

DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

HELENE, P. R. L. (PCC/E)

DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

HELENE, Paulo R. L.

Eng. Civil, Doutor em Engenharia, Prof. Associado da EPUSP, C. Postal 61548,
SP 05424-970, BRASIL

Resumo

Nos últimos anos tem crescido o número de estruturas de concreto armado com problemas de corrosão de armaduras, como resultado do envelhecimento das construções existentes. A perda da proteção natural oferecida à armadura pelo cobrimento de concreto pode ocorrer através de diversos mecanismos sendo preponderantes a despassivação por carbonatação e por íons cloretos. Em ambos os casos, na maioria das vezes, todo o componente estrutural é atacado pelo ambiente externo, porém a manifestação da corrosão se dá somente em alguns pontos localizados, como resultado da própria natureza do processo de corrosão eletroquímica onde regiões anódicas alternam-se com regiões catódicas.

Neste trabalho apresenta-se a forma conceitual atualmente adotada para prever a evolução da deterioração das estruturas de concreto armado através de modelos de comportamento que viabilizam projetar para durabilidade ao mesmo tempo que possibilitam a avaliação da vida útil residual das estruturas de concreto já exposta por anos a determinados ambientes agressivos.

Abstract

The number of reinforced concrete structures with rebar corrosion has been increased during the last years, as a result of the ageing of these structures. The loss of the rebar protection by the concrete recovering may occur due to various factors but the main one is the despassivation of the rebar due to carbonation or chloride ions. In both cases, the structure as a whole is damaged by the environment, however the corrosion happens in some regions, as a result of the electrochemical process where anodic regions are surrounded by cathodic ones.

This paper presents the concepts adopted to predict the deterioration evolution of reinforced concrete structures. It is described the models for corrosion development in order to design the structure taken into account its durability and also predict the remain lifetime of the existing structures submitted to aggressive environments.

1. Introdução

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado e pretendido tem evoluído nos últimos anos graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos no concreto, que possibilitam associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos e consequentemente permitem avaliar a vida útil expressa em número de anos e não mais em critérios subjetivos do tipo esta maneira é "mais ou menos" adequada a um certo grau de exposição.

O princípio básico, no entanto, não alterou-se. Há necessidade de por um lado conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente e, por outro, conhecer o concreto e a estrutura, estabelecendo então a correspondência entre ambos, ou seja, entre a "agressividade do meio versus a durabilidade do concreto ou da estrutura".

A "resistência" da estrutura de concreto armado dependerá, no entanto, da resistência do concreto e da resistência da armadura. Qualquer dos dois que se deteriore, comprometerá a estrutura como um todo. Os principais agentes agressivos à armadura, o gás carbônico CO_2 e os cloretos Cl^- , não são agressivos ao concreto, ou seja não o atacam deletoriamente. Por outro lado, os agentes agressivos ao concreto como os ácidos, que contribuem para a redução do pH e conseqüente risco de despassivação da armadura, assim como os sulfatos e até a própria reação álcali-agregado, que geram reações expansivas que destroem o concreto de cobrimento e de proteção da armadura, atuam de forma dupla, atacando principalmente ao concreto e secundariamente à armadura, simultaneamente.

Portanto, apesar de não ser comum na normalização disponível até poucos anos atrás, hoje em dia é conveniente e indispensável uma separação nítida e conseqüente classificação entre ambientes preponderantemente agressivos à armadura ou ao concreto. Da mesma forma, a composição do concreto, ou seja, a proporção e a natureza dos materiais que o compõe devem ser tratadas em separado; concretos resistentes a meios agressivos à armadura e concretos resistentes a meios agressivos preponderantemente ao próprio concreto.

2. Conceito Moderno de Durabilidade

Os documentos atuais que tratam do tema, são o Código Modelo CEB-FIP 90¹, outras publicações do próprio CEB² e do ACI³, o projeto de norma européia ENV-206⁴, artigos de especialistas no tema^{5,6,7,8,9} e documentos básicos de referência como a norma CETESB L1007.

