A SEGURANÇA DAS OBRAS NO BRASIL DISCUTIDA SOB DIFERENTES PONTOS DE VISTA. TRAGA O SEU.

1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

21 a 23 de maio de 2014 - Foz do Iguaçu - PR

FUNDAMENTOS DA AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE CORROSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO INSERIDAS EM AMBIENTES DE ALTA AGRESSIVIDADE

BOLINA,F.[1];SCHNEIDER, D.[2];TUTIKIAN, B.[3]

[1]Unisinos, Mestrando PPGEC, Especialista em Patologia nas Obras Civis, e-mail: fabriciobolina@gmail.com
[2]Unisinos, Mestrando PPGEC, Especialista em Patologia nas Obras Civis, e-mail: engenheiro.ds@gmail.com
[3]Unisinos, Professor e coordenador do curso de Engenharia Civil, Pós doutor, e-mail: bftutikian@unisinos.br

RESUMO

No que tange estudos voltados à durabilidade das estruturas de concreto, a corrosão das armaduras provém como um mecanismo de considerável relevância. Contribui para o advento deste fenômeno o microclima de inserção da peça. Dentre estes, as regiões marítimas são admitidas como de alta agressividade, devido ao ataque por íons cloretos. Inúmeras teorias tentam dilucidar os mecanismos de penetração e transporte destes íons ao interior do concreto, dentre elas a teoria da difusão, fundamentada na segunda Lei de Fick. Esta teoria é utilizada, inclusive, na análise da probabilidade de corrosão das estruturas costeiras. O intento deste trabalho é levantar os fatores intervenientes nesta análise probabilística de deterioração do concreto por íons cloreto. O trabalho foi dividido em quatro tópicos: (1º) o mecanismo de corrosão, (2º) a penetração dos íons cloreto no concreto, (3º) fatores externos e (4º) fatores internos. No primeiro item é revisada a teoria da corrosão metálica. No segundo, é explanada a fundamentação teórica do transporte de íons nos poros. No terceiro, as condições ambientais que aceleram e contribuem no referido processo. No último item, os fatores concernentes às propriedades intrínsecas do concreto que influenciam nesta análise. Como conclusão, entende-se que são inúmeros os elementos que intervém neste mecanismo e que as recomendações normativas são muitos simplistas nesta avaliação.

Palavras chave: Patologia, Estruturas, Durabilidade, Corrosão metálica, Cloretos.

ABSTRACT

Regarding studies focused on durability and mechanisms of deterioration of concrete structures, corrosion of reinforcement comes as a mechanism that has a considerable relevance. Is contributes to the microclimate structures insertion. Among these, the maritime regions are admitted as high aggressiveness due to attack by chloride ions. Numerous theories attempt to elucidate the penetration mechanisms and transport of ions inside the concrete, among them the diffusion theory, based on the second Fick's law. This theory is used to analysis of the probability of corrosion of reinforced concrete structures in coastal regions. The intent of this work is therefore to raise the factors involved in this probabilistic analysis of concrete deterioration by chloride ions. This work was divided into four topics: (1) the corrosion mechanism, (2) the penetration of chloride ions in concrete, (3) external factors and (4) internal factors. Inthe first item, we reviewed the theory of metallic corrosion. In the second, it is explained the theoretical basis for the ions transport in the pores. In the third, the environmental conditions that accelerate that process. In the last item, we related the concrete intrinsic properties that influence this analysis. Like conclusion, it is understood that there are numerous elements that intervene in this mechanism and that the regulation recommendations in this review are very simplistic

Keywords: Pathology, Structures, Durability, Metallic corrosion, Chlorides.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um mecanismo de deterioração e transformação das barras de aço de uma estrutura de concreto armado, produzindo alterações químicas e eletroquímicas, físicas e mecânicas deste composto. O concreto, por sua vez, proporciona uma proteção física (cobrimento da armadura) e química (alcalinidade) às barras, preservando-as contra o advento de mecanismos que induzam tal fenômeno eletroquímico.

Dentre as regiões de alta severidade na qual as estruturas de concreto podem ser submetidas, destaca-se a marítima. Segundo Bolina *et al.* (2013), a agressividade deste meio provém dos cloretos oriundos da névoa salina. Estes íons Cl^- são capazes de ingressar nos poros do concreto e produzir a despassivação das armaduras, sem proporcionar qualquer alteração química ou física ao cimento Portland hidratado.

Dentre os diversos mecanismos de transporte dos íons cloreto ao interior massa de concreto, destaca-se o fenômeno da difusão, que ocorre de forma mais significativa nos elementos suficientemente compactos e sem fissuras. Segundo GjØrf (2009), trata-se de um mecanismo de penetração e transporte de íons altamente complexo, com diversas variáveis à serem compreendidas.Uma das teorias mais aceitas para estimar a potencialidade ou probabilidade de corrosão das estruturas de concreto armado (submetidas a este mecanismo de ingresso e transporte de íons por difusão) é a segunda lei de Fick, que produz resultados satisfatórios na caracterização do problema.

