

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Vítor de Bragança Freixo

Estudos Sobre Modelos de Degradação de Estruturas de
Concreto

Trabalho de Graduação
2010

Civil-Aeronáutica

Vítor de Bragança Freixo

**Estudo Sobre Modelos de Degradação de Estruturas de
Concreto**

Orientadora
Prof.^a Dr.^a Maryangela Geimba de Lima

Divisão de Engenharia Civil

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Freixo, Vítor de Bragança
Estudo sobre Modelos de Degradação de Estruturas de Concreto/ Vítor de Bragança Freixo.
São José dos Campos, 2010.
071 f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Orientadora: Prof.^a Maryangela Geimba de Lima.

1. Durabilidade. 2. Estruturas de Concreto. 3. Corrosão. I. Departamento de Ciência e
Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil. II.
Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREIXO, Vítor de Bragança. **Estudo Sobre Modelos de Degradação de Estruturas de Concreto**. 2010. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS – (NEGRITO, TAMANHO 12)

NOME DO AUTOR: Vítor de Bragança Freixo

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo Sobre Modelos de Degradação de Estruturas de Concreto

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Vítor de Bragança Freixo

Rua Rodolpho Fiório, nº 10, apto 1002, Cachoeiro de Itapemirim

29306-331 – Espírito Santo – ES

ESTUDO SOBRE MODELOS DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

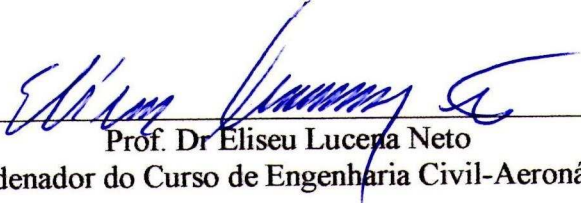
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Vitor de Bragança Freixo, Asp. Of.
Autor



Prof. Dr.^a Maryangela Geimba de Lima - ITA
Orientadora



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de Novembro de 2010

AGRADECIMENTOS

A confecção deste trabalho representa muito mais do que a elaboração de um TG. Ela simboliza o término desse período de 5 anos, ou seja, significa minha formatura no ITA. Dessa forma, os agradecimentos que aqui faço não correspondem apenas à gratidão por aqueles que me ajudaram com esse trabalho, mas também àqueles que estiveram comigo no decorrer do meu curso.

Agradeço a Deus por me ter dado condições de ter chegado até esse momento.

Agradeço a meus pais, que sempre me apoiaram e nunca pouparam esforços para que eu pudesse atingir meus objetivos. Agradeço aos meus familiares, de uma forma geral, que sempre torceram e rezaram por mim, e compartilharam comigo grandes momentos de alegrias.

Agradeço à professora Maryangela, orientadora deste trabalho, que muito contribuiu para a realização do mesmo. Agradeço também a todos os professores que cruzaram o meu caminho na faculdade, pois de alguma forma ajudaram a construir, de forma positiva ou negativa, o engenheiro que se forma nesse ano.

Agradeço a todos aqueles que compartilharam cada momento de ralação e de comemorações, os meus companheiros de turma, que sem dúvidas, tornaram os últimos 5 anos muito mais agradáveis do que poderiam ter sido. De uma maneira especial agradeço a turma de Engenharia Civil-Aeronáutica.

Por fim, agradeço àqueles que em algum momento de faculdade dividiram o apartamento comigo, testemunhando de perto os momentos de vitórias e também os picos de stress.

Resumo

As estruturas de concreto sofrem degradação recorrente do meio ambiente onde estão inseridas. As normalizações e publicações existentes têm considerado o fator durabilidade nas recomendações de projeto, preparo e execução; através da definição de parâmetros como o cobrimento mínimo, visando o alcance 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 propostos, que não raramente conduzem a resultados não condizentes com aqueles observados em campo.

Este trabalho busca estudar a capacidade de os modelos propostos por organizações nacionais e internacionais protegerem da degradação as estruturas sujeitas às condições reais, por um tempo pelo menos igual a sua vida útil de projeto. Para isso são consideradas duas formas de degradação do concreto: a carbonatação, por meio da análise de dois viadutos em concreto armado na rodovia Presidente Dutra, e o ataque de íons cloreto através da análise de uma plataforma offshore no Rio Grande do Norte.

Pôde-se observar que os modelos analisados não conduziram a resultados satisfatórios para todos os pontos onde medições foram realizadas. Em diversos casos, as armaduras já estavam ou estariam sujeitas à deterioração antes dos 50 anos de vida útil esperada, sinalizando um cobrimento nominal insuficiente para o tipo de agressão ambiental sofrida. Além disso, foi possível observar enorme variância em resultados obtidos para um mesmo elemento de uma mesma estrutura, evidenciando a importância da caracterização do microambiente para melhor previsão de comportamento da mesma. Por fim, este trabalho faz uma análise crítica dos modelos de vida útil estudados propondo uma maior representatividade do fator microclima nos mesmos.

Abstract

The concrete structures suffer recurrent degradation of the environment in which they live. The normalization and existing publications have considered the durability factor in the design recommendations, preparation and execution, by setting parameters such as minimum cover thickness, aiming to reach a certain shelf life. However, there is too much trouble for the characterization of environmental exposure of the structure, which hinders the precise formulation of the proposed models, which frequently lead to inconsistent results comparing with those observed in the field.

This work studies the ability of the models proposed by national and international organizations to protect the deteriorating structures subjected to real conditions, for a time at least equal to their design lives. For this are considered two forms of degradation of concrete: carbonation, through the analysis of two reinforced concrete bridges in the Presidente Dutra highway, and the attack of chloride ions through the analysis of an offshore platform in Rio Grande do Norte.

It was observed that the models did not produce satisfactory results for all points where measurements were made. In several cases, the armor had already been or would be subject to decay before 50 years of expected life, signaling a nominal cover thickness is not sufficient for the type of environmental aggression suffered. Furthermore, we observed large variance in results obtained for one element of the same structure, highlighting the importance of characterizing the microenvironment to better predict the behavior of the structure. Finally, this study suggests a revision in models of useful life studied by proposing a greater representation of the microclimate in the same models.

Lista de Figura

Figura 1 - Vista geral do Viaduto 1 sentido SP/RJ com localização aproximada dos ensaios.	32
Figura 2 - Posicionamento preciso dos ensaios - Viaduto 1 - Sentido SP/RJ	32
Figura 3 - Posicionamento preciso dos ensaios - Viaduto 1 - Sentido RJ/SP	32
Figura 4 - Vista geral do Viaduto 2 sentido SP/RJ com localização aproximada dos ensaios.	33
Figura 5 - Posicionamento Preciso dos ensaios - Viaduto 2 - Sentido SP/RJ	33
Figura 6 - Posicionamento Preciso dos ensaios - Viaduto 2 - Sentido RJ/SP	34
Figura 7- Divisão das zonas de exposição da plataforma.....	37
Figura 8 - Esquema em planta das plataformas.....	38

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classes de Agressividade Ambiental (Adaptado de NBR 6118:2003).....	18
Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto de cobrimento (Adaptado de NBR 6118:2003).....	18
Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm. (Adaptado de NBR 6118/2003).....	19
Tabela 4 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição (Adaptado de NBR 12655/2006).....	20
Tabela 5 - Classes de exposição relativas à Carbonatação e ataques de Cloretos (Adaptado de EN 1992).....	21
Tabela 6 - Classificação estrutural recomendada (Adaptado de EN 1992).....	22
Tabela 7 - Valores de Cobrimento mínimo (mm) relativos à durabilidade (Adaptado de EN 1992).....	22
Tabela 8 - Profundidade de carbonatação máxima em cada ensaio (Adaptado de Yazigi, 2008).....	35
Tabela 9 – Resultados dos ensaios para a determinação de cloretos totais (adaptado de Brito, 2008).....	39
Tabela 10 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 1 com idade de 57 anos (adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para NBR 6118.....	43
Tabela 11 - Comparação no Viaduto 1 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela norma brasileira.....	44
Tabela 12 – Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 2 com idade de 57 anos (adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para NBR 6118.....	45
Tabela 13 - Comparação no Viaduto 2 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela NBR 6118.....	46
Tabela 14 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 1 com idade de 57 anos (Adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para EuroCode 2 – versão portuguesa.....	48
Tabela 15 - Comparação no Viaduto 1 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela EuroCode 2 – versão portuguesa	49
Tabela 16 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 2 com idade de 57 anos (Adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para EuroCode 2 – versão portuguesa.....	50

Tabela 17 - Comparação no Viaduto 2 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela EuroCode 2 – versão portuguesa	51
Tabela 18 – Resultado dos cálculos para determinação dos tempos t_a , t_r e t_d para o Viaduto 1	53
Tabela 19 - Resultado dos cálculos para determinação dos tempos t_a , t_r e t_d para o Viaduto 2	54
Tabela 20 – Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para NBR 611858	
Tabela 21 – Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para NBR 6118	59
Tabela 22 - Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para EuroCode 2	60
Tabela 23 - Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para EuroCode 2	61
Tabela 24 - Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para ISO N280	64
Tabela 25 - Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para ISO N280	65

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivo	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Apresentação do Problema	14
1.4	Estrutura do Trabalho	14
2	Modelos Propostos pelas Normas e Publicações	16
2.1	Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento – NBR 6118/2003	16
2.2	EuroCode 2: Projeto de Estruturas de Concreto (EN 1992)	20
2.3	ISO N280 – Durability – Service Life Design of Concrete Structures (2004)	23
2.3.1	Corrosão induzida pela carbonatação	23
2.3.2	Corrosão induzida pelo ataque de cloretos	25
2.4	FIB Model Code (2010) – Bulletin 56.....	27
2.4.1	Corrosão Induzida pela Carbonatação	27
2.4.2	Corrosão Induzida pelo ataque de Cloretos.....	28
3	Modelos Clássicos de Carbonatação e Ataque de Cloretos	29
3.1	Modelo clássico de carbonatação.....	29
3.2	Modelo clássico de ataque de íons cloreto.....	29
4	Referências de Dados de Campo.....	31
4.1	Trabalho de Yazigi (2008).....	31
4.1.1	Posicionamento dos ensaios	31
4.1.2	Valores de profundidade de carbonatação encontrados	34
4.2	Trabalho de Brito (2008)	36
4.2.1	Posicionamento da retirada de corpos de prova	36
4.2.2	Resultados obtidos por Brito (2008).....	38
5	Materiais e Métodos	40

6	Apresentação e Análise dos Resultados	42
6.1	Carbonatação nos Viadutos em Concreto Armado	42
6.1.1	NBR 6118/2003 – Projeto de Estruturas de Concreto	42
6.1.2	EuroCode 2 (EN 1992)	47
6.1.3	ISO N280 (2004)	52
6.1.4	FIB Model Code (2010)	55
6.1.5	Análise dos Resultados de Carbonatação	55
6.2	Penetração de Cloretos na Plataforma Offshore de Concreto	56
6.2.1	NBR 6118/2003 – Projeto de Estruturas de Concreto	56
6.2.2	EuroCode 2 (EN 1992)	59
6.2.3	ISO N280 (2004)	61
6.2.4	FIB Model Code (2010)	65
6.2.5	Análise dos Resultados de Penetração de Cloretos	66
7	Considerações Finais	68
7.1	Principais Conclusões	68
7.2	Sugestões para a continuidade do trabalho	68
	Referências	70

1 Introdução

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho é fazer uma análise da capacidade de previsão de vida útil de estruturas de concreto dos modelos propostos por quatro documentos, sendo duas normalizações e duas propostas de normalizações: NBR 6118:2003 - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento; EuroCode 2: Projeto de Estruturas de Concreto (EN 1992); o projeto de normalização ISO N280 – Durability – Service Life Design of Concrete Structures (2004) e um draft do Bulletin 56, da FIB Model Code (2010).

O estudo será realizado com base em dados reais coletados em campo para estruturas de concreto localizadas em ambiente urbano e ambiente marinho. Dessa forma, serão apresentados resultados de previsão dos modelos apresentados, com base em dados reais, fornecendo subsídios para a revisão dos mesmos. Com isso, busca-se um melhor entendimento da previsão da degradação das estruturas a partir da inclusão de parâmetros ambientais, em especial, aqueles relacionados com o microambiente que envolve as estruturas.