Em todos esses documentos fica claro que o problema da durabilidade das estruturas de concreto deve considerar os seguintes aspectos:

- a classificação da agressividade do meio ambiente;
- a classificação da resistência do concreto à deterioração;
- os modelos (de preferência numéricos) de deterioração e envelhecimento das estruturas de concreto;
- a correspondência entre agressividade do meio e resistência à deterioração e ao envelhecimento do concreto;
- e, finalmente a vida útil desejada, ou seja, o período de tempo que se deseja que a estrutura atenda a certos requisitos funcionais com um mínimo de manutenção.

A **classificação da agressividade do ambiente**, com base nas condições de exposição da estrutura ou suas partes, deve levar em conta o micro e macro clima atuantes sobre a obra e suas partes críticas.

A partir de uma síntese das publicações anteriormente citadas, a agressividade ambiental pode ser avaliada segundo o ponto de vista da **durabilidade da armadura** e da **durabilidade do próprio concreto**, considerando-se as classes apresentadas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 Classificação da agressividade do ambiente.

Classe de Agressividade	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

A classificação da agressividade ambiental segundo o ponto de vista da durabilidade da armadura pode ser avaliada segundo o descrito na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 Classificação da agressividade do ambiente visando a durabilidade das armaduras.

Classe de agressividade	Macro clima	Micro clima	Gás carbônico CO ₂ no ambiente	Cloretos Cl ⁻ no ambiente
I	atmosfera rural	UR ≤ 60% interiores secos	≤ 0,3 %	≤ 200 mg/L
II	urbana	UR de 60 a 95% UR = 100% (submersa)	≤ 0,3 %	< 500 mg/L
III	marinha ou industrial	UR de 65 a 98%	≥ 0,3 %	> 500 mg/L
IV	pólos industriais	interiores úmidos de indústria	> 0,3 %	> 500 mg/L

A classificação da agressividade ambiental segundo o ponto de vista da durabilidade do concreto pode ser adotada segundo os parâmetros apresentados na Tabela 2.3, resumindo-se a três mecanismos básicos de deterioração:

- *lixiviação* por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas que dissolvem e carreiam os compostos da pasta hidratada, especialmente o hidróxido de cálcio
- *expansão* por ação de sulfatos reativos com o aluminato tricálcico da pasta
- *expansão* devida a reações dos álcalis do cimento com certos agregados.

TABELA 2.3 Classificação da agressividade do ambiente visando a durabilidade do concreto.

Classe de Agressividade	pH	CO ₂ agressivo mg/L	Amônia NH ₄ ⁺ mg/L	Magnésio Mg ²⁺ mg/L	Sulfato SO ₄ ²⁻ mg/L	Sólidos Dissolvidos mg/L
I	> 6,0	< 20	< 100	< 150	< 400	> 150
II	5,9 - 5,9	20 - 30	100 - 150	150 - 250	400 - 700	150 - 50
III	5,0 - 4,5	30 - 100	150 - 250	250 - 500	700 - 1500	< 50
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	> 1500	< 50

- Obs: 1. No caso de solos a análise deve ser feita no extrato aquoso do solo.
 2. Água em movimento, temperatura acima de 30°C, ou solo agressivo muito permeável conduz a um aumento de um grau na classe de agressividade.
 3. Certas combinações de ação física superficial tais como abrasão e cavitação aumentam a velocidade de ataque químico e podem corresponder a um aumento do grau de agressividade.

Os concretos são classificados de acordo com suas características e propriedades principais e de maior interesse para resistir à agressividade do meio ambiente ao qual será submetido.

Na ausência de valores efetivos, obtidos de ensaios experimentais nos concretos que realmente serão utilizados na estrutura, podem ser adotados os valores orientativos, tomados das referências bibliográficas citadas, apresentados na Tabelas 2.4, referente à corrosão de armaduras e na Tabela 2.5, referente à deterioração do concreto.

TABELA 2.4 Classificação dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras.

Classe de Concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Máxima a/c	Deterioração por Carbonatação	Deterioração por Cloretos
			Teor de Adições	Teor de Adições
durável	≥ C50	≤ 0,38	≤ 10% de pozolana, microssilica ou escória de alto forno	≥ 20% de pozolana ou microssilica ≥ 65% de escória de alto forno
resistente	C35 C40 C45	≤ 0,50	≤ 10% de pozolana ou microssilica ≤ 15% de escória de alto forno	≥ 10% de pozolana ou microssilica ≥ 35 % de escória de alto forno
normal	C25 C30	≤ 0,62	qualquer	qualquer
efêmero	C10 C15 C20	qualquer	qualquer	qualquer

TABELA 2.5 Classificação dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos.