Fundamentado nesta teoria, o objetivo deste trabalho é elaborar uma análise dos diversos fatores intervenientes na penetração e difusão dos íons cloreto ao interior da massa de concreto e, assim, caracterizar, sob diferentes variáveis, a potencialidade ou probabilidade de corrosão das estruturas submetidas a este meio ambiente marinho.

Para tanto, o estudo foi dividido em quatro partes: (1º) o mecanismo da corrosão, (2º) a penetração dos íons cloretos, (3º) fatores externos e (4º) fatores internos. No primeiro item, é apresentado o fundamento do processo de corrosão metálica. No segundo, são apresentadas as formulações matemáticas que norteiam a análise da probabilidade de corrosão das estruturas por ação de íons cloreto. No terceiro item, evidenciam-se os fatores ambientais influentes nesta determinação e, no último, as circunstâncias, condições e características do concreto que incrementam a probabilidade de corrosão.

Este trabalho busca, assim, evidenciar aos engenheiros as fundamentações teóricas suficientes para comparar, ainda na fase de projeto, as soluções técnicas disponíveis, intentando obter a máxima durabilidade para uma determinada estrutura de concreto inserida em região litorânea.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A durabilidade de uma estrutura de concreto armado está relacionada com a capacidade desta em manter suas características estruturais e funcionais durante a sua vida útil estimada. Diante desta asserção, é possível deduzir que a durabilidade do sistema não depende apenas da durabilidade do concreto, mas também de outras variáveis (BOLINA *et al.*, 2013). No território brasileiro, a corrosão das armaduras é responsável por cerca de 20% de todas as patologias em estruturas de concreto (HELENE, 1992).

A análise do potencial de corrosão dos constituintes metálicos das estruturas submetidas a determinado ambiente são, segundo Zhang *et al.* (2009), parâmetros adotados há mais de três décadas na estimativa da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado.

Segundo Sadowski (2013), a probabilidade de corrosão das estruturas de concreto depende, essencialmente, da condutividade iônica do concreto, da umidade, da temperatura e da qualidade do concreto de cobrimento.

Conforme relata Romano (2009), as estruturas de concreto armado insertes em regiões marítimas são fortemente atacadas por agentes agressivos, sendo os cloretos os causadores dos maiores danos quando atingem a níveis críticos, afetando de forma significativa a vida útil do concreto.

Apesar de suas limitações, a segunda lei de Fick da difusão fornece uma maneira útil, realista e de relativa precisão para analisar e estimar a durabilidade do concreto frente a estas agressões químicas, mantidas as mesmas condições de exposição (KEPLER *et al.,* 2000).

Conforme observa Stanishet al. (1997), o mecanismo de penetração dos íons cloreto no concreto deve ser conhecido e identificado. Somente assim, segundo o autor, será possível projetar uma estrutura com a devida qualidade, possibilitando, então, o controle deste processo.

Destarte, o fim da vida útil de uma estrutura de concreto armado submetida a este ambiente é admitida, pela norma Norueguesa NS-EM 206-1 citada por GjØrf (2009), por exemplo, no período de tempo em que houver 10% de probabilidade de início de corrosão das armaduras nele embebidas. Provém, portanto, interessante realizar o estudo da potencialidade de corrosão de determinada peça, objetivando controlar o seu desempenho no tempo.

3. O MECANISMO DA CORROSÃO

Corrosão é, conceitualmente, a iteração destrutiva de um metal com o meio ambiente, promovendo a sua dissolução em íons metálicos por mecanismos eletroquímicos. Este fenômeno eletroquímico é fundamentado no desencadeamento de reações de oxidação (região anódica) e reações de redução (regiões catódicas).

Nas regiões anódicas, o metal é dissolvido e transferido para a solução como íons Fe^{2+}, liberando, também, elétrons. Estes elétrons gerados, deslocando-se pelo metal até as áreas catódicas, são combinados com o oxigênio dissolvido na solução e promovem a formação de íons hidroxila OH^-.

Estes íons hidroxila são conduzidos ao encontro dos íons Fe^{2+} inicialmente formado, produzindo, então, um hidróxido metálico ($Fe(OH)_2$) que se deposita sobre a superfície do metal. Este processo é ilustrado na Figura 1~~Figura 1~~.