1.2 Justificativa

As estruturas de concreto sofrem degradação decorrente da ação do meio ambiente onde estão inseridas. Fatores como umidade, temperatura, permeabilidade, contato com determinados agentes químicos, entre outros, influenciam diretamente na durabilidade do concreto estrutural, armado e protendido (**Mehta e Monteiro**). Esses fatores auxiliam a elaboração de modelos de previsão de vida útil propostos pelas normas, que buscam definir parâmetros como o cobrimento mínimo visando proteger a estrutura pelo período desejado.

No entanto, muitos modelos e exigências normativas possuem elevado nível de incerteza, prejudicando a confiabilidade dos resultados. Isso pode ser observado em diversas estruturas, que apresentam armaduras expostas e deterioradas antes mesmo de ter completado sua vida útil, ainda que o projeto e execução tenham sido realizados em conformidade com alguma norma reconhecida. Outro fato que também pode ser visto é

a variação dos níveis de degradação do concreto dentro de uma mesma estrutura, ou até em um mesmo elemento da estrutura.

Isso leva a crer que é indispensável a análise do fator microclima para a previsão de durabilidade de uma estrutura. Esse trabalho busca, portanto, a verificação da importância da inclusão deste fator nos modelos de previsão de vida útil propostos e analisados, o que auxiliará na melhoria de exigências normativas.

1.3 Apresentação do Problema

Para a concretização dos objetivos desse trabalho serão utilizados os resultados de ensaios obtidos em amostras coletadas diretamente de estruturas em serviço. São consideradas duas fontes de deterioração para análise dos modelos das normas: Carbonatação e ataque de íons cloreto.

Os dados de profundidade de carbonatação são retirados da tese de mestrado de Yazigi (2008), a partir de medições em Viadutos de concreto. Os dados de concentração e profundidade de íons cloreto são obtidos da tese de mestrado de Brito (2008), que coletou amostras da Plataforma PUB-02 da Petrobrás.

Com o devido conhecimento das exigências normativas e das propostas em estudo pela ISO e pela FIB, e de posse dos dados reais, é possível analisar a capacidade de previsão de vida útil dos modelos, poderão ser avaliadas as exigências dos mesmos e sua capacidade de previsão das condições de serviço da estrutura. Um forte indício de que existirão problemas de previsão é o fato de que esses modelos consideram a estrutura como um elemento único, sem abordarem fatores relacionados ao microclima.

1.4 Estrutura do Trabalho

Para uma boa organização e bom entendimento, esse trabalho está dividido em 7 Capítulos, sendo que o primeiro apresenta quais objetivos a serem cumpridos, a justificativa para a realização do estudo e uma visão geral do problema abordado.

Os Capítulos 2 e 3 mostram vários modelos de previsão de vida útil apresentados por documentos nacionais e internacionais, ou então modelos matemáticos considerados clássicos para o avanço da frente de carbonatação e para o ataque de cloretos.

O Capítulo 4 expõe os trabalhos de onde são retirados os dados para serem utilizados nesse trabalho, e o Capítulo 5 explica qual a metodologia que foi utilizada para que fosse possível uma análise dos modelos.

Os resultados obtidos bem como a análise dos mesmos são apresentados no Capítulo 6. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais desse trabalho.

2 Modelos Propostos pelas Normas e Publicações

Existe uma série de normas que especificam critérios de projeto e execução de estruturas em concreto armado e protendido, esperando, com isso a obtenção de uma durabilidade desejada.

No presente capítulo são tratados aspectos relevantes com relação à durabilidade das estruturas, apresentados pelos seguintes documentos: Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2003, a versão portuguesa da norma europeia EUROCODE (1992) e os projetos de norma ISO N280 (2004) e FIB Model Code (2010) – Bulletin 56.

2.1 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento – NBR 6118/2003

A Norma brasileira NBR 6118/2003 entrou em vigor em 30/03/2003, substituindo a NBR 6118/1980. A principal inovação da nova norma em relação àquela de 1980 pode ser considerada a inserção do fator durabilidade das estruturas de concreto, algo que não era tratado até o momento (Yazigi, 2008).

O Capítulo 6 da NBR 6118/2003 descreve as diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto, abordando os seguintes itens: Exigências de Durabilidade, Vida Útil de Projeto, Mecanismos de Envelhecimento e Deterioração, e por fim, Agressividade do Meio Ambiente.

Com relação às exigências de Durabilidade, a Norma diz que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de forma que conserve 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 em projeto.

A vida útil é definida como o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, contando que sejam atendidos os requisitos de uso e de manutenção previstos.

Com relação a envelhecimento e deterioração, a NBR 6118/2003 divide os mecanismos em três grupos principais:

- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto
 - i. Lixiviação.

- ii. Expansão por ação de águas e solos.
 - iii. Expansão por ação de álcali-agregados.
 - iv. Reações deletérias
- Mecanismos preponderantes de degradação relativos à armadura
 - i. Despassivação por carbonatação.
 - ii. Despassivação por elevado teor de íon Cloro.
 - Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita. São aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação.

Para o objeto deste Trabalho de Graduação, são estudados com maior profundidade os mecanismos de degradação relativos à armadura.

Por fim, a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. A Norma brasileira estabelece classes de agressividade ambiental (fraca, moderada, forte ou muito forte) para estabelecer critérios de projeto que visem o alcance da durabilidade desejada para um determinado tipo de ambiente. A Tabela 1 mostra como a ABNT classifica a agressividade ambiental a qual a estrutura está sujeita.

Tabela 1 - Classes de Agressividade Ambiental (Adaptado de NBR 6118:2003)

Classe Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano (1) (2)	Pequeno
III	Forte	Marinho (1)	Grande
		Industrial (1) (2)	
IV	Muito forte	Industrial (1) (3)	Elevado
		Respingos de maré	

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos ou ambientes em concreto revestidos com argamassa e pintura.

2) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em região de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva, ou em regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Com relação ao concreto de cobrimento, a norma diz que a espessura e a qualidade do mesmo influenciam diretamente na durabilidade das estruturas. A Tabela 2 mostra a correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o concreto de cobrimento.

Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto de cobrimento (Adaptado de NBR 6118:2003)

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Fator água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de Concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 40
	CP	≥ 25	≥ 30	≥ 35	≥ 40

Notas:

1 - O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655

2 - CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado

3- CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Deve-se evitar o uso de aditivos contendo cloreto para que se garanta a qualidade do concreto armado ou protendido.

O projeto e execução para estruturas armadas ou protendidas devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}) a fim de garantir o cobrimento mínimo (c_{min}). O cobrimento nominal é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc), geralmente considerado igual a 10 mm nas obras correntes e 5 mm com controle rigoroso de qualidade. A Tabela 3 mostra a correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal da estrutura de concreto.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm. (Adaptado de NBR 6118/2003)

Tipo de estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

De acordo com a NBR 12655/2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento, há ainda requisitos para o concreto em condições especiais de exposição. A Tabela 4 mostra as especificações para condições especiais de uso.

Tabela 4 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição (Adaptado de NBR 12655/2006)

Condições de exposição	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água	0,5	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químico de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,4	45

2.2 EuroCode 2: Projeto de Estruturas de Concreto (EN 1992)

A versão do EuroCode utilizada foi a versão vigente em Portugal, escrita em língua portuguesa.

A EN 1992 diz que uma estrutura duradoura deve satisfazer, durante o seu período de vida, os requisitos de duração, resistência e estabilidade, sem perda significativa de utilidade, nem excesso de manutenção não prevista.

A norma europeia classifica as estruturas quanto às condições de exposição (físicas e químicas). A Tabela 5 mostra as classes de exposição designadas pela norma europeia para o caso de corrosão induzida por carbonatação e para corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar.

Tabela 5 - Classes de exposição relativas à Carbonatação e ataques de Cloretos
(Adaptado de EN 1992)

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que podem ocorrer as classes de exposição
Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	Seco ou permanentemente úmido	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar ambiente baixa. Concreto permanentemente submerso em água.
XC2	Úmido, Raramente Seco	Superfícies de concreto sujeitas a contato prolongado com a água. Um grande número de fundações.
XC3	Umidade moderada	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar ambiente moderada ou elevada. Concreto exterior protegido da chuva.
XC4	Alternadamente úmido e seco	Superfícies de concreto sujeitas a contato com a água, não inclusos na classe XC2
Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contato direto com a água	Estruturas próximas da costa ou na costa
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zona sujeita ao efeito das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas

O Eurocódigo 2 considera que o uso do cobrimento adequado das armaduras é a principal forma de se conduzir à vida útil desejada. Assim como a NBR 6118/2003, o cobrimento nominal também é dado como o cobrimento mínimo mais uma margem de cálculo para as tolerâncias de execução. O cobrimento mínimo deve assegurar:

- A transmissão eficaz das forças de aderência.
- A proteção do aço contra a corrosão (durabilidade).
- Uma adequada resistência ao fogo.

A Norma Européia recomenda a classificação da estrutura em classes estruturais, de acordo com o tipo de exposição e com a resistência do concreto da obra. Em geral, as estruturas são classificadas na classe estrutural S4, quando se deseja uma vida útil de 50

anos. Essa será a classificação das estruturas estudadas nesse trabalho. Em condições especiais de uso, essa classe pode ser aumentada ou reduzida, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação estrutural recomendada (Adaptado de EN 1992)

Classe estrutural S4							
Critério	Classe de exposição						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Tempo de vida útil de projeto de 100 anos	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes	aumentar 2 classes
Classe de resistência	\geq C30 reduzir 1 classe	\geq C30 reduzir 1 classe	\geq C35 reduzir 1 classe	\geq C40 reduzir 1 classe	\geq C40 reduzir 1 classe	\geq C40 reduzir 1 classe	\geq C50 reduzir 1 classe
Elemento com geometria de laje (posição das armaduras não afetada pelo processo construtivo)	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe
Garantia especial de controle de qualidade da produção do concreto	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe	reduzir 1 classe

A Tabela 7 mostra os cobrimentos mínimos relativos aos requisitos de durabilidade das armaduras de concreto armado. Algumas das classes de exposição apresentadas na Tabela 6 e na Tabela 7 não são mostradas na Tabela 5, pois se referem a formas de degradação não estudadas nesse trabalho.

Tabela 7 - Valores de Cobrimento mínimo (mm) relativos à durabilidade (Adaptado de EN 1992)

Classe estrutural	Classe de exposição						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Para o cálculo do cobrimento nominal, deverá majorar-se, ao nível do projeto, o cobrimento mínimo para levar em conta as tolerâncias de execução. Recomenda-se o uso do valor de 10 mm para a tolerância de execução. Pode-se adotar um valor menor do que esse caso seja possível garantir um grande controle de qualidade na execução.

2.3 ISO N280 – Durability – Service Life Design of Concrete Structures (2004)

A ISO N280 ainda não é uma normalização internacional ISO. Ela é um projeto de norma que está sendo discutido e sujeito a alterações. Evidentemente, objetiva-se certificá-la para que possa ser internacionalmente reconhecida.

A ISO oferece um modelo analítico para cálculo de cobrimento nominal, baseado no avanço da frente de carbonatação e no avanço da profundidade da estrutura atingida por íons Cloreto, conforme mostrado nos itens 2.3.1 e 2.3.2.

2.3.1 Corrosão induzida pela carbonatação

Para a corrosão induzida pela carbonatação, o documento apresenta que o avanço da frente de carbonatação na estrutura deve obedecer a Equação 1.

$$x_c(t) = W(t) \cdot k \cdot \sqrt{t}$$

Equação 1

Onde:

$x_c(t)$: Profundidade de carbonatação na estrutura após um tempo de serviço t .

$W(t)$: É uma função do clima, relacionada à umidade na superfície do concreto.

k : Fator que reflete a influência de aspectos como a execução, tipo de cimento e uso de aditivos.

O valor de $W(t)$ pode ser obtido por meio da Equação 2.

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$$

Equação 2

Onde:

t_0 : Tempo de referência em anos,

t : Tempo de exposição, em anos,

w : expoente climático ($w = 0$, para condições de ambiente fechado e aumenta para valores entre 0 e 1 com o aumento da frequência de eventos que provocam umidade do local). Pode ser calculado pela Equação 3.

$$w = (p_{sr} \cdot Tow)^{b_w}$$

Equação 3

Em que:

Tow é o tempo que a estrutura permanece com superfície úmida,

p_{sr} é a probabilidade de chuvas dirigidas,

b_w é um expoente de regressão.

A ISO N280 informa que o valor de Tow é obtido utilizando-se a Equação 4.

$$Tow = \frac{\text{número de dias de chuva no ano } \geq 2,5 \text{ mm}}{365}$$

Equação 4

Para o projeto de uma nova estrutura, os valores de W e k , ou seu produto podem ser obtidos de estruturas existentes em que a composição do concreto, a execução e as condições de exposição sejam semelhantes àqueles esperados para a nova estrutura.