Classe de Concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Deterioração por Expansão		Deterioração por Lixiviação
		Teor de C ₃ A no Cimento Anidro	Teor de Adições	Teor de Adições
durável	≥ C50	≤ 5%	≥ 20% de pozolana ou microssílica ≥ 65% de escória de alto forno	≥ 20% de pozolana ou microssílica ≥ 65% de escória de alto forno
resistente	C35 C40 C45	≤ 5%	≥ 10% de pozolana ou microssílica ≥ 35 % de escória de alto forno	≥ 10% de pozolana ou microssílica ≥ 35 % de escória de alto forno
normal	C25 C30	≤ 8%	qualquer	qualquer
efêmero	C10 C15 C20	qualquer	qualquer	qualquer

Os modelos numéricos de deterioração e envelhecimento das estruturas, também devem ser considerados separadamente; se afetos à corrosão das armaduras ou se afetos à deterioração do concreto.

Para os primeiros há modelos atuais de envelhecimento, enquanto para os segundos, que corresponderiam a velocidades de deterioração por sulfatos, por lixiviação, por reação álcali-agregado e outras formas, não há ainda modelos matemáticos satisfatórios, devendo as considerações de durabilidade basear-se apenas em avaliações qualitativas. Na Tabela 2.6 apresenta-se algumas das formulações mais empregadas atualmente para o caso da armadura.

TABELA 2.6 Formulações para cálculo da espessura mínima de cobrimento.

Risco Preponderante de	Espessura Mínima de Cobrimento	onde:
Carbonatação	$e_{CO_2} = k_{CO_2} \cdot t^{1/2}$	e_{CO_2} = espessura, em cm k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação do concreto em questão t = vida útil, em anos
Penetração de cloretos	$e_{Cl} = 2 \cdot (z) \cdot \sqrt{D_{efCl} \cdot t}$	e_{Cl} = espessura, em cm D_{efCl} = coeficiente efetivo de difusão, ou difusividade do concreto em questão, em cm^2/ano t = vida útil, em anos (z) = valor da função de erro de Gauss, obtida conforme Tabela 2.7, calculada a partir de:
	$erf(z) = 1 - \frac{C_{eCl} - C_0}{C_s - C_0}$ $erf(z) = \frac{C_s - 0,30}{C_s - 0,02}$	C_{eCl} = concentração dos cloretos na profundidade e_{Cl} , no tempo t C_0 = concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural C_s = concentração de cloretos na superfície do componente estrutural de concreto, admitida constante* $erf(z)$ = função de erro de Gauss (Tabela 2.7)

* concreto de tanques industriais com salmoura $C_s = 7\%$; concreto submerso em água de mar $C_s = 1\%$; concreto sujeito a respingos de maré $C_s = 1,2\%$; concreto em atmosfera marinha (névoa salina) ou atmosfera industrial $C_s = 0,33\%$; concreto em atmosfera rural ou urbana não marinha $C_s = 0,03\%$. Em todos os casos a concentração de cloretos está referida ao teor em massa de cloretos, no concreto, em relação à massa de cimento do concreto.

TABELA 2.7 Valores da função de erro de Gauss.*

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0,00	0,0000	0,40	0,4284	1,20	0,9103
0,01	0,0113	0,45	0,4755	1,30	0,9340
0,05	0,0564	0,50	0,5205	1,40	0,9523
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,50	0,9661
0,15	0,1680	0,70	0,6778	1,60	0,9763
0,20	0,2227	0,80	0,7421	1,70	0,9838
0,25	0,2763	0,90	0,7969	1,80	0,9891
0,30	0,3286	1,00	0,8427	1,90	0,9928
0,35	0,3794	1,10	0,8802	2,00	0,9953

*Johann Karl Friedrich Gauss (1777 - 1855), matemático alemão, considerado um dos maiores gênios da matemática. Ainda adolescente desenvolveu o método dos mínimos quadrados para as regressões.