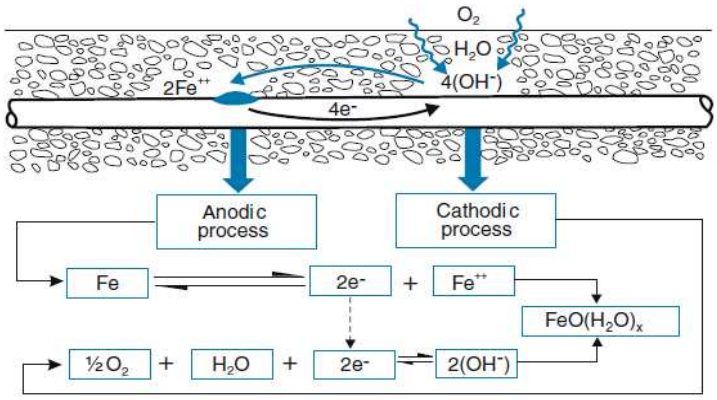

Figura 1 - Mecanismo de corrosão eletroquímica (CCAA, 2009)

Este hidróxido metálico não é estável e, com a renovação da água e oxigênio, oxida-se, formando $Fe(OH)_3$. Este composto, comumente descrito na bibliografia por $FeOOH+H_2O.FeOOH$, segundo Pannoni (2009), é a ferrugem comum, que todos conhecemos, de cor avermelhada ou amarronzada

Nas estruturas de concreto armado, o concreto possui papel fundamental na proteção das barras metálicas à corrosão. Primeiro, porque promove uma proteção física. Segundo, porque promove uma proteção química. Quanto a esta última, a proteção referida é fundamentada na alta alcalinidade dos poros do concreto, devido ao hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento.

Segundo propôs Tuutti (1982), a vida útil do concreto armado é dividida em duas etapas. A primeira, de iniciação, é o intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem no concreto até atingir as armaduras. A segunda, de propagação, iniciada após a despassivação do aço, é o momento em que o processo corrosivo se instala e os produtos de corrosão são, então, gerados. As etapas referenciadas são apresentadas na Figura 2~~Figura 2~~.

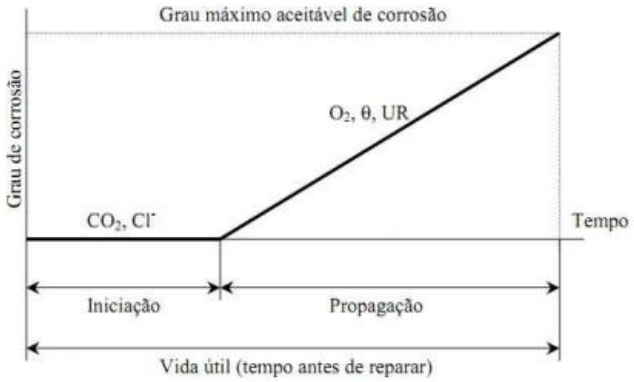

Figura 2 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (TUUTTI, 1982)

Do exposto, observa-se que nas estruturas de concreto expostas a regiões marinhas, a vida útil da estrutura é principalmente afetada na etapa de iniciação, onde o íon cloreto penetra no concreto, despassiva a armadura e, somente então, deflagra os mecanismos de corrosão metálica desta (propagação). Nos itens subsequentes deste trabalho será, então, elucidado o mecanismo de penetração e transporte destes íons no interior da massa de concreto.

4. A PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO NO CONCRETO

O transporte dos íons cloreto do meio externo para o interior de uma estrutura de concreto é um processo complexo, que envolve mecanismos de transporte regidos pelas teorias da difusão, sucção capilar, permeabilidade e fluxo convectivo. O mecanismo de transporte preponderante, no entanto, dependerá do tipo de exposição na qual a peça será submetida: se submersa, com variação de marés, spray marinho ou sobre a costa.

Estes diferentes mecanismos de transporte de íons cloreto ao interior da massa de concreto obedecem a diferentes leis de propagação iônica. Contudo, a segunda lei de Fick (1), utilizada para equalizar os mecanismos de difusão de íons em materiais sólidos semi-infinitos, é comumente aplicada para reger a taxa de penetração de cloretos no concreto, independente do mecanismo de transporte existente. Trata-se de um valor aparente, portanto.

$$C(x,t) = C_{sup}.\left[1 - \text{erf}.\left(\frac{x}{2.\sqrt{D(t).t}}\right)\right] \quad (1)$$

Na equação supracitada, C(x,t) é a concentração de cloretos na profundidade x após o tempo t, Csup é a concentração de cloretos -admitida como constante- na superfície do concreto, D é o coeficiente de difusão do concreto e erf é a função erro de Gauss.