Para descobrir a vida de serviço remanescente de uma estrutura já existente, o valor desses parâmetros pode ser obtido diretamente da estrutura.

Descoberto o valor de x_c , a seguinte desigualdade expressa pela Equação 5 deve ser satisfeita:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0$$

Equação 5

Onde:

a_d - Valor de projeto para cobrimento de concreto (mm).

$x_{c,d}(t_{SL})$ - Valor de projeto da profundidade de carbonatação para $t = t_{SL}$ (vida útil).

A Equação 6 e a Equação 7 fornecem os valores necessários para resolver a Equação 5.

$$a_d = a_{nom} - \Delta a$$

Equação 6

$$x_{c,d}(t_{SL}) = x_{c,c}(t_{SL}) \cdot \gamma_f$$

Equação 7

Onde:

a_{nom} - Valor nominal do cobrimento do concreto (mm).

Δa - Margem de segurança do cobrimento do concreto (mm).

$x_{c,c}(t_{SL})$ - Valor característico da profundidade de carbonatação (mm), calculado pela Equação 1.

γ_f - Fator de segurança para a profundidade de carbonatação.

2.3.2 Corrosão induzida pelo ataque de cloretos

Quando se trata da corrosão da armadura induzida pelo ataque de íons cloretos, assume-se que o ingresso de cloretos provenientes do meio ambiente marinho pode ser apresentado como na Equação 8.

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

Equação 8

Essa equação, 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 ($x = 0$ na superfície) e em um tempo t .

C_s : Concentração de cloretos na superfície do concreto.

C_i : Concentração de cloretos inicial no concreto.

x : Profundidade considerada na análise (mm).

$D_{app}(t)$: Coeficiente de difusão aparente de cloretos (mm²/ano) para um tempo t .

t : Tempo de exposição em anos.

Erf: Função erro.

A Equação 9 mostra como obter o valor de $D_{app}(t)$.

$$D_{app}(t) = D_{app}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha$$

Equação 9

$D_{app}(t_0)$: Coeficiente de difusão aparente de cloretos medido em um tempo de referência t_0 .

α : É um fator de idade que fornece o decréscimo do coeficiente de difusão ao longo do tempo.

Para o projeto de uma nova estrutura, os valores de C_s , C_i , α e $D_{app}(t_0)$, podem ser obtidos de estruturas existentes em que a composição do concreto, a execução e as condições de exposição sejam semelhantes àqueles esperados para a nova estrutura.

Para descobrir a vida de serviço remanescente de uma estrutura já existente, o valor desses parâmetros pode ser obtido de medições diretamente feitas na estrutura, com a possível exceção de α . Para este caso, α deve ser obtido através de observações em campo de estruturas com condições semelhantes àquela que se deseja estudar.

O cobrimento nominal para esse tipo de ataque pode ser obtido através da Equação 10, Equação 11 e Equação 12, que se assemelham respectivamente à Equação 5, Equação 6 e Equação 7.

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}, C_{cr}) \geq 0$$

Equação 10

$$a_d = a_{nom} - \Delta a$$

Equação 11

$$x_{c,d}(t_{SL}) = x_{c,c}(t_{SL}, C_{cr}) \cdot \gamma_f$$

Equação 12

O termo C_{cr} se refere à concentração crítica de íons Cloreto acima da qual a armadura está sujeita à corrosão. Usualmente, esse valor é considerado como sendo igual a 0,4 % sobre a massa de cimento.

Conforme citado no documento ISO N 280, a ISO 22966 assume $\Delta a = 10$ mm se não forem fornecidos outros valores na especificação da execução.

2.4 FIB Model Code (2010) – Bulletin 56

A FIB, Fédération Internationale du Béton (Federação Internacional do Concreto Estrutural), oferece, assim como a ISO, modelos analíticos para cálculo da profundidade de carbonatação e para avanço da frente de penetração dos íons cloreto, a fim de se fazer a verificação da durabilidade da estrutura de concreto.

2.4.1 Corrosão Induzida pela Carbonatação

O modelo de avanço da frente de carbonatação fornecido pela FIB, é muito semelhante ao modelo proposto pela ISO. Utiliza-se a Equação 1 para determinar $x_c(t)$ (a profundidade que a frente de carbonatação atingirá em um tempo t). Os parâmetros W e k são definidos da forma já anteriormente descrita, e W pode ser obtido com o auxílio da Equação 2 e da Equação 3.

A FIB não contempla, em seu modelo, um cálculo para a obtenção de T_{ow} .

Para o projeto de uma nova estrutura, os valores de W e k, ou seu produto podem ser obtidos de estruturas existentes em que a composição do concreto, a execução e as condições de exposição sejam semelhantes àqueles esperados para a nova estrutura.

Para descobrir a vida de serviço remanescente de uma estrutura já existente, o valor desses parâmetros pode ser obtido diretamente da estrutura.

Quando se deseja a determinação do cobrimento para proteção da armadura, procede-se utilizando a Equação 5, a Equação 6 e a Equação 7.

2.4.2 Corrosão Induzida pelo ataque de Cloretos

O modelo proposto pela FIB para corrosão induzida pelo ataque de íons cloreto também é semelhante com o modelo apresentado pela ISO, já discutido no item Corrosão induzida pelo ataque de cloretos 2.3.2 deste trabalho.

A Equação 8, válida também para a FIB, estabelece uma relação entre concentração de cloretos no concreto em função da profundidade e do tempo de exposição da estrutura. Os parâmetros dessa equação são definidos da mesma forma já apresentada, e a Equação 9 mostra como se determinar o coeficiente de difusão do concreto.

Para o projeto de uma nova estrutura, os valores de C_s , C_i , α e $D_{app}(t_0)$, podem ser obtidos de estruturas existentes em que a composição do concreto, a execução e as condições de exposição sejam semelhantes àqueles esperados para a nova estrutura.

Para descobrir a vida de serviço remanescente de uma estrutura já existente, o valor desses parâmetros pode ser obtido de medições diretamente feitas na estrutura, com a possível exceção de α . Para este caso, α deve ser obtido através de observações em campo de estruturas com condições semelhantes àquela que se deseja estudar.

A FIB fornece a informação de que o valor de α está provavelmente situado entre 0,2 e 0,8. Essa informação não é fornecida pela ISO N280.

O cobrimento nominal para o caso do ataque por cloretos pode ser obtido através da Equação 10, da Equação 11, e da Equação 12.

A FIB também segue a recomendação da ISO 22996, para o uso da margem de segurança de 10 mm no cobrimento, quando não forem fornecidos valores na especificação.

3 Modelos Clássicos de Carbonatação e Ataque de Cloretos

3.1 Modelo clássico de carbonatação

Com relação à carbonatação do concreto, o modelo matemático mais utilizado para prever a profundidade carbonatada de um elemento estrutural é baseada na segunda Lei de Fick para meios homogêneos e fluxo unidirecional, de acordo com a Equação 13.

$$x_{CO_2}(t) = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t}$$

Equação 13

Em que:

x_{CO_2} : Profundidade da frente de carbonatação, em mm.

k_{CO_2} : Constante de carbonatação, dependente dos materiais em $\text{mm.ano}^{-0,5}$.

t : tempo, em anos.

De acordo com Tuutti (1982), a constante de carbonatação depende da concentração de dióxido de carbono, da absorção do mesmo no concreto e da permeabilidade do material.

3.2 Modelo clássico de ataque de íons cloreto

No que diz respeito ao ataque de íons cloreto em uma estrutura de concreto, o movimento dos íons ocorre essencialmente por difusão em meio aquoso, devido a gradientes de concentração entre o meio externo e o interior do concreto. Considerando que esse fluxo é não estacionário, o que contempla o fluxo e a profundidade de penetração variável ao longo do tempo recorre-se a Segunda Lei de Fick para o cálculo do coeficiente aparente de difusão (D_a) (Brito, 2008), conforme Equação 14

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Equação 14

A solução da Equação 14 é dada pela Equação 15

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_a \cdot t}} \right)$$

Equação 15

Onde:

C – Concentração de cloreto na profundidade considerada,

C_0 - Concentração inicial do íon que penetrou no interior do concreto,

C_s - Concentração na superfície do concreto, admitida constante,

erf – Função do erro de Gauss,

x – Profundidade considerada,

D_a - Coeficiente aparente de difusão,

t – Tempo considerado.

Quando as normas não oferecerem um modelo analítico para previsão de vida útil, a Equação 15 será utilizada como modelo clássico de ataque de cloretos auxiliando nos cálculos necessários.

4 Referências de Dados de Campo

Os modelos propostos pelas normalizações apresentadas no Capítulo 2 foram confrontados com valores reais medidos em campo na Tese de Mestrado de Ricardo Yazigi (Yazigi, 2008) e na Tese de Mestrado de Priscila Caterine de Brito (Brito, 2008). Os dados de profundidade de carbonatação e ataque de íons cloreto medidos em estruturas existentes são utilizados neste trabalho e são apresentados no Capítulo 4.

4.1 Trabalho de Yazigi (2008)

Yazigi, em sua Tese, tinha com objetivo avaliar a influência do microclima no processo de degradação de estruturas de concreto armado submetidas ao ambiente urbano e da necessidade de considerar tal influência nos modelos de previsão de vida útil.

Para isso, estudou dois viadutos localizados na BR 116 – Rodovia Presidente Dutra km 65 e km 67, no município de Guaratinguetá no estado de São Paulo. O viaduto do km 67 foi intitulado de Viaduto1, ao passo que o outro foi intitulado Viaduto 2. Yazigi realizou ensaios com a finalidade de obter 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, ou seja, a idade da estrutura era de 57 anos.

4.1.1 Posicionamento dos ensaios

Foram realizados diversos ensaios em vários pontos dos viadutos, tanto de frente quanto de fundo, nos sentidos SP/RJ e RJ/SP, conforme convenção de Yazigi (2008).

A Figura 1 mostra uma vista geral do Viaduto 1 sentido SP/RJ, bem como a localização dos ensaios numerados de 1 à 11. A Figura 2 e a Figura 3 mostram a posição exata dos ensaios em ambos os sentidos.

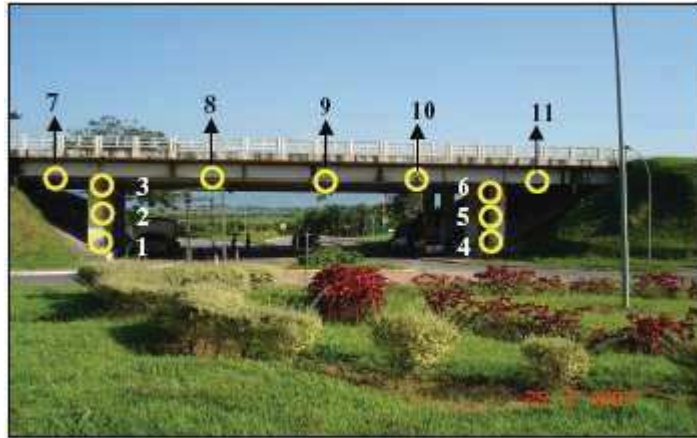


Figura 1 - Vista geral do Viaduto 1 sentido SP/RJ com localização aproximada dos ensaios.

