do site é:



CHLORTEST – EU Funded Research Project under 5FP GROWTH Programme

Resistance of concrete to chloride ingress
– From laboratory tests to in-field performance

Guideline for Practical Use of Methods for Testing the Resistance of Concrete to Chloride Ingress

[http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07 Bibliografia/durabilidade%20betao%20%28durability%29/Outros/Guideline%20different%20method%20chloride%20ingress.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/durabilidade%20betao%20%28durability%29/Outros/Guideline%20different%20method%20chloride%20ingress.pdf)

O projeto objetivou o seguinte:

1. avaliar diferentes métodos de teste de desempenho laboratorial em termos de base teórica, viabilidade técnica, precisão de medição, aplicabilidade em projetos práticos de construção e avaliação de qualidade;
2. recomendar dois métodos confiáveis, um método de referência e outro método rápido, para testar a resistência do concreto ao ingresso de cloreto;
3. coletar dados de desempenho no campo sobre a entrada de cloretos e corrosão das armaduras;
4. verificar os testes de desempenho laboratorial com os dados de desempenho coletados no campo usando diferentes modelos, incluindo abordagens científicas, empíricas e probabilísticas;
5. recomendar a utilização prática dos testes de desempenho laboratorial e a interpretação dos resultados dos testes, incluindo uma proposta para critérios de aceitação.

Baseado na evolução dos resultados, o consórcio CHLORTEST propôs os três métodos seguintes para futura normalização a nível europeu:

TESTE DE IMERSÃO (NT BUILD 443) para determinação do estado não estacionário do **COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS D_{nssd}** e conteúdo **TOTAL DE CLORETOS NA SUPERFÍCIE C_s** ;

TESTE DE MIGRAÇÃO RÁPIDA (NT BUILD 492) para determinação do estado não estacionário do **COEFICIENTE DE MIGRAÇÃO D_{nssm}** sob condições normativas de exposição laboratoriais;

TESTE DE RESISTIVIDADE para determinação da **RESISTIVIDADE p** como medida indireta das propriedades de transporte do concreto.

Todos os três métodos tiveram precisão aceitável, isto é, Repetibilidade¹ COV < 30% (11 a 20%) e Reprodutibilidade COV < 30% (24 a 28%). Portanto, são adequados para intercâmbio de dados e aplicações industriais.

¹ **REPETIBILIDADE** - variação das medidas obtidas por um único operador, utilizando o mesmo equipamento de medição e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma única peça (corpo de prova).

² **REPRODUTIBILIDADE** - Variação das médias obtidas por diferentes operadores utilizando o mesmo equipamento de medição para medir repetidamente uma mesma grandeza de uma única peça (corpo de prova).

2.3 Breve descrição dos Métodos de Testes escolhidos pelo CHLORTEST

2.3.1 TESTE DE IMERSÃO (NT BUILD 443)

O método é baseado na natural difusão face um muito alto gradiente de concentração. O teste dá valores de **D_{nssd} (coeficiente de difusão não estado estacionário)** e **C_s (conteúdo total de cloreto na superfície)** pela curva do perfil de cloretos medido para uma solução de erro da segunda lei de Fick. Com os valores de **D_{ns}** e **C_s** , o parâmetro **K_{cr}** , denominado **Parâmetro de Penetração**, pode ser obtido. O teste é relativamente laborioso e demanda um longo tempo (mais ou menos 35 dias).

Corpos de Prova: são três espécimes com diâmetro maior que 75 mm e comprimento maior que 60 mm, com a superfície de corte como superfície de teste e revestidos de epóxi em todas as demais superfícies sem exposição.

Condição preliminar: imersão natural na água de cal saturada até que um peso constante seja atingido.

Testando: imersão dos corpos de prova numa solução de 165 g de NaCl por litro pelo menos 35 dias e medindo o perfil de penetração de cloretos por trituração sucessiva da amostra a partir da superfície exposta, e análise da titulação do teor total de cloreto em cada pó obtido.

Duração do teste: pelo menos 35 dias

Resultado do Teste: perfil de penetração de cloretos e curva ajustada com os parâmetros **Dnssd e Cs** derivando o parâmetro **Kcr**.

Precisão: Repetibilidade média COV 20%, 18% e 9% para os parâmetros Dnssd, Cs e Kcr, respectivamente; Reprodubilidade COV 28%, 22% e 14% para os parâmetro Dnss, Cs e Kcr, respectivamente; de acordo com os resultados finais da avaliação, observando que Kcr é proporcional à raiz quadrada de Dnssd, implica que o desvio de Kcr é, teoricamente, metade do de Dnssd.

a. Interpretação dos Resultados do Teste de Imersão

O teste de imersão fornece valores acoplados de Dnssd e Cs pela curva ajustada de medida da penetração do cloreto através de uma função erro solução da segunda lei de Fick, a qual está sob a hipótese de capacidade constante da ligação do cloreto. Na realidade, a capacidade de ligação do cloreto é não linear dependendo da concentração de cloreto livre e também dependente do tipo de pasta cimentícia. O total de cloretos contido é a soma de cloretos livre nas soluções dos poros com os cloretos ligados nas superfícies dos hidratos. Portanto, o valor de Cs é dependente da porosidade e do tipo do aglutinante. Mesmo sob igual condição de exposição, ou seja, na presença de solução com a mesma concentração de cloretos, diferentes tipos de aglutinantes promoverão valores diferentes de Cs. Como o Dnssd é acoplado ao Cs no ajuste de curva, o valor de Dnssd sozinho pode não refletir a resistência real do concreto ao ingresso de cloreto. Para interpretar corretamente os resultados do teste, ambos os valores de Dnssd e Cs devem ser levados em conta. o parâmetro de penetração Kcr combina influências de Dnssd e Cs e, portanto, facilita melhor a comparação dos resultados. Um exemplo é mostrado na **figura 12** onde Mix A revela um valor menor de Dnssd e um valor maior de Cs que Mix B, mas ambos misturam tem os mesmos valores de Kcr.