Conceitualmente, difusão é o deslocamento de íons livres na solução dos poros, resultante da capacidade de um líquido fluir de regiões de alta concentração para regiões de menor concentração da substância difusora. O coeficiente difusão D dos íons cloreto no concreto, no tempo t, é evidenciado conforme (2).

$$D(t) = \frac{D_o}{1-\alpha}.\left[\left(1+\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha}\right].\left(\frac{t_o}{t}\right).k_e \quad (2)$$

Nesta equação, D_o é o coeficiente de difusão após o tempo de referência t_o, e t' é o período de tempo no qual o concreto foi submetido ao ataque por cloretos. O parâmetro α representa o tempo de dependência do coeficiente de difusão (fator tempo, detalhado nos próximos itens), enquanto k_e considera o efeito da temperatura nesta determinação, evidenciado em (3).

$$k_e = \exp\left[b_e.\left(0{,}00341 - \frac{1}{T-273}\right)\right] \quad (3)$$

Onde b_e é o parâmetro de regressão, T a temperatura e exp a função exponencial.

Apesar de possuir algumas limitações, a segunda lei de Fick fornece uma maneira útil e relativamente aceitável para determinar a durabilidade das estruturas de concreto em ambientes marinhos (KEPLER *et al*., 2000), sendo utilizada para elementos instalados tanto na atmosfera quanto submersos.

O critério para determinação da potencialidade de corrosão é, finalmente, determinada pela comparação apresentada em (4).

$$C(x) = C_{CCR} \quad (4)$$

Sendo C(x) a concentração de cloretos supracitada, medida na espessura x do cobrimento do concreto, e C_{CCR} a concentração de cloreto crítica, necessária par o início da agressão à armadura.

Nos itens subsequentes serão analisados, individualmente, os principais parâmetros intervenientes na estimativa do potencial de difusão dos íons cloretos ao interior da massa de um determinado concreto, regidos pela segunda lei de Fick.

5. FATORES EXTERNOS

A agressividade do meio ambiente produz consequências físicas e químicas nocivas ao concreto, deteriorando-o e podendo, em última instância, deflagrar a corrosão das armaduras constituintes.

As principais regulamentações mundiais de projeto de estruturas de concreto, entre elas a ABNT NBR 6118: 2007, estabelecem uma divisão dos diferentes ambientes na qual uma estrutura poderá ser construída. Esta divisão, de caráter classificatório, é, geralmente, apresentada em: (a) meio rural, (b) meio urbano, (c) meio industrial e (d) regiões marítimas, sendo a primeira a mais branda e, a última, a mais agressiva.

Contudo, ressalta Kogler (2012), esta divisão é, inevitavelmente, genérica. Segundo o autor, algumas estruturas, não necessariamente, estarão inseridas ou enquadradas em alguma destas

sub-regiões. Fatores como a direção do sol, do vento e a geometria da peça, não considerados na análise do microclima, influenciam igualmente no grau de ataque à peça.

A seguir serão explanados, portanto, fatores que potencializam o ataque às estruturas inseridas em regiões marítimas, interpretadas como regiões de alta agressividade ambiental. Os fatores evidenciados são: (a) carga de cloretos na superfície e (b) temperatura. Estes fatores são essenciais para análise da difusão dos íons pela segunda lei de Fick.

5.1 Carga de cloretos na superfície (C_{sup})

Nas regiões litorâneas, a agressividade do meio está diretamente atrelada ao aerossol marinho. O impacto do vento com a superfície marítima origina a formação de microbolhas que explodem, originando gotículas que dão origem ao aerossol. Ventos com velocidades superiores a 10m/s já potencializam a origem deste fenômeno.

Nestas regiões, os níveis de sal no ar reduzem drasticamente na medida em que se afasta da costa. Segundo Kogler (2012), alguns estudos tem evidenciado que estes sais podem ser transportados no ar por vários quilômetros da costa marítima, estando este valor diretamente atrelado a direção e velocidade do vento incidente.

Estudos já foram realizados com o intuito de determinar a relação entre a deposição de cloretos e o afastamento do mar. Segundo Meira e Padaratz (2002), as estruturas localizadas nos primeiros 200m de distância do mar são as mais agredidas pela névoa marinha, ocorrendo redução significativa no primeiro quilômetro de distância. Segundo Nunes *et al.* (2006), esta região crítica situa-se nos primeiros 160m, com redução significativa a partir dos 630m. Já para Romano (2009), somente a partir de 890m é que ocorre uma redução considerável destes íons.

A carga de cloretos junto a superfície de determinada estrutura de concreto varia, ainda, em função da sua altura acima do nível do mar. Entretanto, mantida as mesmas condições de exposição e localização, GjØrf (2009) relata que a concentração destes íons pode ser acumulada de diferentes formas sobre uma mesma estrutura. As partes que contenham maior incidência de vento possuem um menor potencial de agressão do que as partes mais protegidas da estrutura, pois, segundo o autor, há uma maior exposição à chuva e os íons contidos nesta superfície tendem a ser lavados.