Fonte: (Yazigi, 2008)

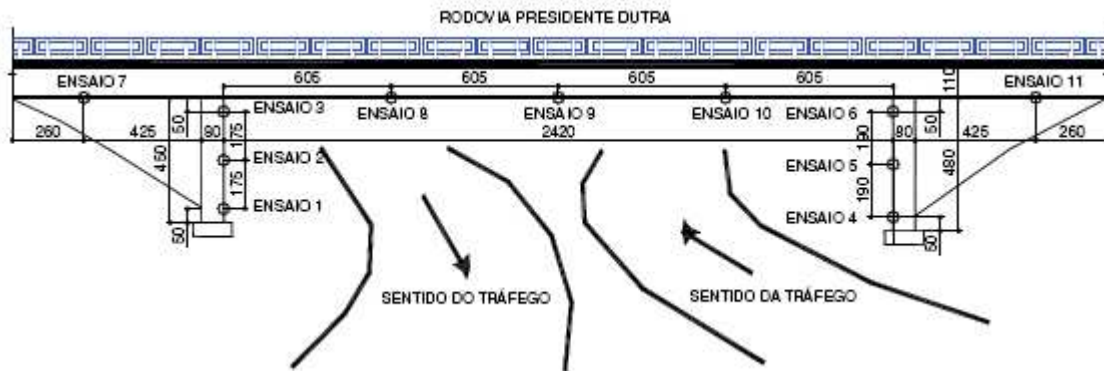


Figura 2 - Posicionamento preciso dos ensaios - Viaduto 1 - Sentido SP/RJ

Fonte: (Yazigi, 2008)

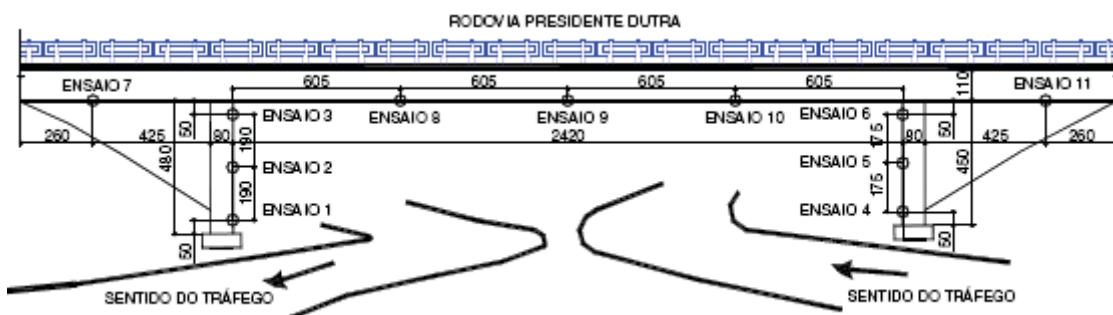


Figura 3 - Posicionamento preciso dos ensaios - Viaduto 1 - Sentido RJ/SP

Fonte: (Yazigi, 2008)

Da mesma forma são apresentados os pontos de ensaio no Viaduto 2, por meio das Figuras Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

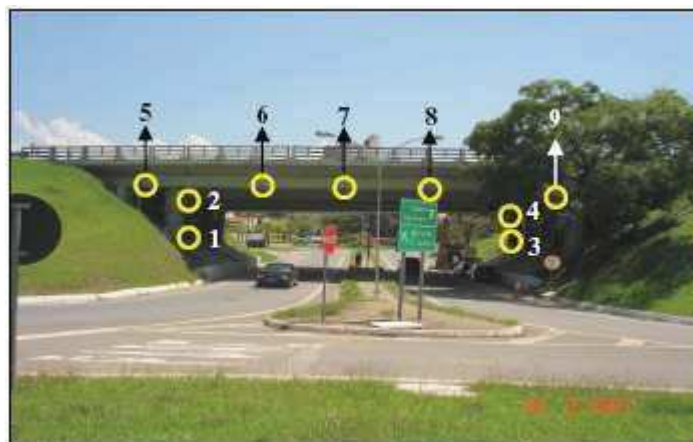


Figura 4 - Vista geral do Viaduto 2 sentido SP/RJ com localização aproximada dos ensaios.

Fonte: (Yazigi, 2008)



Figura 5 - Posicionamento Preciso dos ensaios - Viaduto 2 - Sentido SP/RJ

Fonte: (Yazigi, 2008)

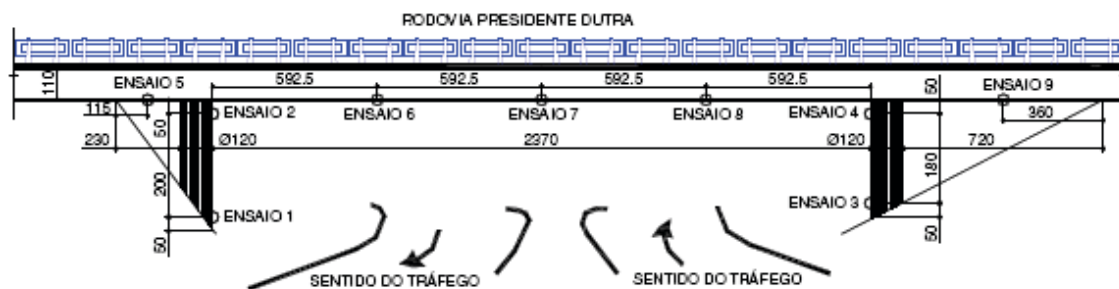


Figura 6 - Posicionamento Preciso dos ensaios - Viaduto 2 - Sentido RJ/SP

Fonte: (Yazigi, 2008)

4.1.2 Valores de profundidade de carbonatação encontrados

Em cada ensaio foram realizadas várias medidas, sendo de interesse para o objeto deste trabalho os valores de profundidade máxima encontrados, uma vez que correspondem à situação crítica e que deve ser evitada. A Tabela 8 mostra os dados obtidos do Viaduto 1 e Viaduto 2.

Tabela 8 - Profundidade de carbonatação máxima em cada ensaio (Adaptado de Yazigi, 2008)

Viaduto 1	Xco ₂ (mm)	Viaduto 2	Xco ₂ (mm)
V1 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	49,87	V2 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	36,69
	63,42		49,82
	67,96		55,34
	57,39		39,01
	46,91		55,64
V1 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	47,33	V2 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	25,94
	57,02		28,92
	31,42		46,18
	56,09		36,17
	12,71		33,29
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	68,43	V2 - SP/RJ	7,53
	61,79	P. Fr. Horiz. E 1 e 2	19,16
	83,55	V2 - SP/RJ	9,22
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	59,29	P. Fr. Vert. E 1 e 2	41,18
	65,52	V2 - SP/RJ	16,37
	75,33	P. Fr. Horiz. E 3 e 4	30,06
V1 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	61,42	V2 - SP/RJ	16,37
	97,32	P. Fr. Vert. E 3 e 4	30,06
	61,56	V2 -RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	32,00
	46,12		55,99
	81,86		34,88
43,03	50,07		
V1 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	49,86	V2 -RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	30,48
	45,74		24,84
	49,83		53,72
	78,49		24,47
	46,1		60,06
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	66,94	V2 - RJ/SP	33,32
	76,28		32,18
	47,62		P. Fr. Horiz. E 1 e 2
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral- Ensaio 1, 2 e 3	47,59	V2 - RJ/SP	30,25
	69,41	P. Fr. Vert. E 1 e 2	33,48
	40,37	V2 - RJ/SP	23,28
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	73,07	P. Fr. Horiz. E 3 e 4	32,88
	55,15	V2 - RJ/SP	25,48
	57,48		22,78
80,86	P. Fr. Vert. E 3 e 4		-
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral - Ensaio 4, 5 e 6	40,38		-

4.2 Trabalho de Brito (2008)

O objetivo central de Brito (2008) era o estudo das condições microclimáticas próximas ou na superfície do concreto em ambiente marinho, verificando o comportamento e durabilidade de uma plataforma *offshore* construída no Brasil em 1976. Esse comportamento seria descrito através de análises da evolução de concentração de íons cloretos e de suas degradações com base em ensaios realizados em campo. A retirada de corpos de prova ocorreu no ano de 2005, ou seja, quando a estrutura possuía 29 anos de serviço.

A plataforma estudada foi a PUB-02, pertencente à Petrobrás, localizada no Nordeste do Brasil. Em sua tese de doutorado, Pereira (2003) fornece os detalhes de localização, as características ambientais e os detalhes da estrutura de concreto presente na plataforma PUB-02.

Brito mediu a concentração de íons cloreto para diversas profundidades a partir da superfície de concreto, em diferentes pontos da plataforma.

4.2.1 Posicionamento da retirada de corpos de prova

Os resultados obtidos são apresentados de acordo com a zona em que o corpo de prova se encontrava (Zona de variação de marés, zona de respingos e zona de atmosfera marinha), de acordo com o costado da plataforma (Norte, Sul, Leste e Oeste) e a coluna estudada na estrutura.

A Figura 7 mostra a divisão das zonas de exposição da plataforma.

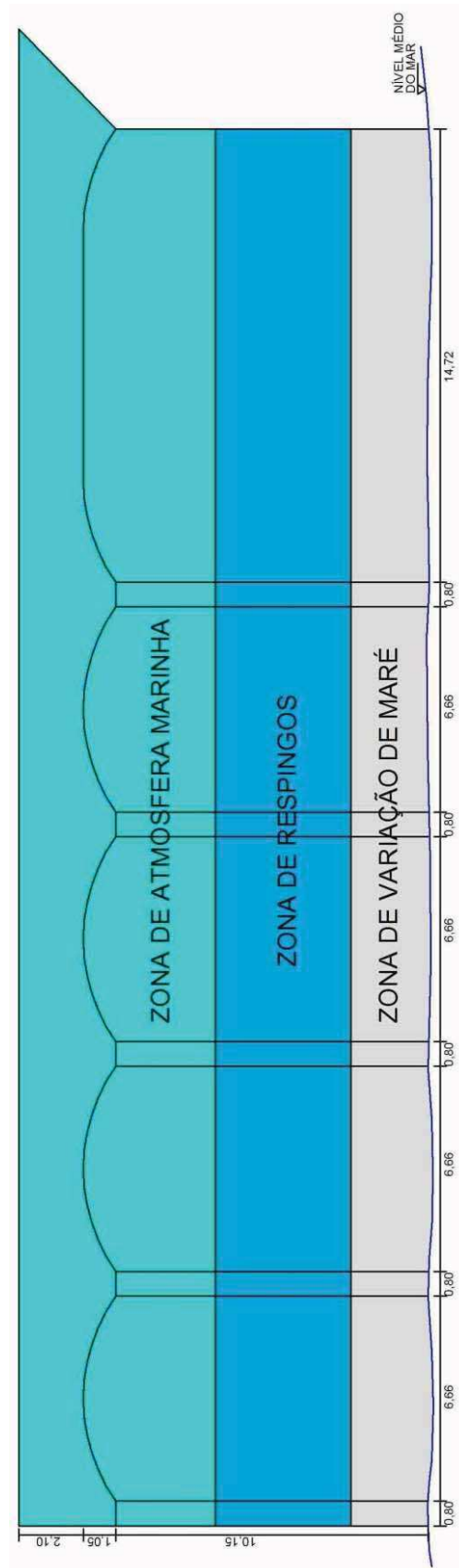


Figura 7- Divisão das zonas de exposição da plataforma

Fonte: (Brito, 2008)

A Figura 8 ilustra o esquema em planta das plataformas, onde os pilares são numerados de 1 à 22, o são definidos os costados Norte, Sul, Leste e Oeste.



Figura 8 - Esquema em planta das plataformas

Fonte: (Brito, 2008)

Como simbologia para identificar o ponto de retirada da amostra para determinação do teor de íons cloreto, utiliza-se o numeral que identifica a coluna da estrutura, conforme apresentado na Figura 8, seguido de um hífen e outro numeral que informa qual a amostra coletada naquela coluna.

4.2.2 Resultados obtidos por Brito (2008)

Para algumas das colunas indicadas na Figura 8, Brito fixou alturas em relação ao nível do mar, de forma a abranger as 3 zonas de exposição mostradas na Figura 7. Para cada uma dessas alturas foram coletadas amostras a diferentes profundidades em relação à superfície, para que fosse determinada a variação da concentração de íons cloreto em função da profundidade da localização da amostra coletada.

É importante dizer que o teor de íons cloretos totais determinados por Brito é em relação à massa de concreto.

A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados

Tabela 9 – Resultados dos ensaios para a determinação de cloretos totais (adaptado de Brito, 2008)

Coluna	Altura (m)	Profundidade (mm)	Conteúdo de íons Cloretos (%)
Costado Norte			
16.1	10,50	10	0,588
		90	0,229
		120	0,351
12.1	12,60	55	0,685
Costado Sul			
11.1	9,50	10	0,851
		90	0,022
		120	0,024
13.1	2,50	10	0,266
		90	0,121
		120	0,058
13.2	4,80	10	0,666
		90	0,105
		120	0,033
Costado Leste			
5.1	9,80	10	0,431
		90	0,052
6.1	9,80	20	0,263
		100	0,111
		130	0,09
Costado Oeste			
20.1	5,40	20	0,049
		100	0,036
20.2	9,30	15	0,234
		95	0,079
19.1	0,80	15	0,514
		95	0,277
19.2	2,00	10	0,152
		90	0,233

Observa-se que os ensaios caracterizados por 13.1, 19.1 e 19.2 correspondem à zona de variação de marés. Os ensaios 13.2 e 20.1 correspondem à zona de respingos e os demais à zona de atmosfera marinha.

5 Materiais e Métodos

Para a concretização do objetivo deste trabalho de graduação, são confrontados os modelos propostos pelos documentos analisados com os valores obtidos de estruturas sujeitas às condições reais, em ensaios de amostras coletadas no campo.