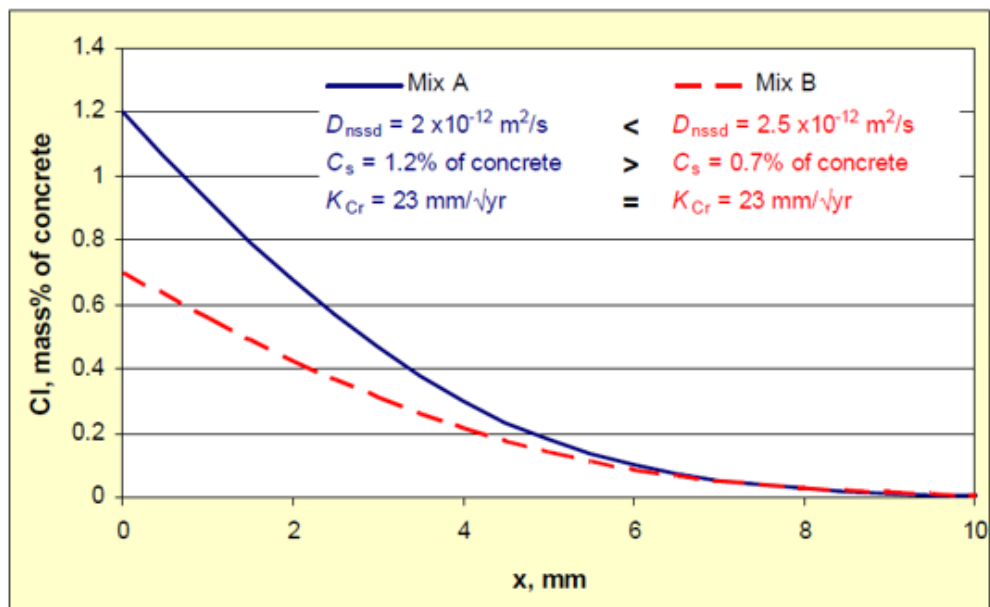


Fig. 12. Perfil de cloretos em duas misturas de concreto.

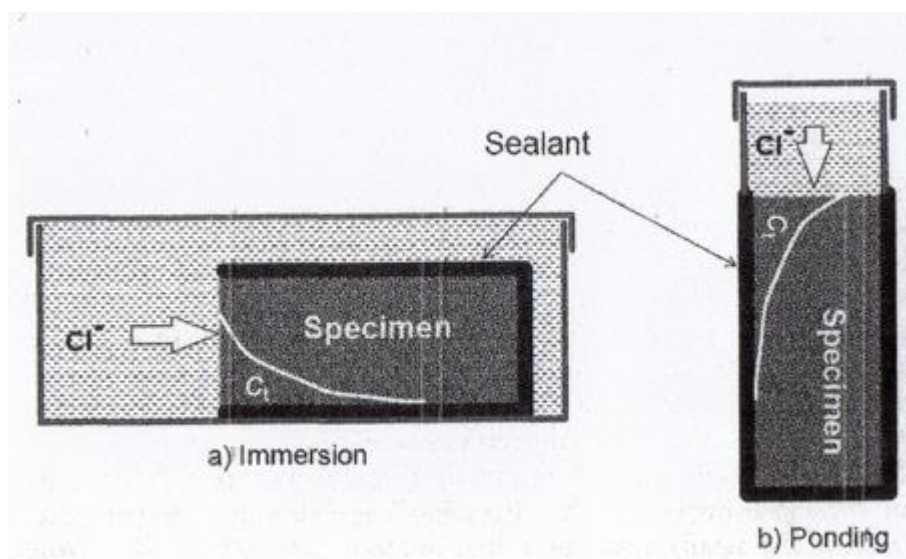


FOTO 12. Corpo de Prova no teste de imersão com apenas uma superfície do topo desprotegida de selantes epoxídicos.

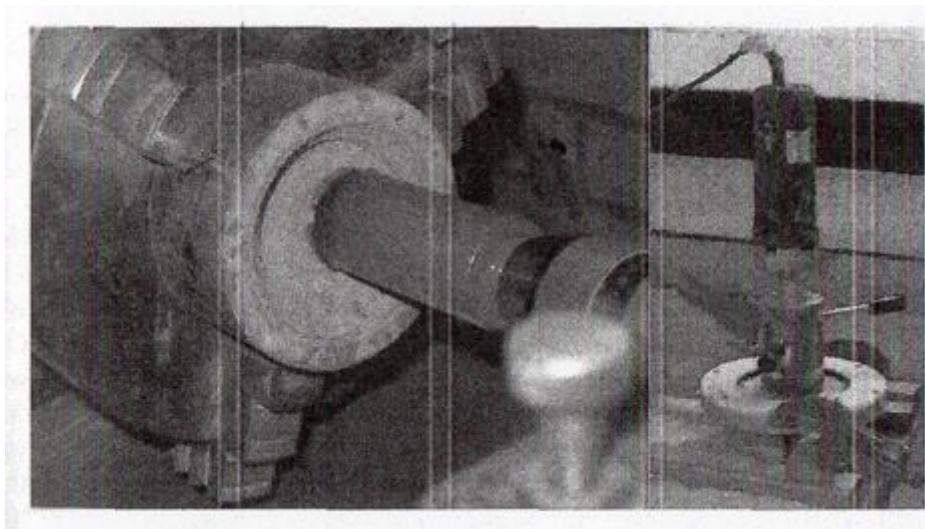


FOTO 13. Exemplo de moagem em um torno mecânico (esquerda) ou uma esmerilhadeira de perfil portátil (direita) para determinar o perfil de cloreto.

b. Expressão dos Resultados

Os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário D_{nssd} e o conteúdo aparente na superfície do concreto C_s , são determinados pela curva de ajuste das medições do perfil de cloretos pela equação (1) de acordo com o princípio dos mínimos quadrados como ilustrado a seguir:

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 D_{nssd} t}} \right) \quad (1)$$

where:

D_{nssd} : apparent non-steady state diffusion coefficient, m^2/s ;

x : average depth where the chloride sample was ground, m;

t : immersion duration, seconds;

$C(x, t)$: chloride content at depth x , mass% of sample;

C_s : apparent surface chloride content, mass% of sample;

C_i : Initial chloride content, mass% of sample;

erf: error function as defined by equation (2).

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (2)$$

O **PARÂMETRO DE PENETRAÇÃO K_{cr}** é calculado usando-se a equação (3), com os valores obtidos de C_s , C_i e D_{nssd} , assumindo $C_r = 0,05\%$ em massa da amostra, a menos que outro valor seja necessário.

Equação (3)

$$K_{Cr} = 2\sqrt{D_{nssd}} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{C_s - C_r}{C_s - C_i}\right)$$

where: erf^{-1} is the inverse of error function.

NOTE K_{Cr} is defined only when $C_s > C_r > C_i$.