Para uma estrutura de concreto inserida em determinado meio potencialmente agressivo, GjØrf (2009) salienta que a variação da concentração de íons cloretos provenientes da superfície externa para as camadas internas das estruturas é ilustrada através da Figura 3~~Figura 3~~.

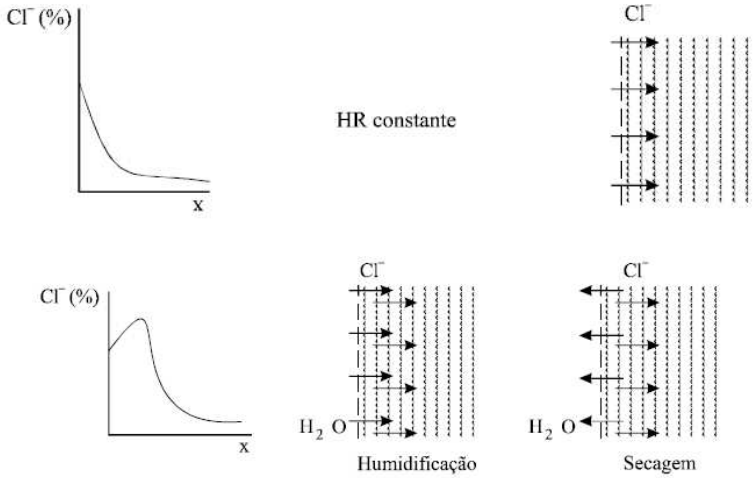

Figura 3 - Penetração de cloretos em ambientes aéreos e em ambientes submetidos a ciclos de molhagem e secagem(GJØRF, 2009)

Estabelecida uma análise de regressão baseadas na segunda lei de Fick, observa-se que a concentração de cloretos na superfície (C_{sup}) pode ser menor do que a máxima concentração de cloretos observada nas camadas mais internas do concreto (C_{max}) devido aos fenômenos ambientais incidentes. Ademais, a qualidade do concreto e a forma geométrica da estrutura afetam, igualmente, a referida acumulação de cloretos na superfície.

5.2 Temperatura

O aumento da temperatura do ambiente na qual uma estrutura é exposta contribui na difusão dos cloretos no concreto, devido ao aumento da mobilidade iônica proporcionado por temperaturas elevadas. Conforme relata Østvik (2004), em altas temperaturas, a probabilidade de duas moléculas colidirem é alta. Esta colisão resulta em uma energia cinética, que promove uma energia de ativação (*activationenergy*) da reação.

Segundo Cascudo (1997), o aumento da temperatura aumenta o teor de cloretos livres na água dos poros. Admite-se, ademais, que um aumento de 10ºC na temperatura dobre a velocidade de reação. Este fato explica a existência de mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que temperadas.

Sabe-se que, além dos íons cloreto, a existência de oxigênio é um dos fatores essenciais para a ocorrência da corrosão. No que cerne a difusão do oxigênio no concreto, esta é incrementada com o aumento da temperatura. Em contrapartida, a solubilidade deste gás decresce significativamente com o aumento da temperatura (FUNAHISHI e YOUNG; 1994). Desta forma, há um equilíbrio do efeito da temperatura na propagação das moléculas de oxigênio ao interior do concreto.

No que tange a difusão de oxigênio para temperaturas abaixo de 0ºC, tal como ocorre nos países nórdicos, não se possui, ainda, nenhuma conclusão congruente apesentada pela bibliografia, tal como salienta Østvik (2004),

A umidade relativa do ar, embora não diretamente considerada na segunda lei de Fick exerce, contudo, considerável influência na resistividade do concreto, ou seja, na condutividade iônica deste, estando esta diretamente atrelada à temperatura do meio. Segundo Sadowski (2013), para cada incremento de 1°C na temperatura, a umidade relativa do ar aumenta 3%.

6. FATORES INTERNOS

Neste item são explanados os fatores internos, ou seja, relativos à constituição do concreto, que influem na determinação da probabilidade de corrosão das estruturas de concreto armado. Os fatores analisados são: (a) coeficiente de difusão dos íons cloreto, (b) fator tempo, (c) quantidade crítica de cloretos e (d) cobrimento nominal das armaduras. Estes fatores são essenciais para análise da difusão dos íons pela segunda lei de Fick.

6.1 Coeficiente de difusão dos íons cloreto

O coeficiente de difusão dos íons no concreto é a medida da resistência do concreto à penetração de cloretos. O valor do coeficiente de difusão, seguido da qualidade do concreto e magnitude da espessura do cobrimento nominal das armaduras, são elementos que indicam a resistência ao ingresso de cloretos.