Primeiramente serão analisados os dados de profundidade da frente de carbonatação nos Viadutos da Rodovia Presidente Dutra, obtidos por Yazigi (2008). Os dados foram coletados em 2007, ou seja, a estrutura possuía um tempo de serviço de 57 anos. O interesse é descobrir qual era a profundidade de carbonatação com um tempo de serviço de 50 anos, e checar se os documentos estudados no Capítulo 2 conseguiriam, através de suas recomendações, prever um revestimento que protegesse a armadura por pelo menos a vida útil esperada.

Quando o documento fornecer um revestimento nominal numérico fixo, será utilizado o Modelo Matemático Clássico, conforme a Equação 13, para prever a profundidade carbonatada de um elemento. Nos casos em que o documento fornecer uma forma analítica de se obter o revestimento mínimo, serão utilizadas as equações propostas pelos mesmos.

Caso o revestimento nominal especificado pelas normalizações seja superior à profundidade de carbonatação calculada a partir de dados de campo, significa que o modelo foi capaz de proteger a estrutura pelo período de projeto. Caso contrário, o modelo terá sido ineficiente para os casos estudados.

Após o estudo dos dados referentes à profundidade de carbonatação, serão analisados os dados de penetração de íons cloreto na Plataforma PUB-02, obtidos por Brito(2008). Nesse caso, a idade da estrutura é de 29 anos. Assim, torna-se interessante prever, de posse dos valores reais medidos em campo, qual a profundidade que os íons cloreto atingirão após 50 anos de serviço da plataforma, e se a concentração de cloretos atingirá o valor de 0,4 % em relação a massa de cimento, que, de acordo com Andrade (2001), é o valor em que se deve ter o desencadeamento das reações de corrosão.

Dessa forma, para o caso do ataque por cloretos, os documentos devem fornecer valores de revestimento que não permitam que a profundidade de íons cloreto chegue até a armadura em concentrações superiores à 0,4 % em 50 anos. Caso isso não ocorra,

um determinado documento não terá conseguido proteger a estrutura do ataque desse tipo de agente.

Quando as publicações fornecerem um revestimento nominal numérico fixo, será utilizada a Equação 15 para prever qual será a concentração de cloretos a uma profundidade equivalente o revestimento fornecido, quando a estrutura tiver 50 anos de uso. Para as normalizações que possuem um modelo analítico para cálculo de revestimento, esses modelos serão utilizados para cálculo de tempo de vida remanescente.

6 Apresentação e Análise dos Resultados

Nesse capítulo, são apresentados os resultados da comparação entre os modelos propostos pelos documentos e os valores medidos em campo. Primeiramente são mostrados os dados relativos à carbonatação, com análise realizada para as publicações apresentadas. Em seguida, estruturam-se as comparações realizadas para o ataque de íons cloretos, com posterior análise.

6.1 Carbonatação nos Viadutos em Concreto Armado

6.1.1 NBR 6118/2003 – Projeto de Estruturas de Concreto

De acordo com a Norma brasileira de concreto, uma estrutura de concreto em serviço no ambiente urbano está sujeita a uma agressividade moderada, com risco de degradação pequeno. Dessa forma, conforme a Tabela 1, a classe de agressividade considerada será a Classe II. Assim, o cobrimento nominal da armadura passiva para vigas ou pilares do viaduto será igual a 30 mm, de acordo com a Tabela 3, retirada da NBR 6118/2003.

A Tabela 8 mostra quais foram as profundidades de carbonatação máximas medidas nos viadutos. Conhecendo-se a idade da estrutura ($t = 57$ anos), é possível determinar o valor de k_{CO_2} através da Equação 13. Em seguida, chega-se, com o uso da mesma equação, ao valor da profundidade de carbonatação para o tempo de 50 anos, considerado o tempo de vida útil prevista pela normalização em análise. A intenção é checar se esse valor calculado para o avanço da frente de carbonatação excede o cobrimento mínimo previsto pela NBR 6118.

A Tabela 10 mostra a primeira etapa dos cálculos para a idade de 57 anos do Viaduto 1. Os valores das constantes de carbonatação dessa Tabela são utilizados no cálculo da profundidade quando a estrutura possuía 50 anos. A Tabela 11 mostra o resultado dos cálculos bem como a comparação entre o cobrimento nominal indicado pela Norma brasileira e os valores do avanço da frente de carbonatação calculados.

Tabela 10 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 1 com idade de 57 anos (adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para NBR 6118

Viaduto 1 (V1)	X _{co₂} (mm) t = 57 anos	K _{co₂} (mm.ano ^{-0,5})
V1 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	49,87	6,61
	63,42	8,40
	67,96	9,00
	57,39	7,60
	46,91	6,21
V1 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	47,33	6,27
	57,02	7,55
	31,42	4,16
	56,09	7,43
	12,71	1,68
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	68,43	9,06
	61,79	8,18
	83,55	11,07
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	59,29	7,85
	65,52	8,68
	75,33	9,98
V1 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	61,42	8,14
	97,32	12,89
	61,56	8,15
	46,12	6,11
	81,86	10,84
V1 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	43,03	5,70
	49,86	6,60
	45,74	6,06
	49,83	6,60
	78,49	10,40
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	46,1	6,11
	66,94	8,87
	76,28	10,10
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral- Ensaio 1, 2 e 3	47,62	6,31
	47,59	6,30
	69,41	9,19
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	40,37	5,35
	73,07	9,68
	55,15	7,30
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral - Ensaio 4, 5 e 6	57,48	7,61
	80,86	10,71
	40,38	5,35

Tabela 11 - Comparação no Viaduto 1 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela norma brasileira

Viaduto 1 (V1)	X _{CO₂} (mm) t = 50 anos	X _{CO₂} > C _{nom} (NBR 6118/2003)
V1 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	46,71	sim
	59,40	sim
	63,65	sim
	53,75	sim
	43,94	sim
V1 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	44,33	sim
	53,40	sim
	29,43	não
	52,53	sim
	11,90	não
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	64,09	sim
	57,87	sim
	78,25	sim
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	55,53	sim
	61,37	sim
	70,55	sim
V1 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	57,53	sim
	91,15	sim
	57,66	sim
	43,20	sim
	76,67	sim
V1 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	40,30	sim
	46,70	sim
	42,84	sim
	46,67	sim
	73,51	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	43,18	sim
	62,70	sim
	71,44	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral- Ensaio 1, 2 e 3	44,60	sim
	44,57	sim
	65,01	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	37,81	sim
	68,44	sim
	51,65	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral - Ensaio 4, 5 e 6	53,83	sim
	75,73	sim
	37,82	sim

O mesmo procedimento foi realizado para análise do Viaduto 2. A Tabela 12 e a Tabela 13 mostram os resultados obtidos.

Tabela 12 – Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 2 com idade de 57 anos (adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para NBR 6118

Viaduto 2 (V2)	X _{co₂} (mm) t = 57 anos	K _{co₂} (mm.ano ^{-0,5})
V2 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	36,69	4,86
	49,82	6,60
	55,34	7,33
	39,01	5,17
	55,64	7,37
V2 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	25,94	3,44
	28,92	3,83
	46,18	6,12
	36,17	4,79
	33,29	4,41
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 1 e 2	7,53	1,00
	19,16	2,54
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 1 e 2	9,22	1,22
	41,18	5,45
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 3 e 4	16,37	2,17
	30,06	3,98
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 3 e 4	16,37	2,17
	30,06	3,98
V2 -RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	32,00	4,24
	55,99	7,42
	34,88	4,62
	50,07	6,63
	30,48	4,04
V2 -RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	24,84	3,29
	53,72	7,12
	24,47	3,24
	60,06	7,96
	33,32	4,41
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	32,18	4,26
	33,25	4,40
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 1 e 2	30,25	4,01
	33,48	4,43
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 3 e 4	23,28	3,08
	32,88	4,36
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 3 e 4	25,48	3,37
	22,78	3,02

Tabela 13 - Comparação no Viaduto 2 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela NBR 6118

Viaduto 2 (V2)	X _{co₂} (mm) t = 50 anos	X _{co₂} > C _{nom} (NBR 6118/2003)
V2 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	34,36	sim
	46,66	sim
	51,83	sim
	36,54	sim
	52,11	sim
V2 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	24,30	não
	27,09	não
	43,25	sim
	33,88	sim
	31,18	sim
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 1 e 2	7,05	não
	17,94	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 1 e 2	8,64	não
	38,57	sim
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 3 e 4	15,33	não
	28,15	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 3 e 4	15,33	não
	28,15	não
V2 -RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	29,97	não
	52,44	sim
	32,67	sim
	46,89	sim
V2 -RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	28,55	não
	23,26	não
	50,31	sim
	22,92	não
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	56,25	sim
	31,21	sim
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	30,14	sim
	31,14	sim
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 1 e 2	28,33	não
	31,36	sim
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 3 e 4	21,80	não
	30,79	sim
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 3 e 4	23,86	não
	21,34	não

6.1.2 EuroCode 2 (EN 1992)

De acordo com a norma europeia de estruturas de concreto, os viadutos estudados na Rodovia Presidente Dutra devem estar classificados na classe de exposição XC4, com ambiente caracterizado por estar alternadamente úmido e seco, em que o contato com água ocorre principalmente devido às chuvas, conforme Tabela 5 deste trabalho. Essa classificação se justifica pois se tratam de viadutos a céu aberto, que se encontram secos quando não há chuvas, e molhados caso contrário.

A classe estrutural dos viadutos será considerada S4, classificação recomendada pela norma quando se deseja uma vida útil de 50 anos. Dessa forma, através da Tabela 7, chega-se a um valor de cobrimento mínimo de 30 mm, que deve ser majorado no projeto em 10 mm, como tolerância de execução. O cobrimento nominal deve ser, segundo a EuroCode 2, igual a 40 mm.

Foi realizada uma análise semelhante à apresentada no item 6.1.1, em que foi seguido o mesmo raciocínio para os cálculos.

A Tabela 14 mostra a primeira etapa dos cálculos para a idade de 57 anos do Viaduto 1. Os valores das constantes de carbonatação dessa Tabela são utilizados no cálculo da profundidade quando a estrutura possuía 50 anos. A Tabela 15 mostra o resultado dos cálculos bem como a comparação entre o cobrimento nominal indicado pela Norma europeia e os valores do avanço da frente de carbonatação calculados. Objetiva-se verificar se esse valor calculado excede o cobrimento nominal especificado pelo EuroCode 2.

O mesmo procedimento foi repetido para o Viaduto 2, cujos resultados são apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17.

Tabela 14 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 1 com idade de 57 anos (Adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para EuroCode 2 – versão portuguesa

Viaduto 1 (V1)	X _{co₂} (mm) t = 57 anos	K _{co₂} (mm.ano ^{-0,5})
	49,87	6,61
V1 -SP/RJ	63,42	8,40
Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	67,96	9,00
	57,39	7,60
	46,91	6,21
	47,33	6,27
V1 -SP/RJ	57,02	7,55
Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	31,42	4,16
	56,09	7,43
	12,71	1,68
V1 -SP/RJ	68,43	9,06
Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	61,79	8,18
	83,55	11,07
V1 -SP/RJ	59,29	7,85
Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	65,52	8,68
	75,33	9,98
	61,42	8,14
V1 - RJ/SP	97,32	12,89
Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	61,56	8,15
	46,12	6,11
	81,86	10,84
	43,03	5,70
V1 - RJ/SP	49,86	6,60
Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	45,74	6,06
	49,83	6,60
	78,49	10,40
V1 -RJ/SP	46,1	6,11
Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	66,94	8,87
	76,28	10,10
V1 -RJ/SP	47,62	6,31
Pilar Medida Lateral- Ensaio 1, 2 e 3	47,59	6,30
	69,41	9,19
V1 -RJ/SP	40,37	5,35
Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	73,07	9,68
	55,15	7,30
V1 -RJ/SP	57,48	7,61
Pilar Medida Lateral - Ensaio 4, 5 e 6	80,86	10,71
	40,38	5,35

Tabela 15 - Comparação no Viaduto 1 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela EuroCode 2 – versão portuguesa