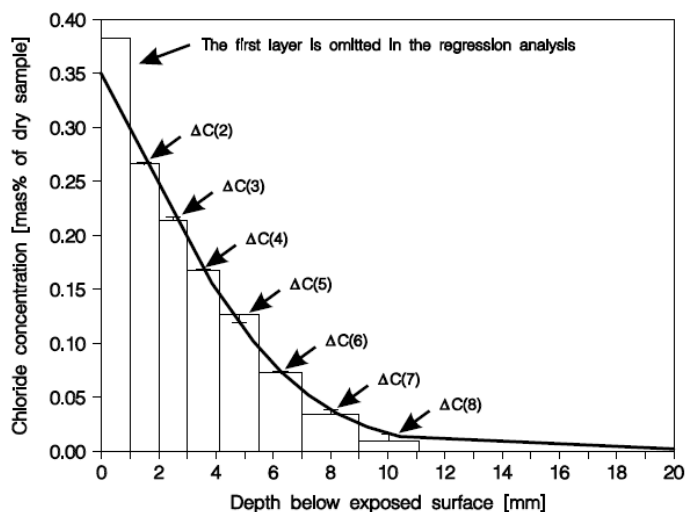


Fig. 13. Exemplo de análise de regressão para ajuste de curva

c. Relatório do Teste deve conter:

- referência a este método padrão;
- origem, tamanho e marcação das espécimes;
- identificação do concreto;
- data da confecção do concreto;
- qualquer desvio do método de teste;
- resultados dos testes incluindo as dimensões da amostra, idade do concreto na exposição, temperaturas de exposição, concentração de cloreto do líquido de exposição, duração da exposição, dados do teor de cloreto versus profundidade, o

-coeficiente de difusão e conteúdo de superfície ajustados pela curva e o parâmetro de penetração calculado.

-qualquer observação ou suspeita de defeitos (rachaduras, grandes poros, corpos estranhos no corpo, etc..

2.1.2 TESTE DE MIGRAÇÃO RÁPIDA DE CLORETOS (RCM)

Princípio do Método RCM - um campo elétrico externo é aplicado axialmente através da amostra e força os íons cloretos a migrarem para dentro da amostra após uma determinada duração do teste. A amostra é dividida axialmente ou cortada a seco e uma solução de nitrato de prata é pulverizada em uma das seções recentemente divididas. A profundidade de penetração de cloreto pode então ser medida a partir da precipitação visível de nitrato de prata, após o que o coeficiente de migração de cloreto pode ser calculado a partir desta profundidade de penetração. O método (**FOTO 14**) é um não estacionário estado teste de migração usando um campo elétrico externo para acelerar a penetração dos íons cloretos. O teste obtém o valor do D_{nssm} (não estado estacionário coeficiente de migração). O teste é relativamente simples e rápido com duração em muitos casos de 24 horas para um concreto de densidade normal, mas é preciso mais tempo para um concreto mais denso.

O teste de migração rápida fornece valores de D_{nssm} que também estão sob a hipótese de capacidade constante de ligação a cloreto durante o teste. Diferentemente do teste de imersão, essa suposição pode ser mais bem mantida no teste de migração rápida, devido ao forte campo elétrico externo e curta duração do teste, ambos os quais tendem a reduzir a quantidade de cloretos ligados, especialmente ligados fisicamente. Portanto, o **parâmetro D_{nssm}** descreve a propriedade do transporte de cloreto sob uma condição de ligação reduzida de cloreto.



FOTO 14 – Método RCM

Espécimes: três espécimes de diâmetro 100 mm e espessura de 50 mm, com a superfície de corte como a superfície de teste.

Pré-condição: saturação a vácuo com água calcária saturada.

Testando: impondo um gradiente de voltagem elétrica que pode variar de 10V a 60V, os íons de cloretos são forçados para dentro do concreto durante um período relativamente curto. Os corpos de prova são montados em suportes de borracha e colocados num recipiente com uma solução de 10% de NaCl. O interior dos suportes de borracha são preenchidos com uma solução de 0,30 N de NaOH. Imediatamente depois de uma exposição acelerada à solução de cloretos, os corpos de prova são divididos em duas metades, nas quais é possível observar a profundidade média da penetração do cloreto por meio de uma técnica colorimétrica. Com base na profundidade observada e nas condições de ensaio adotadas, a difusividade do cloreto é calculada de acordo com o procedimento estabelecido.

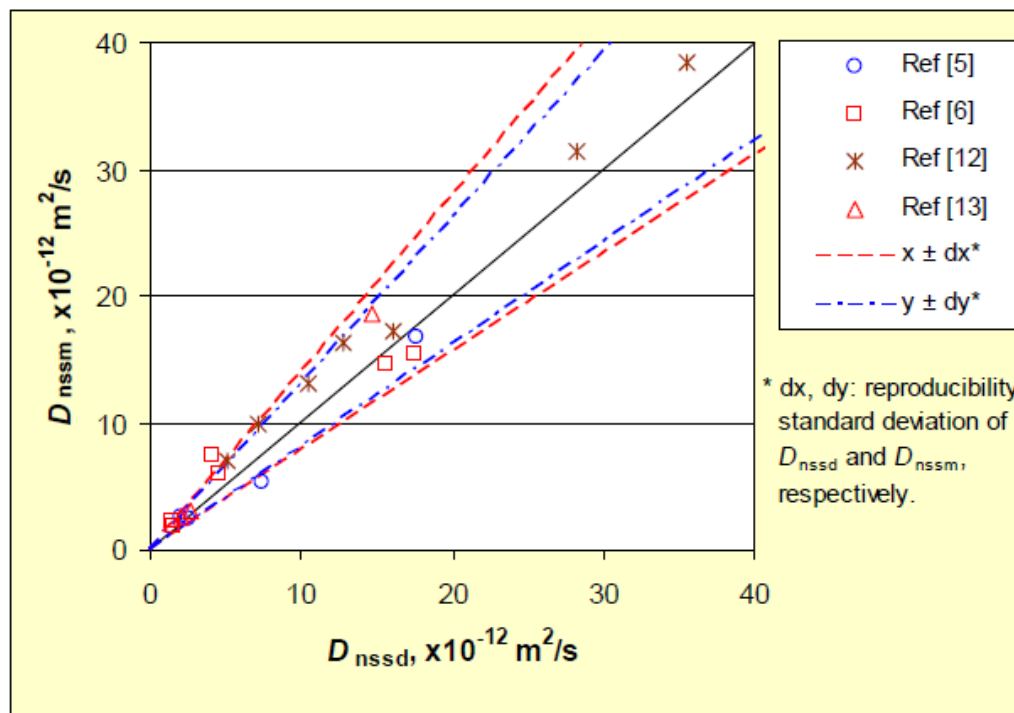


FOTO 15. Profundidade da penetração do cloreto em superfície de concreto cortada após o borrifo da superfície fresca com uma solução padrão de AgNO₃

Resultados dos testes: a difusividade é obtida como um valor médio e um desvio padrão, por meio do teste de três corpos de prova. Dependendo da resistência à penetração do cloreto no concreto em teste, o período do ensaio pode durar alguns dias, incluindo a preparação dos corpos de prova.

