

VERIFICAÇÃO DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO - APLICAÇÃO DE DADOS DE CAMPO EM MÉTODOS DE NORMALIZAÇÕES

Ronaldo A. Medeiros-Junior (ITA) ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br

Maryangela G. Lima (ITA) magdlima@gmail.com

Vítor B. Freixo (ITA) vitorbfreixo@gmail.com

Resumo: O meio ambiente de exposição influencia diretamente nos processos de degradação das estruturas de concreto. Estudos e normalizações têm procurado considerar o fator durabilidade nas recomendações de projeto, preparo e execução das estruturas, visando à garantia de determinada vida útil. No entanto, observa-se demasiada dificuldade de caracterização do ambiente de exposição da estrutura, o que dificulta uma formulação precisa nos modelos. Este estudo verifica a capacidade dos métodos propostos por organizações nacionais e internacionais de protegerem estruturas de concreto quanto à corrosão das armaduras, por um tempo pelo menos igual a sua vida útil de projeto. Para tanto, foram consideradas duas formas de degradação do concreto: a carbonatação, por meio da análise de dois viadutos; e o ataque de cloretos, através do estudo de uma plataforma offshore em concreto. A metodologia adotada consistiu no confronto dos métodos e modelos oferecidos pelas organizações estudadas com dados medidos em estruturas reais. Os resultados permitiram observar que os modelos avaliados não conduziram a resultados satisfatórios para diversos pontos onde ensaios foram realizados. Em vários casos, as estruturas de concreto armado já estavam, ou estariam sujeitas à degradação, antes dos 50 anos de vida útil esperada. Além disso, foi possível observar variação elevada em resultados obtidos para um mesmo elemento de uma mesma estrutura, evidenciando a importância da caracterização do microclima para melhor previsão do comportamento das estruturas frente à degradação.

Palavras-chave: Ambiente de exposição, Degradação, Estruturas de concreto, Modelos, Microclima.

VERIFICATION OF THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES - APPLICATION OF FIELD DATA ON METHODS OF NORMALIZATION

Abstract: The environmental directly influences the degradation's processes of concrete structures. Studies and normalizations have sought to consider the durability factor in the design recommendations, preparation and execution of structures in order to guarantee a certain useful lifetime. However, there are a lot of problems for the characterization of environmental exposure of the structure, which hinders the precise formulation of the proposed models. This study evaluates the ability of the models proposed by national and international organizations to protect concrete structures for corrosion of reinforcement, for a time at least equal to their design lives. Two forms of degradation of concrete are considered: carbonation, through the analysis of two reinforced concrete viaducts; and the chloride attack, through the analysis of a concrete platform. The methodology consisted in the comparison of methods and models offered by the organizations studied with data measured on real structures. The results showed that the models analyzed did not produce satisfactory results for all points where measurements were made. In several cases, the concrete structures had already been or would be subject to degradation before 50 years of expected life. Moreover, a high variation was found in results for one element of the same structure, highlighting the importance of characterizing the microenvironment to better predict the behavior of concrete structures.

Keywords: *Environment, Degradation, Concrete structures, Models, Microenvironment.*

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais consumido pelo homem, e o seu uso envolve um alto consumo de recursos naturais não renováveis. Além disso, a segurança dos usuários das estruturas de concreto e os custos envolvidos nos procedimentos de reparo justificam a necessidade da preservação de estruturas já existentes.

O conhecimento dos processos de degradação das estruturas de concreto é essencial para contribuir com a concepção de projetos e execução de estruturas mais duráveis. Estudos

nacionais e internacionais são desenvolvidos com o objetivo de melhorar processos de construção, desenvolver novos modelos de vida útil e atualizar normas de ensaios (Ait-Mokhtar et al., 2013; Kuosa et al., 2013). Um desses principais esforços está direcionado para o processo de corrosão das armaduras do concreto, uma vez que esse mecanismo de degradação pode reduzir drasticamente a vida de serviço das estruturas de concreto armado.

O objetivo deste artigo é realizar uma análise da capacidade de proteção às estruturas de concreto armado dos métodos e modelos propostos por quatro documentos, sendo duas normalizações e duas propostas de normalizações:

- 1- NBR 6118 (2007): Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento;
- 2- CEN (2004): EuroCode 2 - Design of Concrete Structures;
- 3- ISO N280 (2010): Durability – Service Life Design of Concrete Structures; e
- 4- FIB (2010): Bulletin 56 – Draft Model Code.

O estudo foi realizado com base em dados reais coletados em campo e apresentados por Yazigi (2008) e Brito (2008), para estruturas de concreto localizadas em ambiente urbano e marinho, respectivamente. Dessa forma, são verificados os cobrimentos recomendados pelos documentos, e comparados com resultados obtidos em estruturas reais de concreto armado para o avanço da frente de carbonatação e a penetração de íons cloretos.

2. DOCUMENTOS ANALISADOS

As principais características dos documentos (normas e projetos de normas) estudados no presente artigo são abordadas a seguir, de forma a propiciar um embasamento teórico para uma melhor compreensão dos métodos utilizados neste artigo.