Viaduto 1 (V1)	X _{co2} (mm) t = 50 anos	X _{CO2} > C _{nom} (EuroCode 2)
V1 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	46,71	sim
	59,40	sim
	63,65	sim
	53,75	sim
	43,94	sim
V1 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	44,33	sim
	53,40	sim
	29,43	não
	52,53	sim
	11,90	não
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	64,09	sim
	57,87	sim
	78,25	sim
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	55,53	sim
	61,37	sim
	70,55	sim
V1 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	57,53	sim
	91,15	sim
	57,66	sim
	43,20	sim
	76,67	sim
V1 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	40,30	sim
	46,70	sim
	42,84	sim
	46,67	sim
	73,51	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 1, 2 e 3	43,18	sim
	62,70	sim
	71,44	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral- Ensaio 1, 2 e 3	44,60	sim
	44,57	sim
	65,01	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaio 4, 5 e 6	37,81	não
	68,44	sim
	51,65	sim
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral - Ensaio 4, 5 e 6	53,83	sim
	75,73	sim
	37,82	não

Tabela 16 - Valores de profundidade de carbonatação para o Viaduto 2 com idade de 57 anos (Adaptado de Yazigi, 2008) – Estudo para EuroCode 2 – versão portuguesa

Viaduto 2 (V2)	X _{co₂} (mm) t = 57 anos	K _{co₂} (mm.ano ^{-0,5})
V2 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	36,69	4,86
	49,82	6,60
	55,34	7,33
	39,01	5,17
	55,64	7,37
V2 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	25,94	3,44
	28,92	3,83
	46,18	6,12
	36,17	4,79
	33,29	4,41
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 1 e 2	7,53	1,00
	19,16	2,54
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 1 e 2	9,22	1,22
	41,18	5,45
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 3 e 4	16,37	2,17
	30,06	3,98
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 3 e 4	16,37	2,17
	30,06	3,98
V2 -RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	32,00	4,24
	55,99	7,42
	34,88	4,62
	50,07	6,63
	30,48	4,04
V2 -RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	24,84	3,29
	53,72	7,12
	24,47	3,24
	60,06	7,96
	33,32	4,41
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	32,18	4,26
	33,25	4,40
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 1 e 2	30,25	4,01
	33,48	4,43
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 3 e 4	23,28	3,08
	32,88	4,36
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 3 e 4	25,48	3,37
	22,78	3,02

Tabela 17 - Comparação no Viaduto 2 entre a profundidade de carbonatação com 50 anos de serviço e o cobrimento mínimo indicado pela EuroCode 2 – versão portuguesa

Viaduto 2 (V2)	X _{co₂} (mm) t = 50 anos	X _{co₂} > C _{nom} (EuroCode 2)
V2 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	34,36	não
	46,66	sim
	51,83	sim
	36,54	não
	52,11	sim
V2 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	24,30	não
	27,09	não
	43,25	sim
	33,88	não
	31,18	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 1 e 2	7,05	não
	17,94	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 1 e 2	8,64	não
	38,57	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 3 e 4	15,33	não
	28,15	não
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 3 e 4	15,33	não
	28,15	não
V2 -RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaios 5, 6, 7, 8 e 9	29,97	não
	52,44	sim
	32,67	não
	46,89	sim
	28,55	não
V2 -RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaios 5, 6, 7, 8 e 9	23,26	não
	50,31	sim
	22,92	não
	56,25	sim
	31,21	não
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	30,14	não
	31,14	não
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 1 e 2	28,33	não
	31,36	não
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 3 e 4	21,80	não
	30,79	não
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 3 e 4	23,86	não
	21,34	não

6.1.3 ISO N280 (2004)

A análise de validade do modelo proposto pela ISO para as estruturas estudadas será feita com base no tempo de vida remanescente da estrutura já existente. Nesse caso, a norma diz que o valor do produto de $W(t)$ e k pode ser obtido diretamente de medidas na estrutura. Uma vez que o tempo de referência da Equação 2 será considerado igual ao tempo de exposição dos viadutos, o valor de W será igual a 1.

Dessa maneira, com o uso da Equação 1, e dos valores medidos em campo apresentados na Tabela 8, são determinados diferentes valores para o produto entre W e k , para cada ponto de medição realizada por Yazigi (2008).

De posse desses valores, e considerando o cobrimento utilizado nos viadutos igual a 30 mm, é determinado, novamente com a Equação 1, qual o tempo de vida remanescente ou quanto tempo a estrutura está em uso após a frente de carbonatação ter atingido a armadura, quando for o caso. Esses cálculos são feitos considerando cada ponto de medida separadamente. Na prática, se um elemento da estrutura já estiver degradado, a estrutura como um todo também estará.

A Tabela 18 mostra o valor de profundidade de carbonatação medido em campo com tempo de exposição de 57 anos para o Viaduto 1. Também são apresentados os valores do produto $W.k$, além dos tempos t_a , t_r e t_d , conforme notação explicada abaixo:

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 do início do serviço da estrutura.

t_r : Tempo remanescente que a estrutura pode ser utilizada contado a partir da data de medição, sem que sua armadura seja atingida. Calculado caso $t_a > 57$ anos.

t_d : Tempo que a armadura fica desprotegida antes dos 50 anos previstos para vida útil. Ou seja, quantos anos antes da estrutura atingir 50 anos de idade a frente de carbonatação atingiu profundidade equivalente ao cobrimento. Calculado caso $t_a < 50$ anos.

Nos casos em que $50 < t_a < 57$ anos, significa que a norma conseguiu proteger a estrutura pelos 50 anos desejáveis, mas atualmente, sua armadura já se encontra degradada.

A Tabela 19 apresenta os mesmos dados para o Viaduto 2.

Tabela 18 – Resultado dos cálculos para determinação dos tempos t_a , t_r e t_d para o Viaduto 1

Viaduto 1	X _{co2} (mm) t = 57 anos	W.K (mm.ano ^{-0,5})	t _a (anos)	t _r (anos)	t _d (anos)
V1 -SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	49,87	6,61	20,63	-	29,37
	63,42	8,40	12,75	-	37,25
	67,96	9,00	11,11	-	38,89
	57,39	7,60	15,58	-	34,42
	46,91	6,21	23,31	-	26,69
V1 -SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	47,33	6,27	22,90	-	27,10
	57,02	7,55	15,78	-	34,22
	31,42	4,16	51,96	-	-
	56,09	7,43	16,31	-	33,69
	12,71	1,68	317,56	260,56	-
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaios 1, 2 e 3	68,43	9,06	10,96	-	39,04
	61,79	8,18	13,44	-	36,56
	83,55	11,07	7,35	-	42,65
V1 -SP/RJ Pilar Medida Frontal - Ensaios 4, 5 e 6	59,29	7,85	14,59	-	35,41
	65,52	8,68	11,95	-	38,05
	75,33	9,98	9,04	-	40,96
V1 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	61,42	8,14	13,60	-	36,40
	97,32	12,89	5,42	-	44,58
	61,56	8,15	13,54	-	36,46
	46,12	6,11	24,12	-	25,88
V1 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaios 7, 8,9, 10 e 11	81,86	10,84	7,66	-	42,34
	43,03	5,70	27,71	-	22,29
	49,86	6,60	20,64	-	29,36
	45,74	6,06	24,52	-	25,48
	49,83	6,60	20,66	-	29,34
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaios 1, 2 e 3	78,49	10,40	8,33	-	41,67
	46,1	6,11	24,14	-	25,86
	66,94	8,87	11,45	-	38,55
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral- Ensaios 1, 2 e 3	76,28	10,10	8,82	-	41,18
	47,62	6,31	22,62	-	27,38
	47,59	6,30	22,65	-	27,35
V1 -RJ/SP Pilar Medida Frontal - Ensaios 4, 5 e 6	69,41	9,19	10,65	-	39,35
	40,37	5,35	31,48	-	18,52
	73,07	9,68	9,61	-	40,39
V1 -RJ/SP Pilar Medida Lateral - Ensaios 4, 5 e 6	55,15	7,30	16,87	-	33,13
	57,48	7,61	15,53	-	34,47
	80,86	10,71	7,85	-	42,15
	40,38	5,35	31,46	-	18,54

Tabela 19 - Resultado dos cálculos para determinação dos tempos t_a , t_r e t_d para o Viaduto 2

Viaduto 2	X _{co₂} (mm) t = 57 anos	W.K (mm.ano ^{-0,5})	t _a (anos)	t _r (anos)	t _d (anos)
V2 - SP/RJ Viga Medida Frontal - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	36,69	4,86	38,11	-	11,89
	49,82	6,60	20,67	-	29,33
	55,34	7,33	16,75	-	33,25
	39,01	5,17	33,71	-	16,29
	55,64	7,37	16,57	-	33,43
V2 - SP/RJ Viga Medida Fundo - Ensaio 7, 8,9, 10 e 11	25,94	3,44	76,24	19,24	-
	28,92	3,83	61,34	4,34	-
	46,18	6,12	24,06	-	25,94
	36,17	4,79	39,21	-	10,79
	33,29	4,41	46,29	-	3,71
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 1 e 2	7,53	1,00	904,75	847,75	-
	19,16	2,54	139,74	82,74	-
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 1 e 2	9,22	1,22	603,47	546,47	-
	41,18	5,45	30,25	-	19,75
V2 - SP/RJ P. Fr. Horiz. E 3 e 4	16,37	2,17	191,43	134,43	-
	30,06	3,98	56,77	-	-
V2 - SP/RJ P. Fr. Vert. E 3 e 4	16,37	2,17	191,43	134,43	-
	30,06	3,98	56,77	-	-
V2 - RJ/SP Viga Medida Frontal - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	32,00	4,24	50,10	-	-
	55,99	7,42	16,36	-	33,64
	34,88	4,62	42,17	-	7,83
	50,07	6,63	20,46	-	29,54
	30,48	4,04	55,22	-	-
V2 - RJ/SP Viga Medida Fundo - Ensaio 5, 6, 7, 8 e 9	24,84	3,29	83,14	26,14	-
	53,72	7,12	17,78	-	32,22
	24,47	3,24	85,67	28,67	-
	60,06	7,96	14,22	-	35,78
	33,32	4,41	46,21	-	3,79
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 1 e 2	32,18	4,26	49,54	-	0,46
	33,25	4,40	46,40	-	3,60
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 1 e 2	30,25	4,01	56,06	-	-
	33,48	4,43	45,77	-	4,23
V2 - RJ/SP P. Fr. Horiz. E 3 e 4	23,28	3,08	94,66	37,66	-
	32,88	4,36	47,45	-	2,55
V2 - RJ/SP P. Fr. Vert. E 3 e 4	25,48	3,37	79,02	22,02	-
	22,78	3,02	98,86	41,86	-

6.1.4 FIB Model Code (2010)

Por apresentar um modelo praticamente idêntico ao mostrado pela ISO N280, a proposta da FIB produz resultados iguais àqueles já mostrados nas Tabelas do item 6.1.3. A análise também é feita com base no tempo de vida remanescente, em que os valores de W e k podem ser obtidos diretamente de medidas na estrutura.

Os cálculos são feitos da mesma forma explicada no item anterior, e todas as considerações e definições são válidas para a verificação da modelagem da FIB. Dessa forma, os resultados explicitados na Tabela 18 e na Tabela 19 são também os resultados da análise das recomendações normativas da FIB.

6.1.5 Análise dos Resultados de Carbonatação

Os resultados apresentados mostram que, não raras vezes, as normalizações e os documentos analisados 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: 2003 e o EuroCode 2 (1992), ao fazerem exigências de cobrimento nominal, deveriam garantir a proteção da armadura por esses 50 anos, fato que não ocorreu em alguns pontos de medição, como apresentados nas Tabelas 11 e 13 (NBR 6118) nas Tabelas 15 e 17 (EuroCode 2). A última coluna dessas Tabelas confronta a profundidade atingida pela carbonatação e o cobrimento nominal especificado pela norma, evidenciando o risco de despassivação da armadura em alguns elementos dos Viadutos. Observa-se uma grande diferença nos valores de profundidade carbonatada em um mesmo Viaduto, podendo esse valor se situar entre 11 mm e 91 mm para o Viaduto 1, por exemplo.

Os modelos analíticos propostos pela ISO e pela FIB, usados com a finalidade de cálculo de tempo de vida remanescente, mostram que em diversos pontos da estrutura a vida útil, em termos de avanço da frente de carbonatação, acabou antes dos 50 anos desejáveis. Houve casos que, com menos de 6 anos de uso, a carbonatação atingiu a armadura, como por exemplo o ensaio 8 no Viaduto 1, na medida frontal da viga, sentido Rio de Janeiro – São Paulo. Por outro lado, o modelo estima que outros pontos, do mesmo Viaduto poderiam trabalhar em serviço por mais 260 anos, quando se considera o ataque apenas desse tipo de agente.