A correspondência básica entre **agressividade do meio ambiente e durabilidade do concreto** pode ser a considerada na Tabela 2.8.

Finalmente a vida útil desejada, ou seja, o período de tempo que se deseja que a estrutura atenda a certos requisitos funcionais com um mínimo de manutenção, pode ser conceituada conforme exposto a seguir.

TABELA 2.8 Correspondência entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto.

Classe de agressividade	Concreto recomendável
I fraca	efêmero, normal, resistente e durável
II média	normal, resistente e durável
III forte	resistente e durável
IV muito forte	durável

Por vida útil entende-se o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada. No caso de deterioração da estrutura por corrosão das armaduras, pode-se distinguir pelo menos três situações:

- a) Período de tempo que vai até a despassivação da armadura, normalmente denominado de período de iniciação. A esse período de tempo pode-se associar a chamada **vida útil de projeto**. Normalmente correspondente ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação¹⁰ ou a frente de cloretos¹¹ atinjam a armadura. O fato da região carbonatada ou de um certo nível de cloretos atingir a armadura e teoricamente despassivá-la, não significa que necessariamente a partir desse momento haverá corrosão importante. Esse período de tempo, no entanto, é o período que deve ser adotado no projeto da estrutura, a favor da segurança.
- b) Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento. A esse período de tempo associa-se a chamada **vida útil de serviço ou de utilização**. É muito variável de caso a caso pois em certos locais é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão ou fissuras. Em outros casos somente a queda de pedaços de concreto, colocando em risco a integridade de pessoas, pode ser considerado o momento a partir do qual deve-se considerar terminada a vida útil de serviço.
- c) Período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura. A esse período de tempo associa-se a chamada **vida útil última ou total**. Corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da secção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura/concreto¹², acarretando o colapso parcial ou total da estrutura.

3. Considerações finais

Apresenta-se graficamente na Fig 3.1¹³ os conceitos de vida útil anteriormente expostos, tomando-se por base as duas fases principais do processo de deterioração do concreto armado (iniciação e propagação), do ponto de vista da corrosão das armaduras.

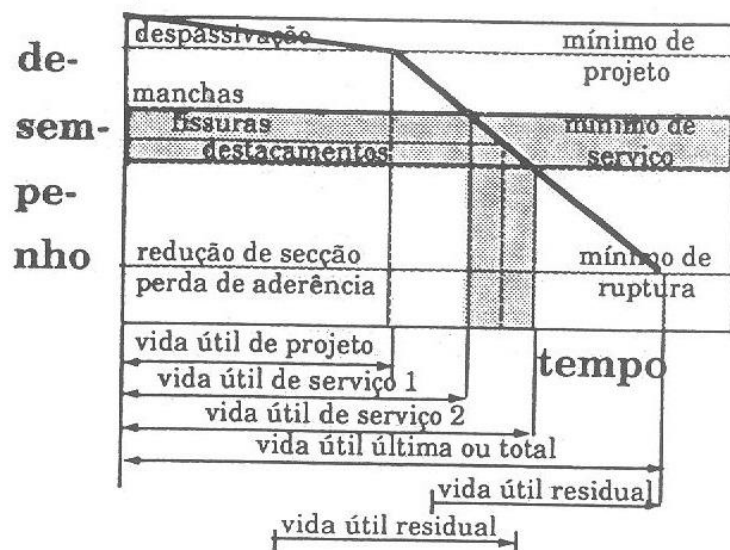


FIGURA 3.1 Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.

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 neste caso a partir da data de uma vistoria e correspondente diagnóstico pode ser efetuado a qualquer instante da vida em uso da estrutura. O prazo final, neste caso, tanto pode ser o limite das condições de serviço quanto o limite de ruptura, dando origem a duas "vida útil residual"; uma mais curta contada até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto e outra longa contada até a perda significativa da capacidade resistente do componente estrutural ou seu eventual colapso.

Do ponto de vista do concreto, os sulfatos presentes na água do mar podem acarretar reações deletérias de expansão com formação de compostos expansivos do tipo etringita e gesso secundário ou reações tipo álcali-agregado e acarretar fissuras na superfície dos elementos estruturais. Os métodos descritos nas normas NBR 5746 e NBR 9917 podem ser adaptados para determinações do teor de sulfato em concreto.

