

6

Corrosión de armadura de estructuras de hormigón

Corrosão das armaduras das estruturas de concreto

Reinforcement corrosion of concrete structures

Boletín Técnico

Enio Pazini Figueiredo & Gibson Meira

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología
y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT Int.



Elaboración de:



PREFÁCIO

Com o grande desenvolvimento atual dos meios de comunicação e de transporte, há efetiva possibilidade e necessidade de integração dos profissionais dos países Ibero-americanos, conscientes de que o futuro inscreve-se numa realidade social onde o conhecimento científico e o desenvolvimento tecnológico são as ferramentas corretas a serem utilizadas em benefício da sustentabilidade e qualidade de vida de nossos povos.

É missão e objetivo da ALCONPAT (Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción) ser um forte instrumento de união, desenvolvimento e difusão dos conhecimentos gerados pela comunidade da construção civil, com foco nos materiais e na gestão da qualidade de obras em andamento, no estudo dos problemas patológicos, na manutenção, recuperação e proteção do enorme patrimônio construído e na prevenção de falhas de projeto e construção em obras novas.

Desde sua fundação no ano de 1991 em Córdoba, Argentina, os membros da ALCONPAT Internacional e de suas delegacias e entidades nacionais, vêm organizando cursos, seminários, palestras e, nos anos ímpares o tradicional e reconhecido congresso científico CONPAT, já realizado de forma itinerante em onze diferentes países da Ibero-américa.

Com o objetivo de fortalecer essa integração e valorizar ainda mais a Construção Civil desses países, a ALCONPAT instituiu, em 2011, a “Comisión Temática de Procedimientos Recomendables” sob a profícua coordenação do Prof. Dr. Bernardo Tutikian. Essa Comissão tem o objetivo de levantar temas de interesse da comunidade, buscar um especialista que se disponha a pesquisar e escrever sobre o assunto, voluntariamente, e divulgar esse conhecimento na comunidade Ibero-americana.

O conteúdo deve ser claro, objetivo, com bases científicas, atualizado e não muito extenso, fornecendo a cada leitor profissional as bases seguras sobre um tema específico de forma a permitir seu rápido aproveitamento e, quando for o caso, constituir-se num ponto de partida seguro para um desenvolvimento ainda maior daquele assunto.

O resultado dessa iniciativa agora se cristaliza na publicação de 10 textos fantásticos, em forma de fascículos seriados, cuja série completa ou coletânea se denomina “O QUE É NA CONSTRUÇÃO CIVIL?”. Se tratam de textos conceituais visando o nivelamento do conhecimento sobre as principais “palavras de ordem” que hoje permeiam o dinâmico setor da

Construção Civil, entre elas: Sustentabilidade, Qualidade, Patologia, Terapia, Profilaxia, Diagnóstico, Vida Útil, Ciclo de Vida, e outras, visando contribuir para o aprimoramento do setor da construção assim como a qualificação e o aperfeiçoamento de seus profissionais.

Por ter um cunho didático, os diferentes temas são abordados de modo coerente e conciso, apresentando as principais etapas que compõem o ciclo dos conhecimentos necessários sobre aquele assunto. Cada fascículo é independente dos demais, porém o seu conjunto constituirá um importante referencial de conceitos utilizados atualmente na construção civil.

O curto prazo disponível para essa missão, de repercussão transcendental aos países alvo, foi superado vitoriosamente e esta publicação só se tornou realidade graças à dedicação, competência, experiência acadêmica, profissionalismo, desprendimento e conhecimento do Coordenador e Autores, apaixonados por uma engenharia de qualidade.

Estes textos foram escritos exclusivamente por membros da ALCONPAT, selecionados pela sua reconhecida capacidade técnica e científica em suas respectivas áreas de atuação. Os autores possuem vivência e experiência dentro de cada tópico abordado, através de uma participação proativa, desinteressada e voluntária.

O coordenador, os autores e revisores doaram suas valiosas horas técnicas, seus conhecimentos, seus expressivos honorários e direitos autorais à ALCONPAT Internacional, em defesa de sua nobre missão. Estimou-se essa doação em mais de 500h técnicas de profissionais de alto nível, a uma média de 50h por fascículos, acrescidas de pelo menos mais 200h de coordenação, também voluntária.

Todos os recursos técnicos e uma visão sistêmica, necessários ao bom entendimento dos problemas, estão disponíveis e foram tratados com competência e objetividade, fazendo desta coletânea uma consulta obrigatória. Espera-se que esta coletânea venha a ser amplamente consultada no setor técnico-profissional e até adotada pelas Universidades Ibero-americanas. Esta coletânea é mais um esforço que a ALCONPAT Int. realiza para aprimoramento e atualização do corpo docente e discente das faculdades e universidades, assim como para evolução dos profissionais da comunidade técnica ligada ao construbusiness, valorizando indistintamente a contribuição da engenharia no desenvolvimento sustentado dos países Ibero-americanos.

Mérida - México, março de 2013

Prof. Paulo Helene
Presidente ALCONPAT Internacional

Prof. Bernardo Tutikian
Coordinador Comisión Temática de Procedimientos Recomendables

Junta Directiva de ALCONPAT Internacional (bienio jan.2012/dez. 2013):

Presidencia:

Presidência de Honor:

Vicepresidente Administrativo:

Vicepresidente Técnico:

Secretario Ejecutivo:

Director General:

Gestor:

Prof. Paulo Helene

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Profa. Maria Ysabel Dikdan

Profa. Angélica Piola Ayala

Prof. José Manuel Mendoza Rangel

Dr. Pedro Castro Borges

Ing. Enrique Crescencio Cervera Aguilar

Sede permanente ALCONPAT:

CINVESTAV Mérida México

<http://www.alconpat.org>

Dr. Pedro Castro Borges

Presidente Congreso CONPAT 2013

Prof. Sérgio Espejo

Comisiones Temáticas:

Publicaciones

Educación

Membrecía

Premiación

Procedimientos Recomendables

Relaciones Interinstitucionales

Historia ALCONPAT

Boletín de Noticias

Dr. Pedro Castro Borges

Prof^a. Liana Arrieta de Bustillos

Prof. Roddy Cabezas

Prof^a. Angélica Piola Ayala

Prof. Bernardo Tutikian

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Prof. Dante Domene

Arq. Leonardo López

Missão da ALCONPAT Internacional:

ALCONPAT Internacional es una Asociación no lucrativa de profesionales dedicados a la industria de la construcción en todas sus áreas, que conjuntamente trabajan a resolver los problemas que se presentan en las estructuras desde la planeación, diseño y proyecto hasta la ejecución, construcción, mantenimiento y reparación de las mismas, promoviendo la actualización profesional y la educación como herramientas fundamentales para salvaguardar la calidad y la integridad de los servicios de sus profesionales.

Visão da ALCONPAT Internacional:

Ser la Asociación de especialistas en control de calidad y patología de la industria de la construcción con mayor representatividad gremial y prestigio profesional reconocido internacionalmente, buscando siempre el beneficio social y el óptimo aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y económicos para la construcción de estructuras sustentables y amigables con el medio ambiente.

Valores de ALCONPAT Internacional:

Ciencia, Tecnología, Amistad y Perseverancia para el Desarrollo de América Latina.

Objetivos da ALCONPAT Internacional:

ARTÍCULO 1.2 del Estatuto. ALCONPAT se define como una asociación sin fines de lucro, cuyos fines son:

- a) Contribuir al desarrollo científico y técnico de toda la comunidad Latinoamericana relacionada con la construcción y sus materiales, con énfasis en la gestión de la calidad, la patología y la recuperación de las construcciones.*
- b) Actuar como un interlocutor cualificado, tanto de la propia sociedad civil como de sus poderes públicos representativos.*
- c) Promover el papel de la ciencia y la tecnología de la construcción y sus materiales, y contribuir a su difusión como un bien necesario que es para toda la sociedad Latinoamericana y Iberoamericana.*



06

ALCONPAT Internacional

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

Boletín Técnico

Corrosión de armadura de estructuras de hormigón

Corrosão das armaduras de concreto

Reinforcement corrosion of concrete structures

Enio J. Pazini Figueiredo

Universidade Federal de Goiás

Gibson Rocha Meira

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. UFPB

Introdução

O processo de corrosão do aço no concreto envolve uma fase inicial, na qual os agentes agressivos alteram as condições do concreto no entorno da barra, despassivando a armadura, seguindo-se da formação de uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão.

Neste fascículo, são discutidas as condições que garantem a passividade da armadura no concreto e os fenômenos que levam à ruptura dessa condição de passividade, dando lugar a distintas formas de corrosão. Apresentam-se as fases do processo de

corrosão segundo o modelo de *Tuutti* e discute-se como se inicia a corrosão da armadura a partir da carbonatação do concreto e da ação dos íons cloreto, ponderando-se aspectos que influenciam nas fases de iniciação e de propagação da corrosão. No caso específico do ataque por cloretos, discute-se o teor crítico que conduz à despassivação da armadura. Apresentam-se, também, métodos de monitoramento eletroquímico empregados na avaliação da corrosão, bem como métodos de proteção contra o fenômeno da corrosão.

2. Passivação da armadura no concreto

O concreto oferece ao aço uma dupla proteção. Primeiro uma proteção física, separando o aço do contato direto com o meio externo e, segundo,

uma proteção química, conferida pelo elevado pH do concreto, o qual promove a formação de uma película passivadora que envolve o aço.

A formação e estabilidade dessa película têm relação com a elevada alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto. Inicialmente se pensou que essa alcalinidade se devia essencialmente à presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), resultante das reações de hidratação do cimento. Contudo, com a evolução dos conhecimentos sobre o tema, verificou-se que o elevado pH da solução dos poros do concreto se deve, principalmente, aos hidróxidos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH), conferindo pHs da ordem de 13 a 14 à fase líquida do concreto (LONGUET *et al.*, 1973; ANDRADE & PAGE (1986). O crescente uso de adições no cimento pode reduzir o pH na solução dos poros do concreto (HAUSMANN, 1998), sem contudo induzir a despassivação do aço.

A película passivadora protetora do aço é gerada a partir de uma rápida e extensa reação eletroquímica que resulta na formação de uma fina camada de óxidos, transparente e aderente ao aço (POURBAIX, 1987). A composição precisa dessa película ainda é objeto de discussão. Embora haja algumas teorias, uma das mais aceitas prevê a formação de uma película composta de duas camadas: uma mais interna, composta principalmente por magnetita, e outra mais externa, composta por óxidos férricos (NAGAYAMA & COHEN, 1962 *apud* ALONSO *et al.*, 2010). Essa película apresenta uma elevada resistência ôhmica, conferindo taxas de corrosão desprezíveis, uma vez que impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, bem como dificulta a dissolução do ferro.

A ação de proteção exercida pela película passivadora é garantida pela alta alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico. Essa condição pode ser melhor observada no diagrama de equilíbrio termodinâmico proposto por Pourbaix (1974) para o ferro em meio aquoso, que mostra as condições de pH e potencial nas quais o ferro pode situar-se em três condições distintas: corrosão, passivação ou imunidade (vide Fig. 1).

A zona de imunidade corresponde à região do diagrama onde o aço não se corrói, independentemente da natureza do meio ser ácido, neutro ou alcalino. É para essa zona que o aço é conduzido quando se aplica a técnica de proteção catódica (HELENE, 1986). A zona de passivação

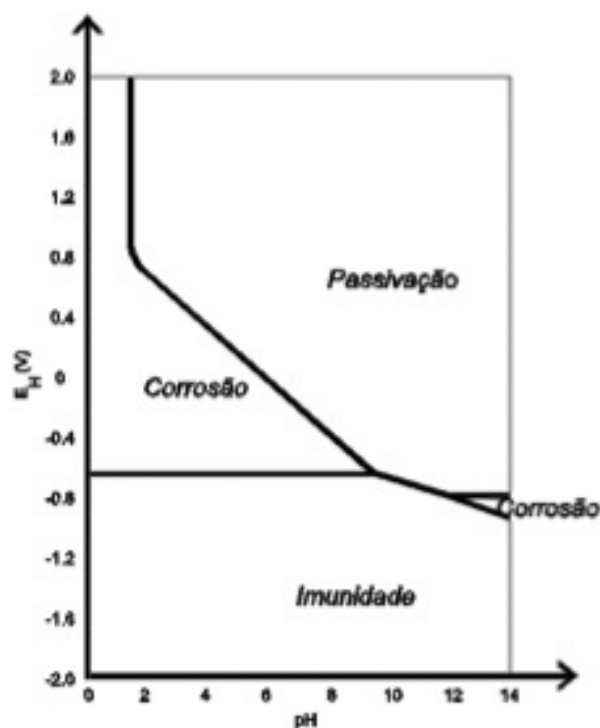


Figura 1. Diagrama de equilíbrio termodinâmico, potencial versus pH, para o sistema $\text{Fe} - \text{H}_2\text{O}$ a 25°C (Adaptado de POURBAIX, 1974).

corresponde àquela em que as reações observadas são as de formação da película passivadora, a qual será mais ou menos perfeita em função do nível de proteção que esta camada ofereça ao metal (POURBAIX, 1987). É o que acontece com o aço imerso no concreto, em que o pH está na faixa de 12,5 a 14,0 e o potencial de corrosão está na faixa de 0,15V a 0,40V (PETROCKIMO, 1960 *apud* HELENE, 1986). Nessa zona, a corrosão não é exatamente nula, mas ela ocorre a uma taxa tão baixa que o metal possui a aparência de manter-se inalterado (ANDRADE, 1988). A zona de corrosão corresponde àquela onde há as condições termodinâmicas necessárias para que o metal possa desenvolver a corrosão.