A difusão dos íons cloreto geralmente está associada a poro-estrutura do concreto. Já a taxa de ingresso dos íons cloreto ao interior do concreto é afetada pelos materiais e prática utilizada na produção deste, bem como pela sua idade. Quanto à permeabilidade do concreto, esta se relaciona diretamente com o fator água cimento e o grau de hidratação deste.

Contudo, GjØrf (2009) relata que a redução do relação água/cimento de 0,45 para 0,35 em um cimento Portland puro acarreta na redução da difusão dos íons cloretos num fator de aproximadamente 2, conquanto que substituindo o cimento Portland comum por escoria de alto forno, é possível alcançar fatores redutores da ordem de 50. Já Romano (2009), por exemplo, não observou influência nas taxas de penetração de cloretos entre os cimentos CP V-ARI e CP IV-RS, embora o primeiro tenha se apresentado com uma concentração superficial superior de cloretos do que os últimos.

Para concretos com relação água/cimento de 0,65, independente do posicionamento em relação aos ventos predominantes, Romano (2009) observou que eles apresentaram baixa concentração superficial de cloretos. O ator justifica isto devido, essencialmente, ao efeito de lavagem das chuvas que, em conjunto com o maior diâmetro dos capilares, provoca uma menor ascensão capilar ao interior do concreto.

Para os materiais porosos, a equação que expressa a relação entre o coeficiente de difusão dos íons e a resistividade elétrica do concreto é dado, de forma geral, pela equação (5) (ATKINS & DE PAULA, 2006).

$$D_i = \frac{R.T}{Z^2.F^2} \cdot \frac{t_i}{\gamma_i.c_i.\rho} \quad (5)$$

Onde R é a constante do gás, T a temperatura absoluta, Z a valência iônica, F a constante de Faraday, ti número de transferência do ion; ɣ o coeficiente de atividade do ion, c a concentração do ion nos poros da água e ρ a resistividade elétrica. Como todos estes fatores físicos são constantes, a equação pode ser simplificada conforme a equação (6).

$$D = k.\frac{1}{\rho} \quad (6)$$

Sendo D a difusão do íon no concreto, k a referida constante e ρ a resistividade do concreto. Dado que a resistividade do concreto é medida de forma simples e rápida, admite-se, então, que a difusão do íon cloreto pode ser interpretada através da leitura da resistividade elétrica do concreto.

6.2 Fator tempo α

O fator tempo α é um importante parâmetro e geralmente reflete como a difusão de cloretos, em um determinado concreto, inserido em um determinado ambiente, se desenvolve ao longo do tempo.

Trata-se de um coeficiente que pode ser determinado somente em laboratório e é específico para um material. Contudo, dada tal complexidade, valores empíricos dos fatores α para determinados tipos de concreto, inseridos em determinados tipo de ambientes, são normalmente utilizados para caracterizar parâmetros de análise da durabilidade das estruturas.

Segundo GjØrf (2009), experiências de campo tem sido realizadas em estruturas de concreto similares, inseridas em ambientes também similares, objetivando determinar a base do valor de α adequado. Baseados nestas informações foram produzidas tabelas práticas de determinação deste fator. As tabelas mostram alguns valores de α observados em vários tipos de concreto, inseridos em zonas de marítimas e zonas de respingos de maré. Na Tabela 1~~Tabela 1~~, evidencia-se que adições de cinza volante e escória de alto forno reduzem a difusão de cloretos no concreto.

Form
Form
Portug
gramá

Tabela 1 - Guia geral para estimativa dos valores de para concretos submetidos em ambientes marinhos (GJØRF, 2009)

Tipos de cimento	valor α	
	Valor médio	Desvio padrão
Portland	0,4	0,08
Escória de Alto Forno	0,5	0,1
Cinza volante	0,6	0,12

6.3 Quantidade crítica de cloretos

Devido aos diversos fatores que influenciam neste fenômeno, tais como a qualidade do concreto e a umidade relativa do meio, a quantidade crítica da concentração de cloretos nos poros do concreto para romper a camada passivadora do aço varia numa ampla faixa de limites, conforme Figura 4~~Figura 4~~.