Os fatos observados evidenciam a grande dificuldade de lidar com a estrutura como sendo algo único, considerando todas as suas partes imersas nas mesmas características ambientais, e desprezando o microambiente em cada parte da estrutura. As medidas realizadas em campo mostram a constante (K) que relaciona a profundidade de avanço da carbonatação com a raiz do tempo variando entre $1,68 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ e $12,89 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ no Viaduto 1 e entre $1,00 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ e $7,96 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ no Viaduto 2.

As normas, ao fornecerem cobrimentos nominais ou modelos para cálculo dos mesmos, consideram um valor único para essa constante, e por isso, acabam não protegendo a armadura por várias vezes, o que sugere que uma revisão nos modelos propostos para carbonatação deve ser realizada. É importante se levar em conta, por exemplo, que uma face, pode estar sujeita a maior umidade do que outra, ou que um elemento pode sofrer maior aquecimento com o uso, além de diversos outros fatores que caracterizam o microambiente.

6.2 Penetração de Cloretos na Plataforma Offshore de Concreto

6.2.1 NBR 6118/2003 – Projeto de Estruturas de Concreto

A Norma Brasileira de estruturas de concreto prevê que estruturas 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 classificada na classe de agressividade ambiental III. Quando o concreto está sujeito a respingos de maré ou se encontra em zonas de variação da mesma, o risco de deterioração passa a ser considerado elevado, com agressividade do ambiente muito forte. Nesses casos a classe de agressividade ambiental será IV. Essas classificações podem ser observadas conforme Tabela 1 deste trabalho.

A Tabela 3 mostra que para elementos de viga ou pilar 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.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos no trabalho de Brito (2008), especificando a profundidade de retirada dos corpos de prova e a concentração de cloretos nesses pontos. Essas medidas foram realizadas com a estrutura exposta por 29

anos. De posse desses dados, com o auxílio do modelo clássico exposto pela Equação 15, determina-se o coeficiente de difusão para cada ponto de medição, com algumas considerações a serem feitas:

- $C_0 = 0$, não há íon cloreto no concreto no início de seu serviço.
- C_s será considerada a concentração de cloretos no ponto mais externo de medição, geralmente a 10 ou 20 mm da superfície, no trabalho de Brito (2008)
- Quando existirem 3 profundidades de medição, as duas mais profundas são utilizadas para determinar coeficientes de difusão diferentes. É adotada a média entre os dois.
- Quando só existir uma profundidade de medida, não é possível a realização de cálculos para determinar o coeficiente de difusão.
- Quando a concentração de cloretos aumenta com o aumento da profundidade, considera-se que os dados estão errados, e não se prossegue com o cálculo.

Após a determinação de um coeficiente de difusão médio para cada ponto de coleta de amostras, recorre-se novamente à Equação 15, para checar qual será a concentração de cloretos quando $t = 50$ anos e quando a profundidade for igual ao cobrimento nominal da norma, respeitando a classe de agressividade III ou IV. Deve-se verificar se essa concentração excederá ou não os 0,4 % em relação à massa de cimento que desencadeiam as reações de corrosão da armadura.

A Tabela 20 mostra a primeira etapa dos cálculos. Em seguida, a Tabela 21 mostra a continuação dos cálculos, aproveitando os resultados apresentados na primeira tabela, chegando na última coluna ao valor da concentração de cloretos na profundidade da armadura após 50 anos de serviço.

Define-se Z nas tabelas como mostrado na Equação 16

$$Z = \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

Equação 16

Z é utilizado quando ainda não se determinou o valor de D

Z_D é usado após a obtenção de um coeficiente de difusão médio, para o cálculo da concentração final após a vida útil da estrutura.

Tabela 20 – Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para NBR 6118

Coluna	Profundidade (mm)	Cs	C t=29 anos	C/Cs	1-(C/Cs)= erf z
16.1	10	0,588%			
	90	0,588%	0,229%	0,38946	0,61054
	120	0,588%	0,351%	0,59694	0,40306
12.1	55	Não são realizados cálculos			
11.1	10	0,851%			
	90	0,851%	0,022%	0,02585	0,97415
	120	0,851%	0,024%	0,02820	0,97180
13.1	10	0,266%			
	90	0,266%	0,121%	0,45489	0,54511
	120	0,266%	0,058%	0,21805	0,78195
13.2	10	0,666%			
	90	0,666%	0,105%	0,15766	0,84234
	120	0,666%	0,033%	0,04955	0,95045
5.1	10	0,431%			
	90	0,431%	0,052%	0,12065	0,87935
6.1	20	0,263%			
	100	0,263%	0,111%	0,42205	0,57795
	130	0,263%	0,090%	0,34221	0,65779
20.1	20	0,049%			
	100	0,049%	0,036%	0,73469	0,26531
20.2	15	0,234%			
	95	0,234%	0,079%	0,33761	0,66239
19.1	15	0,514%			
	95	0,514%	0,277%	0,53891	0,46109
19.2	10	0,152%			
	90	0,152%	0,233%	1,53289	-0,53289

Tabela 21 – Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para NBR 6118

Coluna	Profundidade (mm)	z	D	D médio	erf Z _D	C t=50 anos
16.1	10					
	90	0,60854	188,56027	538,20332	0,13689	0,51%
	120	0,37392	887,84637			
11.1	10					
	90	1,57574	28,12287	39,83935	0,47374	0,45%
	120	1,55172	51,55583			
13.1	10					
	90	0,52842	250,07873	206,86024	0,27189	0,19%
	120	0,87097	163,64175			
13.2	10					
	90	0,99914	69,94826	67,16227	0,45821	0,36%
	120	1,38864	64,37627			
5.1	10					
	90	1,09747	57,97544	57,97544	0,40065	0,26%
6.1	20					
	100	0,56771	267,47758	295,23000	0,18408	0,21%
	130	0,67162	322,98242			
20.1	20					
	100	0,23963	1501,27287	1501,27287	0,10268	0,04%
20.2	15					
	95	0,67805	169,22649	169,22649	0,24153	0,18%
19.1	15					
	95	0,43449	412,12566	412,12566	0,19455	0,41%
19.2	10					
	90	Não se prossegue com o cálculo				

6.2.2 EuroCode 2 (EN 1992)

De acordo com a versão portuguesa da norma europeia de estruturas de concreto, 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 dos pilares da plataforma. Quando o elemento está sujeito a variação de marés, da rebentação ou da neblina marítima a classe de exposição é a XS3, conforme Tabela 5. Para ambos os casos, na

plataforma offshore estudada a classe estrutural considerada foi a S4, desejando-se uma vida útil de 50 anos.

Obtêm-se da Tabela 7 os valores de cobertura nominal igual a 45 mm para a classe de exposição XS1 e 55 mm para a classe de exposição XS3.

Os cálculos foram feitos da mesma forma que aquela explicada no item 6.2.1, seguindo o mesmo raciocínio, e sendo válidas as mesmas considerações. Novamente a Equação 15 foi utilizada para a determinação do coeficiente de difusão médio e para a determinação da concentração de íons cloreto na profundidade equivalente ao cobertura recomendado por norma, com uma idade de 50 anos de exposição. A Tabela 22 e a Tabela 23 mostram os resultados obtidos para análise do EuroCode 2.

Tabela 22 - Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para EuroCode 2

Coluna	Profundidade (mm)	Cs	C t=29 anos	C/Cs	1-(C/Cs)= erf z
16.1	10	0,588%			
	90	0,588%	0,229%	0,38946	0,61054
	120	0,588%	0,351%	0,59694	0,40306
12.1	55	Não são realizados cálculos			
11.1	10	0,851%			
	90	0,851%	0,022%	0,02585	0,97415
	120	0,851%	0,024%	0,02820	0,97180
13.1	10	0,266%			
	90	0,266%	0,121%	0,45489	0,54511
	120	0,266%	0,058%	0,21805	0,78195
13.2	10	0,666%			
	90	0,666%	0,105%	0,15766	0,84234
	120	0,666%	0,033%	0,04955	0,95045
5.1	10	0,431%			
	90	0,431%	0,052%	0,12065	0,87935
6.1	20	0,263%			
	100	0,263%	0,111%	0,42205	0,57795
	130	0,263%	0,090%	0,34221	0,65779
20.1	20	0,049%			
	100	0,049%	0,036%	0,73469	0,26531
20.2	15	0,234%			
	95	0,234%	0,079%	0,33761	0,66239
19.1	15	0,514%			
	95	0,514%	0,277%	0,53891	0,46109
19.2	10	0,152%			
	90	0,152%	0,233%	1,53289	-0,53289

Tabela 23 - Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para EuroCode 2

Coluna	Profundidade (mm)	z	D	D médio	erf Z _D	C t=50 anos
16.1	10					
	90	0,60854	188,56027	538,20332	0,15380	0,50%
	120	0,37392	887,84637			
11.1	10					
	90	1,57574	28,12287	39,83935	0,52412	0,40%
	120	1,55172	51,55583			
13.1	10					
	90	0,52842	250,07873	206,86024	0,29784	0,19%
	120	0,87097	163,64175			
13.2	10					
	90	0,99914	69,94826	67,16227	0,49786	0,33%
	120	1,38864	64,37627			
5.1	10					
	90	1,09747	57,97544	57,97544	0,44548	0,24%
6.1	20					
	100	0,56771	267,47758	295,23000	0,20660	0,21%
	130	0,67162	322,98242			
20.1	20					
	100	0,23963	1501,27287	1501,27287	0,11288	0,04%
20.2	15					
	95	0,67805	169,22649	169,22649	0,27960	0,17%
19.1	15					
	95	0,43449	412,12566	412,12566	0,21355	0,40%
19.2	10					
	90	Não se prossegue com o cálculo				

6.2.3 ISO N280 (2004)

A verificação da validade da modelagem apresentada pela ISO N280 é feita com base no tempo de vida remanescente dos elementos da plataforma offshore em concreto já exposta 29 anos antes da realização dos ensaios. O ingresso de íons cloreto é descrito pela Equação 8. Para determinação desse tempo de vida restante, a ISO informa que os valores dos parâmetros dessa equação podem ser obtidos diretamente de medidas na estrutura.

Com relação ao cálculo do parâmetro $D_{app}(t)$, o tempo de referência considerado será igual ao tempo de exposição da estrutura. Dessa forma, a Equação 9 fornece um valor constante para o coeficiente de difusão, o qual será denominado D_{app} .

Com o uso da Equação 8, e utilizando-se os dados coletados em campo no trabalho de Britto (2008) apresentados na Tabela 9, são determinados diferentes coeficientes de difusão, para cada ponto de medição realizada.

Para a determinação do coeficiente de difusão, são feitas as mesmas considerações apresentadas no item 6.2.1, as quais são ratificadas neste tópico:

- $C_i = 0$, não há íon cloreto no concreto no início de seu serviço.
- C_s será considerada a concentração de cloretos no ponto mais externo de medição, geralmente a 10 ou 20 mm da superfície, no trabalho de Brito (2008).
- Quando existirem 3 profundidades de medição, as duas mais profundas são utilizadas para determinar coeficientes de difusão diferentes. É adotada a média entre os dois.
- Quando só existir uma profundidade de medida, não é possível a realização de cálculos para determinar o coeficiente de difusão.
- Quando a concentração de cloretos aumenta com o aumento da profundidade, considera-se que os dados estão errados, e não se prossegue com o cálculo.

Com o coeficiente de difusão conhecido, e sabendo que na plataforma o cobrimento utilizado no projeto foi de 50 mm, calcula-se novamente com a Equação 8 em quanto tempo, contado desde que a estrutura entrou em serviço, a concentração de cloretos a uma profundidade equivalente ao cobrimento será igual ou superior a concentração crítica de 0,4 % em relação a massa de cimento.

As especificações do documento devem proteger a estrutura por pelo menos 50 anos, considerado o tempo de vida útil da mesma.

Para apresentação dos resultados são feitas as seguintes definições:

t_a : Tempo que leva para os íons cloreto atingirem a armadura, ou seja, a profundidade de ataque se iguala ao cobrimento, a uma concentração igual a 0,4 %, contado a partir do início do serviço da estrutura.

t_r : Tempo remanescente que a estrutura pode ser utilizada contado a partir da data de medição, sem que sua armadura seja atingida na concentração crítica. Calculado caso $t_a > 29$ anos.

t_d : Tempo que a armadura fica desprotegida antes dos 50 anos previstos para vida útil. Ou seja, quantos anos antes da estrutura atingir 50 anos de idade os íons cloreto atingiram ou atingirão profundidade equivalente ao cobrimento, com uma concentração crítica. Calculado caso $t_a < 50$ anos.