Como se percebe, o diagrama de Pourbaix tem uma grande utilidade no estudo da corrosão, fornecendo informações sobre as condições de equilíbrio do ferro em função do pH e do potencial de corrosão. Contudo, não fornece informações sobre a cinética da corrosão, a qual depende de outros aspectos, conforme se discute ao longo deste fascículo.

A perda de estabilidade da camada passivadora é que conduz o ferro ao processo de corrosão. Essa situação ocorre pela penetração de substâncias

agressivas que atuam através dos seguintes mecanismos (BAKKER, 1988):

- a carbonatação do concreto, que reduz seu pH a níveis insuficientes para manter o estado passivo das armaduras;
- a presença do agente despassivador íon cloreto em quantidade suficiente para romper localizadamente a camada passivadora;
- a combinação dos dois fatores anteriormente citados.

Nesse sentido, a camada de revestimento

desempenha um importante papel porque, além de ser uma barreira química, conforme foi discutido neste subitem, também se constitui em uma barreira física. Um revestimento de boa qualidade, com baixa porosidade, além de dificultar a penetração dos agentes agressivos, constitui-se em uma barreira adicional, reduzindo a presença da água e do oxigênio, elementos necessários à existência da corrosão eletroquímica (SHIESSL & BAKKER, 1988).

3. Mecanismos eletroquímicos da corrosão e condições para o seu desenvolvimento

A corrosão é um fenômeno que, na grande maioria das vezes, é de natureza eletroquímica, implicando na formação e movimento de partículas com carga elétrica e na presença de um eletrólito condutor. A corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica de corrosão, em que há a presença de um ânodo o qual se caracteriza pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); um cátodo onde são consumidos os elétrons gerados na região anódica (redução); uma diferença de potencial entre ambos, sendo o ânodo de potencial mais eletronegativo; uma ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, que pode ser caracterizada pelo mesmo material metálico; e uma ligação externa caracterizada pela condução iônica através do eletrólito. A Fig. 2 representa esse fenômeno e expõem as reações parciais que se processam nas regiões anódica e catódica, características de um meio alcalino como o concreto.

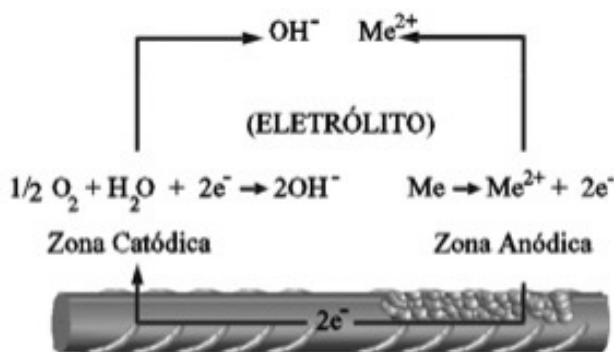


Figura 2. Representação de uma pilha de corrosão em um mesmo metal

A equação da direita representa as reações parciais de dissolução do metal (oxidação). A equação da esquerda representa as reações parciais catódicas, as quais são caracterizadas pelo consumo dos elétrons produzidos na área anódica. O conjunto dessas reações é que representa o processo completo de corrosão eletroquímica e o controle de qualquer das reações parciais representa um controle sobre o processo de corrosão.

O eletrólito integrante da pilha eletroquímica tem especial importância sobre o processo de corrosão instalado. A maior presença de eletrólito facilita a passagem de uma maior corrente iônica, acelerando o processo de corrosão. De modo contrário, a presença de pouco eletrólito aumenta a resistividade do sistema, reduzindo a velocidade de corrosão. Considerando o eletrólito presente nos poros do concreto, essa avaliação ocorre de modo semelhante, ou seja, o concreto em ambientes de baixa umidade relativa dificulta o processo de corrosão da armadura por carência de eletrólito, enquanto que, em ambientes de elevada umidade, o processo pode ser acelerado.

Por outro lado, a presença de oxigênio na região catódica tem papel importante nas reações de redução. A carência de oxigênio provoca uma diminuição das reações de redução, controlando a velocidade de oxidação do metal em função da velocidade com que os elétrons gerados na zona anódica são consumidos na zona catódica (vide Fig. 2). Nesse caso, tem-se um controle catódico do processo de corrosão pela carência de oxigênio.

4. Sintomatologia e tipos de corrosão

A corrosão pode ser classificada em generalizada e localizada. Na corrosão generalizada, o desgaste do material pode ocorrer de forma mais ou menos uniforme, contudo se processa em extensas áreas do metal. Na corrosão localizada, o desgaste se processa em uma superfície limitada e, usualmente, tende a se aprofundar de modo mais rápido do que

em um processo de corrosão generalizada. Essas expressões da corrosão podem sofrer algumas variações morfológicas quando analisadas em maior profundidade, podendo assumir, dentre outras formas, aparência superficial uniforme ou irregular, com a formação de pites ou com a formação de fissuras, conforme expõe a Fig. 3 (FELIU, 1984).

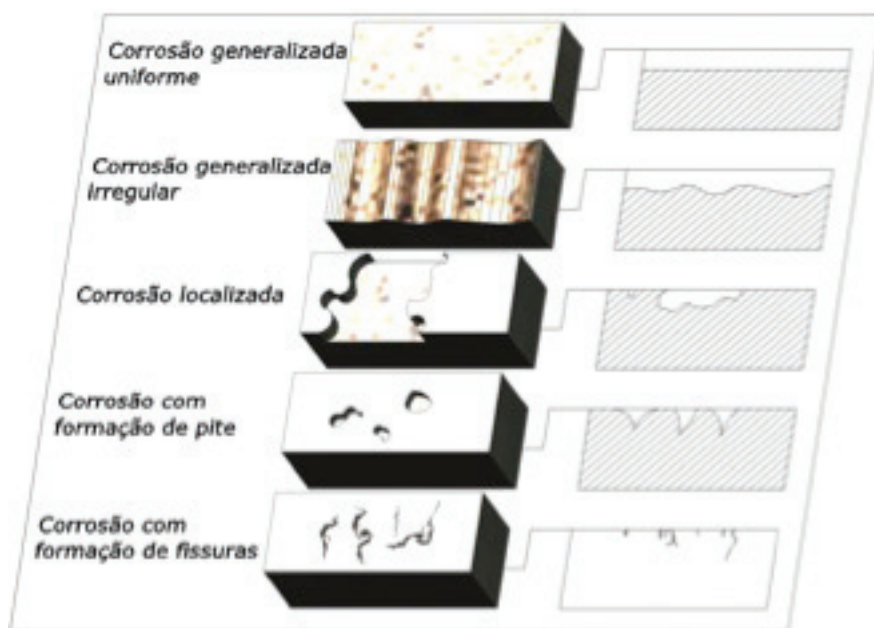


Figura 3. Tipos de corrosão (FELIU, 1984).

Na corrosão generalizada, o ataque é produzido em uma grande superfície do metal, na qual existem inúmeros ânodos e cátodos, formando micropilhas que mudam a todo tempo. Nesse caso, a perda de seção pode ser uniforme ou irregular.

A corrosão localizada trata-se de um ataque intermediário entre a corrosão uniforme e a corrosão por pites. O ataque se produz em zonas mais ou menos extensas do material, as quais, por diferentes razões, são anódicas em relação às demais. Um dos motivos para que isso ocorra pode ser a mudança ou heterogeneidade de composição química do material ou do eletrólito que o circunda.

Na corrosão por pites, o ataque se produz em zonas discretas do material, as quais são mais ativas do que o resto da superfície. É comum no caso da ação de contaminantes que têm a propriedade de romper a capa passiva em pontos específicos, como é o caso dos cloretos.

A corrosão com formação de fissuras ocorre quando, além das condições propícias para a

corrosão, o metal se encontra submetido a tensões importantes de tração. Nesse caso, surgem fissuras no material que se propagam na direção transversal à carga, produzindo rupturas com níveis baixos de tensão.

No caso da corrosão em estruturas de concreto armado, as formas mais comuns são a corrosão generalizada irregular (vide Fig. 4a) e a corrosão puntiforme ou por pites (vide Fig. 4b). O primeiro caso está relacionado à corrosão desencadeada pela carbonatação do concreto, que atua na forma de uma frente e desencadeia a corrosão ao longo de uma superfície extensa do metal. O segundo caso está relacionado à corrosão desencadeada pela ação dos íons cloreto, com ação localizada em relação à ruptura da capa passiva do metal. No caso de estruturas protendidas, pode ocorrer o que se chama de corrosão sob tensão, em que a associação das ações eletroquímicas com as mecânicas favorece ao surgimento de fissuras no metal (corrosão com fissuração).

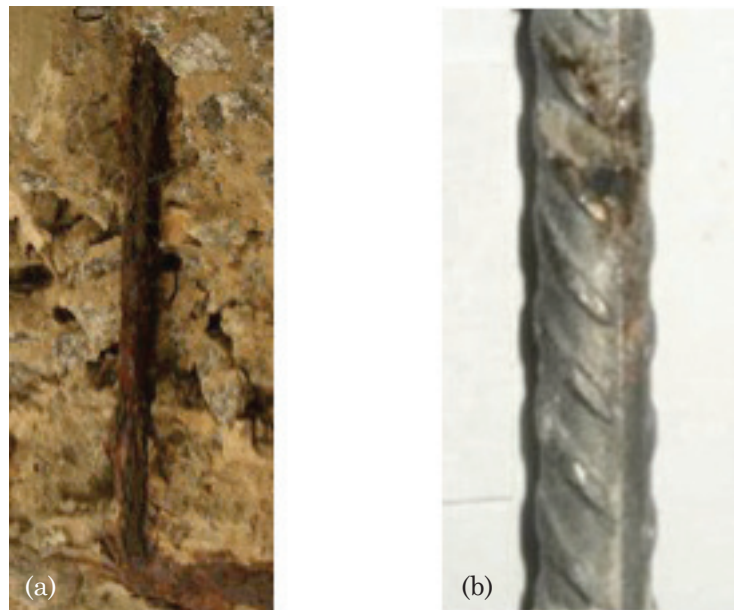


Figura 4. Aparência superficial da corrosão generalizada desencadeada pela carbonatação do concreto (a) e da corrosão puntiforme desencadeada pela ação dos íons cloreto (b).

5. As fases da corrosão segundo o modelo de *Tuutti*

Os modelos de vida útil, associados ao fenômeno da corrosão, usualmente se baseiam no modelo fenomenológico proposto por *Tuutti* (1982), o qual, na sua forma original, apresenta uma fase de iniciação e outra fase de propagação da corrosão (vide Fig. 5).

A fase de iniciação se caracteriza pela penetração dos agentes agressivos, até o momento no qual a armadura se despassa. Essa fase depende das características de agressividade do meio ao qual a estrutura está exposta e das características dos materiais, como o tipo de cimento, porosidade

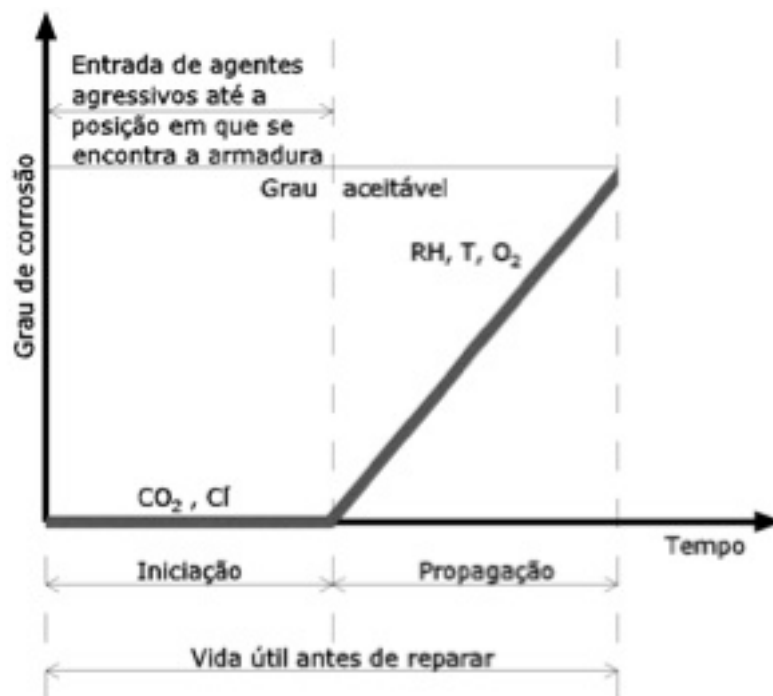


Figura 5. Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras – proposta original (TUUTTI, 1982).

superficial do concreto, tipo de aço etc. Com a propagação da corrosão. A fase de propagação da corrosão se caracteriza

despassivação da armadura, inicia-se a fase de

A fase de propagação da corrosão se caracteriza

pelo desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas em função das variáveis que controlam a cinética das reações, ou seja, em função da disponibilidade de oxigênio, da resistividade do meio, da temperatura etc.

Considerando que o momento da despassivação do aço envolve alterações eletroquímicas na superfície do aço e que essas alterações demandam

certo tempo para que o início da corrosão possa ocorrer de forma consistente, o modelo de *Tuutti* pode ser adaptado para a forma apresentada na Fig. 6, a qual aceita que a fase de despassivação se desenvolve ao longo de um período de tempo e, portanto, o modelo passa a ter três fases: iniciação, despassivação e propagação.



Figura 6. Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras – modelo ajustado.