2.1 NBR 6118 (2007)

No tocante a durabilidade do concreto, a norma NBR 6118 (2007) discute que as estruturas devem ser projetadas e construídas de forma que conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, desde que as condições ambientais sejam as previstas em projeto e que o uso da estrutura seja conforme preconizado também em projeto.

Essa norma relaciona a agressividade do meio ambiente às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, estabelecendo classes de agressividade ambiental (fraca, moderada, forte ou muito forte) para definir critérios de projeto que visam o alcance da durabilidade desejada para um determinado tipo de ambiente.

Sendo assim, a norma supracitada proporciona correspondências, por meio de tabelas, entre classes de agressividade ambiental e cobrimentos nominal da estrutura de concreto. É importante destacar que o cobrimento nominal é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc), normalmente considerada igual a 10 mm nas obras correntes e 5 mm em obras com controle rigoroso de qualidade.

2.2 CEN (2004)

A versão do EuroCode analisada neste artigo é a versão vigente em Portugal (CEN, 2004), a qual estabelece que uma estrutura duradoura deve satisfazer, durante o seu período de projeto,

os requisitos de durabilidade, resistência, e estabilidade, sem perda significativa de utilidade, e sem exigir excesso de manutenção não prevista; além de considerar o cobrimento adequado das armaduras como a principal forma de se conduzir à vida útil desejada.

Essa norma europeia classifica as estruturas quanto às condições de exposição (físicas e químicas). A classificação para o caso de corrosão induzida por carbonatação e por cloretos é indicada através de tabelas, de maneira similar ao previsto na NBR 6118 (2007). Portanto, essa norma não oferece um modelo analítico matemático para determinação do cobrimento nominal das estruturas de concreto.

O CEN (2004) ressalta também que o cobrimento nominal é dado como o cobrimento mínimo mais uma margem de 10 mm para as tolerâncias de execução. As estruturas são divididas em classes estruturais, de acordo com o tipo de exposição e com a resistência do concreto da obra. Para uma vida útil de 50 anos, valor que será adotado no presente artigo, em geral, as estruturas são classificadas na classe estrutural S4, segundo CEN (2004).

2.3 ISO N280 (2010) e FIB (2010)

Os documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010) são projetos de normas, portanto, sujeitos a alterações. Para ambos, a versão aqui analisada é a do ano 2010. Esses projetos são bastante similares e, em termos de avaliação da durabilidade das estruturas de concreto armado, apresentam o mesmo método.

De acordo com esses projetos, o cobrimento nominal deve ser calculado através de modelos analíticos baseados no avanço da frente de carbonatação e na profundidade de penetração dos íons cloreto.

Para a corrosão induzida pela carbonatação, o avanço de CO₂ na estrutura obedece a Equação 1 (ISO N280, 2010; FIB, 2010).

$$x_c(t) = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: $x_c(t)$ (mm) é a profundidade da frente de carbonatação na estrutura após um tempo de exposição t (anos); k_{CO_2} é o produto dos fatores $W(t)$ (parâmetro em função das condições de temperatura e umidade no concreto) e k (fator relacionado com o tipo de cimento, uso de aditivos, etc).

Não é apresentado por esses projetos um método para determinação direta de $W(t)$ e k . De acordo com a ISO N280 (2010), esses valores, ou o seu produto, podem ser obtidos, para uma nova estrutura, diretamente de estruturas existentes em que a composição do concreto, a execução, e as condições de exposição sejam semelhantes àqueles esperados para a nova estrutura.

Em relação a corrosão por cloretos, os documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010) assumem que o ingresso desses íons pode ser representado pela Equação 2.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \left[\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}(t) \cdot t}} \right] \quad \text{Eq. (2)}$$

A Equação 2, também conhecida como 2ª Lei da Difusão de Fick Modificada, apresenta os seguintes parâmetros: $C(x,t)$ = concentração de cloretos no concreto a uma profundidade x (em mm, $x = 0$ na superfície) e em um tempo de exposição t (anos); C_s = concentração de cloretos na superfície do concreto; C_i = concentração de cloretos inicial no

concreto; $D_{ap}(t)$ = coeficiente de difusão aparente de cloretos (mm^2/ano); e erf = função de erro de Gauss.

A determinação do coeficiente de difusão aparente de cloretos, bem como outros parâmetros envolvidos na Equação 2, estão descritos nos documentos analisados neste item.

Uma vez que esses projetos oferecem um método analítico de equações para o cálculo do avanço de agentes agressivos no concreto, torna-se possível verificar a durabilidade do concreto através da determinação da vida de serviço remanescente da estrutura. Sendo assim, a aplicação das Equações 1 ou 2, permite verificar o quanto o agente de degradação considerado (isto é, dióxido de carbono ou cloretos) penetrou na estrutura de concreto.