Precisão: o coeficiente do estado não estacionário de migração de cloretos **D_{nssm}** tem uma repetibilidade de COV 15% e uma reprodutibilidade de COV 24% de acordo com os resultados finais da avaliação.

Análise de Resultados: desde que **D_{nssm}** e **D_{nssd}** são condições diferentes de testes, seus valores podem não ser necessariamente comparáveis. Entretanto, os resultados experimentais do Projeto CHLORTEST e alguns outros prévios projetos, mostraram **que esses dois coeficientes de difusão são coincidentemente comparáveis conforme mostrado na figura 14**. Considerando as incertezas de medição dos métodos de testes, é razoável concluir que **ambos esses métodos medem os parâmetros de transporte de forma equivalente**.



Note: The values of D_{nssd} were from the exposure for a target of 35 days.

Fig. 14. Correlação entre os valores D_{nssd} e D_{nssm}

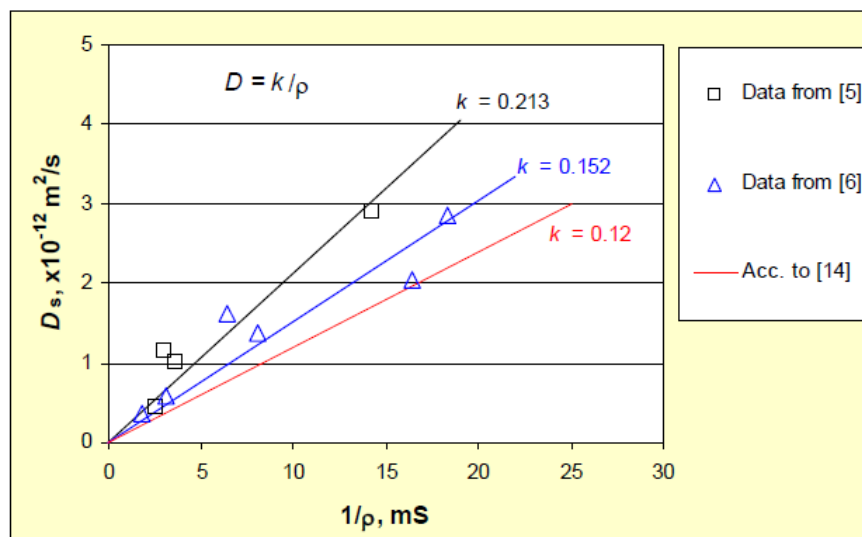
Odd E. Gjrv, na suas publicações sobre Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade, página 152, 6.1.3, assim textualiza: “ quando a resistência do concreto  penetração do cloreto  determinada e caracterizada por um método de ensaio tão acelerado como o descrito (RCM), deve-se ter em mente que os resultados obtidos são muito diferentes daquilo que geralmente ocorre em condições mais normais no campo. A difusividade do cloreto aos 28 dias  apenas um ndice relativo simples que reflete a resistência  penetração do cloreto e às propriedades gerais de durabilidade do concreto, da mesma forma que a resistência  compressão aos 28 dias também é apenas um ndice simples, relativo, refletindo a resistência  compressão e as propriedades mecânicas gerais do concreto.”

Assevera o famoso pesquisador norueguês: “ a difusividade do cloreto aos 28 dias  um parâmetro muito importante para um projeto de durabilidade adequado nas estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. A especificação de uma certa difusividade do cloreto aos 28 dias prov também uma base necessária para o controle e a garantia de qualidade habituais durante a concretagem.

Conclui o pesquisador: “ para refletir melhor as propriedades de durabilidade de um certo concreto – e, portanto, as diferentes resistências  penetração do cloreto em vários tipos de concreto –  preciso acompanhar o desenvolvimento mais completo da difusividade do cloreto a partir do estágio inicial e além dele”. Isto é: a curva do perfil de cloretos.

2.1.3 TESTE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O teste de resistividade elétrica é uma medida indireta das propriedades de transporte do concreto, porque a resistência elétrica do concreto é relacionada com os poros estruturais e a força iônica na solução dos poros. Teoricamente, a resistividade é inversamente proporcional à difusividade. Praticamente, no entanto, a resistividade medida é contribuída por todos os íons, especialmente hidróxidos na solução de poros. Um concreto com o aglutinante contendo alto teor alcalino resultará em uma baixa resistividade, enquanto um concreto com adições pozolânicas contendo baixo teor de álcalis freqüentemente resultará em alta resistividade. Para converter a resistividade em coeficiente de difusão de cloreto, o número de transferência de cloretos (a razão da intensidade de íons de cloro sobre o total de íons) na solução dos poros deve ser conhecido. Não é uma tarefa fácil estimar a intensidade de íons totais na solução de poros. Portanto, o teste de resistividade só pode ser tomado como uma medida indireta da propriedade de transporte de cloretos. Devido à sua rapidez e simplicidade, esse teste é uma ferramenta muito eficiente para o controle de qualidade na produção real de concreto. A calibração é necessária para estabelecer as relações empíricas entre a resistividade e o coeficiente de difusão de cloreto, como na **figura 15** abaixo.