6. Iniciação da corrosão da armadura

6.1 Pela carbonatação

A formação e a estabilidade da película passivadora na superfície da armadura é dependente do nível do pH na solução que a circunda. Para pHs acima de 11,5 na solução dos poros do concreto, a estabilidade dessa película é mantida e a corrosão não se instala. O crescente uso de adições no cimento pode reduzir o pH na solução dos poros do concreto (HAUSMANN, 1998). Contudo, os valores de pH não decrescem a níveis que comprometam a passivação, situando-se em valores acima de 12 (HÄRDTL *et al.*, 1994). No entanto, as reações pozolânicas podem reduzir a reserva alcalina devido ao consequente consumo de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que é importante

para a resistência à carbonatação.

Com a penetração das moléculas de dióxido de carbono no concreto, ocorrem reações que fazem decrescer a alcalinidade na solução dos poros, conduzindo o pH para níveis próximos de 8 (TUUTTI, 1982). Com essa redução, há um comprometimento da estabilidade da película passivadora, uma vez que o metal sai da zona de passivação e entra na zona de corrosão, segundo o diagrama de Pourbaix (vide Fig. 7).

Como resultado da carbonatação, tem-se a redução do pH do concreto para valores inferiores a 9. Conforme mostram as Equações 1 e 2, os compostos hidratados do cimento suscetíveis à

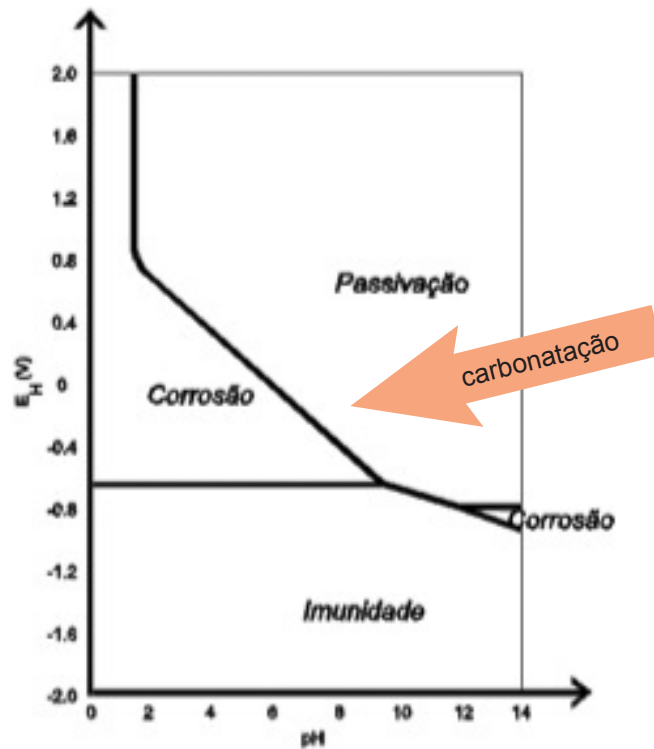
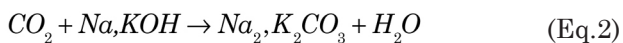
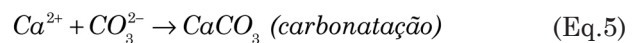
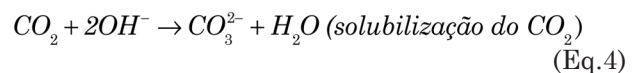
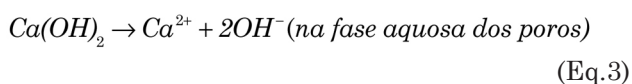


Figura 7. Efeito da carbonatação no comportamento da armadura em relação à corrosão, tendo como referência o diagrama de Pourbaix.

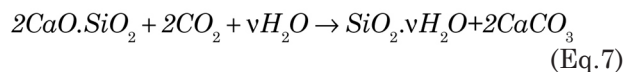
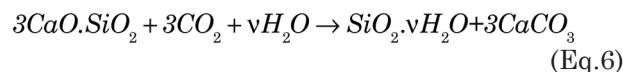
carbonatação são o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos (SCHRÖDER; SMOLCZYK, 1969). A principal reação que ocorre é a carbonatação do hidróxido de cálcio, o qual é transformado em carbonato de cálcio, segundo a representação simplificada da reação mostrada na Equação 1.



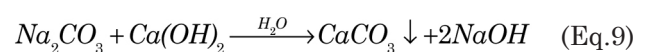
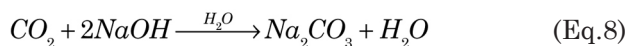
Na realidade, primeiro tem que haver a difusão gasosa do CO_2 , que se encontra na atmosfera, na fase aquosa dos poros do concreto, para somente após haver a reação química do CO_2 com os elementos alcalinos (Equações 3, 4 e 5). Logo, para que a carbonatação se processe ao natural, é necessário que primeiro ocorra a solubilização do dióxido de carbono. As Equações 4 e 5 mostram, respectivamente, a solubilização do CO_2 e a reação de formação do carbonato de cálcio (TAYLOR, 1997; FIGUEIREDO, 2007).

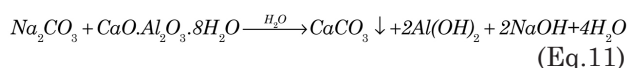
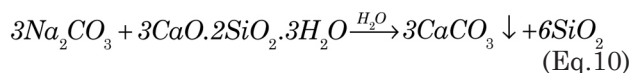


Os íons OH^- e Ca^{2+} são formados pela dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e decomposição das fases hidratadas de silicatos e aluminatos. Papadakis et al. (1991) mostram que a carbonatação dos silicatos C_3S e C_2S não hidratados da pasta de cimento endurecida pode ocorrer de acordo com as Equações 6 e 7.



A conversão do hidróxido de sódio em carbonato de sódio ocorre conforme mostra a Equação 8. O NaOH consumido na reação com o gás carbônico (Equação 8) é liberado novamente após a reação do carbonato de sódio com o hidróxido de cálcio (Equação 9), com o C_3S hidratado (Equação 10) e com o aluminato de cálcio hidratado (Equação 11), podendo reagir novamente com o CO_2 , permitindo a seqüência do processo (GUIMARÃES, 2000).





No âmbito das reações de carbonatação, também ocorre a carbonatação do CSH, em que, além do $CaCO_3$, há a formação de gel de sílica, com estrutura porosa, facilitando a continuidade da carbonatação, bem como a carbonatação de outras

fases hidratadas contendo Al e Fe (BAKKER, 1988; TAYLOR, 1997).

O processo de carbonatação ocorre de fora para dentro, criando uma frente carbonatada e uma zona onde ainda não houve carbonatação e os níveis de pH se mantêm elevados, conforme representa a Fig. 8. Quando essa frente atinge a armadura, aceita-se que o período de iniciação da corrosão foi vencido (TUUTTI, 1982).

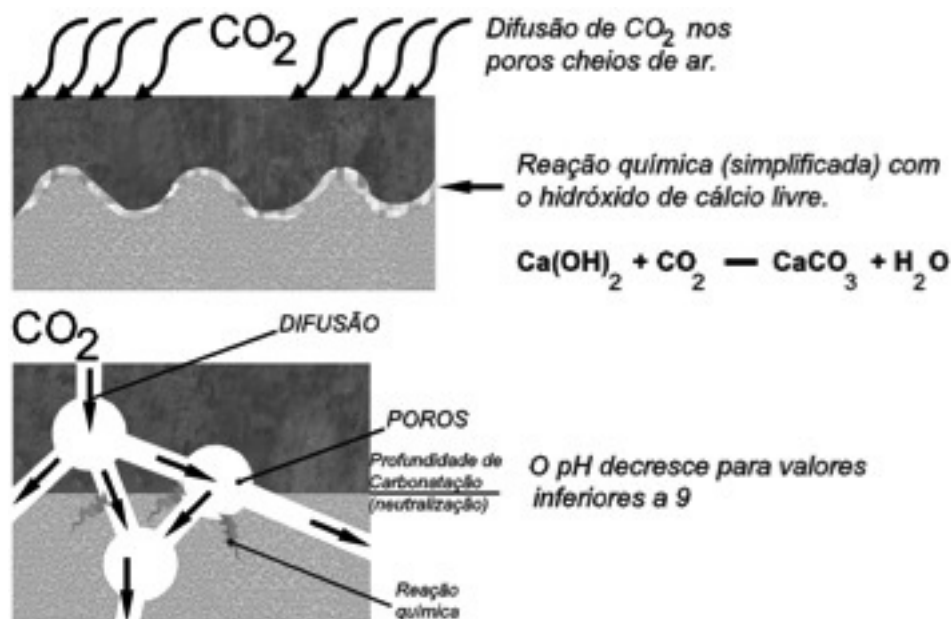


Figura 8. Representação esquemática do processo de carbonatação (CEB, 1984).

6.2 Pela ação dos íons cloreto

Os íons cloreto (Cl^-) penetram nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, provocam desestabilizações pontuais nessa película. Várias teorias tentam representar esse fenômeno. No entanto, a maioria delas converge em relação ao fato de que a ruptura da película passivadora é algo dinâmico, com eventos repetidos de despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva da armadura, bem como que este efeito ocorre de forma localizada. Essa é uma característica que faz com que a corrosão desencadeada por cloretos seja tipicamente por pites, diferindo do que ocorre devido à carbonatação (corrosão generalizada).

O processo de despassivação por cloretos ainda é cercado de incertezas e teorias, como a do complexo transitório (TREADAWAY, 1988) ou a do defeito

pontual (McDONALD, 1992 apud ALONSO et al., 2010), que têm sido empregadas para explicar esse fenômeno.

A Fig. 9 representa o efeito dos íons cloreto na ruptura pontual da película passivadora e o início do processo de corrosão, baseando-se na primeira teoria. Uma vez iniciado o processo corrosivo, os cloretos que se combinam inicialmente com os íons Fe^{2+} , formando $FeCl_2$, são reciclados através da hidrólise desses produtos, liberando os Cl^- para novas reações, mas também liberando íons H^+ . A liberação de H^+ faz com que a área anódica tenha a sua acidez aumentada e o potencial dessa área se torne mais negativo. Por outro lado, a formação de OH^- em função das reações catódicas, eleva o pH dessas áreas. Assim, a corrosão por pites é autossustentada, diminuindo o pH nas áreas

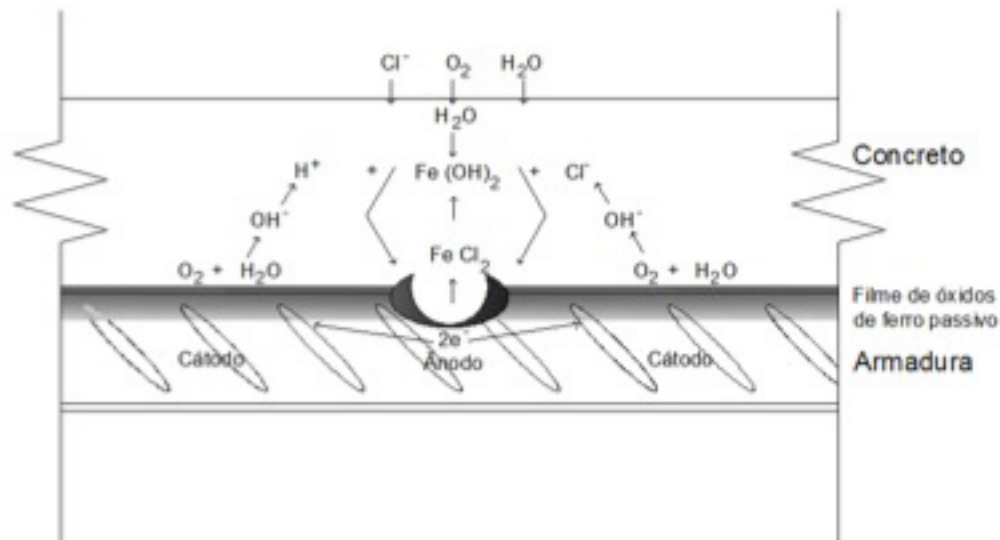


Figura 9. Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos (TREADAWAY, 1988).

anódicas e aumentando o pH nas áreas catódicas adjacentes, reduzindo as chances de futuro ataque nessas áreas catódicas. Com a continuidade do processo, mais íons Cl^- penetram no concreto, unindo-se àqueles reciclados para participarem de novas reações.

No caso da segunda teoria, a ruptura da película passivadora se dá em consequência da formação de vazios decorrente do fluxo de cátions através da película passivadora em resposta à

penetração de cloretos. Quando a eliminação desses vazios não é mais possível, a ruptura local da película passivadora pode ocorrer e a formação de um pite tem início. Considerando o diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-solução aquosa, contendo cloretos (vide Fig. 10), evidencia-se o comportamento agressivo desses íons por meio da redução significativa da zona de passivação e um incremento da zona de corrosão com a inclusão da zona de corrosão por pites.