No tocante ao ataque de cloretos, a concentração limite desses íons (C_{lim}) é definida como a concentração acima da qual, em contato com a armadura, os processos corrosivos poderão iniciar. C_{lim} é usualmente considerado igual a 0,4 % sobre a massa de cimento (Page et al., 1981; Helene, 1993).

Por fim, tanto a ISO N280 (2010), quanto a FIB (2010), assumem as recomendações da ISO 22966 (2009) para uma tolerância de execução (Δc) de 10 mm na majoração do cobrimento mínimo das estruturas de concreto, se não forem fornecidos outros valores nas especificações de execução.

3. APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

3.1 Carbonatação

O estudo de Yazigi (2008) teve por objetivo avaliar a influência do microclima no processo de degradação de estruturas de concreto armado submetidas ao ambiente urbano. Em vista ao comentado, o supracitado autor estudou dois viadutos localizados em uma importante rodovia da região Sudeste do Brasil. Os viadutos foram denominados de viaduto 1 e viaduto 2. Ambos apresentaram cobrimento nominal de projeto de 30 mm, e estão distanciados a 2 km entre si.

Yazigi (2008) realizou ensaios “in situ” com solução de fenolftaleína (EN 14630, 2006) para determinar a profundidade de carbonatação em diferentes pontos dos viadutos, incluindo vigas e pilares. Os viadutos foram construídos em concreto armado em 1950, e os ensaios foram realizados em 2007, resultando em uma idade das estruturas de 57 anos no momento dos ensaios.

O presente artigo utilizou os valores de profundidade máxima de carbonatação determinados por Yazigi (2008) para testar a capacidade de proteção dos documentos discutidos neste artigo quanto ao avanço do CO_2 .

3.2 Cloretos

Brito (2008) estudou as condições microclimáticas próximas ou na superfície de uma estrutura de concreto armado em ambiente marinho, verificando o comportamento e durabilidade de uma plataforma offshore construída no Brasil em 1976. A penetração de cloretos foi determinada em laboratório com amostras extraídas em distintas profundidades e em diferentes posições da estrutura analisada. Esses ensaios ocorreram no ano de 2005, ou seja, quando a estrutura possuía 29 anos de exposição.

A plataforma estudada por Brito (2008) está localizada no Nordeste do Brasil e possui cobertura nominal de 50 mm. Brito (2008) mediu a concentração de cloreto em diferentes zonas de agressividade marinha (variação de maré, respingo e atmosfera marinha) e em diferentes costados da plataforma (isto é, Norte, Sul, Leste e Oeste).

Valores de profundidade de penetração de cloretos determinados por Brito (2008) foram utilizados no presente artigo para avaliar o método de proteção dos documentos discutidos neste artigo quanto à corrosão devido aos cloretos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método deste artigo consistiu primordialmente em confrontar os valores de cobertura recomendados pelos documentos (normas e projetos de normas) avaliados neste estudo, com os valores de penetração de agentes agressivos obtidos em estruturas reais por Yazigi (2008) e Brito (2008). O período de vida útil assumido para as estruturas no presente estudo é de 50 anos.

Algumas limitações deste estudo devem ser primeiramente esclarecidas. Os métodos, análises e resultados apresentados a seguir foram realizados tendo em vista as seguintes considerações: (1) o espaço amostral utilizado nas medições em estruturas existentes feitas por Yazigi (2008) e Brito (2008) é suficiente para representar a estrutura como um todo; (2) considera-se que os modelos matemáticos para verificação do avanço da frente de carbonatação (Equação 1) e para determinação da profundidade de penetração dos cloretos (Equação 2) reproduzem os processos em condições naturais; e (3) estima-se que não foram cometidos erros nas medições e na apresentação dos dados por Yazigi (2008) e Brito (2008).

O método proposto neste artigo para verificar a capacidade de proteção às estruturas de concreto pelos documento analisados pode ser resumido pelo fluxograma da Figura 1, para as normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004); e pela Figura 2, para os projetos de norma ISO N280 (2010) e a FIB (2010).

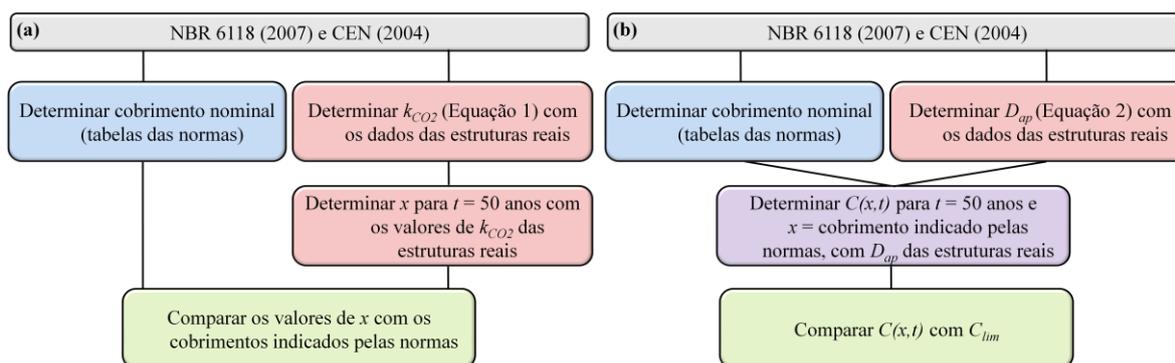


Figura 1 – Resumo do método utilizado neste artigo para os documentos NBR 6118 (2007) e CEN (2004): a) método de análise para a carbonatação; a) método de análise para os cloretos.