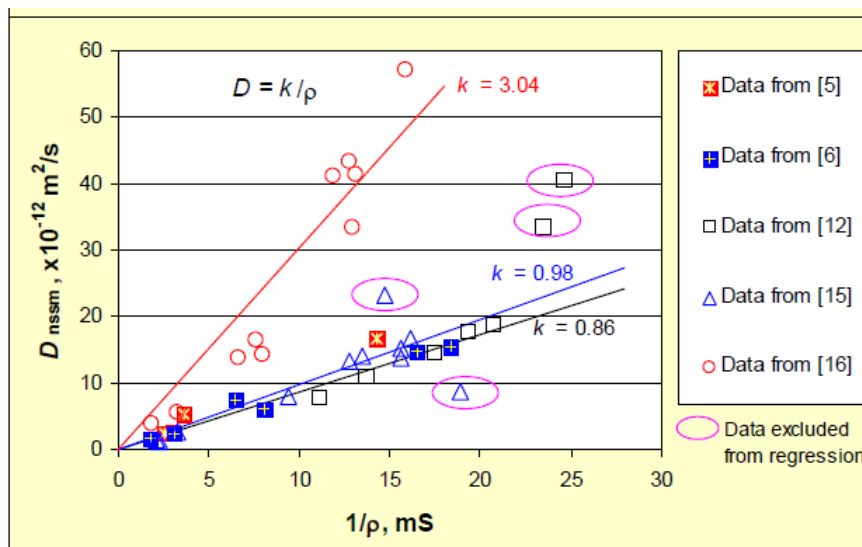


Fig. 15. Exemplo da relação empírica entre resistividade e difusividade

Espécimes: três amostras com diâmetro de 100 mm e espessura de 50 mm, com a superfície de corte como a superfície de teste.

Pré-condições: saturação a vácuo com água destilada ou desmineralizada.

Duração do teste: poucos minutos.

Resultado do teste: resistividade ρ .

Testando: impondo uma corrente alternada constante através do corpo de prova e medindo a resistência ôhmica do concreto. Como as condições de umidade e temperatura são fatores muito importantes, que afetam a resistividade elétrica do concreto, todas as medidas devem ser tomadas sob condições controladas em laboratório. Imediatamente antes do teste, toda água livre na superfície do concreto deve ser retirada cuidadosamente. Também é importante garantir uma boa conexão elétrica entre eletrodos e a superfície do concreto. Para evitar qualquer perda de corrente durante as medições, os corpos de prova devem ser colocados numa placa de base seca e isolada eletricamente. Não se deve tocar o corpo de prova com a mão.

O método dos quatro eletrodos chamado Wenner (**FOTO 16**) é bastante usado, mas existe também o de dois eletrodos.

Indirect control of the 28-day diffusivity based on the 4-electrode method

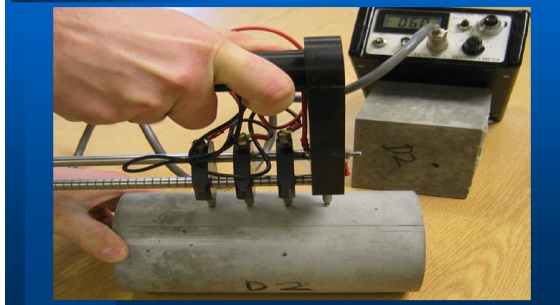


FOTO 16. Método Wenner

O método de quatro eletrodos (Wenner), as medidas são baseadas na passagem da corrente elétrica alternada de baixa frequência pelo concreto entre dois eletrodos externos, enquanto a queda de voltagem entre os dois eletrodos internos é observada. A resistividade elétrica do concreto (ρ) é obtida pela equação:

$$P = 2\pi \cdot a \cdot V/I$$

Em que (a) é o espaçamento entre os eletrodos, V é a queda de voltagem e I é a corrente.

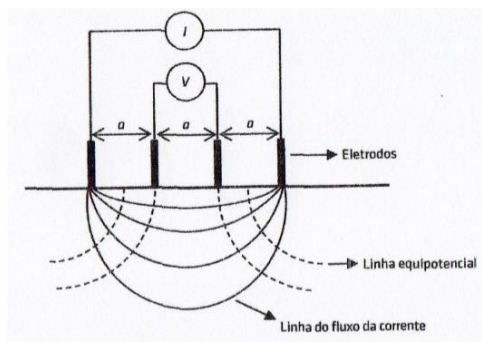


Fig. 16. O método dos quatro eletrodos (método Wenner) para medir a resistividade elétrica do concreto

Precisão: média da repetibilidade COV de 11% e reprodutibilidade COV de 25%.

A norma americana AASHTO TP 95-14 (Standard method of test for surfasse resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration) apresenta uma correlação qualitativa entre a penetração de íons cloretos e a resistividade elétrica conforme Tabela a seguir:

TABELA 1. CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A INTENSIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO (AASHTO TP 95-14)

RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (K Ω .cm)	INTENSIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS
< 12	Forte
12 a 21	Moderada
21 a 37	Fraca
37 a 254	Muito Fraca
>254	Desprezível

ANDRADE apud SANTOS, sugeriu valores mínimos de resistividade em função da agressividade do ambiente. A Tabela 2 a seguir mostra os valores.

TABELA 2. VALORES MÍNIMOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA REQUERIDOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE ATAQUE E DA CLASSE DE EXPOSIÇÃO DAS ESTRUTURAS

Tipo de Ataque	CARBONATAÇÃO		AÇÃO DOS CLORETOS		
	Estrutura interna ou protegida da chuva	Estrutura externa não saturada	Estrutura exposta à atmosfera	Estrutura submersa	Estrutura na região de maré
Resistividade mínima requerida (k Ω .cm)	1	5	10	15	20

O efeito dos íons na diminuição da resistividade do concreto também está relacionado com as propriedades higroscópicas desses íons, que aumentam, por isso, a possibilidade de retenção de água no interior dos poros. Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto, Elsevier, 2ª ed.

SANTOS, cita alguns dos fatores que influenciam a resistividade do concreto como as **características do concreto**: relação a/c, tipo e quantidade de agregados, consumo de cimento, presença de adições e aditivos químicos, além do grau de hidratação; as **características ambientais**: temperatura e umidade relativa e a **ação de agentes agressivos** (penetração de cloretos e carbonatação).

2.2 ENSAIOS LABORATORIAIS PARA AVALIAR A QUALIDADE E QUANTIDADE DO COBRIMENTO DAS ARMADURAS VISANDO A RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DOS AGENTES AGRESSIVOS INCLUSIVE CLORETOS

Para avalia-se a qualidade e quantidade do cobrimento das armaduras dos concretos visando promover a Resistência à Penetração de Agentes Agressivos, ensaios laboratoriais são usados para determinar-se indicadores mais adequados nesses objetivos, tais como: permeabilidade à água, permeabilidade aos gases, por exemplo, ao oxigênio, ensaios de porosidade, ensaios de absorção, ensaios de difusividade cloretos, etc. Alguns desses ensaios são ilustrados a seguir.