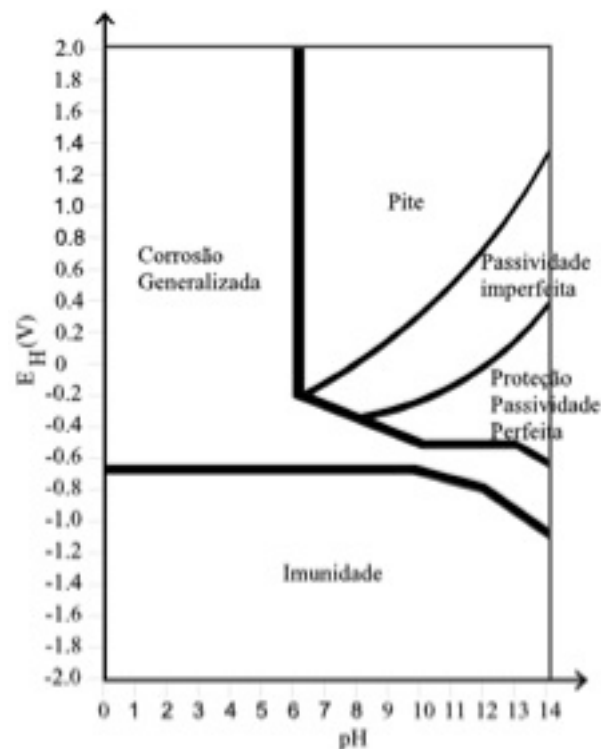


Figura 10. Diagrama de equilíbrio termodinâmico para o sistema Fe-H₂O, a 25 °C, na presença de solução com íons cloreto a 355 ppm (Adaptado de POURBAIX, 1987).

6.3 Teor crítico de cloretos

A chegada de cloretos nas proximidades da armadura, por si só, não representa o início do processo de corrosão. É necessário que estejam em quantidade suficiente para desencadear o processo corrosivo. Essa quantidade, conhecida como limite crítico de cloretos, depende de uma

série de variáveis. Este Item seção aborda o tema considerando que esse parâmetro depende de aspectos relacionados ao ambiente, aos materiais e à interface aço-concreto (vide Quadro 1), o que pode gerar uma extensa variação desse parâmetro.

Quadro 1. Fatores que influenciam o limite crítico de cloretos, em % em relação à massa de aglomerante (GLASS & BUENFELD, 1997b).

Interface com o aço	Fatores relacionados com o concreto		Fatores externos
	Materiais cimentantes	Barreira representada pelo concreto	
Vazios / falhas	Quantidade de C3A	Cura	Quantidade de umidade
Oxidação prévia	pH	Relação água / cimento	Variações de umidade
	Cinza Volante	Espessura do cobrimento	Concentração de oxigênio
	Escória		Fonte de íons cloreto
	Sílica Ativa		Tipo de cátion que acompanha o íon cloreto
	Teor de Aglomerante		Temperatura

Não é objetivo deste Item discutir, ponto a ponto, as variáveis que influenciam no teor crítico de cloretos, mas apresentar este cenário de variabilidade, bem como indicar os valores referenciais mais aceitos.

As variáveis relacionadas à interface aço-concreto dizem respeito à possibilidade de acúmulo pontual de cloretos em um local específico dessa interface ou de falhas na formação da película passivadora. Os fatores relacionados ao concreto agrupam influências relacionadas ao potencial alcalino da matriz, à capacidade de fixação de cloretos à microestrutura do concreto, bem como em relação à estabilidade das condições no entorno da armadura. As variáveis relacionadas a fatores externos dizem respeito ao tipo de cloreto envolvido (tipo de cátion

associado) e à sua forma de penetração no concreto, às reações de corrosão e o seu controle catódico, em função da presença de oxigênio, às condições de umidade no entorno da armadura e sua flutuação e às características da edificação em relação ao seu entorno (CASTRO, RINCÓN & FIGUEIREDO, 2001).

Além das influências anteriormente relatadas, há que acrescentar-se a diversidade de métodos empregados para identificar a despassivação da armadura e posterior identificação do teor crítico de cloretos (vide Quadro 2), bem como a variedade de procedimentos empregados na definição da extensão e na extração das amostras das matrizes sólidas empregadas na determinação do teor crítico de cloretos.

Quadro 2. Limites críticos de cloretos para começar a corrosão - dados da literatura. (Adaptado de ALONSO et al., 2000).

Condições	Referência	Ambiente	Valores ou intervalos do teor crítico de cloretos			Método de detecção da despassivação
			Cl ⁻ livres (%de cim.)	Cl ⁻ totais (%de cim.)	[Cl ⁻]/[OH ⁻]	
Soluções simulando concreto	Hausman (1967)	Solução			0,60	Medidas de potencial e inspeção visual
Polarização anódica, medidas de potencial e inspeção visual	Gouda (1970)	Solução			0,35	Polarização anódica, medidas de potencial e inspeção visual

Continua...

Quadro 2. Limites críticos de cloretos para começar a corrosão - dados da literatura. (Adaptado de ALONSO *et al.*, 2000). (continuação)

Condições	Referência	Ambiente	Valores ou intervalos do teor crítico de cloretos			Método de detecção da despassivação
			Cl ⁻ livres (%de cim.)	Cl ⁻ totais (%de cim.)	[Cl ⁻]/[OH ⁻]	
Soluções simulando concreto	Hausman (1967)	Solução			0,60	Medidas de potencial e inspeção visual
Polarização anódica, medidas de potencial e inspeção visual	Gouda (1970)	Solução			0,35	Polarização anódica, medidas de potencial e inspeção visual
Suspensões de argamassa	Gouda & Halaka (1970)	Suspensões				Polarização anódica
		CP comum		2,42		
		CP escória		1,21		
Aços sem limpeza prévia	Gouda & Halaka (1970)	CP comum		0,60		Polarização anódica
Concreto com adição de cloretos	Gouda & Halaka (1970)	Concreto				Polarização anódica
		CP comum		3,04		
		CP escória		1,01		
Pastas de CP comum (inglês) e cimento com escória (espanhol)-Cl-adicionados à mistura.	Andrade & Page (1986)	Pastas				Medidas da taxa de corrosão
		CP comum			0,15–0,69	
		CP escória			0,12–0,44	
Lajes de concreto com Cl adicionados para várias condições de exposição	Hope & Ip (1987)	Concreto		0,1–0,19		Taxa de corrosão, impedância AC, inspeção visual, perda de massa
		CP comum				
Três argamassas de cimento Portland (cloretos externos)	Hansson & Sørensen (1990)	Argamassa				ncremento da densidade de corrente
		100% UR		0,6 –1,4		
		50% UR				
Aço em soluções alcalinas com cloretos	Goñi & Andrade (1990)	Solução			0,25–0,80	Medidas da taxa de corrosão (i_{corr})
Prismas de concreto em ambientes marinhos	Thomas <i>et al.</i> (1990)	Concreto		0,50		Inspeção visual e perda de massa
Concreto exposto à contaminação externa de cloretos	Lambert <i>et al.</i> (1991)				3,00	Medidas da taxa de corrosão (i_{corr})
Argamassas feitas com cimentos com alto ou baixo teor de álcalis	Pettersson (1992)	Argamassas				Medidas da taxa de corrosão (i_{corr})
		80% UR		0,6–1,8		
		100% UR		0,5–1,7		
Lajes de concreto armazenadas em água do mar com 10% de Cl	Pettersson (1992)	Concreto			1,8 – 2,9	Medidas da taxa de corrosão

Continua...

Quadro 2. Limites críticos de cloretos para começar a corrosão - dados da literatura. (Adaptado de ALONSO et al., 2000). (continuação)

Condições	Referência	Ambiente	Valores ou intervalos do teor crítico de cloretos			Método de detecção da despassivação
			Cl ⁻ livres (%de cim.)	Cl ⁻ totais (%de cim.)	[Cl ⁻]/[OH ⁻]	
Cl ⁻ adicionados à mistura	Kayyali & Haque (1995)	Solução	Concreto			Supondo o limite [Cl ⁻] / [OH ⁻] = 0,6 e cálculo dos cloretos livres
Concreto de média resistência (MS)			MS	0,15		
Concreto de alta resistência (HS)			HS	0,85		
Concreto superplastificado de alta resistência (HSS)			HSS	0,80		
Concreto superplastificado de alta resistência com cinza volante (HSSFA)			HSSF	0,45		
Cimentos c/ diferentes conteúdos de C3A	Hussain et al. (1995)	Concreto				Adoção do limite [Cl ⁻]/[OH ⁻] = 0,3
Conteúdo de C3A = 2,43%			0,14	0,35		
Conteúdo de C3A = 7,59%			0,17	0,62		
Conteúdo de C3A = 14,0%			0,22	1,00		
Concreto com Cl ⁻ adicionados à mistura e exposições externas a ambientes com Cl ⁻	Breit & Sciessl (1997)	Concreto				Medidas de corrente em macrocélulas
		CP comum		0,5 – 1,0		
		CP escória		1,0 – 1,5		
		CP cinza v.		1,0 – 1,5		
Prismas de concreto armado com cinza volante, em ambiente marinho	Thomas (1996)	Concreto				Perda de massa
Conteúdo de cinza = 0%				0,70		
Conteúdo de cinza = 15%				0,65		
Conteúdo de cinza = 30%				0,50		
Conteúdo de cinza = 50%				0,20		
Prismas de concreto expostos ao ambiente marinho com diversos cobrimentos	Sandberg (1999)	Concreto				Medidas de potencial de corrosão e taxa de corrosão
		CP r.sulfatos		0,6 - 1,5		
		CP r.sulfatos + 10% SA		0,5 - 1,2		

Continua...

Quadro 2 - Limites críticos de cloretos para começar a corrosão - dados da literatura. (Adaptado de ALONSO et al., 2000). (continuação)

Condições	Referência	Ambiente	Valores ou intervalos do teor crítico de cloretos			Método de detecção da despassivação
			Cl ⁻ livres (%de cim.)	Cl ⁻ totais (%de cim.)	[Cl ⁻]/[OH ⁻]	
Prismas de argamassa com cloretos adicionados à mistura	Alonso et al. (2000)	Argamassa CP comum	0,4-1,16	1,24-3,1	1,17-3,98	Medidas da taxa de corrosão

Outro aspecto importante em relação ao teor crítico de cloretos corresponde a como representá-lo. Entende-se, hoje, que a relação $[Cl^-]/[OH^-]$ seja aquela que melhor representa esse parâmetro. Contudo, a dificuldade de medir-se a concentração de hidroxilas na solução dos poros do concreto tem feito com que a relação entre cloretos livres e totais e a massa de cimento, e mais especialmente o último, tenha sido um parâmetro com amplo uso para indicar risco de corrosão.

Glass & Buenfeld (1997a) defendem que a melhor forma de expressar o limite crítico de cloretos é a relação entre o teor de cloretos totais e a massa de cimento, tendo em conta que a concentração de hidroxilas na solução dos poros não é o único parâmetro que representa as propriedades inibidoras do cimento e que os cloretos inicialmente ligados podem vir a participar das reações de corrosão.

No caso dos métodos empregados para identificar a despassivação do aço e, portanto, o momento em que se atingiu o teor crítico de cloretos, também há uma extensa variedade, tais como as medidas de densidade de corrente instantânea corrosão (i_{corr}), as medidas de potencial de corrosão (E_{corr}), inspeção visual etc., conforme se observa no Quadro 2. Contudo, atualmente, há uma maior inclinação para o emprego da densidade de corrente instantânea

de corrosão (i_{corr}) como variável indicadora da despassivação (ALONSO et al., 2000).

Esse cenário de múltiplas influências contribui para uma significativa variação do teor crítico de cloretos totais, assumindo valores que vão de 0,1 a 3,1 % (em relação à massa de cimento), conforme exemplifica o Quadro 2.

Diante da grande variabilidade de resultados, com reflexos das particularidades de cada estudo, a tendência é que sejam adotados valores conservadores (GLASS & BUENFELD, 1977b). Essa postura acaba se refletindo nas normas de diversos países/regiões. Nesse sentido, a rede de pesquisa DURAR (1997) apresenta os limites 0,4 % de cloretos totais, em relação à massa de cimento, para estruturas em concreto armado e 0,2 % para concreto protendido.

As informações apresentadas neste item conduzem a de um cenário bastante variável, onde a adoção de limites conservadores tem o objetivo geral de atender à maioria dos casos. Contudo, o estudo de situações específicas pode conduzir à adoção de limites que, independentemente de menores ou maiores, sejam mais precisos em função das características particulares de cada caso, em que um conjunto próprio de variáveis age de forma simultânea.

7. Fatores que influenciam a iniciação da corrosão

Retomando o modelo de vida útil de Tuutti, apresentado no Item 6.5, a iniciação da corrosão é caracterizada pelo transporte, para o interior do concreto, de agentes agressivos capazes de desencadear a corrosão, em especial o gás carbônico, responsável pela carbonatação do concreto, e os íons cloretos, responsáveis pela ruptura localizada da película passiva. Nesse sentido, a existência de agentes agressivos no ambiente, as características

da matriz de concreto e as condições de interação ambiente-estrutura são aspectos essenciais na determinação de um maior ou menor tempo demandado para iniciação da corrosão.

Não é objetivo deste Item realizar uma extensa discussão sobre esse tema, mas apresentar alguns exemplos de como alguns desses fatores aceleram ou retardam o início do processo de corrosão.

7.1 Concentração do agente agressivo no ambiente

A existência e a quantidade de agentes agressivos no ambiente é fator decisivo na iniciação da corrosão. No que se refere à concentração de CO_2 , a Fig. 11 exemplifica o incremento da velocidade de carbonatação com o aumento da concentração de CO_2 no ambiente e a Fig. 12 a influência da concentração de cloretos na atmosfera, através

da taxa média de deposição na vela úmida, na penetração de cloretos no concreto. Isso significa que estruturas de concreto concebidas com as mesmas características podem ter desempenhos distintos, dependendo das condições de agressividade do ambiente.