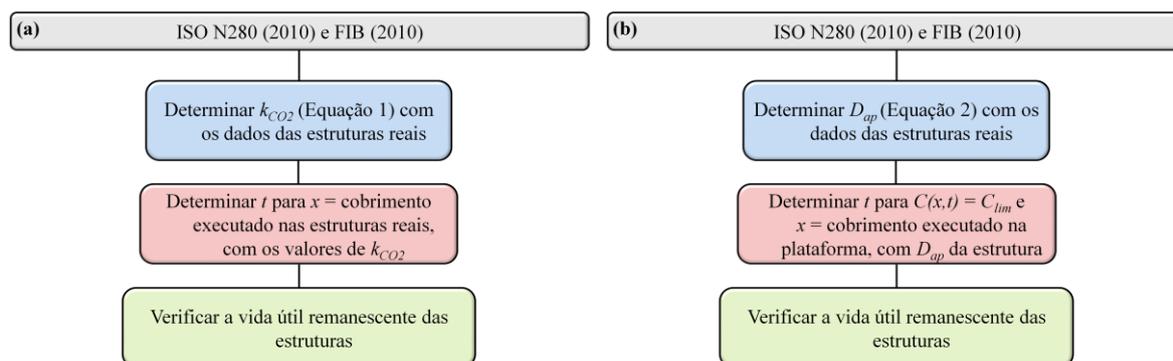


Figura 2 – Resumo do método utilizado neste artigo para os documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010): a) método de análise para a carbonatação; a) método de análise para os cloretos.

4.1 Carbonatação nos viadutos

Dado o exposto, primeiramente foram analisados os dados de profundidade da frente de carbonatação nos viadutos 1 e 2, obtidos por Yazigi (2008). Os métodos propostos pelas normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004) foram investigados.

Seguindo o fluxograma da Figura 1a, foram determinados os cobrimentos indicados pelas normas estudadas. De acordo com a NBR 6118 (2007), considerando que os viadutos em questão estão localizados em ambiente urbano, as estruturas estão sujeitas a uma agressividade moderada, com risco de degradação pequeno. Dessa forma, segundo tabelas dessa norma, a classe de agressividade II e um cobrimento nominal (C_{nom}) da armadura de 30 mm devem ser utilizados para os viadutos.

No tocante ao CEN (2004), conforme tabelas apresentadas por essa norma, os viadutos estudados estão na classe de exposição XC4, definida como a classe que representa um ambiente alternadamente úmido e seco, em que o contato com água ocorre principalmente devido às chuvas. Essa classificação se justifica pois se tratam de viadutos a céu aberto, sem contato direto com rios ou lagos, que se encontram secos quando não há chuvas, e molhados caso contrário.

Conforme já discutido, a classe estrutural S4 foi considerada para os viadutos devido ao período de projeto de 50 anos estabelecido. Dessa forma, através de tabelas do CEN (2004), determinou-se um valor de cobrimento mínimo de 30 mm, que majorado em 10 mm devido as tolerância de execução recomendadas pela própria norma, resultou em C_{nom} igual a 40 mm.

De posse dos dados de Yazigi (2008) do avanço da frente de carbonatação quando os viadutos em análise possuíam 57 anos de idade, foi possível determinar o valor da constante de carbonatação (k_{CO_2}) através da Equação 1. Em seguida, com auxílio da mesma equação, o valor da profundidade de carbonatação para o tempo de 50 anos foi determinado. Sendo assim, foi verificado se o valor calculado para o avanço da frente de carbonatação (para $t = 50$ anos) excede o cobrimento nominal previsto (= 30 mm) pela NBR 6118 (2007) ou pela CEN (2004) (= 40 mm).

Como os documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010) apresentam um modelo analítico matemático para verificação da durabilidade das estruturas de concreto contra a carbonatação (Equação 1), diferentemente da NBR 6118 (2007) e CEN (2004) que apresentam tabelas, foi utilizado o fluxograma da Figura 2a para análise da capacidade de proteção desses documentos.

De acordo com a Figura 2a, as análises realizadas foram com base no tempo de vida remanescente da estrutura. O método utilizado verificou se o tempo em que a frente de carbonatação atinge uma profundidade igual ao cobrimento definido em projeto e executado efetivamente nos viadutos (= 30 mm) é maior ou menor que o período mínimo de vida útil considerado neste artigo (= 50 anos).