2.2.1 ENSAIOS DE PACOMETRIA

O pacômetro, **FOTO 17**, é usado na localização de armaduras dentro dos concretos, seus cobrimentos além de poder inferir um diâmetro aproximado. Mede-se o campo magnético determinado pela presença de materiais ferrosos próximos à superfície do concreto investigado. Esse aparelho localiza um cobrimento de até 150 mm distante da superfície.



FOTO 17. PACÔMETRO DA PROCEQ DENOMINADO PROFOSCOPE

2.2.2 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE À ÁGUA

A NBR 10786/89 – CONCRETO ENDURECIDO – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE À ÁGUA estabelece todos os critérios para a realização do ensaio. Prescreve o método para concreto endurecido através de

percolação de água sob pressão. O aparelho forçar a água através do corpo de prova e mede a velocidade de percolação a uma determinada pressão que pode ser facilmente controlada e regulada.

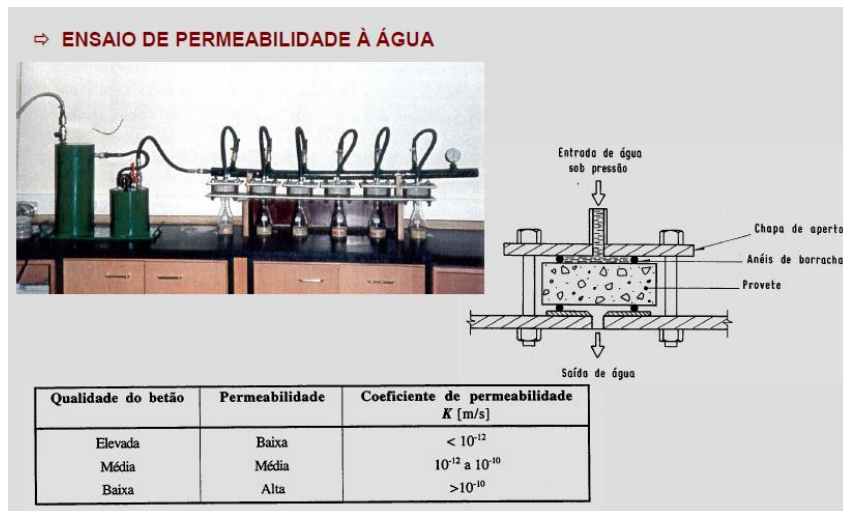


Foto 18

2.2.3 ENSAIO DE POROSIDADE



Foto 19

3 APLICAÇÕES DE MÉTODOS DE TESTES NO CAMPO (IN SITU)

3.1 SENSORES

Para novas estruturas o ingresso dos íons cloretos no concreto pode ser monitorado através de **SENSORES** embutidos durante a construção. O risco de corrosão é avaliado por meio da verificação periódica do estado da armadura e das alterações nas propriedades do concreto.

Há diferentes tipos de **SENSORES** de aquisição contínua de dados. Um dos mais conhecidos é o **SENSOR GALVÂNICO**, composto por um conjunto de barras de aço-carbono, eletricamente isoladas. Com o embutimento do **SENSOR**, essas barras ficam posicionadas em diferentes e conhecidas profundidades do concreto de cobertura da armadura. O risco de corrosão da armadura é monitorado com a periódica medição da corrente galvânica em cada uma das barras do sensor.

Além do **SENSOR GALVÂNICO**, destacam-se o **SENSOR DE UMIDADE** e o de **TAXA DE CORROSÃO**, que monitoram parâmetros importantes que estão relacionados ao estabelecimento e evolução de processo corrosivo das armaduras. O **SENSOR DE FIBRA ÓPTICA** apresenta vantagens em relação aos demais mencionados embora ainda seja de uso restrito. Isso é devido a necessidade de mais estudos para o seu uso efetivo em campo no monitoramento do risco de corrosão.

OBSERVAÇÕES SALIENTADAS

A área mais crítica da estrutura de concreto exposta à ação da água do mar é aquela compreendida entre os níveis acima da maré baixa e abaixo da maré alta, pois nela são verificados tanto ataque químico como físico, simultaneamente. O ataque físico nessa região se dá pela evaporação da água, provocando a cristalização nos poros dos sais dissolvidos na água do mar. Junto à ação expansiva devido à cristalização pode-se acrescentar o movimento das ondas que favorece o desgaste por erosão do concreto danificado.

A velocidade de corrosão em atmosfera marinho pode ser da ordem de 30 a 40 vezes maior à que ocorre em atmosfera rural (pura), dependendo, entre outros fatores, da proximidade que a estrutura de concreto se encontra da água do mar.

O pH da água do mar pode variar entre 7,5 e 8,4; valor médio de equilíbrio com o CO₂ atmosférico é de 8,2. Entretanto, dependendo da região e sob certas condições atmosferas marítimas com aglomerações urbanas, industriais e eventuais fontes isoladas,

como baías e estuários protegidos, podem apresentar altas concentrações de CO_2 dissolvido e outros gases nocivos, tornando a água do mar ainda mais agressiva ao concreto (com valores de pH abaixo de 7,5).

Em linhas gerais, HELENE classifica quanto à agressividade ambiental considerando interações do macroclima, ligadas aos tipos de atmosfera em que se localiza a estrutura de concreto. Essas atmosferas podem ser: rural, urbana, marinha, industrial e viciada, como descritas a seguir:

O Prof. PhD Paulo Helene classifica quanto à agressividade ambiental considerando interações do macroclima na forma didática a seguir:

ATMOSFERA RURAL: consideram-se as regiões ao ar livre, distantes das fontes poluidoras de ar, e se caracterizam por baixo teor de poluentes (atmosfera pura). Apresenta-se fraca à ação agressiva das armaduras, sendo que o processo de redução da proteção química proporcionada pelo cobrimento do concreto é lento, devido à sua alta alcalinidade. Os teores, de SO_2 , H_2S , NO_x ($NO + NO_2$) e NH_3 (gases); SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3 e NH_4^+ (sólidos) são desprezíveis, bem como o teor de CO_2 presente no ar é menor do que em outras regiões (ao menos que haja uma fonte natural localizada como, por exemplo, esterco e estrume que liberam NH_3 e SO_2 na sua fermentação, ou rios e lagos poluídos que liberam H_2S).