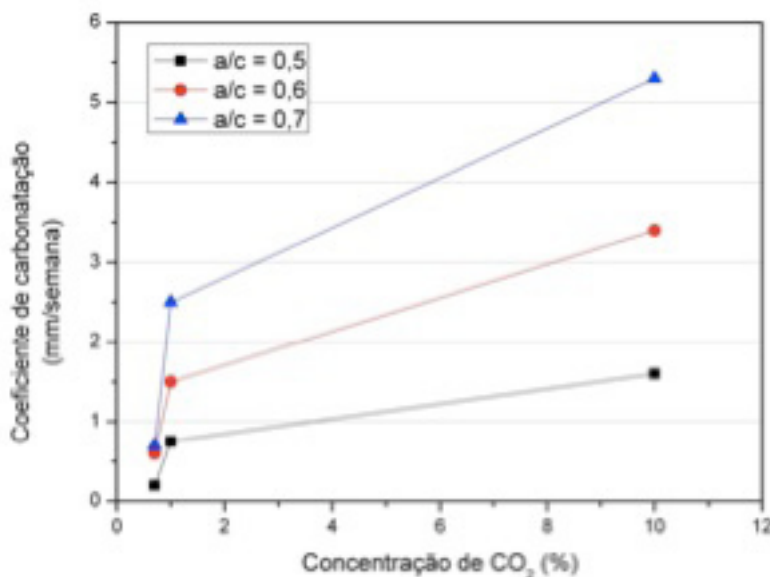


Figura 11. Influência da concentração de CO_2 no ambiente sobre o coeficiente de carbonatação (POSSAN, 2004).

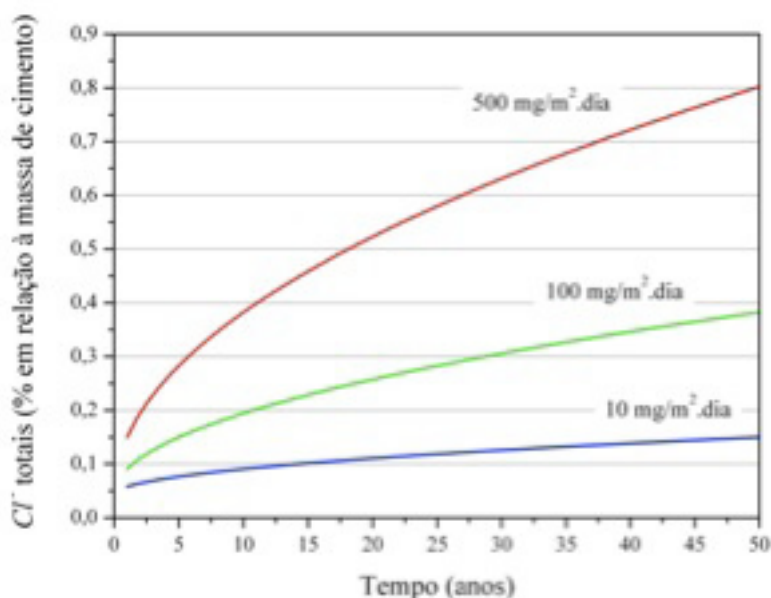


Figura 12. Influência da presença de cloretos no ambiente sobre a concentração média de cloretos no interior do concreto ao longo do tempo (MEIRA *et al.*, 2007).

7.1 Característica da matriz do concreto

No que se referem às características da matriz de concreto, os aspectos relacionados à porosidade, potencial alcalino e capacidade de fixação de

cloretos são alguns dos mais importantes em relação à iniciação da corrosão.

A porosidade tem relação direta com a velocidade

de transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto, conforme pode ser visto na Fig. 11, que mostra o efeito da relação água/cimento no coeficiente de carbonatação. Esse efeito também

pode ser visto na Fig. 13, que relaciona a relação água/cimento com a concentração de cloretos no concreto para um mesmo período de exposição.

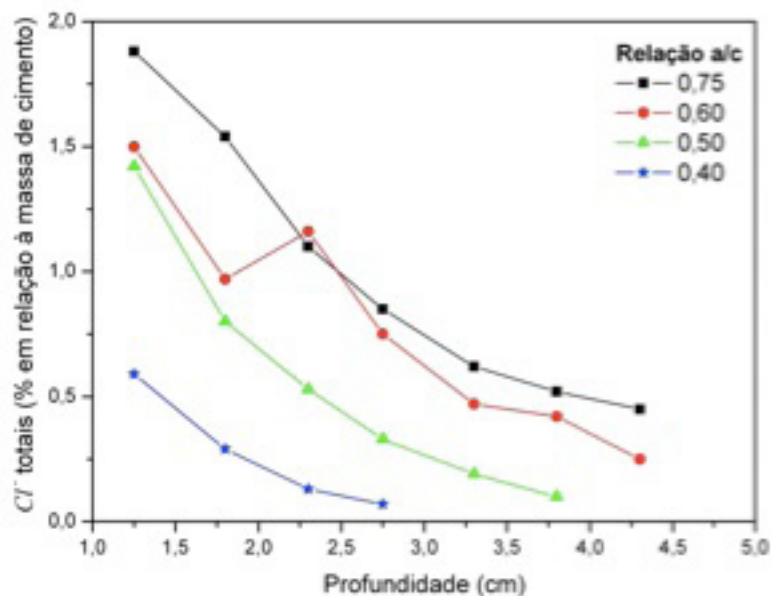


Figura 13. Influência da relação água/cimento na penetração de cloretos no concreto (JAEGERMANN, 1990).

Sobre o potencial alcalino, o mesmo faz frente à redução de alcalinidade decorrente do processo de carbonatação, de modo que, para matrizes com estrutura porosa semelhante, aquela que apresente menor potencial alcalino demanda menor tempo para que tenha o cobrimento carbonatado. No caso da ação dos cloretos, esse efeito se processa em relação à quantidade de cloretos necessária

para iniciar a corrosão. Como matrizes com maior potencial alcalino possuem maior teor de OH⁻, uma maior quantidade de cloretos é necessária para atingir a mesma relação [Cl⁻]/[OH⁻]. Esse efeito é exemplificado na Fig. 14, a qual mostra as diferenças de comportamento de concretos elaborados com cimentos de distintas características de alcalinidade em relação ao avanço da carbonatação.

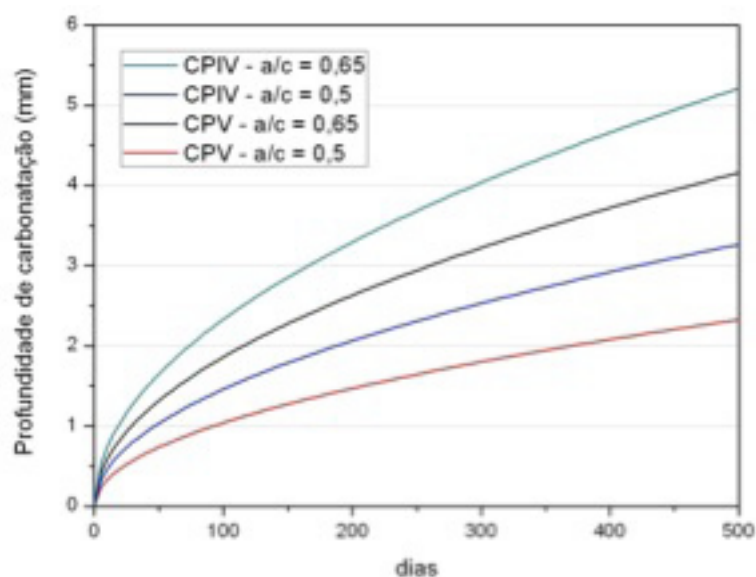


Figura 14. Influência do tipo de cimento na carbonatação natural do concreto (VIEIRA et al., 2010).

A capacidade de fixação de cloretos na matriz de concreto é um aspecto que pode retardar a chegada de cloretos no nível da armadura. Essa ação de fixação está fortemente relacionada com

a quantidade de aluminatos na matriz. Nesse sentido, *Rasheeduzzafar et al. (1990)* mostraram o efeito da concentração de C_3A no cimento sobre o período de iniciação da corrosão (vide Quadro 3).

Quadro 3. Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C_3A (*RASHEEDUZZAFAR et al., 1990*).

Teor de C_3A	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2 %	86 %	Referência
9 %	58 %	1,75 vezes
11 %	51 %	1,93 vezes
14 %	33 %	2,45 vezes

7.3 Condições de interação ambiente – estrutura

As condições de interação ambiente-estrutura dizem respeito à como a estrutura reage às condições ambientais que a circunda, bem como à forma de contato do agente agressivo com a estrutura.

As condições de umidade no ambiente se refletem nas condições de umidade na rede porosa da matriz de concreto, com reflexos na velocidade de carbonatação e no transporte dos íons cloreto. Considerando o fenômeno de carbonatação, se os poros estiverem secos, o CO_2 penetra no concreto,

mas a carbonatação não ocorre, pois falta água para as reações se processarem. Se os poros estiverem saturados, a carbonatação fica comprometida pela baixa velocidade de difusão do CO_2 na água (10^4 vezes mais baixa que no ar). Se os poros estiverem parcialmente preenchidos por água, o que é comum nos concretos de cobrimento, a frente de carbonatação avança até onde os poros mantêm essa condição favorável (vide Fig. 15).

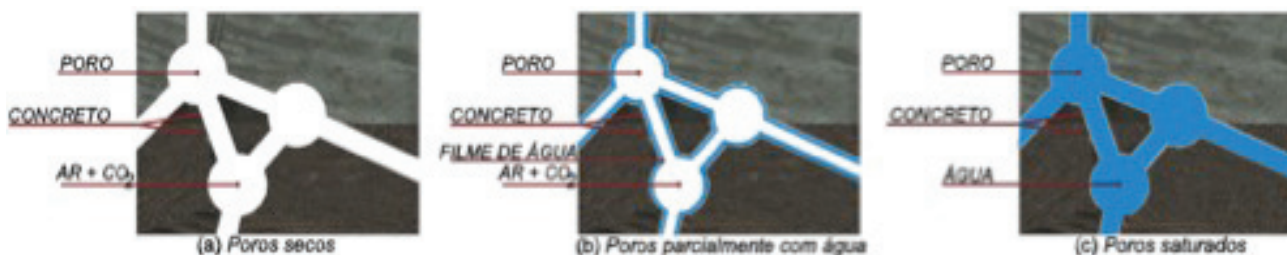


Figura 15. Representação esquemática da difusão de CO_2 nas situações de poros secos (a), poros parcialmente preenchidos por água (b) e poros saturados (c) (*BAKKER, 1988*).

A faixa de 50 % a 80% de umidade relativa é a faixa na qual as condições para a carbonatação são mais favoráveis (*VENUAT & ALEXANDRE, 1969; PARROTT, 1987*). Com o avanço da frente de carbonatação e a presença das condições ambientais necessárias para o desenvolvimento da corrosão, esta se dá de forma generalizada (*GONZÁLEZ & ANDRADE, 1984*). Isso ocorre porque, com o avanço da frente de carbonatação, há uma desestabilização da película ao longo da zona onde o pH decresce e o aço se corrói de forma distribuída na extensão da zona carbonatada (*ANDRADE, 1988*).

Nesse sentido, ambientes com baixo ou elevado índice de umidade relativa contribuem para uma baixa velocidade de carbonatação e, portanto, para um maior período de iniciação da corrosão. Esse comportamento pode ser visualizado através da Fig. 16, que relaciona o grau de carbonatação com a umidade relativa ambiental.

No que se refere ao transporte de cloretos, menores teores de umidade favorecem ao transporte por absorção capilar, enquanto que umidades próximas da saturação favorecem ao transporte por difusão. Nesse último caso, o transporte tende a ser

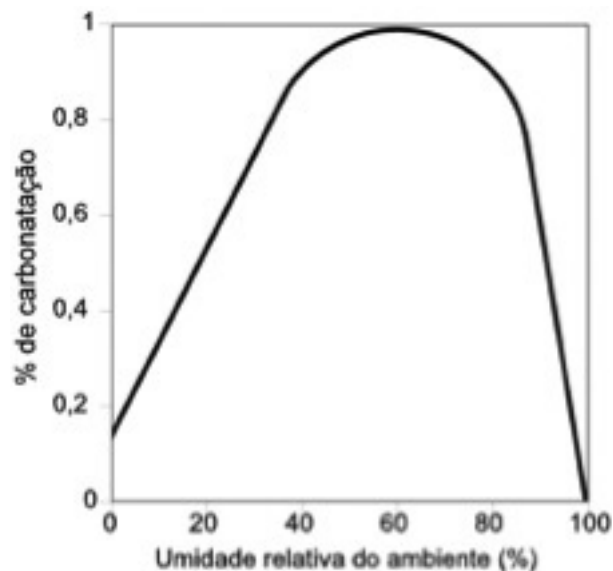


Figura 16. Relação entre umidade relativa ambiental e grau de carbonatação. (VENUAT & ALEXANDRE, 1969).

mais lento, mas esse efeito pode ser compensado pelo contato constante com a fonte de cloretos.

Considerando a condição de contato do agente agressivo com a estrutura, estruturas inseridas no mar têm um contato direto com a fonte do agente agressivo (íon cloreto) ao passo que estruturas em zona de atmosfera marinha têm um contato gradual

com este agente, o qual reduz a sua presença com o afastamento do mar (MEIRA *et al.*, 2010). Isso favorece a menores concentrações de cloreto no concreto e, portanto, a um período de iniciação da corrosão mais extenso. A Fig. 17 amplia essa análise incluindo a zona de respingo.