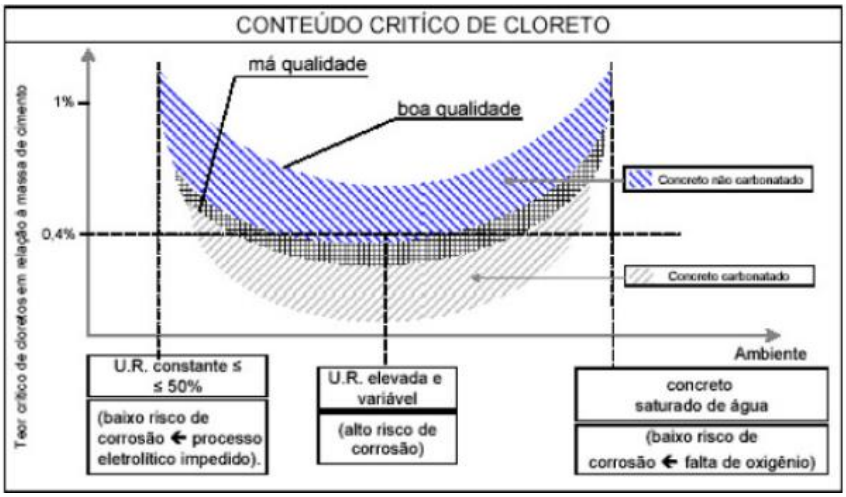

Figura 4 – Relação qualitativa entre a quantidade crítica de cloretos, as condições ambientais e a qualidade do concreto (CEB-FIP, 1992 *apud* FIGUEIREDO, 2005)

O limite crítico de concentração de cloretos resulta do equilíbrio existente entre as três formas de cloretos no concreto: cloretos livres, adsorvidos e quimicamente ligados. São os cloretos livres os que possuem o potencial de agredir as armaduras.

A integridade passiva do filme óxido do aço é controlada, segundo Kepler (2000), por dois processos: a estabilização do filme pelos íons OH^- e o rompimento deste filme por íons Cl^-.

O limiar da concentração de íons cloreto para propiciar agressão ao aço é dependente, portanto, da relação entre OH^- e Cl^-. Contudo, dada à complexidade desta determinação, as especificações não apresentam o limite do teor de cloretos pela relação entre Cl^-/OH^-, e sim pelo peso total de íons cloreto, em massa, no concreto

As tabelas e recomendações fornecidas pelas regulamentações internacionais são baseadas, portanto, em informações empíricas da quantidade de cloretos que provocam um certo risco do desenvolvimento da corrosão (GJØRF, 2009). Alguns limites estabelecidos por diferentes referências normativas mundiais são apresentadas na Tabela 2~~Tabela 2~~.

Tabela 2 - Teor limite de cloreto para diversas normas (FIGUEIREDO, 2005)

Norma	País	Ano	Teor de Cloretos Recomendado
ACI 318-21	USA	2001	≤0,15% em relação à massa de cimento, em ambientes com cloretos;
			≤0,3% em relação à massa de cimento, em ambientes normais;
			≤1% em relação à massa de cimento, em ambiente seco;
			≤0,06% em relação à massa de cimento (concreto protendido);
CEB	Europa	1991	≤0,40% em relação à massa de cimento;
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	≤0,06 kg/m³ de concreto

Dentre as recomendações normativas, mais recentemente, o meio científico brasileiro admite o valor de referência de 0,4% para o teor limite de cloreto em relação à massa de cimento em estruturas de concreto, estabelecido na ABNT NBR 12655: 2006.

6.4 Cobrimento nominal do concreto

Nas regulamentações normativas correntes, uma espessura mínima de cobrimento nominal das armaduras é recomendada para cada tipo de ambiente de inserção da estrutura de concreto. Esta espessura objetiva-se na proteção física e mecânicas das armaduras, preservando-a contra ataques externos.

Da segunda lei de Fick supracitada deduz-se que, para uma determinada taxa de difusão dos íons cloretos ao interior da massa de concreto, tanto maior será a durabilidade de uma estrutura quanto maior a espessura e a qualidade do concreto de cobrimento admitido.

7. CONCLUSÃO

A análise dos fatores intervenientes na durabilidade das estruturas de concreto, inseridas em ambientes marinhos, deve ser empregada com o intuito de comparar soluções técnicas voltadas à produção de estruturas mais duráveis.

O ingresso dos íons cloreto ao interior da massa de concreto se desenvolve através diferentes mecanismos de transporte, cada qual justificado por uma lei particular. Além de complexas,

as inúmeras variáveis necessárias para caracterizar tais leis são, muitas vezes, de difícil obtenção. É importante, então, apoiar-se nas simplificações recomendadas e bem aceitas pelas bibliografias, sendo uma delas o modelo de penetração dos íons por difusão, elucidada através da segunda Lei de Fick.

As limitações da Lei de Fick são: (1º) a difusão referenciada aplica-se em um material permeável e homogêneo. (2º) as propriedades do material transportado não podem ser alteradas com o tempo e (3º) nenhuma reação química deve ocorrer entre o material transportado e o sólido permeável.