A forma de apresentação dos resultados oriundos da verificação da ISO N280 (2010) e da FIB (2010) para os viadutos 1 e 2 foi através dos valores dos tempos t_a e t_r , conforme notação explicada a seguir: t_a = tempo que leva para a frente de carbonatação atingir a armadura, ou seja, a profundidade de carbonatação se iguala ao cobrimento, contado a partir da exposição da estrutura; e t_r = tempo remanescente que a estrutura pode ser utilizada sem que sua armadura seja atingida, contado a partir da data dos ensaios, calculado caso $t_a > 57$ anos.

Desta maneira, o critério utilizado para análise foi: se $t_a < 50$ anos, significa que os documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010) não conseguiram proteger a estrutura pelos 50 anos desejáveis.

4.2. Penetração de cloretos na plataforma

A NBR 6118 (2007), por intermédio de tabelas, prevê que estruturas de concreto armado localizadas em ambientes de atmosfera marinha estão sujeitas a um grau de agressividade forte, com risco de degradação considerada grande. Nesses casos, a estrutura é introduzida na classe de agressividade ambiental III. Quando o concreto está sujeito à variação ou respingos de maré, o risco de degradação passa a ser considerado elevado, com agressividade do ambiente avaliada em muito forte e classe de agressividade ambiental IV.

Para elementos estruturais em concreto armado, o cobrimento nominal deve ser igual a 40 mm para classe de agressividade ambiental III, e igual a 50 mm para classe de agressividade ambiental IV, segundo a NBR 6118 (2007).

No que diz respeito a CEN (2004), quando se trata de corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar, uma estrutura exposta ao sal transportado pelo ar, mas não em contato direto com a água pertence à classe XS1. É o caso das partes mais elevadas da plataforma de concreto. Quando o elemento está sujeito a variação de marés, da rebentação ou da neblina marítima, a classe de exposição é a XS3. Para ambos os casos, a classe estrutural considerada foi a S4 para a plataforma offshore estudada por Brito (2008), considerando-se uma vida útil de 50 anos, conforme esclarecido no embasamento teórico do presente estudo.

Sendo assim, por intermédio de tabelas do CEN (2004), e majorados em 10 mm devido as tolerância de execução recomendadas pela própria norma, é possível obter os valores de cobrimento nominal igual a 45 mm para a classe de exposição XS1 e 55 mm para a classe de exposição XS3.

Seguindo as etapas da Figura 1b, os dados de medições de cloretos obtidos por Brito (2008) foram aplicados na Equação 2. Os coeficientes de difusão de cloretos para cada ponto de medição foram determinados para a idade de 29 anos da estrutura (idade no momento dos ensaios), com as seguintes considerações assumidas: (1) não há cloreto no concreto para $t = 0$, ou seja, $C_i = 0$; e (2) a concentração superficial de cloretos (C_s) foi considerada como a concentração de cloretos medida por Brito (2008) no ponto mais externo de medição, geralmente a 10 ou 20 mm da superfície.

Após a determinação de um coeficiente de difusão médio para cada ponto de coleta de amostras, recorreu-se novamente à Equação 2 para averiguação da concentração de cloretos quando $t = 50$ anos, ou seja, o período de projeto considerado no presente estudo, e quando a

profundidade for igual ao cobrimento nominal estabelecido pela norma, respeitando as classes de agressividades. Os valores de concentração de cloretos calculados foram comparados com a concentração limite adotada neste artigo ($C_{lim} = 0,4$ % massa de cimento).

No tocante ao modelo apresentado pela ISO N280 (2010) e pela FIB (2010), assim como foi descrito nos métodos referentes a carbonatação, a verificação foi feita com base no tempo de vida remanescente dos elementos da plataforma offshore em concreto. Através da Equação 2, e utilizando-se os dados coletados em campo por Britto (2008), diferentes coeficientes de difusão foram determinados, para cada ponto de medição realizada.

As mesmas considerações antes assumidas nas análises das normas da NBR 6118 (2007) e CEN (2004), também se tornaram válidas no estudo da ISO N280 (2010) e FIB (2010). Com o coeficiente de difusão determinado e conhecido o cobrimento nominal utilizado na plataforma (= 50 mm, segundo projeto da plataforma), verificou-se o valor de t necessário para a concentração de cloretos, a uma profundidade equivalente ao cobrimento, se igualar a concentração limite de cloretos (= 0,4 % em relação a massa de cimento). Para tal, foi utilizada a Equação 2, tal como indicado no fluxograma da Figura 2b.

Os resultados são apresentados em função dos tempos t_a e t_r , de acordo com a notação: t_a = tempo necessário para os cloreto atingirem a armadura, em uma concentração igual a 0,4 % em relação à massa de cimento; t_r = tempo remanescente que a estrutura pode ser utilizada, contado a partir da data dos ensaios, sem que sua armadura seja atingida pela concentração limite, calculado caso $t_a > 29$ anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Carbonatação nos viadutos

Os resultados das análises realizadas nas normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004) estão apresentados nas Tabela 1 – Comparação entre a profundidade de carbonatação e o cobrimento mínimo indicado pelas normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004) – viaduto 1. Tabelas 1 e 2 para os viadutos 1 e 2, respectivamente.