ATMOSFERA URBANA: consideram-se as regiões ao ar livre, dentro de centros populacionais maiores. As atmosferas de cidades contêm, normalmente, impurezas em forma de óxidos de enxofre SO_2 , fuligem ácida e outros agentes agressivos, tais como CO_2 , NO_x , H_2S , SO_4^{2-} , etc. Além disso, a umidade do ar é um dos fatores mais importantes que afetam a velocidade de corrosão atmosférica. A umidade relativa de 75% (podendo variar entre 65% e 85%, a $25^{\circ}C$) é considerada crítica, acima da qual o metal começa a corroer-se de maneira apreciável, dependendo ainda da presença de contaminantes.

ATMOSFERA MARINHA: consideram-se regiões ao ar livre, sobre o mar e perto da costa. Esta atmosfera pode conter, em maiores proporções, cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}), que são extremamente agressivos para uma estrutura de concreto. Esses agentes contribuem para a aceleração do processo de corrosão das armaduras, mesmo quando em pequenas proporções. Os teores de gases agressivos, por sua vez, dependem das indústrias locais, da concentração urbana e de fontes isoladas.

ATMOSFERA INDUSTRIAL: consideram-se regiões ao ar livre em locais industriais contaminados por gases e cinzas, sendo os mais frequentes e agressivos H_2S , SO_2 e NO_x . Atmosferas industriais podem acelerar 60 a 80 vezes mais o processo corrosivo, em comparação a situações equivalentes em atmosfera rural. A umidade

relativa do ar também deve ser considerada em conjunto na ação danosa dessas atmosferas.

ATMOSFERA VICIADA: consideram-se regiões em locais fechados com baixa taxa de renovação de ar. Nesses locais pode haver uma intensificação da concentração e até geração de gases agressivos às armaduras de concreto. Exemplos comuns de agentes agressores encontrados neste tipo de atmosfera são ácido sulfúrico (gerado em coletores e interceptores de esgoto), sulfatos (SO_4^{2-}) e gás sulfídrico (H_2S).

Os Professores FERNANDO DO COUTO ROSA ALMEIDA E ALMIR SALES afirmam que, em geral, as ações do meio ambiente podem ser devidas a agentes químicos, físicos e biológicos.

Os agentes químicos, normalmente, envolvem interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente presentes nas diferentes atmosferas e os constituintes da pasta de cimento.

Os agentes físicos, podem levar à fissuração do concreto pela cristalização dos sais nos poros, ao carregamento estrutura e à exposição a temperaturas extremas (congelamento e fogo), ou mesmo levar ao desgaste ao desgaste superficial ou à perda de massa devido a abrasão e erosão.

Os agentes biológicos, são responsáveis pela biodeterioração das estruturas de concreto, os quais podem ser microrganismos, como bactérias e fungos, ou macrorganismos, como cupins roedores, etc.

Na prática, os diversos processos químicos, físicos, mecânicos e biológicos contribuem, simultaneamente, na deterioração dos elementos estruturais e podem até somatizar seus efeitos sobre o concreto e armaduras.

AÇÃO DOS SAIS À BASE DE CLORETO

Fonte: Corrosão e Degradação em Estrutura de Concreto pág. 102, capítulo 5, Fernando do Couto e Almir Sales

A presença do íon cloreto em estrutura de concreto é uma das principais causas da corrosão das armaduras, pois esse íon age tanto na fase de iniciação, com o rompimento pontual do filme passivador, como na aceleração da propagação do processo corrosivo.

MESMO EM CONDIÇÕES DE pH EXTREMAMENTE ELEVADO, OS ÍONS CLORETOS SÃO CAPAZES DE DESPASSIVAR A ARMADURA.

No concreto, o cloreto pode se apresentar de três formas: quimicamente, ligado ao aluminato tricálcico (C3A), formando cloroaluminato de cálcio (C3ACaCl₂.10H₂O); adsorvido fisicamente na superfície dos poros e sob a forma de íons livres na solução contida nos poros. Esses cloretos livres são os que , efetivamente, potencializam o processo corrosivo.

A QUEBRA DA PELÍCULA PASSIVADORA PODE SER EXPLICADA POR DIVERSAS TEORIAS APRESENTADAS POR DIVERSOS AUTORES, COMO A TEORIA DO FILME DE ÓXIDO, A TEORIA DA ADSORÇÃO, A TEORIA DO COMPLEXO TRANSITÓRIO, PORÉM, NÃO EXISTE NEHUMA EFETIVAENTE CONSOLIDADA.

MEHTA e MONTEIRO afirmaram que, quando a relação molar Cl-/OH é mais alta que 0,6, o aço perde a proteção contra a corrosão. Isso porque o filme de óxido de ferro se torna permeável ou instável sob essas condições, dado que o balanço entre a alcalinidade (verificada pela atividade do íon OH-) e a acidez (verificada pela atividade do íon Cl-) é responsável pela manutenção da capa passivadora do aço. Além disso, em altos teores de cloretos, o concreto tende a reter mais umidade, aumentando o risco de corrosão pela diminuição de sua resistividade elétrica.

PEQUENOS TEORES CONCENTRADOS PODEM SER MAIS PERIGOSOS DO QUE ALTOS TEORES DISTRIBUÍDOS DE MODO HOMOGÊNEO E UNIFORME.

AÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

A reação de alcalinidade pela ação do CO₂, em presença de umidade, pode ser representada pela equação



O CO₂ penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o composto chamado ÁCIDO CARBÔNICO (H₂CO₃). Esse ácido reage com alguns componentes da pasta de cimento hidratada e resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO₃). O composto que reage com o H₂CO₃ é o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂ ou CH]. O carbonato de cálcio não deteriora o concreto, porém, durante a sua formação, consome os álcalis da pasta (CH e C-S-H) e reduz o pH.

O teor de CO₂ depende das condições locais como vegetação, concentração de veículos, poluição do ar devido a combustão em grandes cidades, entre outros fatores, entre outros fatores, sendo que a concentração média de CO₂ pode variar de 0,03 a 1,0%.

ATAQUE ÁCIDO

Outras soluções ácidas , em presença de umidade, causam redução da alcalinidade do concreto provocando efeitos similares.

Podem ser encontradas em águas contaminadas com dejetos industriais, ou até mesmo na própria atmosfera industrial que contém os gases nocivos ao concreto em presença de umidade.

Em ambientes da indústria química: ácido clorídrico, sulfúrico ou nítrico que podem estar em efluentes dessas indústrias; em indústrias de produtos alimentícios encontram-se ácido láctico, acético ou fórmico; soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia que podem ser comumente encontradas na indústria de fertilizantes e na agricultura; ácido carbônico que está presente em refrigerantes e águas naturais com alta concentração de CO₂, e na atmosfera industrial proveniente da queima de combustíveis.