Deste pressuposto, conclui-se que duas estruturas idênticas, inseridas em uma mesma distância do mar e confeccionadas com os mesmos materiais não necessariamente apresentarão evidências de corrosão no mesmo período de tempo. A potencialidade da corrosão das peças metálicas varia numa ampla faixa de valores e circunstâncias, podendo-se dividir estes fatores em externos (ambientais) e internos (constituição intrínseca do elemento estrutural)

Quanto aos fatores externos pode-se citar, por exemplo, a velocidade e direção do vento, o tempo de insolação da peça, a umidade relativa do ar, a proteção contra a chuva, frequência de chuvas na região e a temperatura do ambiente como fatores que alteram, circunstancialmente, a probabilidade de corrosão de uma estrutura.

No que concerne os fatores internos, a geometria da peça, a relação água/cimento, a cura do concreto, o tipo de cimento empregado, as adições utilizadas e a espessura do cobrimento são fatores decisivos nesta análise probabilística.

Cabe ressaltar que o mecanismo admitido na segunda lei de Fick é válido apenas para difusão de íons nos poros e microfissuras. Para concretos fissurados, a corrosão se desenvolve através do contato direto do metal com o agente agressivo, não sendo antecedido por mecanismos de propagação de íons, portanto. A corrosão se deflagra, neste caso, de forma muito mais rápida.

Destarte, se sobressai a relevância do controle da relação água/cimento e da cura das estruturas inseridas nas regiões litorâneas. Quanto maior a relação água/cimento, tanto maior será a interconectividade dos poros e, consequentemente, a facilidade de difusão dos íons ao interior da massa. Além disso, uma cura inadequada induz a uma elevada perda da água de hidratação do concreto, o que acarretará, posteriormente, na deflagração de um índice de poros elevado do elemento.

Observa-se que, por fim, as recomendações normativas que referem medidas voltadas à durabilidade são bastante generalistas. Esta asserção se fundamenta no grande número de fatores intervenientes na análise da durabilidade de uma estrutura submetida à agressividade marítima.

8. REFERÊNCIAS

ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. **Physical Chemestry**. Oxford: Oxford University, 2006, 8 ed.

BOLINA, Fabricio L; CIOCCARI, Leandro; OLIVEIRA, Márcio L., TUTIKIAN, Bernardo. Revisão da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto frente a mecanismos químicos de deterioração. In: XII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN y XVI CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN, 2013, Cartagena de Índias. **Anais...** Colômbia, 2013.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA - CCAA. **ChlorideResistanceof Concrete**. Sydney, 2009.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto**. PINI: São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, EnioPazini. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, Geraldo. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005.V.2. p.829-855.

GJØRV, Odd E. **Durability Design of Concrete Structures In Severe Environments**. Taylor & Francis: New York, 2009.

FUNAHISHI, M.; YOUNG, W. T. **Investigation of E-Log I Testes and Cathodically Polarized Steel in Concrete**.NACE: Hpuston. 1994.

HELENE, Paulo. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. PINI: São Paulo, 1992.

KEPLER, Jennifer L.; DARWIN, David; LOCKE, Carl E. Junior.**Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures**. University of Kansas: Kansas, 2000.

KOGLER, Robert. **Steel Bridge Design Handbook: Corrosion Protection of Steel Bridges**. Washington: Federal HigwayAdministration. 2012. V.19.

MEIRA, Gibson Rocha; PADARATZ, Ivo José. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloreto.** Trabalho apresentado na 44ª Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, 2002.

NUNES, Jorge Luiz Oleinik; GUIMARÃES, André Tavares da Cunha. Distância da água do mar – fator a ser considerado na intensidade de ataques por cloretos ao concreto armado**.** In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2., 2006, Rio Grande. **Anais eletrônicos...** Rio Grande, 2006. Disponível em:<<http://www.semengo.furg.br/2006/18.pdf>.>Acessoem: 20 jan 2014.

ØSTVIK, Jan-Magnus.**Thermal aspects of corrosion of steel in concrete: effect of low temperatura on the resistivity and the cathodic reaction rate.**The Norwegian University of Science and Tecnology: Trondheim, 2004.

PANNONI, Fabio Domingos. **Manual de construção e aço: projeto e durabilidade**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2009.

ROMANO, Fátima Sequeira. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do rio grande do sul**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the Chloride Penetration Resistance of a Concrete: A Literatura Review**. University of Toronto: Toronto, 1997.

SADOWSKI, Lukasz. **Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potencial and concrete resistivity measurements.Institute of Building Engeneering.** Wroclaw University of Technology: Wroclaw, 2013.

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

ZHANG, Jieying; QIAN, Shiyuan; BALDOCK, Bruce.**Laboratory study of corrosion performance of diferente reinforcing steels for use in concrete structures.**Disponível em: <<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/rr/rr284/rr284.pdf>>. Acesso em 29 ago 2013.