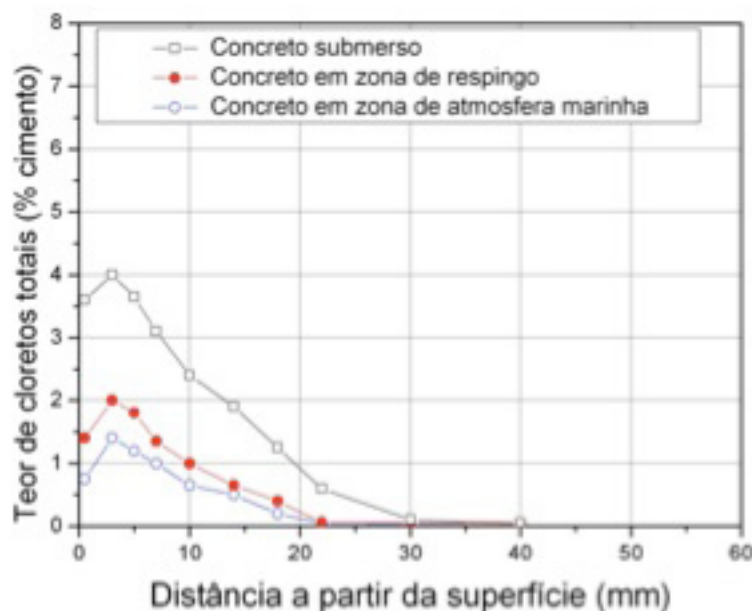


Figura 17 – Relação entre zona de exposição e perfis de cloretos para concretos expostos durante 5,1 anos. (SANDBERG *et al.*, 1998).

Através da Fig. 17, pode-se perceber um aumento gradual das concentrações de cloreto no concreto exposto à zona de atmosfera marinha para a zona submersa, o que implica em uma diminuição do período de iniciação da corrosão.

Nessa análise, apenas o transporte de cloretos está sendo considerado. Fatores adicionais, como a disponibilidade de oxigênio para o processamento das reações de corrosão, não fazem parte desta análise.

8. Propagação da corrosão

Na sequência, faz-se uma discussão a respeito dos fatores que influenciam a taxa de crescimento da corrosão. A velocidade de corrosão pode ser

basicamente controlada pelos quatro processos mostrados na Fig. 18.

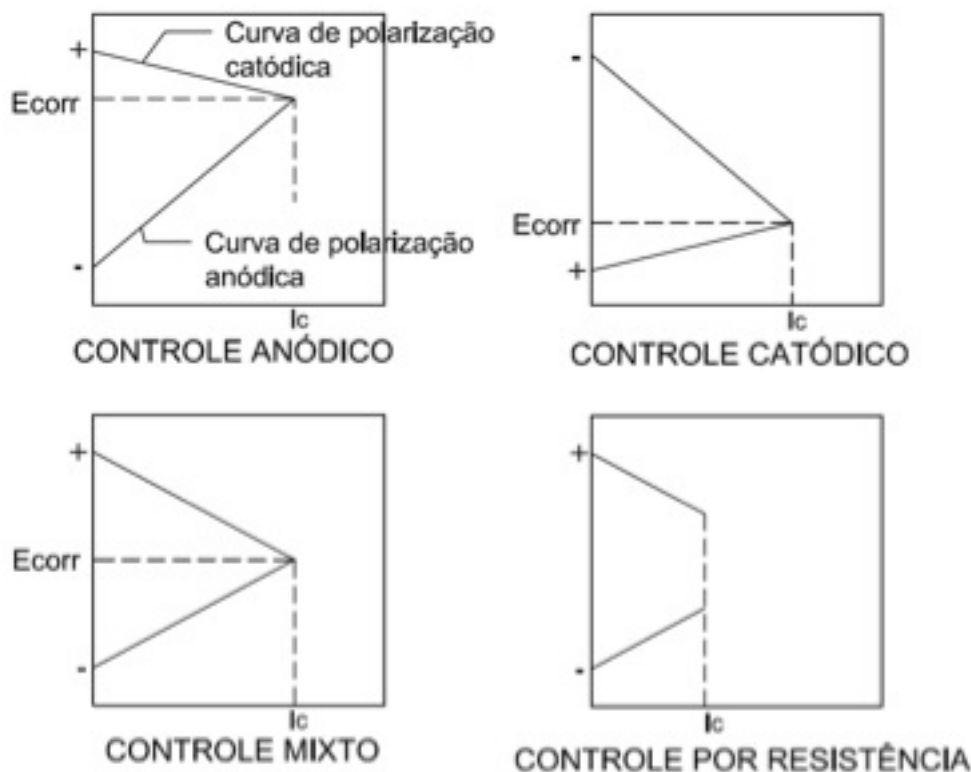


Figura 18. Diagramas de Evans mostrando a influência dos processos de controle catódico, anódico, misto e por resistência sobre a intensidade de corrosão (FIGUEIREDO, 1994).

8.1 Efeito da umidade, resistividade e acesso de oxigênio

O conteúdo de umidade no interior do concreto exerce importante papel sobre a corrosão, quer seja porque a água é necessária para que ocorra a reação catódica de redução do oxigênio, ou porque influi na resistividade do concreto e na permeabilidade ao oxigênio.

O concreto seco possui uma alta resistividade, podendo atingir valores da ordem de 1011 ohm.cm quando é submetida a temperaturas de 105°C (MONFORE, 1968). Nessas condições, o concreto não permite a mobilidade dos íons. Por outro lado, a medida que a umidade interna do concreto aumenta, a resistência ôhmica vai diminuindo e o processo de corrosão pode desenvolver-se, caso a armadura esteja despassivada.

Quando os poros do concreto estão saturados de água, a resistividade é a menor possível, porém o oxigênio encontra maior dificuldade para chegar até a armadura (vide Fig. 19c). Nessa situação, o

processo de corrosão está controlado pelo acesso de oxigênio, ou seja, controlado catodicamente (vide Fig. 18). A velocidade de corrosão resultante é baixa ou moderada, semelhante a que ocorre em estruturas de concreto armado situadas a certa profundidade do mar.

Quando os poros contêm pouquíssima umidade, a resistividade é muito elevada e o processo de corrosão é muito dificultado. Nesse caso, a velocidade de corrosão será baixa, ainda que o concreto se mostre carbonatado ou contaminado por cloretos (vide Fig. 19a).

As velocidades de corrosão máximas se dão em concretos com teores de umidade altos, porém sem saturar os poros. Nesse caso, o oxigênio chega facilmente à armadura e a resistividade é suficientemente baixa para permitir elevadas velocidades de corrosão (vide Fig. 19b).

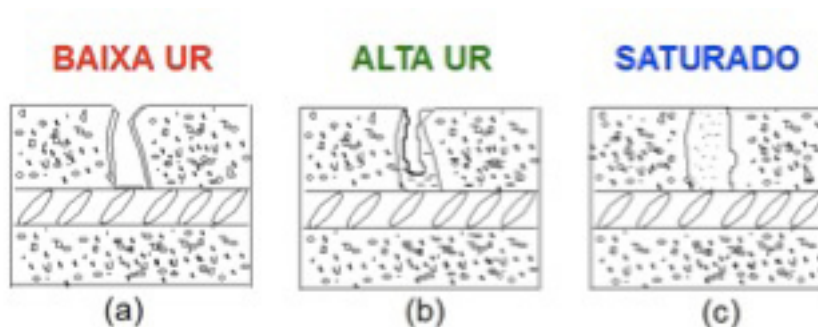


Figura 19. Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (IccET, 1988).

Cavalier & Vassie (1981), realizando uma série de medidas de resistividade pelo método dos quatro eletrodos em estruturas de pontes na Inglaterra sujeitas aos sais de degelo, perceberam que, em concretos com resistividade superior a 12.000 ohm.cm, a corrosão era dificilmente identificada, com resistividade entre 5.000 a 12.000 ohm.cm era provável a identificação da corrosão e com resistividade inferior a 5.000 ohm.cm a corrosão era sempre evidenciada, uma vez que as armaduras encontravam-se despassivadas pela ação dos cloretos oriundos do sal de degelo.

Devido ao caráter higroscópico dos sais, como, por

exemplo, o NaCl ou CaCl_2 , os concretos que os contêm em seus poros possuem maior capacidade de reter a umidade no seu interior (RASHEEDUZZAFAR *et al.*, 1985). No mesmo sentido, deve-se levar em consideração que o concreto absorve com maior facilidade a umidade do ambiente do que deixa escapar esta mesma quantidade de água (IccET, 1988). Esses fenômenos fazem com que o concreto tenha uma maior probabilidade de conter suficiente umidade em seus poros capaz de desenvolver o processo de corrosão, caso a armadura esteja despassivada.

8.2 Efeito da temperatura

O aumento da temperatura estimula a mobilidade das moléculas, favorecendo seu transporte através da microestrutura do concreto (GOÑI *et al.*, 1989). No mesmo sentido, quando a temperatura diminui, pode ocorrer condensação no concreto, ocasionando um aumento da umidade do material (HELENE, 1993).

Raphael & Shalon (1971) mostram que a corrosão aumenta duas vezes a cada aumento de 20°C. O efeito é ainda mais pronunciado a altas umidades relativas. Tuutti (1982) examinou os efeitos da temperatura a -20°C e os resultados sugerem que

a velocidade de corrosão é reduzida 10 vezes a cada redução de temperatura de 20°C abaixo de 0°C. Por outro lado, no que se refere à atividade das macropilhas em vigas de concreto contaminadas por cloretos (Castro, Andrade & Figueiredo, 2008) não encontraram influência na corrosão da área anódica quando a temperatura variou de 15 a 40°C, mesmo quando se empregou nos serviços de reparo revestimentos sobre a armadura compostos por material mais eletronegativo que o ferro, como por exemplo, o epóxi rico em zinco.

8.3 Formação de macrocélula de corrosão

As macrocélulas de corrosão são as pilhas de corrosão formadas entre duas áreas de caráter distinto e com relativa distância, onde uma é corroída e atua como ânodo e a outra se mantém passiva e atua como cátodo. Quando essa situação ocorre, o efeito da ação das micropilhas se soma à ação da macropilha, aumentando a velocidade de corrosão. Essa aceleração da corrosão vai depender

dos potenciais de corrosão do ânodo e do cátodo e da resistência ôhmica entre ambos (CASTRO, FIGUEIREDO, ANDRADE & ALONSO 2003).

Entre os fatores responsáveis pela formação de macrocélulas de corrosão podemos citar as heterogeneidades da fase metálica (anisotropia dos grãos cristalinos, impurezas na matriz metálica, regiões submetidas à tensão e à deformação

elástica, bordes de grãos etc.) e heterogeneidades do meio (aeração diferencial, concentrações salinas e pH diferenciados etc.).

No caso das estruturas de concreto armado,

Lewis & Copenhagen (1957), propuseram cinco tipos de células de corrosão, sobre as quais se comenta a seguir.

8.3.1 Diferença de concentração de sais (íons Cl⁻)

Em meios marinhos, ou próximos a ele, as pilhas oriundas da concentração diferencial de sais são as de maior incidência nas estruturas. A Fig. 20 mostra um exemplo típico onde os íons cloreto penetram pela parte superior de uma estrutura de concreto armado, atingindo inicialmente as

armaduras superiores que, por sua vez, estão conectadas através dos estribos às armaduras inferiores. Nesse caso as armaduras superiores sofrerão processo corrosivo, enquanto as inferiores permanecerão passivas enquanto os íons cloreto não atinjam a profundidade onde estão localizadas.

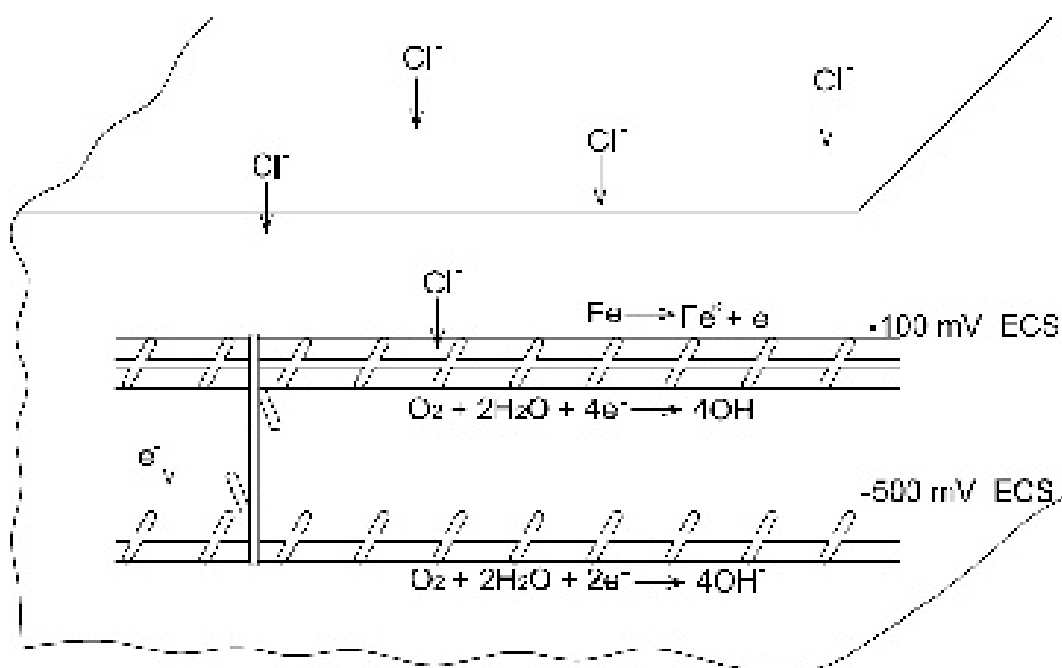


Figura 20. Funcionamento esquemático de uma macrocélula de corrosão formada devido à ação dos íons cloreto (*IccET, 1988*).