Os resultados apresentados mostram que, não raras vezes, as normalizações não foram capazes de proteger os viadutos como um todo do avanço da frente de carbonatação durante a vida útil esperada de 50 anos.

A NBR 6118 (2007) e o CEN (2004), ao fazerem exigências de cobrimento nominal por tabelas, não asseguraram a proteção da armadura por 50 anos para as estruturas analisadas no presente estudo, de acordo com o observado nas Tabelas 1 e 2, evidenciando o risco de despassivação das barras de aço de alguns elementos das estruturas. Verifica-se também uma grande diferença nos valores de profundidade carbonatada em uma mesmo viaduto, podendo esse valor se situar entre 11 e 91 mm para o viaduto 1, por exemplo, representando uma variação de aproximadamente 727 % (Tabela 1).

Ainda analisando a Tabela 1, pode-se observar que dos 35 pontos de medida realizados no viaduto 1, a profundidade máxima da frente de carbonatação em 50 anos foi menor em apenas 2 pontos para o cobrimento nominal recomendado pela NBR 6118 (2007), e em 3 pontos para o cobrimento calculado pelo CEN (2004), o que representa apenas 5,7 % e 8,6 % das medições, respectivamente.

O viaduto 2 apresentou melhores condições de durabilidade quanto à carbonatação quando comparado com o viaduto 1. A Tabela 2 revela que a NBR 6118 (2007) conseguiu proteger 47,2 % das medidas realizadas, enquanto que o CEN (2004) assegurou um

cobrimento nominal suficiente para proteger 77,8 % das medidas. Apesar da diferença apresentada pelos viadutos analisados, pode-se observar que ambos não foram protegidos durante os 50 anos de projeto pelas normas comentadas neste parágrafo, pois as reações de corrosão já foram iniciadas em alguns pontos das estruturas antes do tempo previsto, apesar do viaduto 1 apresentar condições mais críticas que o viaduto 2.

Tabela 1 – Comparação entre a profundidade de carbonatação e o cobrimento mínimo indicado pelas normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004) – viaduto 1.

Viaduto 1 (elemento estrutural)	x_{CO_2} (mm) $t = 50$ anos	$x_{CO_2} > C_{nom}$ (= 30 mm) NBR 6118 (2007)	$x_{CO_2} > C_{nom}$ (= 40 mm) CEN (2004)
Viga 1	46,71	Sim	Sim
	59,40	Sim	Sim
	63,65	Sim	Sim
	53,75	Sim	Sim
	43,94	Sim	Sim
Viga 2	44,33	Sim	Sim
	53,40	Sim	Sim
	29,43	Não	Não
	52,53	Sim	Sim
	11,90	Não	Não
Pilar 1	64,09	Sim	Sim
	57,87	Sim	Sim
	78,25	Sim	Sim
Pilar 2	55,53	Sim	Sim
	61,37	Sim	Sim
	70,55	Sim	Sim
	57,53	Sim	Sim
	91,15	Sim	Sim
	57,66	Sim	Sim
	43,20	Sim	Sim
	76,67	Sim	Sim
Viga 3	40,30	Sim	Sim
	46,70	Sim	Sim
	42,84	Sim	Sim
	46,67	Sim	Sim
	73,51	Sim	Sim
Pilar 3	44,60	Sim	Sim
	44,57	Sim	Sim
	65,01	Sim	Sim
Pilar 4	43,18	Sim	Sim
	62,70	Sim	Sim
	71,44	Sim	Sim
	37,81	Sim	Não
	68,44	Sim	Sim
	51,65	Sim	Sim

Tabela 2 – Comparação entre a profundidade de carbonatação e o cobrimento mínimo indicado pelas normas NBR 6118 (2007) e CEN (2004) – viaduto 2.

Viaduto 2 (elemento estrutural)	x_{CO_2} (mm) $t = 50$ anos	$x_{CO_2} > C_{nom}$ (= 30 mm) NBR 6118 (2007)	$x_{CO_2} > C_{nom}$ (= 40 mm) CEN (2004)
Viga 1	34,36	Sim	Não
	46,66	Sim	Sim
	51,83	Sim	Sim
	36,54	Sim	Não
	52,11	Sim	Sim
Viga 2	24,30	Não	Não
	27,09	Não	Não
	43,25	Sim	Sim
	33,88	Sim	Não
	31,18	Sim	Não
Pilar 1	7,05	Não	Não
	17,94	Não	Não
	8,64	Não	Não
	38,57	Sim	Não
	15,33	Não	Não
	28,15	Não	Não
	15,33	Não	Não
	28,15	Não	Não
Viga 3	29,97	Não	Não
	52,44	Sim	Sim
	32,67	Sim	Não
	46,89	Sim	Sim
	28,55	Não	Não
Viga 4	23,26	Não	Não
	50,31	Sim	Sim
	22,92	Não	Não
	56,25	Sim	Sim
	31,21	Sim	Não
Pilar 2	30,14	Sim	Não
	31,14	Sim	Não
	28,33	Não	Não
	31,36	Sim	Não
	21,80	Não	Não
	30,79	Sim	Não
	23,86	Não	Não
	21,34	Não	Não

A Tabela 3 mostra os resultados das análises dos documentos ISO N280 (2010) e FIB (2010).