O teor de sulfato em um concreto depende do consumo de cimento e do teor de gesso primário no referido cimento. Assim, por exemplo, um concreto de massa específica de 2300 kg/m^3 com 350 kg de cimento por m^3 amassado com um cimento de no máximo 3% de gesso, dará um teor máximo total de sulfatos de 0,46% por massa de concreto. Se as quantidades encontradas forem superiores significarão que houve contaminação. Esse excesso poderá ser proveniente de aditivos ou outros materiais componentes do concreto ou ainda, no caso em questão, os sulfatos estarão penetrando no concreto após seu endurecimento, provenientes da água do mar.

Em geral o valor de referência da **vida útil de projeto** para obras correntes pode ser 50 anos. Certas obras de maior importância social e estrutural podem ser previstas para uma vida útil de 100 anos ou até mais.

Uma aplicação desses conceitos de maneira prática podem ser as Figs. 3.2 e 3.3 desenvolvidas para o caso de espessura de cobrimento em função do ambiente, da qualidade do concreto e da vida útil desejada.

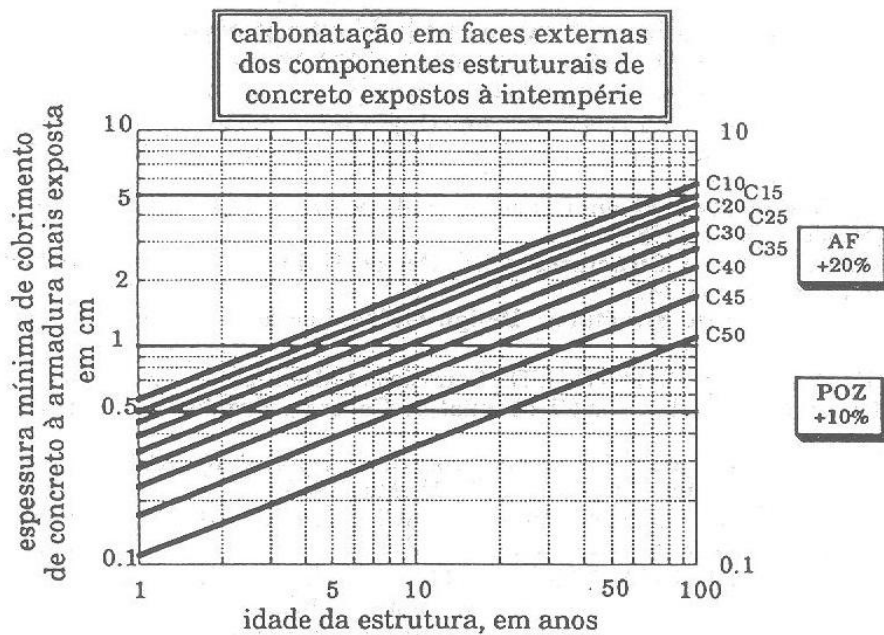


FIGURA 3.2 Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras em função do ambiente (zona urbana e industrial), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).