Mais uma consideração deve ser feita para a realização dos cálculos com base no tempo de vida remanescente. Não é possível calcular matematicamente o valor de t_a com a Equação 8 para os casos em que $C_s < C_{crítico}$. Isso porque o valor da função erro de Gauss fornecerá um valor negativo, o que não faz sentido físico para o problema estudado.

Os resultados dos cálculos são apresentados em duas tabelas. A Tabela 24 mostra a primeira etapa dos cálculos para a determinação do coeficiente de difusão. A Tabela 25 é a continuação dos cálculos até a obtenção dos valores de t_a , t_r e t_d .

Tabela 24 - Primeira etapa dos cálculos de ataque de cloretos. Estudo para ISO N280

Coluna	Profundidade (mm)	Cs	C t=29 anos	C/Cs	1-(C/Cs)= erf z	z	D_{app}
16.1	10	0,588%					
	90	0,588%	0,229%	0,38946	0,61054	0,60854	188,56027
	120	0,588%	0,351%	0,59694	0,40306	0,37392	887,84637
12.1	55	Não são realizados cálculos					
11.1	10	0,851%					
	90	0,851%	0,022%	0,02585	0,97415	1,57574	28,12287
	120	0,851%	0,024%	0,02820	0,97180	1,55172	51,55583
13.1	10	0,266%					
	90	0,266%	0,121%	0,45489	0,54511	0,52842	250,07873
	120	0,266%	0,058%	0,21805	0,78195	0,87097	163,64175
13.2	10	0,666%					
	90	0,666%	0,105%	0,15766	0,84234	0,99914	69,94826
	120	0,666%	0,033%	0,04955	0,95045	1,38864	64,37627
5.1	10	0,431%					
	90	0,431%	0,052%	0,12065	0,87935	1,09747	57,97544
6.1	20	0,263%					
	100	0,263%	0,111%	0,42205	0,57795	0,56771	267,47758
	130	0,263%	0,090%	0,34221	0,65779	0,67162	322,98242
20.1	20	0,049%					
	100	0,049%	0,036%	0,73469	0,26531	0,23963	1501,27287
20.2	15	0,234%					
	95	0,234%	0,079%	0,33761	0,66239	0,67805	169,22649
19.1	15	0,514%					
	95	0,514%	0,277%	0,53891	0,46109	0,43449	412,12566
19.2	10	0,152%					
	90	0,152%	0,233%	1,53289	-0,53289	Não se prossegue com o cálculo	

Tabela 25 - Cálculos finais para o ataque de cloretos. Estudo para ISO N280

Coluna	Profundidade (mm)	D_{app} médio	$1-(0,4\%/Cs) = \text{erf } Z_D$	Z_D	t_a (anos)	t_r (anos)	t_d (anos)
16.1	10	538,20332	0,31973	0,29139	13,68	-	36,32
	90						
	120						
11.1	10	39,83935	0,52996	0,51083	60,12	31,12	-
	90						
	120						
13.1	10	206,86024	-0,50376	NSA	NSA	-	-
	90						
	120						
13.2	10	67,16227	0,39940	0,37020	67,90	38,90	-
	90						
	120						
5.1	10	57,97544	0,07193	0,06383	2646,06	2617,06	-
	90						
6.1	20	295,23000	-0,52091	NSA	NSA	-	-
	100						
	130						
20.1	20	1501,27287	-7,16327	NSA	NSA	-	-
	100						
20.2	15	169,22649	-0,70940	NSA	NSA	-	-
	95						
19.1	15	412,12566	0,22179	0,19916	38,23	9,23	11,77
	95						

6.2.4 FIB Model Code (2010)

O modelo analítico proposto pela FIB é o mesmo apresentado pela ISO N280, conforme mostrado no Capítulo 2 deste trabalho. A verificação da durabilidade da plataforma offshore também é feita com base no tempo de vida útil remanescente, onde os parâmetros da Equação 8 podem ser obtidos de medidas na estrutura.

Todas as considerações e definições já mostradas no item 6.2.3 são também válidas para o estudo do boletim da FIB. Dessa forma, a Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam também os resultados que se obtêm após aplicação do modelo proposto pela FIB Model Code (2010).

6.2.5 Análise dos Resultados de Penetração de Cloretos

Com relação à penetração de íons cloreto na estrutura de concreto, observou-se também que as normas estudadas não garantiram a vida útil de 50 anos para alguns elementos da estrutura, o que significa que a estrutura começa sua degradação por este tipo de agente antes do período desejado.

As normalizações NBR 6118 e EuroCode 2 definem cobrimentos nominais de projeto que deveriam não permitir que, antes dos 50 anos citados, a profundidade de ataque de cloretos atingisse as armaduras em uma concentração crítica (adotada como 0,4 % em relação à massa de cimento nesse trabalho) que permita o início das reações de corrosão. As Tabelas 21 e 23 mostram que isso não ocorreu para todos os pontos de medição, ou seja, antes da estrutura completar sua vida útil, haverá o desencadeamento das reações de corrosão em diversos pontos da plataforma. Nota-se uma grande discrepância de valores de concentração de cloretos em diferentes pontos da mesma estrutura, para mesma idade e profundidade.

Os modelos analíticos oferecidos pela ISO e pela FIB foram utilizados para o cálculo da vida remanescente dos elementos da plataforma offshore PUB-02. Nota-se que o tempo de vida para a estrutura, sem que haja corrosão das armaduras, é menor do que 50 anos para alguns componentes da plataforma, como mostra a Tabela 25. Mais uma vez chama atenção que numa mesma estrutura o nível de degradação por ataque de íons cloreto possui diferenças grandes entre pontos distintos de medida, mesmo que situados na mesma zona de exposição (atmosfera marinha, zona de variação de marés e zona de respingos), conforme Figura 7.

O coeficiente de difusão médio calculado a partir de dados de campo chegou a variar 3668% dentro da mesma plataforma. Isso mostra que a adoção de um coeficiente de difusão único para chegar a um valor de cobrimento nominal fatalmente conduzirá a situações como as descritas, em que a degradação começa a ocorrer antes de a estrutura atingir seu tempo de vida útil.

Tais fatos reforçam a idéia de que os modelos propostos pelas normalizações para ataque de cloretos precisam ser revistos, se fazendo necessário o entendimento do microambiente no qual os elementos de uma estrutura estão inseridos. As normas ainda fazem a distinção da zona de exposição do concreto em relação a água do mar, para a determinação de cobrimento. No entanto, apenas isso não é suficiente. É preciso se levar

em conta fatores como direção dos ventos, orientação da estrutura, arrebentação de ondas, dentre outras características que compõe o microambiente.

7 Considerações Finais

7.1 Principais Conclusões

Com este trabalho se pretende analisar os modelos de previsão de vida útil propostos por quatro documentos importantes, através do estudo do comportamento de 2 Viadutos na Rodovia Presidente Dutra com relação ao microclima urbano, através de patologias geradas pela carbonatação do concreto; e do comportamento da plataforma PUB-02 em relação ao microclima marinho, com a análise do ataque de íons cloreto nos elementos da estrutura.

Foi possível concluir que os modelos fornecidos pelos documentos estudados possuem grandes dificuldades de fornecer uma proteção necessária à estrutura, visando requisitos de durabilidade, por meio de definição de parâmetros como o cobrimento mínimo. Isso se deve ao fato de que as normas tentam caracterizar o ambiente agressivo no qual a estrutura está inserida, mas encontram dificuldades de levar em conta as peculiaridades que afetam cada elemento da mesma separadamente. Assim, muitas vezes corre-se o risco de degradação da estrutura antes mesmo que ela atinja seu tempo de vida útil.

Dentre essas peculiaridades que compõe o microambiente, e que muitas vezes deixam de ser consideradas, destacam-se a umidade local, temperatura, vento, orientação da face do elemento, influência de fontes poluidoras, ondas, insolação, dentre outras condições.

Recomenda-se então, a revisão dos modelos propostos, para que contemplem mais detalhes sobre o microclima de exposição da estrutura, a fim de que seja possível chegar a resultados mais precisos e mais seguros. É importante que tais revisões incluam normas de projeto, execução, reparo e recuperações.

7.2 Sugestões para a continuidade do trabalho

Diante das conclusões apresentadas, pode-se propor para desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Revisão e/ou redefinição dos modelos de previsão de vida útil estudados, com a possível proposta de implementações ou mesmo mudanças dos mesmos,
- A análise de modelos de durabilidade propostos por outros documentos não abordados por esse trabalho,
- Estudo de outras estruturas para checar se as conclusões desse trabalho podem ser expandidas, não se restringindo aos Viadutos e a plataforma analisada,
- Estudo de outras formas de degradação ou de outros microambientes para avaliação dos modelos de vida útil,
- Estabelecimento de relações entre parâmetros do clima e o grau de manifestações patológicas em estruturas e construções de concreto.

Referências

- Andrade, J. J. O. 2001.** Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos. Porto Alegre, 2001, 277p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2004.** NBR 6118:2003. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, Rio de Janeiro 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006.** NBR 12655:2006. Concreto de Cimento Portland - Preparo, Controle e Recebimento, Rio de Janeiro 2006.
- Brito, Priscila Caterine de.** Avaliação de Durabilidade de uma Plataforma Offshore em Concreto - Estudo de Microclima em Ambiente Marinho, 2008. 146 f. *Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica.* São José dos Campos
- Comité Européen de Normalização. 1992.** EuroCódigo 2: Projecto de estruturas de betão. *Regras gerais e regras para edifícios.* Bruxelas, 1992.
- Fédération Internationale du Béton. 2010.** *Bulletin 56.* Draft Model Code, Volume 2 Lausanne 2010.
- ISO 22966. 2009.** Execucion of concrete structures. 2009.
- ISO TC 71/SC 3 N280. 2010.** Durability - Service life design of concrete structures. 2010.
- Mehta, P. K e Monteiro, P. J. M. 1994.** *Concreto: estrutura, propriedades e materiais.* São Paulo : Pini, 1994.
- Pereira, A. C. 2003.** Estudio de métodos probabilísticos para la predcción de la vida útil de estructuras de hormigón: influencia del factor variabilidad espacial em el caso de plataformas offshore en Brasil. *Tese de Doutorado.* 2003. 545p. ETSIC, UPM, Madrid, 2003
- Tuutti, K. 1982.** Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research, 1982. 469p.
- Yazigi, Ricardo. 2008.** Avaliação de Carbonatação em Viadutos em Concreto Armado. 2008. 185 p. *Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica,* São José dos Campos.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2010	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-075/2010	4. N° DE PÁGINAS 71
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudos sobre modelos de degradação de estruturas de concreto			
6. AUTOR(ES): Vítor de Bragança Freixo			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Durabilidade, estruturas de concreto, carbonatação, ataque de cloretos, microclima, modelos de previsão de vida útil.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Durabilidade; Estruturas de concreto; Corrosão; Dióxido de carbono; Cloretos; Efeitos ambientais; Microclimatologia; Técnicas de previsão; Ciclo de vida; Engenharia civil			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Maryangela Geimba de Lima. Publicado em 2010.			
11. RESUMO: <p>As estruturas de concreto sofrem degradação recorrente do meio ambiente onde estão inseridas. As normalizações e publicações existentes têm considerado o fator durabilidade nas recomendações de projeto, preparo e execução; através da definição de parâmetros como o cobrimento mínimo, visando o alcance 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 propostos, que não raramente conduzem a resultados não condizentes com aqueles observados em campo.</p> <p>Este trabalho busca estudar a capacidade de os modelos propostos por organizações nacionais e internacionais protegerem da deterioração estruturas sujeitas às condições reais, por um tempo pelo menos igual a sua vida útil de projeto. Para isso são consideradas duas formas de degradação do concreto: a carbonatação, por meio da análise de dois viadutos em concreto armado na rodovia Presidente Dutra, e o ataque de íons cloreto através da análise de uma plataforma offshore no Rio Grande do Norte.</p> <p>Pôde-se observar que os modelos analisados não conduziram a resultados satisfatórios para todos os pontos onde medições foram realizadas. Em diversos casos, as armaduras já estavam ou estariam sujeitas à deterioração antes dos 50 anos de vida útil esperada, sinalizando um cobrimento nominal insuficiente para o tipo de agressão ambiental sofrida. Além disso, foi possível observar enorme variância em resultados obtidos para um mesmo elemento de uma mesma estrutura, evidenciando a importância da caracterização do microambiente para melhor previsão de comportamento da estrutura. Por fim, este trabalho sugere uma revisão nos modelos de vida útil estudados propondo uma maior representatividade do fator microclima nos mesmos.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			