Tabela 3 - Resultados dos tempos t_a e t_r , de acordo com modelos da ISO N280 (2010) e FIB (2010) – viadutos 1 e 2.

Viaduto 1 (elemento estrutural)	t_a (anos)	t_r (anos)	Viaduto 2 (elemento estrutural)	t_a (anos)	t_r (anos)
Viga 1	20,63	-	Viga 1	38,11	-
	12,75	-		20,67	-
	11,11	-		16,75	-
	15,58	-		33,71	-
	23,31	-		16,57	-
Viga 2	22,90	-	Viga 2	76,24	19,24
	15,78	-		61,34	4,34
	51,96	-		24,06	-
	16,31	-		39,21	-
	317,56	260,56		46,29	-
Pilar 1	10,96	-	Pilar 1	904,75	847,75
	13,44	-		139,74	82,74
	7,35	-		603,47	546,47
	14,59	-		30,25	-
	11,95	-		191,43	134,43
	9,04	-		56,77	-
Viga 3	13,60	-	Viga 3	191,43	134,43
	5,42	-		56,77	-
	13,54	-		50,10	-
	24,12	-		16,36	-
	7,66	-		42,17	-
Viga 4	27,71	-	Viga 4	20,46	-
	20,64	-		55,22	-
	24,52	-		83,14	26,14
	20,66	-		17,78	-
	8,33	-		85,67	28,67
Pilar 2	22,62	-	Pilar 2	14,22	-
	22,65	-		46,21	-
	10,65	-		49,54	-
Pilar 3	24,14	-	Pilar 2	46,40	-
	11,45	-		56,06	-
	8,82	-		45,77	-
	31,48	-		94,66	37,66
	9,61	-		47,45	-
	16,87	-		79,02	22,02
				98,86	41,86

Os modelos analíticos propostos pela ISO N280 (2010) e pela FIB (2010), usados com a finalidade de cálculo de tempo de vida remanescente, mostram que, em diversos pontos da estrutura, o período de vida útil, em termos de avanço da frente de carbonatação, não atingiu

os 50 anos desejáveis. Observa-se situações em que, com menos de 6 anos de uso, a carbonatação atingiu a armadura (viaduto 1, viga 3 - Tabela 3). Um fato diferenciado encontrado na Tabela 3 para o viaduto 1 foi relativo ao ensaio realizado na viga 2, onde observou-se que este ponto, em particular, permite que a estrutura permaneça protegida por mais 260 anos.

A análise da Tabela 3 revela também que o viaduto 1 encontra-se em condições mais críticas, comparado ao viaduto 2, assim como observado nas Tabelas 1 e 2.

Os resultados obtidos através das medições de campo evidenciaram que as normas e documentos analisados consideram toda a estrutura como algo único, assumindo, nas questões de durabilidade, que todas as partes da estrutura estão imersas nas mesmas características ambientais; com isso, tratam somente de caracterizar o macroclima onde a estrutura pode estar exposta.

No entanto, como pôde ser observado neste artigo, o microclima foi o principal fator que influenciou nas diferentes medidas obtidas. Tais fatos contribuíram para que os documentos verificados neste estudo não assegurassem a proteção das armaduras em diversos locais de ensaio. É importante se levar em consideração, por exemplo, que uma face da estrutura de concreto pode estar sujeita a maior umidade do que outra, ou que um elemento pode sofrer maior aquecimento com a exposição ao sol, além de diversos outros fatores que caracterizam o microclima.

5.2 Penetração de cloretos na plataforma

A Tabela 4 apresenta os resultados para as análises referentes a penetração de cloretos na plataforma.

Tabela 4 – Resultado das análises relativas ao ataque de cloretos na plataforma offshore para $t = 50$ anos.

Coluna	C (% em relação à massa de cimento) NBR 6118 (2007)	C (% em relação à massa de cimento) CEN (2004)	t_a (anos) ISO N280 (2010) e FIB (2010)	t_r (anos) ISO N280 (2010) e FIB (2010)
Costado Norte	0,51	0,50	13,68	-
Costado Sul 1	0,45	0,40	60,12	31,12
Costado Sul 2	0,36	0,33	67,90	38,90
Costado Leste	0,26	0,24	2646,06	2617,06
Costado Oeste	0,41	0,40	38,23	9,23

Conforme Tabela 4, observa-se que as normas e projetos de normas estudados não garantiram a vida útil de 50 anos para alguns elementos da estrutura, podendo ocasionar o início do processo de degradação por cloretos antes do período inicialmente planejado.

Tal fato foi identificado na determinação de concentrações de cloretos superiores a 0,4 % em relação à massa de cimento no período de 50 anos para alguns pontos de medição da estrutura de concreto, de acordo com os cobrimentos nominais recomendados pelas normas da NBR 6118 (2007) e pelo CEN (2004). Porém, é possível notar uma discrepância de valores de concentração de cloretos em diferentes pontos da mesma estrutura, para mesma idade e profundidade.