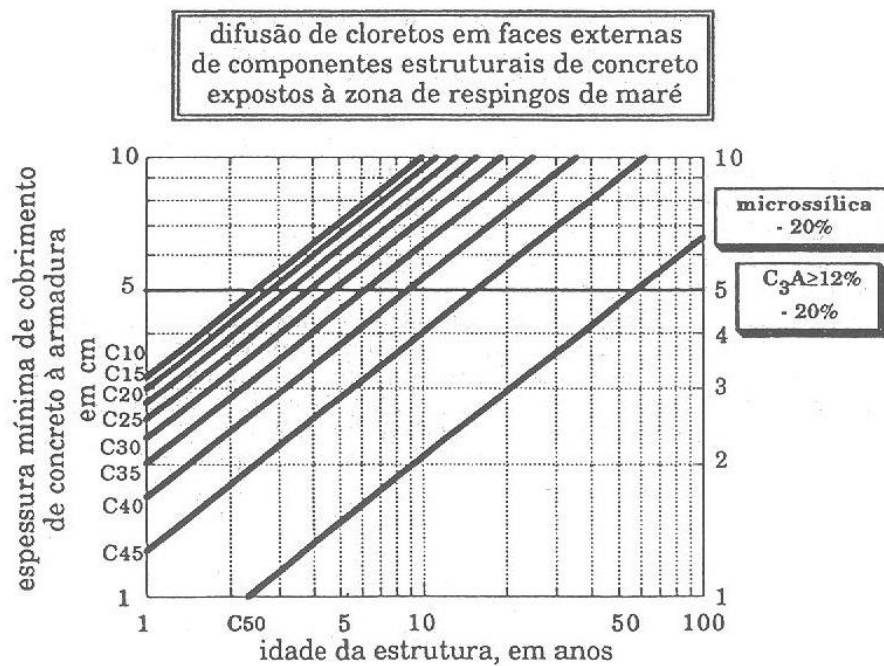


FIGURA 3.3 Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras em função do ambiente (zona de respingos de maré), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada

Referências

- 1 COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. CEB-FIP Model Code 1990: final draft. Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 203-205)
- 2 COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign)**; contribution to the 23rd Plenary Session of CEB, Praga, 1983. Lausanne, Aug. 1983. (Bulletin D'Information, 162)
— **CEB Design Manual on Cracking and Deformations**. Lausanne, École Polytechnique Fédérale, 1985.
— **Durable Concrete Structures. CEB Design Guide**. Lausanne, June 1989. (Bulletin D'Information, 182)
— **Durable Concrete Structures. Design Guide**. Lausanne, Thomas Telford, 1992.
- 3 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion of Metals in Concrete: reported by ACI Committee 222. In:—. **ACI Manual of Concrete Practice**. Detroit, 1991. v.1.
— **Debate: Crack Width, Cover and Corrosion**: reported by ACI Committee 222/224. **Concrete International**, p. 20-35, May 1985.
— **Guide to Durable Concrete**: reported by ACI Committee 201. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, p. 544-82, Sept/Oct. 1991.
- 4 EUROPEAN NORMALIZATION VOLUNTAIRE. ENV-206 Performance, Production, Mise en Ouvre et Critères de Conformité du Béton. 1992.
- 5 ROSTAM, Steen. Service Life Design - The European Approach. **Concrete International**, v. 15, n. 7, July 1993. pp. 24-32
- 6 ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Tendencias Actuales en la Investigación sobre Corrosion de Armaduras. **Informes de la Construcción**, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov. dic. 1988.
- 7 ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Estruturas com Armaduras Corroídas**. trad. Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, PINI. 1992.
- 8 HELENE, Paulo R. L. La Agresividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. **Hormigón, AATH**, n. 10, p. 25-35, mayo/ago., 1983.
- 9 —. Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado sob o Ponto de Vista da Corrosão da Armadura. In: **Seminário de Dosagem e Controle dos Concretos Estruturais**, várias cidades, jul. a set. 93. Anais ENCOL/SENAI, Brasília. 1993.
- 10 Por frente de carbonatação entende-se a posição da interface entre a região carbonatada, de baixa alcalinidade por ação do gás carbônico sobre os produtos alcalinos da hidratação do cimento e a região contígua, não carbonatada e consequentemente de elevado pH.
- 11 Por frente de cloretos entende-se a posição da interface entre a região contaminada por um certo nível de cloretos suficiente para despassivar a armadura naquela condição específica e a região contígua onde o teor de cloretos ainda não atingiu o nível suficiente para despassivar. Esse teor de cloretos varia em função de muitos condicionantes e pode estar de 0,05 a 1 % da massa de cimento.
- 12 AL-SULAIMANI, G. J.; KALEEMULLAH, M.; BASUNBUL, I. A.; RASHEEDUZZAFAR. Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members. **ACI Structural Journal**, p. 220-31, Mar. Apr. 1990.
- 13 HELENE, P. R. L. Diagnóstico da Corrosão de Armadura e Vida Útil Residual de Estruturas de Concreto. In: **Seminário FOSROC/RENA sobre Patologia das Estruturas de Concreto: Uma Visão Moderna**, Salvador, dez. 1992. Anais. Salvador, Rena, Fosroc, 1992.