Os teores de SO₂ (que pode oxidar-se e gerar o H₂SO₄) em centros urbanos, como SP, podem variar entre 0,1 a 1,0 ppm e são originados pela queima de combustíveis contendo enxofre (óleo combustível).

Outra forma de ataque ácido ocorre quando o concreto está em contato com águas residuais (por exemplo, no caso das redes de esgoto ou das estruturas de instalações para tratamento de água). Quando se criam condições anaeróbicas no líquido, a presença de bactérias sulfato-redutoras pode reduzir os sulfatos (SO₄²⁻ existentes na água, a sulfeto de hidrogênio (H₂S). Este, por sua vez, é liberado sob forma gasosa no interior da estrutura e, à medida que atinge zonas aeradas, pode oxidar-se a ácido sulfúrico (H₂SO₄) devido as bactérias aeróbicas que vivem na superfície do concreto, acima do nível da água. O ácido sulfúrico, geralmente produzido na região superior interna das galerias de esgoto, pode atacar severamente o concreto, levando à formação de gesso e causando a perda de massa e conseqüente redução da espessura do elemento concreto da ordem de milímetros por ano.

ATAQUE POR SULFATOS

Os íons sulfatos presentes em águas e solos contaminados, podem penetrar no concreto e reagir com componentes da matriz de cimento, gerando produtos expansivos. A decomposição de matéria orgânica em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubulação de esgoto podem levar a formação de gás sulfídrico (H₂S) que se transforma em ácido sulfúrico pela ação das bactérias.

HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA DE CIMENTO

As chamadas “água pura”, proveniente da condensação da neblina ou do vapor de água, e “água mole”, derivada da chuva ou da neve e do gelo derretidos, contêm pouco ou nenhum íon de cálcio e magnésio. Quando essas águas entram em contato com a pasta de cimento tendem a hidrolisar ou dissolver os compostos à base de cálcio. O hidróxido de cálcio é um dos constituintes da pasta de cimento com maior susceptibilidade à hidrólise devido à sua solubilidade relativamente alta na água pura.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, Adriana. Pesquisadora do Laboratório de Corrosão (LCP) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)/SP.

Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete: theoretical background and practical consequences. RAUPACH, M. Construction and Building, v.10, 1996.

Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair. ZHANG, J.; MAILVAGANAM, N. P. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 33, 2006.

Corrosion of reinforcing bars in concrete. HANSSON, C.M.; POURSAEE, A. JAFFER, S.J. The masterbuilder, v.106, 2012.

Corrosion of steel in concrete. Tuutti, K. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, POLDER, P. R.B.; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004

Corrosion of steel reinforcement in concrete adjacent to surface repairs. BARKEY, D.P. ACI Materials Journal, v.101, 2004

Electrochemical behavior of mild steel in concrete: influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. HUET, B. et al. In: Electrochimica Acta, v.51, 2005

Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide. ANDRADE, C.; GARCÉS, P.; MARTÍNEZ, I. Corrosion Science, v. 50, 20.

Investigation of steel corrosion in cracked concrete: evaluation of macrocell and microcell rates using Tafel polarization response. SUBRAMANIAM, K.V.; BI, M. Corrosion Science, v.52, 2010

Long term study of passive corrosion of steel rebars in Portland mortar in context of nuclear waste disposal. CHOMAT, L.; L’HOSTIS, V.; AMBLARD, E.; BELLOT-GURLET, L. Corrosion Engineering Science and Technology v.49, 2011.

Macrocell and microcell corrosion of steel in OPC and high performance concrete. HANSSON, C.; POURSAEE, A.; LAURANT, A. Cement and Concrete Research,

v.36,2006.

Mechanisms of corrosion of steel in concrete. VERBECK, G.J; American Concrete Institute: SP 49, 1975

Mechanisms of corrosion protection in reinforced concrete marine structures. PAGE, C. L; Nature, v.258, 1975

Non-uniform corrosion states of rebar in concrete under chlorid environment. MUTHULINGAM, S.; RAO, B.N. Corrosion Science, v.93, 2015.

Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete. HORNE, A.T; RICHARDSON, I.G; BRYDSON, R.M.D; Cement and Concrete Research, v.37, 2007

The experimental investigation of concrete carbonation depth. CHANG, C. F; CHEN, J. W; Cement and Concrete Research, v. 36, 2006.

The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements. ANDRADE, C.; MARIBONA, I.R.; FELIU, S.; GONZÁLEZ, J.A.; FELIU S. Corrosion Science v.33, 1992

Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. QIAN, S.; ZHANG, J.; QU, D. Cement and Concrete Composites, v.28, 2006

ANDRADE, C. **Calculation os diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements.** Cement and Concrete Research, v. 23, 1993.

ANDRADE, P.M.C., **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Pini, 1992.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. (1999). **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto.** *Cadernos de Engenharia de Estruturas*. n.8. EESC. Universidade de São Paulo.São Carlos.

CEB – Comitê Euro-Internacional do Beton – Bulletin D’informacion nº 183 – **Durable Concrete Structures** – 1992.

FERREIRA, R. M.. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FREIRE, K.R.R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto.** 192p. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

GJORV, O. E., **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, P.; PACHECO, J.; **Controle da Resistência do Concreto. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int., Mérida – México, 2013.**

HOPPE, T. **Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

JANSSEN, H. **Thermal Diffusion of water vapour in porous materials: factor friction?** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011.

MARTYS, N.S.; FERRARIS, C.F. **Capillary transport in mortars and concrete. Cement and Concrete Research**, v. 27. 1997.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MILLARD, S. G. **Reinforced concrete resistivity measurement techniques**. Proceedings of Institute of Civil Engineers. Vol. 91, parte 2, (1991).

PESSOA, R. C. J et al. **Porosidade do Concreto determinada por Microtomografia com Raios X e Processamento de Imagens**. Engenharia Estudos e Pesquisas ABPE, 2014.

RIBEIRO et al., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. São Paulo, 1998. 163 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, R. G., **Estudo da microestrutura da camada de cobertura de concretos com altos teores de cinza volante**. Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço das estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

TUUTI, K. **Corrosion of Steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

Philippi, C. P. et al. **Higroscopicidade e Capilaridade nos Materiais Porosos**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído.

THE END