8.3.2 Diferença de pH

Os fatores responsáveis pela velocidade e profundidade de carbonatação, comentados no Item 6.1, são os responsáveis pela formação desse tipo de macrocélula de corrosão. Concretos com

características distintas permitem que algumas áreas sejam carbonatadas, enquanto outras permanecem com pH elevado.

8.3.3 Presença de fissuras

Através das fissuras, agentes agressivos como os íons Cl⁻ ou o CO₂ podem penetrar e romper a passividade da armadura. No caso de fissura transversal à armadura, a região próxima a fissura atuará, como ânodo, enquanto que as regiões

laterais atuarão como cátodo (vide Fig. 21a). No caso de fissura longitudinal sobre a armadura, a região adjacente à armadura atuará como ânodo e a região inferior da armadura como cátodo (vide Fig. 21b).

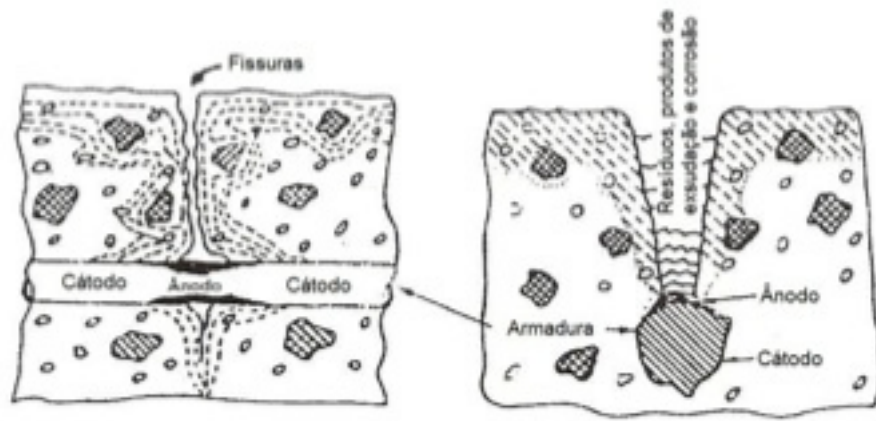


Figura 21. Modelos de formação de macrocélulas de corrosão devido a presença de fissura (IccET, 1988).

8.3.1 Aeração diferencial

Inicialmente, é importante salientar que somente a aeração diferencial não consegue iniciar o processo de corrosão, embora tenha influência na sua propagação.

Qualquer fator que leve à diminuição localizada de concentração de oxigênio, em relação às demais regiões da superfície da armadura, contribui para a formação de pilhas de aeração diferencial. Nesse caso a reação catódica tende a produzir-se nas áreas de maior acesso de oxigênio, enquanto que a anódica se instala nas regiões de menor concentração de oxigênio.

Estruturas com concretos de diferentes qualidades, estruturas enterradas em solos com

diferentes permeabilidades ou mesmo o acúmulo de produtos de corrosão e estruturas em frente ao mar, representam situações favoráveis ao aparecimento desse tipo de macrocélula de corrosão. No caso de estruturas reparadas, o uso de revestimentos para proteção da armadura ou de argamassas de reparo mais impermeáveis do que o concreto antigo, também poderiam favorecer a formação de pilhas de aeração diferencial. Por outro lado, *Lewis & Copenhagen (1957)*, baseados em trabalhos de outros autores, chegaram à conclusão que a ação das macrocélulas por aeração diferencial, em geral, são menos importantes na propagação da corrosão do que a ação de outros mecanismos.

8.3.5 Pilhas galvânicas

Essas macrocélulas são formadas quando as armaduras estão conectadas a outras estruturas metálicas, ou quando a armadura utilizada foi galvanizada. Nesses casos, o metal mais ativo atuará

como ânodo em relação ao outro mais nobre. O uso de revestimentos do tipo epóxi rico em zinco pode levar a formação dessas macrocélulas (*CASTRO, FIGUEIREDO, ANDRADE & ALONSO, 2003*).

8.4 Efeito da concentração de cloretos

A concentração de cloretos nas estruturas de concreto é um fator que deve ser levado em consideração, já que o aumento das concentrações de Cl^- além de diminuir a resistividade, devido à

maior condutividade proporcionada por estes íons, pode também provocar o aumento da velocidade de corrosão.

9. Corrosão da armadura versus vida útil da estrutura

Vida útil pode ser conceituada como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada, considerando

procedimentos de manutenção regular. A vida útil das estruturas de concreto, baseada na corrosão das armaduras, pode ser representada de forma

simplificada a partir do modelo proposto por *Tuutti (1982)*, mostrado na Fig. 5. Nesse modelo simplificado, pode-se distinguir as fases de iniciação e propagação do processo de corrosão. A fase de iniciação está controlada, principalmente, pela porosidade do concreto, pela concentração e velocidade de transporte do CO_2 e dos cloretos e pelas características do meio ambiente, conforme discutido no Item 6.5. Quando os agentes despassivadores atingem a superfície da armadura, dando início ao processo de corrosão, considera-se que a vida útil de projeto terminou, uma vez que as características do concreto e a espessura do cobrimento devem ser especificados e projetados de forma que impeçam a despassivação da armadura até o limite de tempo estabelecido no projeto (vide Fig. 22).

A fase de “propagação” é o período em que o processo de corrosão se desenvolve com maior ou menor velocidade, dependendo da resistividade do concreto, da presença de oxigênio e das

características do ambiente em termos de umidade e temperatura. Nessa fase de propagação, no momento em que aparecem manchas de corrosão na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento adjacentes à armadura, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento, tem-se o término da vida útil de serviço ou de utilização da estrutura (vide Fig. 22).

O período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura é denominado de vida útil total, a qual corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da secção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura/concreto.

A Fig. 22 apresenta graficamente os conceitos de vida útil anteriormente expostos. Nessa modelagem foi introduzido ainda o conceito de vida útil residual, que corresponde ao período de tempo que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado, nesse caso, a partir da data de uma vistoria específica.

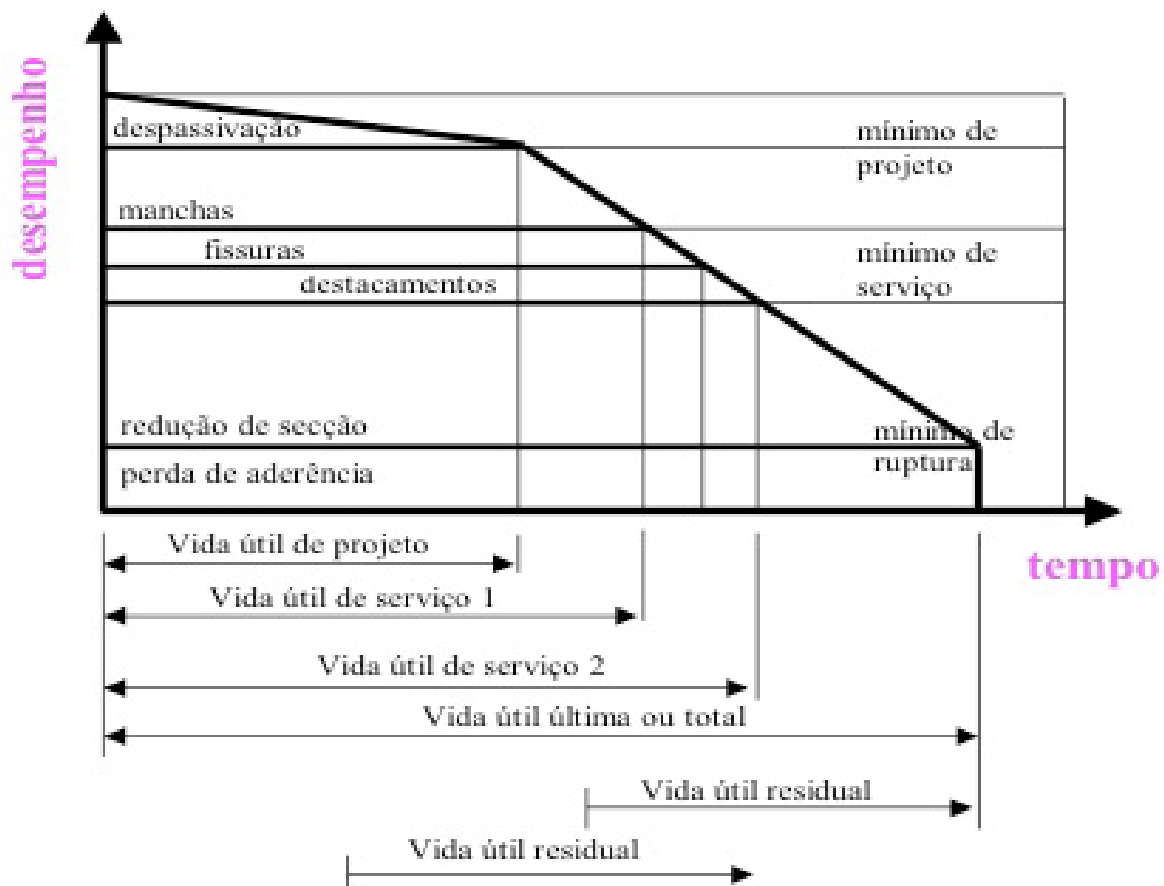


Figura 22. Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (HELENE, 1993).

10. Estratégia para diagnóstico da corrosão

A Fig. 23 apresenta uma metodologia bastante completa para atuar em casos gerais de aparecimento de manifestações patológicas nas edificações, mas que pode ser empregada nos casos de corrosão das armaduras.

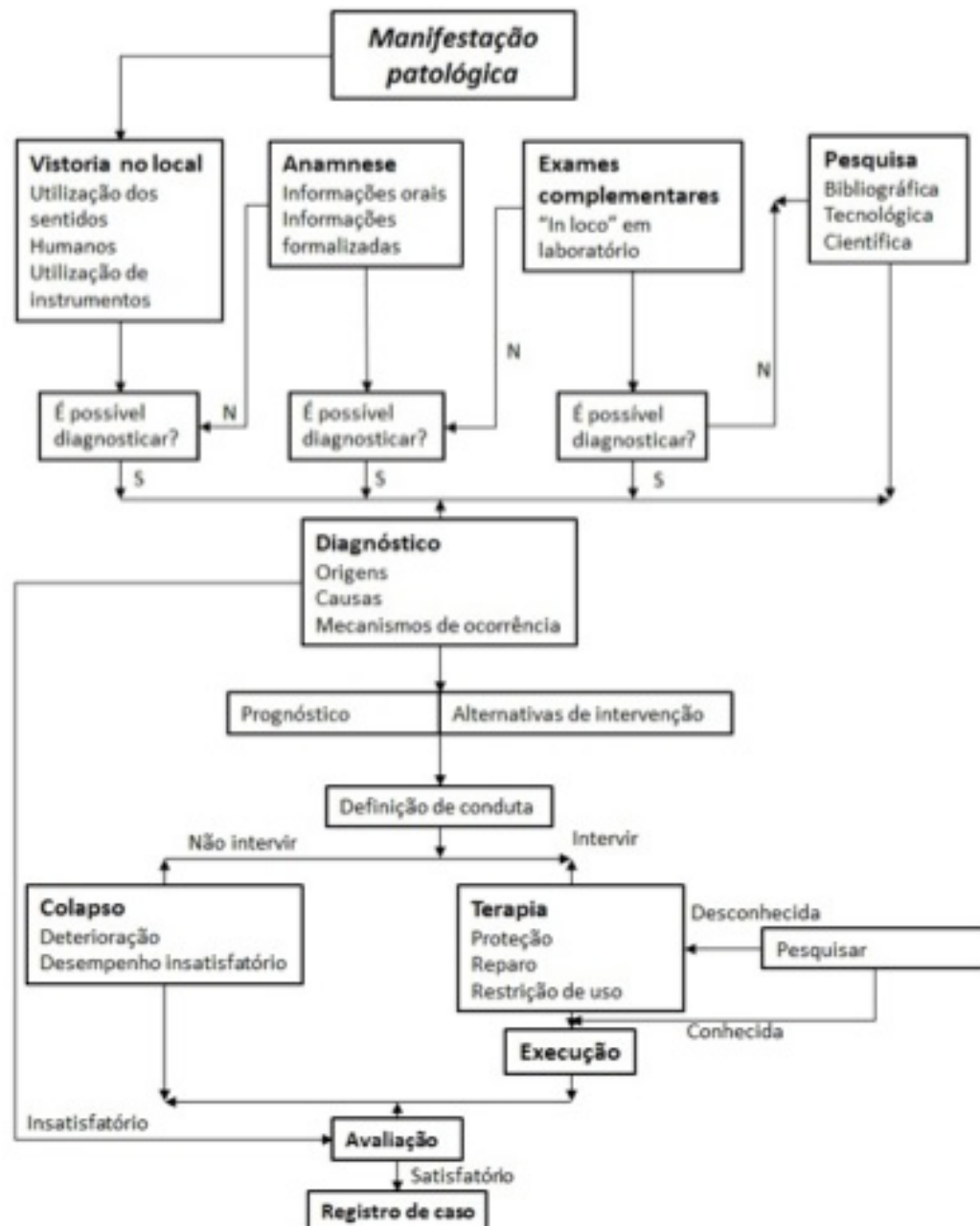


Figura 23. Fluxograma de atuação em casos de aparecimento de corrosão de armaduras. (LICHTENSTEIN, 1985).