Dos 5 pontos de medição do ataque de cloretos, de acordo com a Tabela 4, três não foram assegurados pela norma da NBR 6118 (2007); apenas 1 ultrapassou a concentração limite de cloretos para a norma do CEN (2004), comprovando menor eficiência em assegurar a durabilidade das estruturas quanto ao ingresso de cloretos da norma NBR 6118 (2007) quando comparada com a CEN (2004). Deve-se ressaltar que dois pontos de medição registraram concentração de cloretos exatamente igual a concentração limite (costado Sul 1 e Oeste) para as análises relativas ao CEN (2004).

No tocante aos modelos analíticos oferecidos pela ISO N280 (2010) e pela FIB (2010), através da Tabela 4 percebe-se que as colunas do costado Norte e Oeste apresentaram tempo para início da corrosão inferior a 50 anos, evidenciando alguma deficiência dos modelos. Entretanto, mais uma vez chama-se a atenção para a grande diferença nos valores encontrados em uma mesma estrutura entre pontos distintos de medida.

Durante a realização dos cálculos do tempo remanescente de vida útil, foi verificado que o coeficiente de difusão médio obtido a partir de dados de campo chegou a variar em 3.668 % dentro da mesma plataforma, comprovando que a adoção de um coeficiente de difusão único para chegar a um valor de cobrimento nominal conduz a situações como as descritas.

Finalmente, assim como comentado a respeito da carbonatação, mediante todas as limitações anteriormente apresentadas para o presente estudo, os resultados reforçam a ideia de que os modelos analisados para ataque de cloretos apresentam necessidades de revisões, se fazendo necessário o entendimento do microclima no qual os elementos de uma estrutura estão inseridos. As normas ainda fazem a distinção da zona de exposição do concreto em relação à água do mar, para a determinação do cobrimento nominal. No entanto, os resultados aqui expostos apontam que apenas isso não é suficiente. Talvez a consideração de fatores ambientais, como direção dos ventos, orientação da estrutura, arrebentação de ondas, dentre outras características que compõe o microclima, possam contribuir para um modelo mais realista.

6. CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu verificar que os métodos e modelos fornecidos pelas normas e projetos de normas analisados não fornecem proteção necessária à estrutura, visando requisitos de durabilidade. Foi observado que peculiaridades que afetam separadamente cada elemento de uma mesma estrutura não são consideradas, comprovando a importância da inserção dos parâmetros relacionados ao microclima nos modelos, dentre os quais, destacam-se a umidade local, temperatura, vento, orientação da face do elemento, influência de fontes poluidoras, ondas e insolação.

Portanto, os resultados atentam para uma revisão dos métodos e modelos verificados neste estudo, a fim de que seja possível o alcance de resultados mais precisos e, conseqüentemente, mais seguros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

REFERÊNCIAS

AÏT-MOKHTAR, A.; BELARBI, R.; BENBOUDJEMA, F.; BURLION, N.; CAPRA, B.; CARCASSÈS, M.; COLLIAT, J.-B.; CUSSIGH, F.; DEBY, F.; JACQUEMOT, F.; LARRARD, T.; LATASTE, J.-F.; BESCOP, P.; PIERRE, M.; POYET, S.; ROUGEAU, P.; ROUGELOT, T.; SELLIER, A.; SÉMÉNADISSE, J.; TORRENTI, J. -M.; TRABELSI, A.; TURCRY, P.; YANEZ-GODOY, H. *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. Cement and Concrete Research*, v.45, p.21-36, mar, 2013.

BRITO, P.C. *Avaliação de durabilidade de uma plataforma offshore em concreto - Estudo de microclima em ambiente marinho*. Dissertação (mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São Jose dos Campos, São Paulo, 2008.

CEN. *EuroCode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, EN 1992-1-1, Brussels, 2004.

EN 14630. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method*. Committee B/517/8, ISBN 0580496228, 2006.

FIB. *Bulletin 56 - Draft Model Code*. Fédération Internationale du Béton, v. 2, Lausanne, 2010.

HELENE, P.R.L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1993.

ISO 22966. *Execution of concrete structures*. International Organization for Standardization - ISO/TC 71/SC 3, 2009.

ISO N280. *Durability - Service life design of concrete structures*. International Organization for Standardization - ISO TC 71/SC 3 N280, 2010.

KUOSA, H.; FERREIRA, R. M.; HOLT, E.; LEIVO, M.; VESIKARI, E. *Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. Cement and Concrete Composites*, v.47, p.32-40, mar, 2013.

NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2007.

PAGE, C.L.; SHORT, N.R.; TARRAS, A. EL. *Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. Cement and Concrete Research*, v.11, n. 3, p.395-406, jan, 1981.

YAZIGI, R. *Avaliação de carbonatação em viadutos em concreto armado*. Dissertação (mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São Jose dos Campos, São Paulo, 2008.