O diagnóstico de um problema de corrosão, assim como de qualquer outra manifestação patológica, é o entendimento das origens, causas e mecanismos envolvidos na sua iniciação e propagação. Para obter-se o diagnóstico, dependendo da complexidade do caso, pode ser necessário passar por uma série de etapas que vai desde uma vistoria do local, passando

pela coleta de informações e avaliações in loco ou em laboratório, até a realização de pesquisas e contatos com especialistas. Uma vez que o caso tenha sido diagnosticado é possível fazer prognósticos da evolução do caso e estabelecer a terapia ou conduta mais adequada. Para que a terapia elegida seja executada, necessita-se conhecer a tecnologia de

intervenção e as características e usos dos materiais especificados. Como forma de criação de banco de

dados, bem como disseminação dos conhecimentos adquiridos, recomenda-se o registro do caso.

11. Métodos para proteção contra a corrosão

De forma geral, a corrosão das armaduras pode ser controlada pelos mecanismos de proteção por barreira, repassivação, proteção catódica ou por inibição (FIGUEIREDO, 1994). O mecanismo de proteção por barreira visa controlar o acesso de umidade e oxigênio até a armadura. Esse é o caso típico da aplicação de uma pintura de base epóxi sobre a armadura ou de outro material ou sistema de baixa permeabilidade. O sistema que atua pelo mecanismo da repassivação deve promover o restabelecimento do elevado pH ao redor da armadura. A proteção catódica está associada à

polarização da armadura por corrente impressa ou pelo uso de metal mais eletronegativo que o aço, de forma que o potencial da armadura fique na zona de imunidade mostrada na Fig. 1. Finalmente, o mecanismo de proteção por inibição é conseguido pelo uso de inibidores de corrosão anódicos, catódicos ou mistos, como, por exemplo, os nitritos de cálcio ou sódio e as aminas.

A Fig. 24 apresenta um resumo das técnicas e materiais que podem ser usados para a proteção de armaduras sujeitas à corrosão.

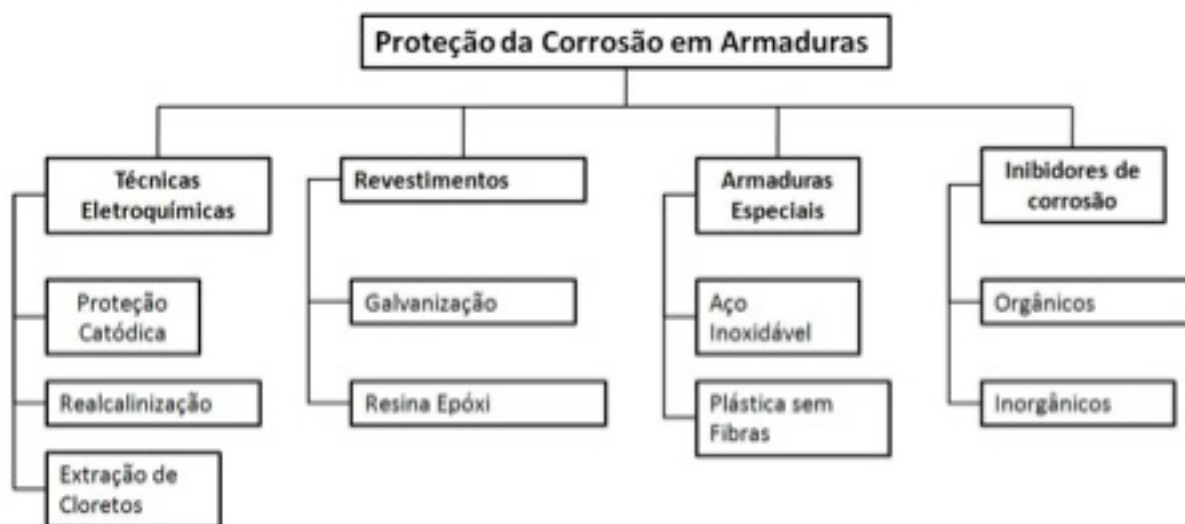


Figura 24. Técnicas e materiais usados para proteção das armaduras contra a corrosão.

12. Referências bibliográficas

- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLÓTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1047-1055, 2000.
- ALONSO, M. C.; ANGST, U.; SANCHEZ, M.; ANN, K. Y. Onset of chloride induced reinforcement corrosion. In: Kim, S. H. and Ann, K. Y. (Eds.). **Handbook of concrete durability**. Korea: Middleton Publishing Inc, 2010.
- ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. **British Corrosion Journal**, v. 21, n.1, p. 49-53, 1986.
- ICCET. INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Coord. Maria del Carmen Andrade Perdrix. Madrid: CSIC/IETec, 1988. 122 p.
- BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.
- BREIT, W.; SCHIESSL, P. Investigations on the threshold value of the critical chloride content. In: DURABILITY OF CONCRETE (Edited by V. M. Malhotra, 1997). **Proceedings...** Sydney: ACI, 1997. p. 363-378.
- CASTRO, P.; RINCON, O. T.; FIGUEIREDO, Enio José Pazini. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 529-537, 2001.
- CASTRO, P.; FIGUEIREDO, Enio José Pazini; ANDRADE, C.; ALONSO, C. The Macrocell Activity in Slightly Chloride Contaminated Concrete induced by Reinforcement Primers. **Corrosion** (Houston), USA, v. 59, n. 1, p. 535-546, 2003.
- CASTRO, P.; ANDRADE, C.; FIGUEIREDO, Enio José Pazini. Influence of temperature on the galvanic current induced by a localized repair when using primers to the reinforcement in slightly chloride contaminated concrete. **Materials and Structures**, v. 41, p. 351-361, 2008.
- CAVALIER, P. G.; VASSIE, P. R. Investigation and repair of reinforcement corrosion in a bridge deck. **Proc. Inst. Civ. Engrs.**, part 1, 70, p. 461 - 480, 1981.

- CEB. **Durability of concrete structures**. Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May 1983. CEB Bulletin D' Information n. 152, 1984.
- DURAR (Red Temática XV.B – Durabilidad de la Armadura – del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado**. Rio de Janeiro: CYTED, 1997. 208 p.
- FELIU, S. Principios de corrosión electroquímica y tipos de ataque. In: FERNÁNDEZ, J. A. G. (Ed.). **Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión**. Madrid: CSIC, p. 10 – 44, 1984.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para a proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - Contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo: USP, 1994, 437 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- FIGUEIREDO, Enio José Pazini. Carbonatação e cloretos. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2007, cap. 33
- GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, Great Britain, v. 39, n. 5, p. 1001-1013, 1997a.
- _____. Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP – CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE (1995: St-Rémy-lés-Chevreuse). **Proceedings ...** Paris:RILEM, p. 429 – 440, 1997b.
- GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. La corrosión en estructuras de hormigón armado - formas de prevenirla y evaluarla. In: **Teoría y practica de la lucha contra la corrosión**. Madrid: CSIC, p. 183 – 216, 1984.
- GOÑI, S.; MORAGUES, A.; ANDRADE, C. Influencia de la conductividad y fuerza iónica de soluciones sintéticas que simulan la fase acuosa del hormigón en el fenómeno de la corrosión de armaduras. **Materiales de construcción**, v. 39, n. 215, p. 19-28, 1989.
- GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 525-539, 1990.
- GOUDA, V. K. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: immersed in alkaline solutions. **British Corrosion Journal**, p. 198-203, 1970.
- GOUDA, V. K.; HALAKA, W. Y. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: embedded in concrete. **British Corrosion Journal**, p. 204-208, 1970.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos**. São Paulo: USP, 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- HANSSON, C. M.; SØRENSEN, B. The threshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion. In: Berke, N. S.; Chaker, V.; Whiting D. (Ed.). **Corrosion rates of steel in concrete (ASTM STP 1065)**. Philadelphia: ASTM, p. 3 – 16, 1990.
- HÄRDTL, R.; SCHIESSL, P.; WIENS, U. Limits of pozzolanic additions with respect to alkalinity and corrosion protection of reinforcement. In: DURABILITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 1994, Vienna. **Proceedings...** Vienna: RILEM, p. 189 – 193, 1994.
- HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in concrete: how does it occur? **Materials Protection**, p. 19-23, 1967.
- _____. A probability model of steel corrosion in concrete. **Materials Performance**, Houston, v. 37, n. 10, p. 64-68, 1998.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.
- _____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: USP, 231 p. . (Tese de Livre Docência), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HOPE, B. B.; IP, A. C. K. Chloride corrosion threshold in concrete. **ACI Materials Journal**, USA, July – August, p. 306-314, 1987.
- HUSSAIN, S. E., et. al. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 25, n. 7, p. 1543-155, 1995
- JAEGERMANN, C. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 4, p. 333-339, 1990.
- KAYYALI, O. A.; HAQUE, M. N. The Cl-/OH- ratio in chloride-contaminated concrete – a most important criterion. **Magazine of Concrete Research**, v. 47, n. 172, p. 235-242, 1995.
- LAMBERT, P.; PAGE, C. L.; VASSIE, P. R. W. Investigations of reinforcement corrosion - electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete. **Materials and Structures**, v. 24, p. 351 - 358, 1991.
- LEWIS, D. A.; COPENHAGEN, W. J. Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmospheres. **Corrosion**, v. 15, p. 382-388, 1959.
- LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das Construções: procedimentos para formulação de diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações**. São Paulo: EPUSP. Dissertação (Mestrado em Engenharia) .
- LONGUET, P.; BURGOEN, L. e ZELWER, A.. La Phase Liguide du Ciment Hydraté. **Revue Materials and Construction**, N5I676P, p. 35 42, 1973.
- MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 667 – 676, 2007.
- MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., J. C.; PADILHA Jr., M. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 427-435, 2010.
- MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of the PCA research and Development Laboratories**, p. 35 – 48, May 1968.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modelling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p. 363 – 373, 1991.
- PARROTT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Cement and Concrete Association: Building Research Establishment, 1987.
- PETTERSSON, K. **Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete**. Stockholm: CBI(report 2:92), 1992. 43 p.
- POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Brussels: CEBELCOR, 1974. 644 p.
- _____. **Lecciones de corrosión electroquímica**. 3 ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987, 387 p.
- POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- RAPHAEL, M.; SHALON, R. A study of the influence of climate on corrosion and reinforced concrete. In: **Proceedings of**

- RILEM Symposium on concrete and reinforced concrete in hot climates, p. 77-96, 1971.
- RASHEEDUZZAFAR; DAKHIL, F. H.; GAHTANI, A. S. Corrosion of reinforcement in concrete structures in the middle east. **Concrete International**, p. 48 – 55, September 1985.
- RASHEEDUZZAFAR et al. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 723 - 738, 1990.
- SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. **Cement and Concrete Research**, v.28, n.10, p. 1489-1503, 1998.
- SANDBERG, P. Factors affecting the chloride thresholds for uncracked reinforced concrete exposed in a marine environment. Part I: field exposure tests of reinforced concrete. **Concrete Science and Engineering**, v. 1, p. 92 - 98, 1999
- SCHIESSL, P.; BAKKER, R. Measures of protection. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 70-78, 1988.
- SCHRÖDER, F.; SMOLCZYK, H. G. Carbonation and protection against steel corrosion. In.: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5th., 1968, Tokyo. **Proceedings ...** Tokyo:1969. 4v., v.4, p.188-198. (Part IV).
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. United Kingdom: Thomas Telford, 1997.
- THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J.D.; HAYNES, C. A. Chloride diffusion and reinforcement corrosion in marine exposed concretes containing pulverized-fuel ash. In: CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, 1990, Warwickshire (Edited by Page, Treadaway and Bamforth) **Proceedings...** Warwickshire: SCI, p. 198-212, 1990.
- THOMAS, M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 26, n. 4, p.513-519, 1996.
- TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 56-69, 1988.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 468 p.
- VIEIRA, R. M.; MARQUES, V. C.; PADILHA Jr, M.; MEIRA, G. R. Estudo da carbonatação natural de concretos em ambiente urbano. **Concreto e Construções**, São Paulo, v. 58, p. 40-45, 2010.
- VENUAT, M.; ALEXANDRE, J. De la carbonatacion du béton. França. **CERILH**. Publication N° 195, 1969, 30p.

Boletins Técnicos Alconpat

BT 01 – Bernardo Tutikian e Marcelo Pacheco

Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil

Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil
Civil Construction Assessment

Boletim técnico 02 – Raúl Husni

Reparación y Refuerzo

Reparo e Reforço
Repair and Strengthening

Boletim técnico 03 – Antônio Carmona Filho e Thomas Carmona

Grietas en Estructuras de Hormigón

Fissuração nas Estruturas de Concreto
Cracking in Concrete Structures

BT 04 – Fernando Branco, Pedro Paulo e Mário Garrido

Vida Útil en la Construcción Civil

Vida Útil na Construção Civil
Service Life in Civil Construction

BT 05 – Gilberto Nery

Monitoreo en la Construcción Civil

Monitoração na Construção Civil
Monitoring in Civil Construction

BT 06 – Enio Pazini Figueiredo e Gibson Meira

Corrosión de armadura de estructuras de hormigón

Corrosão das armaduras das estruturas de concreto
Reinforcement corrosion of concrete structures

BT 07 – Alicia Mimbacas

Sostenibilidad en la Construcción

Sustentabilidade na Construção
Construction Sustainability

BT 08 – Paulo Helene e Salomon Levy

Curado del Hormigón

Cura do Concreto
Concrete Curing

BT 09 – Paulo Helene e Jéssika Pacheco

Controle da Resistência do Concreto

Control de la Resistencia del Hormigón
Conformity control for compressive strength

BT 10 – Hênio Tinoco

Responsabilidad Social en Construcción

Responsabilidade Social na Construção Civil
Social Responsibility in Civil Construction

Patrocínio de: