Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade

Odd E. Gjørv

supervisão técnica | Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene



oficina de textos

Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade

Odd E. Gjørv

supervisão técnica | Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene

tradução | Leda Maria Marques Dias Beck

Copyright © 2015 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

Conselho editorial Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;
José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez;
Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos;
Teresa Gallotti Florenzano

Supervisão técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene
Capa e projeto gráfico Malu Vallim
Diagramação Alexandre Babadobulos
Foto capa M.schwed - "Puentedelabarra" via Wikimedia commons
Preparação de figuras Letícia Schneiater
Preparação de textos Carolina A. Messias
Revisão de textos Pâmela de Moura Falarara
Tradução Leda Maria Marques Dias Beck
Impressão e acabamento Prol gráfica e editora

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Gjorv, Odd E.
Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade / Odd E. Gjorv ; revisão técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene ; tradução Leda Maria Marques Dias Beck. --
São Paulo : Oficina de Textos, 2015.

Título original: Durability design of concrete structures in severe environments

Bibliografia.
ISBN 978-85-7975-195-0

1. Concreto - Deterioração 2. Construção de concreto 3. Engenharia de estruturas 4. Estruturas de concreto 5. Materiais de construção - Durabilidade I. Helene, Paulo. II. Figueiredo, Enio Pazini. III. Título.

15-06617 CDD-624.1834

Índices para catálogo sistemático:
1. Durabilidade no projeto das estruturas de concreto em ambientes agressivos : Engenharia
624.1834

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**
Rua Cubatão, 959
CEP 04013-043 São Paulo SP
tel. (11) 3085-7933 fax (11) 3083-0849
www.ofitexto.com.br
atend@ofitexto.com.br



A gente se importa com o constante desenvolvimento da construção civil.

Nós, da Weber, fabricante dos produtos quartzolit, nos importamos com o constante desenvolvimento tecnológico do mercado da construção civil. Por isso, apoiamos o lançamento no Brasil do livro **Projeto da Durabilidade de Estruturas de Concreto em Ambientes de Severa Agressividade**, que aborda este tema de extrema importância no campo das estruturas de concreto.

Estamos presentes em 49 países e, como líder de mercado, temos como objetivo facilitar a introdução de produtos inovadores, realizar pesquisas visando à sustentabilidade e apoiar as normativas vigentes, levando soluções construtivas de alto desempenho ao mercado. Isso, porque **a gente se importa** em promover o bem-estar para aqueles que projetam, que produzem, que constroem e que habitam as edificações.

Destacamos para o tema desta obra uma linha completa de soluções para **Construção**, **Reparos**, **Reforços** e **Proteção de Estruturas**, que atendem às mais exigentes solicitações técnicas. **A gente se importa** com tudo que é duradouro.

we care

weber SAINT-GOBAIN produtos quartzolit

Na Weber, **a gente se importa** com o seu negócio. E, para contribuir com o mercado técnico, temos uma equipe de especificação para analisar projetos e obras e propor soluções em produtos ou sistemas, de acordo com as diferentes necessidades. Oferecemos também treinamentos e capacitação de mão de obra, acompanhamento de obras e assistência técnica para todo o Brasil.



Conheça nossas linhas de produtos:

- **Assentamento e Rejuntamento**
- **Fachadas**
- **Impermeabilizantes**
- **Reparos, Reforços e Proteção**
- **Pisos**

Para mais informações:
Telefone: **0800 709 69 79**
Site: **www.weber.com.br**

weber SAINT-GOBAIN produtos quartzolit

agradecimentos

Pelos muitos anos de trabalho para alcançar uma durabilidade maior e mais controlada em novas e importantes infraestruturas de concreto, reconheço a colaboração de muitos de meus alunos recentes de doutorado, que têm trabalhado com vários aspectos da durabilidade do concreto e que contribuíram com partes importantes dos procedimentos, tanto para o projeto de durabilidade como para o controle de qualidade do concreto, como descrito e discutido neste livro. Entre eles, estão Tiewei Zhang, Olaf Lahus, Arne Gussiås, Franz Pruckner, Liang Tong, Surafel Ketema Desta, Miguel Ferreira, Öskan Sengul, Guofei Liu e Vemund Årskog.

Também agradeço ao Norwegian Cost Directorate e à Norwegian Association for Harbor Engineers pelo apoio à pesquisa e, particularmente, a Tore Lundestad e Roar Johansen por seu grande interesse e entusiasmo em testar o novo conhecimento em novas e importantes infraestruturas em portos noruegueses. Como resultado dessa colaboração, recomendações e diretrizes para novas e duráveis infraestruturas marinhas de concreto foram desenvolvidas e adotadas pela Norwegian Association for Harbor Engineers em 2004. As lições extraídas das aplicações práticas dessas recomendações e diretrizes foram incorporadas a edições subsequentes revisadas, a terceira e última das quais, de 2009, foi também adotada pelo capítulo norueguês dos Permanent International Association of Navigation Congresses (Pianc), que é a associação mundial para infraestrutura de transporte por água. Essas recomendações e diretrizes são basicamente as mesmas descritas neste livro, e o *software* Duracon, que provê a base para a análise de durabilidade, também é o mesmo. Esse *software* pode ser baixado gratuitamente no site do capítulo norueguês da Pianc (http://www.pianc.no/duracon.php).

Esta segunda edição revisada do livro inclui mais resultados e experiência adquirida com aplicações práticas, em Oslo, dos procedimentos para projeto de durabilidade e controle de qualidade do concreto em recentes projetos comerciais da Oslo Harbor KF e da Nye Tjuvholmen KS. Agradeço muito a oportunidade de publicar esses resultados.

Também foram incluídos alguns resultados preliminares do Programa Infraestrutura Submersa e Cidade do Futuro Submersa (*Underwater Infrastructure and Underwater City of the Future*), da National Research Foundation (NRF) de Singapura, ali implementado pela Universidade Tecnológica de Nanyang, à qual agradeço. Nesse programa, muito mais abrangente, os procedimentos para projeto de durabilidade e controle de qualidade do concreto também foram adotados como parte da base técnica para o futuro desenvolvimento da cidade de Singapura com grande número de estruturas de concreto sob o mar.

Odd E. Gjørv
Trondheim, Noruega

apresentação à edição brasileira

Trata-se de um livro excepcional que descreve a complexa questão da durabilidade das estruturas de concreto conectando com maestria a pesquisa com a prática, a teoria com o projeto e o rigor de execução, fornecendo dados e ferramentas, com exemplos reais, que viabilizam o complicado cálculo da vida útil de estruturas de concreto em ambientes agressivos.

Uma das maiores dificuldades atuais da Engenharia de Estruturas é conseguir, com certa confiança, introduzir a durabilidade no projeto estrutural. Falta um banco de dados seguro, faltam ensaios coerentes, sejam eles acelerados ou de longa exposição, falta informação consistente de campo, obtida de obras existentes, faltam exemplos didáticos.

No caso de estruturas a serem construídas em ambientes de severa agressividade, nos quais a durabilidade ainda se torna mais crítica e decisiva para o sucesso do empreendimento, a carência desses dados é ainda maior. Este livro vem contribuir sobremaneira para suprir essa falta de conhecimento fornecendo interessantes e confiáveis dados passíveis de serem aproveitados no projeto de estruturas longevas de concreto armado e protendido.

A consciência da importância de se considerar a vida útil da estrutura no projeto estrutural é relativamente recente. Pode-se dizer que essa consciência foi introduzida na Europa e nos Estados Unidos na década de 1990 e no Brasil com a publicação da ABNT NBR 6118:2003 e, mais modernamente, da ABNT NBR 15575:2013, que considera a durabilidade como um dos indiscutíveis critérios de desempenho das construções civis.

No contexto internacional, do ponto de vista conceitual, além do advento das normas de ciclo de vida e de como avaliar esse ciclo, foi fundamental a publicação do *fib Model Code for Service Life Design* em 2006 e do ACI 365. Apesar de terem fornecido ao meio técnico conceitos, ferramentas e modelos de previsão, a carência de dados práticos e confiáveis a serem utilizados nos cálculos continuou.

Segundo a norma ISO 16204:2012, *Durability: service life design of concrete structures*, há quatro alternativas para prever a vida útil

de projeto: o método probabilista integral; o método dos fatores parciais (valores característicos); o método prescritivo (a/c, cobrimento, f_{ck}, adotado na ABNT NBR 6118); e o método baseado na proteção extra da estrutura (no texto da ABNT NBR 6118, também há recomendações de medidas especiais).

É nesta questão que entra a oportuna e inestimável contribuição de Odd E. Gjørv, pois ele conseguiu repassar para este livro grande parte de sua enorme e longa experiência em observação, estudo, inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto em alto-mar (*offshore*) e estruturas costeiras expostas a ambientes marinhos. A agressividade dos cloretos às armaduras do concreto armado e protendido pode ser considerada como a maior agressividade que a natureza pode impingir aos sistemas estruturais em concreto.

Anos de parceria com a Norwegian Association for Harbor Engineers e a Universidade Tecnológica de Nanyang, em Singapura, num interessante programa de construção de cidades dentro do mar, somados à experiência vitoriosa de pesquisador e professor de engenharia na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU) conferem autoridade ímpar a este autor para tratar com profundidade o tema da durabilidade de estruturas em ambientes de severa agressividade.

Cabe ressaltar os vários exemplos de aplicação do *software* Duracon (em conformidade com o *fib Model Code*) para prever vida útil com base no método probabilista integral. Nesse método, é considerado como término da vida útil de projeto o instante em que, probabilisticamente, 10% da armadura da área exposta e sujeita à ação de cloretos fica despassivada.

Assim, o resultado não poderia ser outro, este livro constitui uma obra de consulta obrigatória da engenharia de concreto no país, permitindo que projetistas estruturais obtenham conceitos e dados práticos para a tomada de decisões no âmbito da introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto.

Vai ainda mais além: contribui para a pesquisa na medida em que mostra exemplos em andamento na Noruega e em Singapura, os quais estão servindo de base para expressivos projetos comerciais futuros. Também aborda de forma clara a importância da qualidade e do rigor da execução de obras e suas consequências na vida útil, sendo de leitura altamente recomendável a estudantes, pesquisadores, consultores, construtores, tecnologistas, laboratoristas e gerenciadores de obras de concreto.

Prof. Paulo Helene
São Paulo, julho de 2015

prefácio

As estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade incluem uma variedade de estruturas em diversos tipos de ambiente. Embora muitos processos de deterioração, como as reações álcali-agregado, gelo e degelo e ataques químicos, ainda representem graves desafios e problemas para muitas estruturas importantes de concreto, o rápido desenvolvimento da tecnologia de concreto nos últimos anos facilitou o controle desses processos. Além disso, para novas estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade, o concreto aplicado é normalmente tão denso que a carbonatação do concreto não representa nenhum problema prático. Para estruturas de concreto em ambientes que contêm cloreto, porém, a penetração desse ânion e a prematura corrosão das armaduras ainda parecem ser um desafio muito difícil e grave para a durabilidade e o desempenho de muitas infraestruturas de concreto importantes. Nos últimos anos, também tem havido um aumento significativo do uso de sal de degelo, assim como um rápido desenvolvimento de estruturas de concreto em ambientes marinhos.

Para obter um controle maior e melhor da penetração do cloreto e da corrosão das armaduras, os procedimentos aperfeiçoados e as especificações para combinações apropriadas de qualidade do concreto e cobrimento do concreto são muito importantes. Uma vez terminada e entregue uma nova estrutura de concreto, a qualidade efetivamente alcançada, em geral, pode se apresentar irregular e variável. Cabe ressaltar que, em ambientes de severa agressividade, quaisquer fraquezas e deficiências serão logo reveladas, independentemente da qualidade das especificações de durabilidade e dos materiais utilizados. Portanto, procedimentos aperfeiçoados para controle de qualidade e garantia de qualidade durante a execução da estrutura de concreto também são muito importantes.

Até certo ponto, uma abordagem probabilística do projeto de durabilidade pode acomodar a alta variabilidade e irregularidade das obras. No entanto, apenas a abordagem numérica não é suficiente para garantir a durabilidade. Para obter uma durabilidade com maior controle e perfeição também é essencial especificar os requisitos prescritivos de durabilidade baseados em desempenho, de forma a serem verificados e controlados num programa efetivo de garantia de qualidade durante a execução da estrutura. A documentação da garantia de qualidade obtida e a conformidade com a durabilidade especificada devem ser a chave para qualquer abordagem racional da durabilidade maior e mais controlada e da vida útil de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. Procedimentos adequados para inspeção e avaliação da estrutura e para a manutenção preventiva também são essenciais. Eles são fundamentais para prover o referencial-limite de durabilidade e vida útil a ser controlado nas estruturas de concreto.

Nos últimos anos, um número crescente de proprietários de estruturas de concreto percebeu que pequenos custos adicionais no projeto e execução demonstraram ser um excelente investimento na obtenção de uma durabilidade maior e mais controlada, com resultado superior ao que é possível alcançar com base estrita nas atuais normas e na prática usual das construções em concreto. A durabilidade maior e mais controlada não é apenas uma questão técnica e econômica, mas também uma questão ambiental e de sustentabilidade, que se torna cada vez mais importante. Embora este livro trate do aumento e maior controle da durabilidade de um ponto de vista técnico, uma breve introdução aos custos e à avaliação do ciclo de vida também foi incluída.

sumário

1 Revisão histórica 13
Referências bibliográficas 22

2 Experiência de campo 25
2.1 Estruturas portuárias 26
2.2 Pontes 44
2.3 Estruturas em alto-mar 51
2.4 Outras estruturas 60
2.5 Durabilidade 60
Referências bibliográficas 64

3 Corrosão das armaduras 70
3.1 Penetração do cloreto 71
3.2 Passividade das armaduras 83
3.3 Taxa de corrosão 85
3.4 Fissuras 88
3.5 Par galvânico entre aço exposto e embutido 91
3.6 Projeto estrutural 91
Referências bibliográficas 92

4 Análise de durabilidade 96
4.1 Cálculo da penetração do cloreto 98
4.2 Cálculo da probabilidade 99
4.3 Cálculo da probabilidade de corrosão 101
4.4 Parâmetros de entrada 102
4.5 Estudos de caso 113
Referências bibliográficas 122

5 Estratégias adicionais e medidas de proteção 127
5.1 Armaduras de aço inoxidável 128
5.2 Outras medidas de proteção 132
Referências bibliográficas 142

6 Controle e garantia da qualidade do concreto 147
6.1 Difusividade do cloreto 149

6.2 Resistividade elétrica ... 152
6.3 Cobrimento de concreto ... 155
6.4 Continuidade elétrica ... 157
Referências bibliográficas ... 158

7 Qualidade especificada da execução ... 160
7.1 Conformidade com a durabilidade especificada ... 161
7.2 Qualidade *in situ* ... 161
7.3 Qualidade potencial ... 162

8 Inspeção, avaliação, manutenção preventiva e reparos ... 163
8.1 Controle da penetração do cloreto ... 164
8.2 Probabilidade de corrosão ... 167
8.3 Medidas de proteção ... 168
8.4 Reparos ... 169
8.5 Estudo de caso ... 169
Referências bibliográficas ... 173

9 Aplicações práticas ... 175
9.1 Terminal de contêineres 1, Oslo (2002) ... 176
9.2 Terminal de contêineres 2, Oslo (2007) ... 179
9.3 Desenvolvimento urbano, Oslo (2010) ... 184
9.4 Avaliação e discussão dos resultados obtidos ... 196
9.5 Observações finais ... 199
Referências bibliográficas ... 200

10 Custos do ciclo de vida ... 202
10.1 Estudo de caso ... 203
Referências bibliográficas ... 207

11 Avaliação do ciclo de vida ... 208
11.1 Diretrizes para a avaliação do ciclo de vida ... 210
11.2 Estudo de caso ... 213
Referências bibliográficas ... 216

12 Normas e prática ... 218
12.1 Normas e práticas recomendadas ... 219
12.2 Requisitos gerais de durabilidade ... 227
Referências bibliográficas ... 229

Índice remissivo ... 232

Sobre o autor ... 239

um

Revisão histórica

Quando Smeaton construiu o famoso farol do rochedo de Eddystone no canal da Mancha, entre 1756-1759 (Smeaton, 1791), foi a primeira vez que foi utilizado um tipo de cimento especialmente desenvolvido para um ambiente marinho severo (Lea, 1970). Quando a estrutura foi demolida, em 1877, devido a uma grave erosão da rocha subjacente, ela havia subsistido por mais de cem anos. Desde que Smeaton registrou sua experiência na construção do farol (Fig. 1.1), toda a literatura publicada sobre concreto em ambientes marinhos compôs um fascinante e abrangente capítulo na longa história da tecnologia do concreto. Durante os últimos 150 anos, muitos profissionais, comitês e autoridades nacionais engajaram-se na questão. Inúmeros artigos foram apresentados em conferências internacionais, como as da American Society for Testing and Materials (ASTM International) em Copenhague (1909), Nova York (1912) e Amsterdã (1927); os congressos da Permanent International Association of Navigation Congresses (Pianc) em Londres (1923), Cairo (1926), Veneza (1931) e Lisboa (1949); as conferências da International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (Rilem) em Praga, em 1961 e 1969; as da Rilem-Pianc em Palermo, em 1965; e a da Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) em Tbilisi, em 1972. Atwood e Johnson (1924) elaboraram uma lista de cerca de três mil referências e, mesmo assim, a durabilidade e as estruturas de concreto em ambientes marinhos continuam a ser objeto de pesquisa, discussão e conferências internacionais (Malhotra, 1980, 1988, 1996; Mehta, 1989, 1996; Sakai; Banthia; Gjørv, 1995; Gjørv; Sakai; Banthia, 1998; Banthia; Sakai; Gjørv, 2001; Oh et al., 2004; Toutlemonde et al., 2007; Castro-Borges et al., 2010; Li et al., 2013).



Fig. 1.3 *Ao longo da costa norueguesa, com seus muitos fiordes profundos e numerosas ilhas grandes e pequenas, há um grande número de estruturas de concreto, tanto costeiras como em alto-mar*

Fonte: cortesia de Noteby AS.



Fig. 1.9 *A plataforma Gullfaks C (1989) durante a construção em Stavanger*
Fonte: cortesia de Norwegian Contractors.

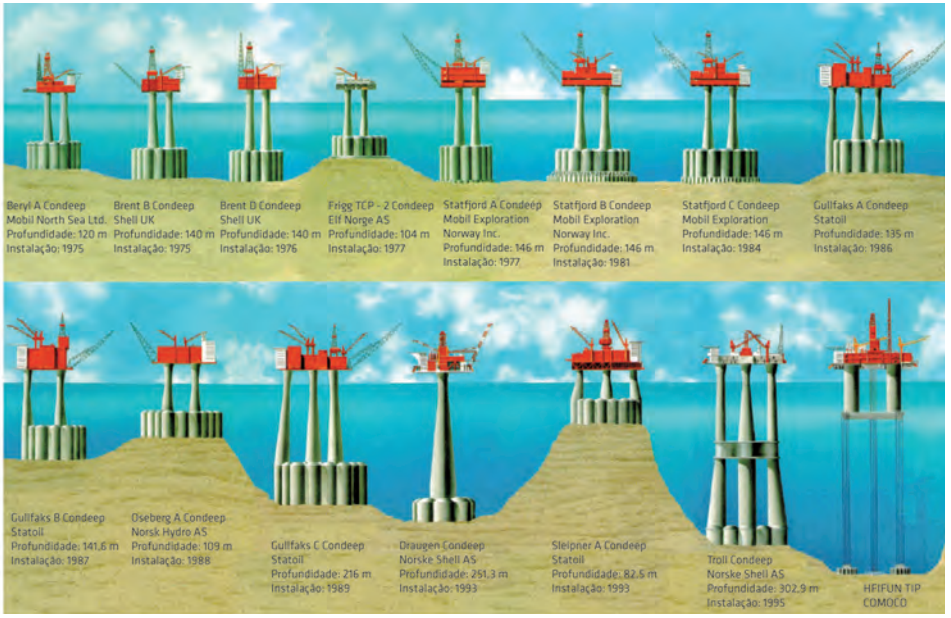


Fig. 1.10 *Desenvolvimento de estruturas de concreto em alto-mar no mar do Norte*
(N. do E.: Condeep *é a abreviação em inglês de estrutura de concreto em alto-mar)*
Fonte: adaptado de Aker Solutions.

dois

Experiência de campo

Como exposto no Cap. 1, em muitos países foram realizadas extensas pesquisas experimentais de campo em um grande número de estruturas de concreto. Na maioria dos casos, foi principalmente a corrosão das armaduras que criou os problemas mais graves de durabilidade e desempenho. Nos últimos anos, o uso crescente de sal (cloreto) para degelo criou problemas especiais para muitas pontes de concreto (U.S. Accounting Office, 1979). Já em 1986 foi estimado que o custo de corrigir pontes de concreto com corrosão nos Estados Unidos era de US$ 24 bilhões, com crescimento anual de US$ 500 milhões (Transportation Research Board, 1986). Mais tarde, os custos anuais de reparação e substituição de pontes estadunidenses foram estimados em cerca de US$ 8,3 bilhões por Yunovich et al. (2001) e em até US$ 9,4 bilhões nos próximos 20 anos pela American Society of Civil Engineers (Darwin, 2007). Em 1998, estimaram-se em US$ 5 bilhões os custos anuais de estruturas de concreto na Europa Ocidental (Knudsen et al., 1998) e muitas outras despesas semelhantes, devidas a problemas de durabilidade, também foram registradas em vários outros países.

Para todas as estruturas de concreto expostas a ambientes marinhos, as condições ambientais podem ser ainda mais severas (Gjørv, 1975). Assim, ao longo da costa norueguesa, há mais de dez mil estruturas portuárias, a maioria delas em concreto; e quase todas sofreram corrosão do aço dentro de um período de dez anos após a construção (Gjørv, 1968, 1994, 1996, 2002, 2006). Além disso, há mais de 300 grandes pontes de concreto construídas de 1970 para cá (Fig. 2.1) e mais de metade delas sofreu corrosão do aço dentro de um período de 25 anos após a construção (Østmoen et al., 1993). No mar do Norte, várias estruturas de concreto em alto-mar também



Fig. 2.11 *As partes detrás do deque de concreto, adjacentes ao dique ou muro de arrimo, são mais vulneráveis à corrosão do aço do que o resto do deque*
Fonte: Gjørv (1968).



Fig. 2.12 *Quando o cobrimento de concreto nas partes inferiores das vigas do deque apresentava fissuras e destacamento numa fase muito inicial, as barras de aço eram corroídas uniformemente, enquanto os estribos verticais de viga exibiam um* pitting *mais severo e quase sempre estavam completamente corroídos*
Fonte: Gjørv (1968).

cia apenas moderada do concreto à penetração do cloreto. No entanto, a resistência observada foi muito mais alta do que aquela nas pontes mais velhas.

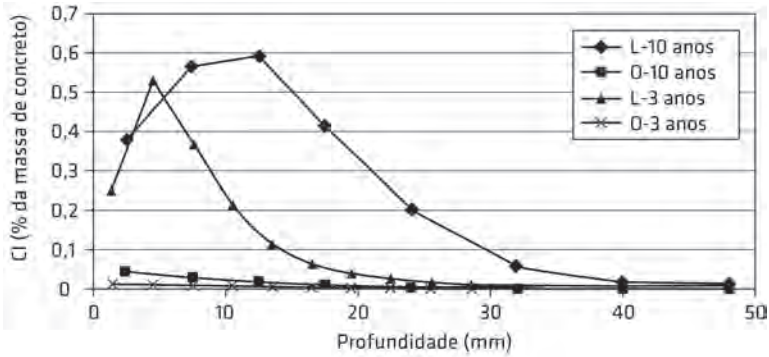


Fig. 2.49 *A penetração do cloreto observada na ponte Aursundet (1995) depois de três e dez anos de exposição à zona de respingos*
Fonte: adaptado de Årskog, Gjørv e Sengul (2005).

Em vários outros países, extensas pesquisas de campo em pontes de concreto expostas a ambientes marinhos mostraram o mesmo tipo de problemas de durabilidade devido à corrosão do aço, como os descritos e discutidos para as pontes ao longo da costa norueguesa citadas anteriormente (Malhotra, 1980, 1988, 1996; Mehta, 1989, 1996; Nilsson, 1991; Stoltzner; Sørensen, 1994; Sakai; Banthia; Gjørv, 1995; Beslac et al., 1997; Wood; Crerar, 1997; Gjørv; Skai; Banthia, 1998; Banthia; Sakai; Gjørv, 2001; Oh et al., 2004; Toutlemonde et al., 2007; Castro-Borges et al., 2010; Li et al., 2013).

2.3 Estruturas em alto-mar

Desde o início dos anos 1970, um total de 34 grandes estruturas de concreto para exploração de gás e petróleo foram instaladas no mar do Norte. A despeito do ambiente marinho muito rigoroso e hostil (Figs. 2.50 e 2.51), a durabilidade e o desempenho dessas estruturas de concreto, em geral, foram muito bons (Fjeld; Røland, 1982; Hølaas, 1992; Gjørv, 1994; FIP, 1996; Moksnes e Sandvik, 1996; Helland; Aarstein; Maage, 2010).



Fig. 2.50 *A plataforma Frigg TCP 2 (1977) em uma tempestade*

das. No entanto, como a maioria dos mecanismos de degradação de estruturas de concreto depende muito da temperatura, as estruturas de concreto expostas a outras condições climáticas, com temperaturas mais elevadas, podem, portanto, comportar-se de maneira diferente. Além disso, quase todas as estruturas de concreto descritas anteriormente foram tipicamente construídas com cimento Portland puro tipo (CEM I), enquanto estruturas de concreto produzidas com outros tipos de sistemas aglomerantes também podem mostrar desempenho e durabilidade diferentes. Portanto, a extensa experiência demonstra que as estruturas de concreto produzidas com cimentos de escória granulada de alto-forno revelam um desempenho claramente melhor em ambientes contendo cloreto do que aquelas construídas com cimentos Portland puros (Bijen, 1998). Sobre todas as estruturas de concreto anteriores, porém, a experiência de campo pode ser brevemente resumida a seguir.

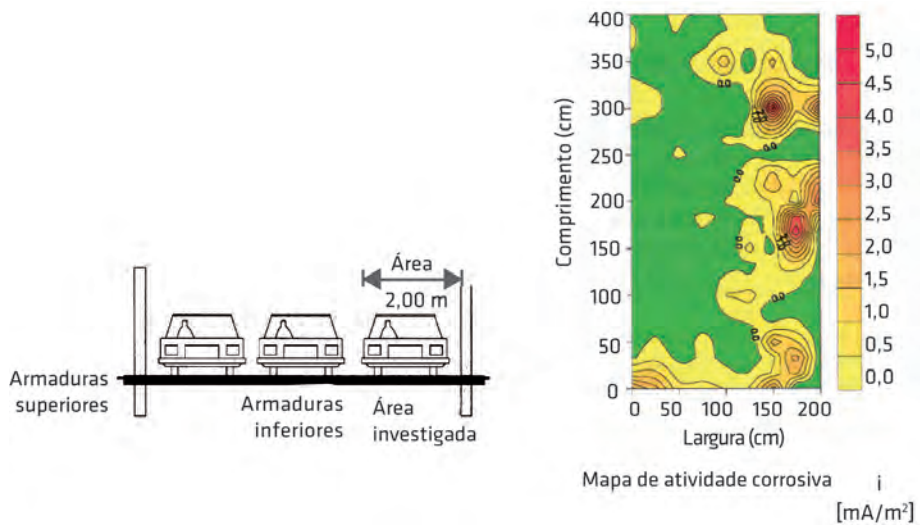


Fig. 2.64 *Típico padrão de atividades corrosivas nas vagas de estacionamento de um edifício-garagem contaminado com sais de degelo*

Fonte: adaptado de Pruckner (2002).

2.5.1 Mecanismos de deterioração

Corrosão das armaduras

De todas as estruturas de concreto citadas, a corrosão das armaduras induzida por cloreto foi o problema dominante e mais grave a afetar a durabilidade e o desempenho; a carbonatação do concreto, por sua vez, não foi um problema para a corrosão do aço observada. Para novas estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade, portanto, a corrosão induzida por carbonatação não precisa ser objeto de

três

Corrosão das armaduras

Embora existam diferentes processos de deterioração que podem causar problemas à durabilidade e ao desempenho de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade, recentemente adquiriu-se muita experiência internacional no aperfeiçoamento de procedimentos e diretrizes para controle tanto da reação álcali-agregado como da ação deletéria do congelamento e degelo. Esses dois processos de deterioração, no entanto, ainda representam um grande desafio em muitos casos. Como mostrado no Cap. 2, o controle adequado da penetração do cloreto e a corrosão prematura das armaduras ainda aparecem como grandes desafios tanto para o projeto de durabilidade como para a operação de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. Ocasionalmente, a penetração precoce do cloreto pode também ser um desafio durante a concretagem, conforme demonstrado no Cap. 2. Neste capítulo, portanto, serão descritas e discutidas detalhadamente a penetração de cloretos e a corrosão de armaduras.

É bem conhecida a elevada capacidade do concreto de proteger armaduras contra a corrosão, o que se deve principalmente à passivação eletroquímica das armaduras na solução altamente alcalina presente nos poros do concreto. No entanto, a corrosão pode começar quando a passividade é rompida, parcial ou completamente, seja devido à carbonatação do concreto ou à presença de cloretos. Quando há corrosão, o potencial eletroquímico da armadura torna-se mais negativo e forma algumas áreas anódicas, enquanto outras porções do aço, cujo potencial passivo está intacto, atuarão como áreas de captação de oxigênio e formarão áreas catódicas. Se a resistividade elétrica (iônica) do concreto está suficientemente baixa, um sistema complexo de atividades de células de corrosão do tipo galvânico desenvolve-se ao longo das armaduras.

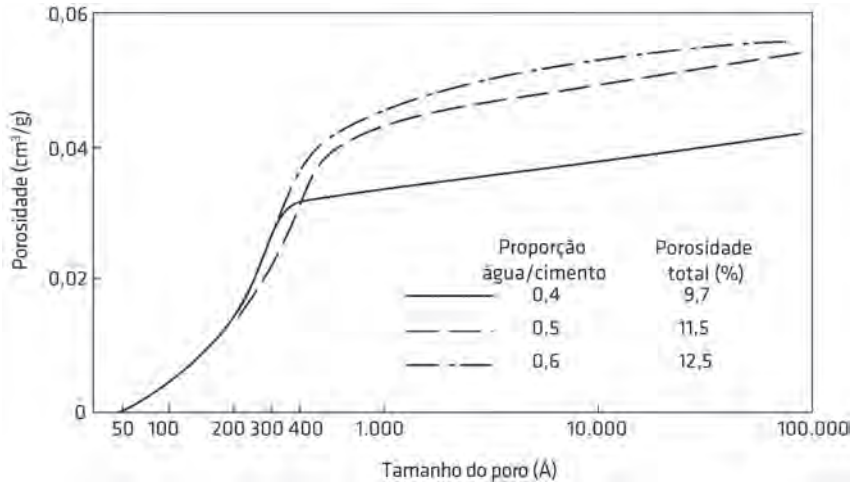


Fig. 3.2 *Efeito da relação água/cimento na porosidade do concreto baseado em cimento Portland puro (CEM I)*

Fonte: adaptado de Gjørv e Vennesland (1979).

O efeito benéfico dos materiais pozolânicos, naturais ou industriais (como sílica ativa, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz) na resistência do concreto à penetração do cloreto está bem documentado na literatura (Gjørv, 1983; Berry; Malhotra, 1986; Malhotra et al., 1987; FIP, 1998; Malhotra; Ramezanianpour, 1994; Gjørv; Ngo; Mehta, 1998; Filho et al., 2013). O efeito superior dos cimentos de escória granulada de alto-forno também tem sido documentado na literatura por mais de cem anos (Bijen, 1998). Ao combinar cimentos de alto teor de escória de alto-forno com vários tipos de materiais pozolânicos, mantida uma relação baixa de água/aglomerante, obtêm-se difusividades muito baixas do cloreto e se produzem, assim, concretos com resistência muito alta à penetração de cloretos.

3.1.1 Efeito do tipo de cimento

A Fig. 3.3 mostra a resistência à penetração de cloretos em quatro tipos diferentes de cimento comercial produzidos com a mesma composição de concreto, numa relação água/aglomerante fixa de 0,45. Esses cimentos incluem dois cimentos de alto teor de escória de alto-forno do tipo CEM II/B-S 42,5 R NA (GGBS1, similar ao CP II E 40 no Brasil), com 34% de escória e do tipo CEM III/B 42,5 LH HS (GGBS2, similar ao CP III 40 no Brasil), com 70% de escória; um cimento Portland puro de alto desempenho do tipo CEM I 52,5 LA (HPC, similar ao CP V no Brasil) e um cimento de cinzas volantes CEM II/A V 42,5 R, com 18% de cinzas volantes (PFA, similar ao cimento composto CP II Z 40 no Brasil). A resistência à penetração do cloreto foi determinada pelo método da rápida migração do cloreto (método RCM) (Nordtest, 1999) e todos os ensaios foram realizados em concreto curado na água a 20 °C por períodos de até 180 dias. Para comparar os mesmos tipos de cimento num concreto mais denso, os mesmos

foram incluídos ainda durante a preparação do concreto ou se penetraram mais tarde é outro fator que pode alterar essa relação complexa. Se o teor de cloreto já era muito alto desde o começo, o filme protetor das armaduras pode nem sequer ser formado.

O patamar-limite de concentração de cloretos necessário para destruir a passividade das armaduras foi objeto de muitas pesquisas (Bertolini et al., 2004; Angst, 2011). Várias técnicas diferentes de medida foram utilizadas e vários resultados diferentes foram obtidos, variando tipicamente de 0,02% a 3,04% da massa de cimento. Há vários fatores que afetam o patamar-limite de concentração de cloretos, como o pH da solução de poro, o potencial do aço e as condições locais na interface do concreto com a armadura (Glass; Buenfeld, 1997, 2000). Logo, não é possível afirmar um único valor para o patamar-limite no caso de corrosão de armaduras. No entanto, basta uma quantidade muito pequena de cloretos para romper a passividade e, assim que ela é rompida e a corrosão começa, a taxa de corrosão é então controlada por vários outros fatores.

3.3 Taxa de corrosão

Para a corrosão em ativa ou em progresso em estruturas de concreto expostas à atmosfera, a experiência indica que a taxa de corrosão pode variar de muitos décimos de μm/ano a até 1 mm/ano, dependendo das condições de umidade e do teor de cloreto no concreto (Bertolini et al., 2004). Diferentes temperaturas também podem afetar a taxa de corrosão de forma muito diferente (Andrade; Alonso, 1995; Østvik, 2005). O Cap. 2 mostrou que somente nas estruturas de concreto permanentemente submersas no mar a taxa de corrosão era tão baixa que o dano observado era negligenciável mesmo depois de uma vida útil de mais de 60 anos (Gjørv; Kashino, 1986). Também no Cap. 2, viu-se ainda que a corrosão em certas partes do sistema de armaduras acabava protegendo catodicamente, com sucesso, outras partes do mesmo sistema. Assim, tanto a forma geométrica da estrutura quanto as condições ambientais locais são fatores muito importantes para a taxa de corrosão, o que dificulta sobremaneira prever matematicamente o efeito a longo prazo da corrosão ativa na capacidade total de carga da estrutura de concreto. No entanto, para que a corrosão se torne um sério processo de deterioração, a resistividade do concreto também é um dos mais importantes fatores de controle.

3.3.1 Resistividade elétrica

Como o fluxo de corrente elétrica em todas as células de corrosão do tipo galvânico ao longo das armaduras é transportado por íons carregados através do concreto, a resistividade elétrica depende da permeabilidade do concreto, do volume da solução de poro e da concentração de íons nessa solução. Na Fig. 3.16, vê-se que a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,50 aumentou a resistividade elétrica por um fator de mais de dois no caso da argamassa, mas a mesma alteração teve apenas um pequeno efeito no concreto. Esses resultados demonstram claramente o efeito da porosidade na resistividade elétrica. Quando o grau de saturação de água no concreto

quatro

Análise de durabilidade

Dependendo da qualidade do concreto e da espessura do cobrimento, muitos anos podem se passar antes que os cloretos cheguem às armaduras e a corrosão comece. No entanto, depois que os cloretos chegam às armaduras, podem se passar apenas alguns meses ou anos até aparecerem sinais visíveis de danos, sob a forma de fissuras e manchas de corrosão, mas ainda pode levar muito tempo para que a capacidade de carga da estrutura seja gravemente reduzida, como se discutiu no Cap. 2.

A Fig. 4.1 mostra o processo de deterioração de forma esquemática. Assim que a corrosão começa, desenvolve-se um sistema muito complexo de atividades de células de corrosão do tipo galvânico na estrutura de concreto. Nesse sistema, a deterioração aparece sob a forma de corrosão do tipo *pitting* (cavidade) nas áreas anódicas das armaduras, enquanto as áreas catódicas adjacentes funcionam como áreas de captação de oxigênio. Embora grandes áreas do sistema de armaduras acabem sendo despassivadas, nem todas essas áreas serão necessariamente corroídas. Como já foi discutido no Cap. 3, o aço das primeiras áreas mais corroídas da estrutura pode agir como ânodos de sacrifício e, assim, proteger catodicamente o resto da estrutura.

Parece ser muito difícil desenvolver um modelo matemático geral para prever quanto tempo é necessário para reduzir a capacidade de carga da estrutura, já que esse padrão de deterioração é afetado por forma estrutural, continuidade elétrica e exposição local. Muitas tentativas foram feitas para desenvolver tal modelo (Lu; Zhao; Yu, 2008), mas parece não haver, no momento, nenhum modelo matemático ou solução numérica confiável para esse processo muito complexo de deterioração.

Nos anos 1970, Collepardi, Marcialis e Turriziani (1970, 1972) criaram um modelo matemático relativamente simples

esse ELS, o início da corrosão do aço é um estágio crucial e foi escolhido para um ELS apropriado, como se verá a seguir.

Nos últimos anos, ocorreu um rápido desenvolvimento de modelos e procedimentos para projeto de durabilidade de estruturas de concreto com base em probabilidade (Siemes; Rostam, 1996; Engelund; Sørensen, 1998; Gehlen, 2000; DuraCrete, 2000; FIB, 2006; Tang; Nilsson; Basher, 2012) e, em muitos países, esse projeto de durabilidade foi aplicado a várias estruturas importantes de concreto (Stewart; Rosowsky, 1998; McGee, 1999; Gehlen; Schiessl, 1999; Gehlen, 2007). Além disso, na Noruega, esse tipo de projeto de durabilidade foi aplicado a várias estruturas de concreto em que alta segurança, durabilidade e longa vida útil foram de especial importância (Gjørv, 2002, 2004).

No começo, esse tipo de projeto era baseado principalmente nos resultados e diretrizes do projeto de pesquisa europeu DuraCrete (2000), mas depois, à medida que se ganhou experiência prática com esse modelo, a base para o projeto foi simplificada e aprimorada para aplicações mais práticas, embora os princípios básicos permanecessem essencialmente os mesmos. Assim, em 2004, esse projeto foi adotado pela Norwegian Association for Harbor Engineers (Nahe) como base para novas recomendações e diretrizes para a construção de infraestrutura de concreto mais durável nos portos noruegueses (Nahe, 2004a, 2004b, 2004c). As lições aprendidas com a experiência prática dessas recomendações foram incorporadas em edições subsequentes, revisadas, a terceira e última das quais, de 2009, também foi adotada pelo capítulo norueguês da Pianc, a World Association for Waterborne Transport Infrastructure (Pianc; Nahe, 2009a, 2009b, 2009c).

A seguir, descreve-se brevemente a base para o cálculo tanto da penetração do cloreto como para a probabilidade de corrosão e, logo após, os parâmetros de entrada na análise de durabilidade são descritos e discutidos. Para demonstrar como os cálculos da probabilidade da corrosão podem ser aplicados como base para um projeto de durabilidade, dois estudos de caso também são brevemente descritos e discutidos.

4.1 Cálculo da penetração do cloreto

Como já foi discutido no Cap. 3, há mecanismos bastante complexos de transporte para a penetração de cloretos no concreto. De forma muito simplificada, no entanto, a taxa de penetração do cloreto pode ser estimada por meio da segunda lei de difusão de Fick, de acordo com Collepardi, Marcialis e Turriziani (1970, 1972), combinada com um coeficiente de difusão do cloreto dependente do tempo, segundo Takewaka e Matsumoto (1988) e Tang e Gulikers (2007), como mostram as Eqs. 4.1 e 4.2:

$$C(x,t) = C_S\left[1 - erf\left(\frac{x_C}{2\sqrt{D(t)\,t}}\right)\right] \tag{4.1}$$

Na Eq. 4.1, $C(x,t)$ é a concentração do cloreto na profundidade x_C depois do tempo t, C_S é a concentração do cloreto na superfície do concreto, D é o coeficiente

Embora a seleção de concentrações do cloreto para uma nova estrutura de concreto deva se basear preferencialmente na experiência local com estruturas de concreto semelhantes expostas a ambientes semelhantes, a experiência disponível na literatura também pode dar uma base para a avaliação da concentração do cloreto adequada. Com base na experiência geral de estruturas de concreto em ambientes marinhos, algumas diretrizes gerais para estimativa da concentração do cloreto estão na Tab. 4.1. Como os dados sobre concentrações de cloreto costumam aparecer em porcentagem por massa do concreto, um diagrama de conversão geral para concentrações de cloreto pode ser conferido na Fig. 4.6.

Tab. 4.1 Diretrizes gerais para estimativa da concentração do concreto (C_S) em estruturas de concreto em ambientes marinhos

	C_S (% por massa do cimento)	
Ação ambiental	**Valor médio**	**Desvio padrão**
Alta	5,5	1,3
Média	3,5	0,8
Moderada	1,5	0,5

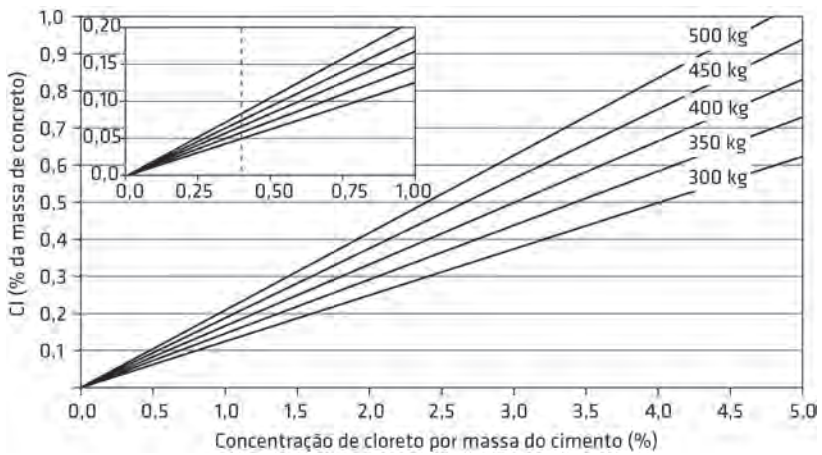


Fig. 4.6 *Diagrama de conversão para estimar as concentrações de cloreto em porcentagem por massa do cimento, com base em porcentagem por massa do concreto com vários teores de cimento*

Fonte: adaptado de Ferreira (2004).

Tempo de atuação do cloreto, t'

Como a resistência de um dado concreto à penetração do cloreto depende muito do grau de hidratação, a idade do concreto ao tempo do cálculo da concentração do cloreto (*t'*) também é um parâmetro muito importante para avaliar a penetração do cloreto.

O outro estudo de caso é parte de uma iniciativa da National Research Foundation (NRF) de Singapura, o programa de pesquisa de Infraestrutura Submarina e Cidade Submarina do Futuro, da Universidade Tecnológica Nanyang (NTU). O objetivo desse programa de cinco anos de duração, que começou em 2011, é desenvolver a base técnica necessária para o futuro desenvolvimento da cidade de Singapura por meio de um grande número de estruturas de concreto submersas. Para tais estruturas, seriam de vital importância as maiores durabilidade e confiabilidade possíveis e, portanto, uma vida útil tão longa quanto possível. No entanto, como qualquer cálculo para uma vida útil de mais de 150 anos não é considerado válido, selecionou-se, como base para uma análise de durabilidade, uma vida útil de até 150 anos com a probabilidade mais baixa possível de corrosão. Para aumentar e garantir ainda mais a durabilidade, uma ou mais medidas adicionais de proteção também devem ser adotadas, como descrito no Cap. 5.

Nesses dois casos, produziram-se vários compostos de concreto baseados em vários tipos de sistemas de aglomerantes para testar a difusividade do cloreto. Com base nos resultados obtidos, as análises de durabilidade foram realizadas para descobrir como os diferentes tipos de concreto afetariam a probabilidade de corrosão durante a vida útil requerida. No passo seguinte, mais análises de durabilidade foram realizadas para descobrir como diferentes cobrimentos afetariam a probabilidade de corrosão.

4.5.1 Estrutura portuária de concreto

Efeito da qualidade do concreto

Para selecionar a qualidade adequada de concreto para a estrutura portuária de concreto, quatro composições do concreto (tipos 1-4) foram produzidas e suas difusividades do cloreto aos 28 dias (D_{28}) foram determinadas. Essas composições foram produzidas com quatro tipos diferentes de cimento comercial, combinados com sílica ativa. Os quatro tipos de cimento eram um cimento Portland puro de alto desempenho (CEM I 52,5 LA); um cimento Portland composto com cerca de 20% de cinzas volantes (CEM II/A V 42,5 R); e dois tipos de cimento de escória de alto-forno, um com 34% de escória (CEM II/B-S 42,5 R NA) e outro com 70% de escória (CEM III/B 42,5 LH HS).

Com exceção do tipo de sistema aglomerante, a composição de todas as misturas de concreto era a mesma: foram todas produzidas com 390 kg/m^3 de cimento, combinados com 39 kg/m^3 de sílica ativa (10%), resultando numa relação água/aglomerante de 0,38. Assim, todas as misturas de concreto atenderiam até aos requisitos mais rigorosos das atuais normas europeias do concreto para uma vida útil de cem anos (CEN, 2009).

As análises de durabilidade foram realizadas com base nos resultados para as difusividades do cloreto aos 28 dias (D_{28}); num cobrimento médio de 70 mm (X_c), com um desvio padrão de 6 mm; e em valores estimados tanto para a idade das difusividades do cloreto (α) quanto para o teor crítico de cloreto (C_{CR}), como mostra a

seria a substituição da parte externa do sistema de armaduras por aço inoxidável, que aumentaria eficazmente a espessura do cobrimento para o aço-carbono interior. Dessa forma, a análise de durabilidade também pode ser usada como uma ferramenta de projeto para quantificar quanto do tradicional aço-carbono precisa ser substituído por aço inoxidável para atender o nível de segurança exigido contra a corrosão.

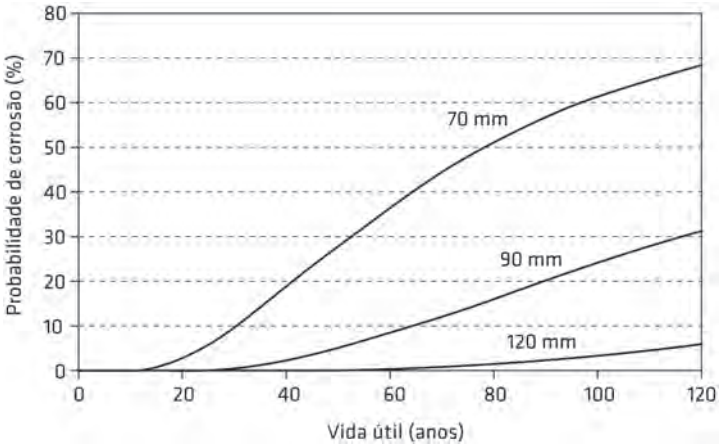


Fig. 4.13 *Efeito do cobrimento na probabilidade de corrosão (concreto tipo 1, 10 °C)*

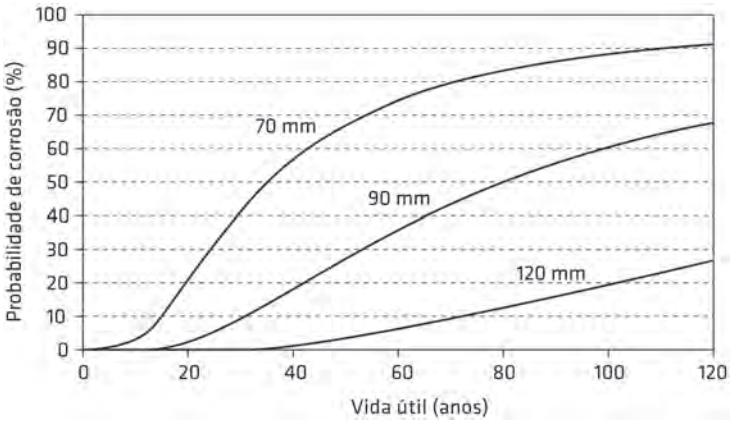


Fig. 4.14 *Efeito do cobrimento na probabilidade de corrosão (concreto tipo 1, 20 °C).*

4.5.2 Infraestrutura submersa

Efeito da qualidade do concreto

Para desenvolver os tipos de concreto apropriados para as futuras estruturas de concreto submarinas em Singapura, produziram-se várias misturas de concreto com base em diversos sistemas aglomerantes, das quais quatro tipos diferentes foram selecionados para análises adicionais (Teng; Gjørv, 2013). A Tab. 4.7 mostra que a mistura de referência produziu um concreto baseado em cimento Portland

cinco

Estratégias adicionais e medidas de proteção

Para todas as grandes infraestruturas de concreto, normalmente é necessária uma vida útil de cem anos ou mais antes de a probabilidade de corrosão ser superior a 10%. No entanto, como os cálculos da probabilidade de corrosão tornam-se gradualmente menos confiáveis no caso de vida útil superior a cem anos, como discutido no Cap. 4, a probabilidade de corrosão deve ser mantida tão baixa quanto possível, não excedendo 10% para uma vida útil de até 150 anos; além disso, é preferível aplicar algumas medidas especiais de proteção.

Para a concretagem em ambientes marinhos, pode também haver o risco de exposição precoce, antes que o concreto adquira maturidade e densidade suficientes, como demonstrou o Cap. 2. Também nesse caso, devem-se considerar algumas precauções especiais ou medidas de proteção. Como essas precauções e medidas podem ter implicações tanto para o custo do projeto como para sua futura operação, elas devem ser sempre discutidas com o proprietário da estrutura antes de sua adoção.

Para garantir desempenho confiável de longo prazo em grandes infraestruturas de concreto com exigência de vida útil superior a cem anos, uma das mais eficientes medidas de proteção tem sido a substituição do aço-carbono por aço inoxidável nas armaduras (Cap. 2). Mesmo o uso parcial do aço inoxidável tem-se mostrado uma medida simples porém robusta e eficiente de proteção, pois a maioria das estruturas de concreto são heterogêneas e com alta variabilidade da qualidade e uniformidade de execução, revelando rapidamente essas fraquezas ou deficiências.

Portanto, para estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade e contendo cloretos, descreve-se a seguir, em detalhes, como bem utilizar a armadura de aço inoxidável e também várias outras medidas de proteção.

5.2 Outras medidas de proteção

5.2.1 Reforço não metálico

Recentemente, têm crescido rapidamente as aplicações de compostos de polímero de fibra de carbono reforçada (FRP, *fiber-reinforced polymer*) em estruturas de concreto. Embora a maioria das experiências com instalações de compostos de FRP e seus dados de durabilidade venham dos setores aeroespacial, marítimo e de resistência à corrosão, esses compostos têm sido usados como material de construção desde meados dos anos 1950 (ACMA MDA, 2006).

Um grande avanço do FRP para a Engenharia Civil tem sido a aplicação externa desses compostos para reabilitação e modernização de estruturas de concreto existentes. No final dos anos 1970 e começo dos 1980, porém, várias novas aplicações de produtos de reforço baseados em compostos foram demonstradas; em 1986, a Alemanha construiu a primeira ponte rodoviária do mundo com tendões de compostos. Mais recentemente, desenvolveu-se um amplo leque de aplicações para reforços não metálicos baseados nos compostos FRP e a experiência atual demonstra que esses sistemas de reforço têm grande potencial para estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade (Newhook; Mufti, 1996; Newhook et al., 2000; Tan, 2003; Serancio, 2004; Newhook, 2006).

Como têm propriedades mecânicas muito boas (Tab. 5.3), os compostos de FRP também representam uma alternativa viável para os tendões de aço convencionais em concreto protendido. Por muito tempo, sistemas adequados de ancoragem foram um problema, mas, nos últimos anos, novos tipos de sistemas de ancoragem baseados em tendões FRP foram desenvolvidos para aplicações práticas de sistemas protendidos (Gaubinger et al., 2002).

Tab. 5.3 Propriedades mecânicas de fibras compostas

	Fibra de aramida (Twaron HM[a])	Fibra de vidro (*E-glass*)	Fibra de basalto	Fibra de carbono (HT[a])	Cabo de CFRP (*Carbon fiber-reinforced polymer*)	Fio de aço (Norma 1.570/1.770)
Resistência à tração (MPa)	2.600	2.300	3.200	3.500/7.000	2.800	> 1.170
Módulo de Young (GPa)	125	74	90	230/650	160	205
Deformação máxima (%)	2,3	3,3	3,0	0,6/2,4	1,6	7
Densidade (g/cm^3)	1,45	2,54	2,6	1,8	1,5	7,85

[a] HM e HT são notações para tipo de qualidade.

Fonte: adaptado de Noisternig, Dotzler e Jungwith (1998) e ReforceTech (2013).

Até recentemente, as fibras de vidro eram o tipo mais comum de fibra de reforço, principalmente na forma de *E-glass*, mas também na forma de vidro resistente a

agressividade. Como a eficiência protetora desse tipo de tratamento superficial baseado em polímeros pode ser reduzida com o tempo, devido ao desgaste e envelhecimento precoce, a maioria desses tratamentos precisa ser reaplicada de tempos em tempos para garantir a proteção apropriada em longo prazo. Se o tratamento hidrofugante for aplicado num estágio tardio, quando os cloretos já atingiram uma certa profundidade, poderá ocorrer uma penetração adicional de cloretos por algum tempo, devido à redistribuição do teor de cloreto (Arntsen, 2001; Årskog et al., 2004). No entanto, em ambientes marinhos de severa agressividade, esse tratamento pode ser aplicado durante a concretagem para proteção contra a exposição nas primeiras idades, antes que o concreto adquira maturidade e densidade suficientes.

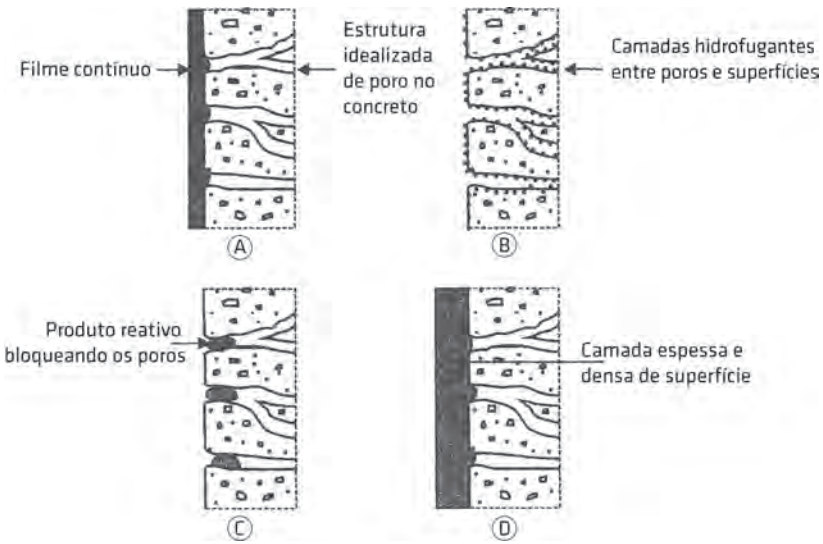


Fig. 5.1 *Representação esquemática dos diferentes tipos de proteção da superfície do concreto: (A) revestimento orgânico, (B) tratamentos de alinhamento dos poros, (C) tratamentos de bloqueio dos poros e (D) espesso revestimento cimentício, concreto projetado ou reboco*
Fonte: adaptado de Bijen (1989).

Para investigar o efeito protetor do tratamento hidrofugante da superfície contra a exposição aos cloretos nas primeiras idades do concreto, executou-se um programa experimental com base num concreto com uma relação água/cimento de 0,45 (Liu; Stavem; Gjørv, 2005). Depois de sete dias de cura do concreto, numa temperatura de 20 °C ou de 5 °C e com umidade relativa de 50%, 95% ou 100%, a superfície das amostras de concreto foi tratada com um gel hidrofugante, composto principalmente de um silano do tipo isobutil *triethoxy*. Antes da exposição, observou-se a profundidade de penetração do agente hidrofugante, como mostra a Tab. 5.4, e, depois de seis semanas de molhagem e secagem intermitentes de uma solução de 3% de NaCl, a eficiência protetora foi avaliada com base na profundidade da pene-

5.2.7 Elementos estruturais pré-fabricados

Vários tipos de elementos estruturais pré-fabricados são utilizados em estruturas de concreto marinhas. Como, nesses casos, a concretagem pode ocorrer sob condições mais controladas, esses elementos pré-fabricados também constituem uma boa estratégia de proteção contra a exposição precoce a cloretos durante a concretagem. Antes da instalação desses elementos, também é possível aplicar sistemas de proteção de superfície a suas partes mais expostas, sob condições ótimas e mais controladas.

Na concretagem em ambiente marinho, elementos estruturais pré-fabricados podem variar de pequenas formas ou elementos da laje do deque a grandes elementos estruturais de concreto. Algumas estruturas de concreto podem também ser parcial ou totalmente pré-fabricadas numa doca seca e, depois, transferidas para sua posição final. No caso de pontes de concreto, pode-se pré-fabricar grandes vigas de deque e longarinas. Foi assim na ponte sobre o estreito de Northumberland, na costa leste do Canadá (Tromposch et al., 1998): tanto os pilares tubulares como as longarinas de até 190 m de comprimento foram pré-fabricadas em terra antes de serem instaladas com um poderoso guindaste flutuante (Figs. 5.5 a 5.8).

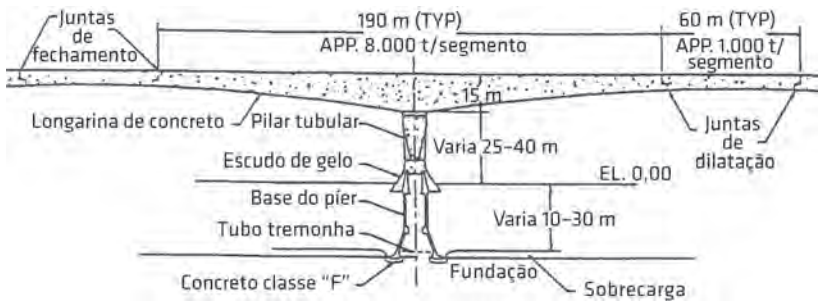


Fig. 5.5 *Fundação, pilar tubular e tabuleiro da ponte sobre o estreito de Northumberland (1997), na costa leste do Canadá*



Fig. 5.6 *Longarinas de ponte suspensa pré-fabricadas para a ponte do estreito de Northumberland*

seis

Controle e garantia da qualidade do concreto

Para conseguir melhor controle da qualidade final do adensamento do concreto (Cap. 2), é essencial ter alguns requisitos de durabilidade baseados em desempenho que possam ser verificados e controlados para garantia de qualidade durante a concretagem. Mesmo estruturas de concreto em alto-mar, onde são aplicados procedimentos rigorosos tanto para a produção do concreto como para o controle de qualidade da concretagem, exibiram falhas de adensamento na qualidade final do concreto. Durante a concretagem (Tab. 2.1), o controle de qualidade de recepção revelou um concreto muito homogêneo, mas a qualidade final do concreto na obra ainda exibia elevada heterogeneidade e variabilidade, ou seja, falhas de adensamento.

Mesmo antes de lançar o concreto na forma, em algumas situações sua qualidade pode exibir heterogeneidade e variabilidade. Se for utilizado concreto com ar incorporado, podem ocorrer grandes variações nas propriedades do sistema de poros e vazios internos (Gjørv; Bathen, 1987). Esse problema é exacerbado quando se usam cimentos de cinzas volantes e o teor de carbono nas cinzas varia excessivamente (Nagi et al., 2007), afetando tanto a difusividade do cloreto como a resistência do concreto ao gelo.

Provavelmente, o problema mais conhecido e melhor documentado relacionado à qualidade das estruturas de concreto é a falha em atender às especificações do cobrimento. As variações do cobrimento final na ponte norueguesa mostradas na Fig. 2.40 refletem um problema geral em canteiros de obra de muitos países. Já a Fig. 6.1 mostra a plotagem dos dados dessa ponte junto com dados semelhantes de uma ponte japonesa (Ohta et al., 1992) e com a média dos dados de cem estruturas de concreto na região do Golfo (Matta, 1993). Nos últimos anos,

corpos de prova são saturados de água de acordo com o procedimento estabelecido. Em paralelo, as medidas correspondentes de resistividade elétrica são tomadas em três corpos de prova de concreto do mesmo tipo usado para o contínuo controle de qualidade da resistência à compressão. Essas medidas devem ser tomadas em corpos de prova de concreto úmido, depois dos períodos de cura em água mencionados anteriormente.

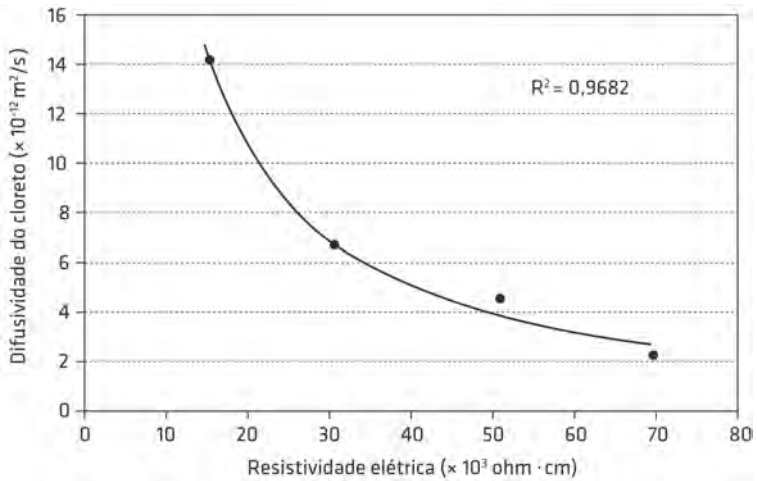


Fig. 6.2
Típica curva de calibração para o controle da difusividade do cloreto com base em medições de resistividade elétrica

Não se pretende aqui discutir todos os detalhes das medidas de difusividade do cloreto com base no método RCM. Essas medidas requerem equipamento especial de ensaio e experiência qualificada, só disponíveis em laboratórios profissionais de ensaios. No entanto, para melhor avaliação e aplicação dos resultados obtidos, segue uma breve descrição do método de ensaio.

6.1.1 Corpos de prova para ensaios

Geralmente, o ensaio é baseado em três fatias de 50 mm de espessura, cortadas de um cilindro de concreto com diâmetro de Ø100 mm. Essas fatias podem ser cortadas de cilindros de concreto moldados durante a concretagem e para essa finalidade, ou de testemunhos removidos da estrutura já existente, ou ainda de testemunhos removidos de protótipos construídos no canteiro de obra.

6.1.2 Procedimento de ensaio

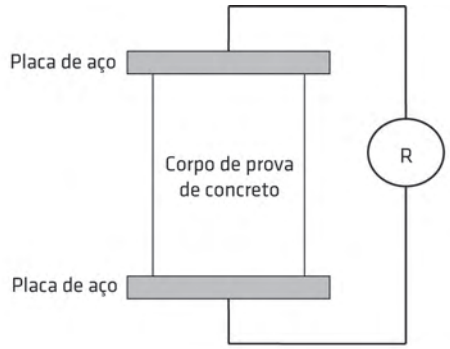
Imediatamente antes de ensaiar, os corpos de prova são pré-condicionados, de acordo com o procedimento padrão de saturação por água. Em seguida, os corpos de prova são montados em suportes de borracha e colocados num recipiente com uma solução de 10% de NaCl, como mostra a Fig. 6.3. O interior dos suportes de borracha são preenchidos com uma solução de 0,3 N de NaOH. A Fig. 6.4 mostra um conjunto de corpos de prova em teste pelo método RCM.

6.2.1 Métodos de ensaio

A Fig. 6.6 mostra um esquema do método dos dois eletrodos, no qual a corrente aplicada flui por todo o bloco de concreto do corpo de prova, colocado entre duas sólidas placas de aço; a resistência é observada por meio de um resistômetro numa certa frequência (1 kHz). A resistividade do concreto (ρ) é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{t} \tag{6.3}$$

em que R é a resistência, A é a área da superfície do corpo de prova e t é a altura do concreto no corpo de prova.



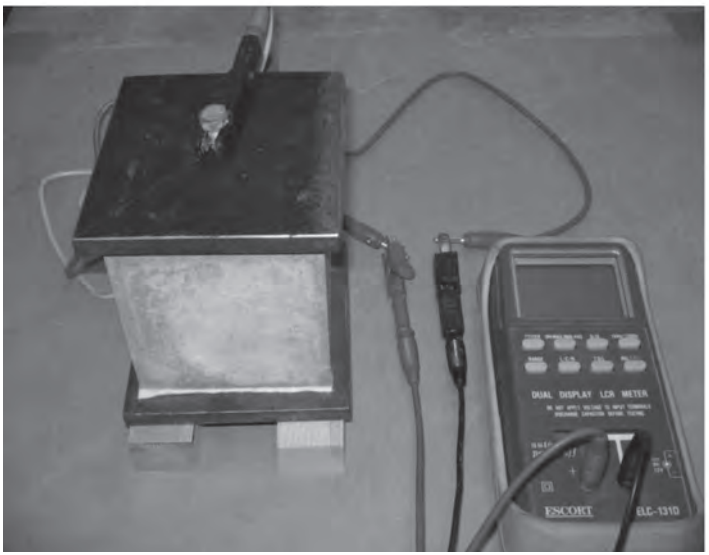


Fig. 6.6 *O método dos dois eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto*

Já a Fig. 6.7 mostra um esquema do método dos quatro eletrodos (Wenner), no qual as medidas são baseadas na passagem de corrente elétrica alternada de baixa frequência pelo concreto entre dois eletrodos externos, enquanto a queda de volta-

sete

Qualidade especificada da execução

Valores médios e desvios padrão da difusividade do cloreto no concreto aos 28 dias e do cobrimento são obtidos mediante o contínuo controle de qualidade do concreto (Cap. 6). Uma vez concluída a concretagem, ou melhor, a etapa de execução da estrutura propriamente dita, esses dados são usados como parâmetros de entrada para uma nova análise de durabilidade, para produzir a documentação de conformidade com a durabilidade especificada no projeto estrutural de partida.

Como a especificação da difusividade do cloreto baseia-se apenas num pequeno conjunto de corpos de prova produzidos separadamente e curados em laboratório por 28 dias, ela pode ser muito diferente da difusividade efetiva obtida no canteiro de obra durante a concretagem. Portanto, deve-se produzir uma documentação adicional sobre a difusividade do cloreto obtida na obra durante o período de concretagem. No fim da concretagem, essa difusividade, combinada com os dados sobre o cobrimento final, provê a base para a documentação da qualidade especificada da execução da obra.

Contudo, nem a difusividade do cloreto aos 28 dias obtida no laboratório, nem a que foi obtida no canteiro de obra refletem o potencial de difusividade do cloreto de um dado concreto, razão pela qual é preciso produzir documentação adicional sobre a difusividade de longo prazo desse concreto. Essa difusividade do cloreto, combinada com os dados do cobrimento final, provê a base para a documentação da qualidade potencial da construção de uma dada estrutura de concreto.

Note-se que, nas análises de durabilidade mencionadas, a qualidade especificada da execução é expressa e qualificada como uma probabilidade de corrosão para a vida útil requerida.

Para o proprietário da estrutura, a documentação adequada da qualidade especificada da construção e de conformidade

oito

Inspeção, avaliação, manutenção preventiva e reparos

Para operação, a decisão de proceder à manutenção e reparos das estruturas de concreto existentes é, em geral, reativa, ou seja, as medidas apropriadas são tomadas principalmente num estágio muito avançado de deterioração (Cap. 2). No caso da corrosão induzida por cloreto, os reparos no estágio avançado são tecnicamente difíceis e excessivamente caros quando comparados com inspeções e avaliações periódicas e com uma manutenção preventiva adequada durante a operação das estruturas. Portanto, deve-se fazer manutenção preventiva e avaliação periódica das condições existentes em todas as grandes infraestruturas de concreto, nas quais a segurança, o desempenho e a vida útil são especialmente importantes. Isso não é relevante apenas do ponto de vista técnico e econômico, mas é comprovadamente uma estratégia muito boa do ponto de vista da sustentabilidade (Cap. 11).

Recentemente, ocorreu uma rápida evolução internacional dos sistemas gerais de gerenciamento de ciclo de vida (LCM, *life cycle management*) de importantes obras de infraestrutura (Grigg, 1988; O'Connor; Hyman, 1989; Hudson et al., 1987; Rimes, 1997; Brime, 1997). Dependendo do número de obras incluídas, estão disponíveis comercialmente sistemas estabelecidos de LCM tanto para o nível de consulta como para o de projeto. Em muitos países, as autoridades nacionais também desenvolveram seus próprios sistemas LCM. No caso de muitas estruturas de concreto importantes, a avaliação geral das condições de conservação da estrutura e a manutenção preventiva atualmente já são parte desses sistemas LCM.

No entanto, para muitas e importantes estruturas de concreto em ambientes que contêm cloreto, são necessários procedimentos especiais de controle da penetração do cloreto, e o estabelecimento desses procedimentos deve sempre ser parte

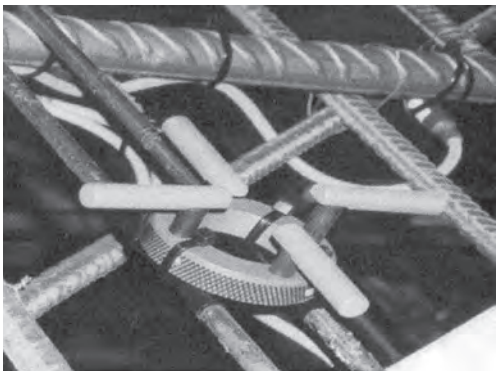


Fig. 8.3 *O multissensor CorroWatch para controle automático da penetração do cloreto e das condições da corrosão em estruturas de concreto*
Fonte: Force Technology (2008).



Fig. 8.4 *O sensor de corrosão Braunschweig para controle automático da penetração do cloreto e das condições da corrosão em estruturas de concreto*
Fonte: Fraunhofer Institute (2011).

8.2 Probabilidade de corrosão

Assim que a profundidade de penetração do cloreto possa ser medida em pelo menos seis regiões diferentes da estrutura, realiza-se uma análise de regressão de todos esses dados para o período de exposição, com adaptação da curva à segunda lei de difusão de Fick. O resultado será uma curva mais completa da penetração do cloreto do que a que aparece na Fig. 8.5. Essa curva oferece as bases para determinar alguns dos parâmetros de durabilidade mais importantes para o cálculo da probabilidade de corrosão.

Com base nessa análise de regressão, determina-se a concentração do cloreto na superfície (C_s) e a difusividade aparente do cloreto (D_a). O cálculo da probabilidade de corrosão também precisa de informação sobre a influência do tempo na difusividade do cloreto (α) e sobre o cobrimento (X_c).

Pode-se obter informação sobre o cobrimento com base no controle de qualidade do concreto realizado durante a concretagem (execução da estrutura) ou por outros meios. No estágio inicial da operação, porém, não está disponível a informação sobre a influência do tempo na difusividade do cloreto (α). Portanto, para fazer um cálculo precoce da probabilidade de corrosão, o cálculo deve ser baseado num valor α estimado, empírico.

Tão logo as medições de controle adicionais disponibilizam dois ou mais valores para a difusividade aparente do concreto (D_a), pode-se determinar um valor mais acurado para α, como demonstrado a seguir (Poulsen; Mejlbro, 2006):

cloretos já chegaram muito fundo, porém, a prevenção catódica é a única medida protetora que pode interromper a sua penetração e, assim, evitar o desenvolvimento da corrosão do aço.

Dessa forma, o controle adequado da penetração do cloreto, combinado com os cálculos de probabilidade de corrosão, fornece a base para a avaliação regular das condições e para a manutenção preventiva da estrutura. Se os cloretos conseguirem chegar às armaduras e a corrosão começar, é só uma questão de tempo antes que apareçam os danos visuais a exigir reparos onerosos.

8.4 Reparos

Dos vários tipos de reparos da corrosão induzida por cloretos, os reparos localizados não são muito eficazes para controlar a corrosão. Como mencionado no Cap. 2, os maus efeitos dos reparos localizados já foram constatados no início dos anos 1950 na ponte San Mateo-Hayward (1929), na área da baía de San Francisco (Gewertz et al., 1958). Essa ponte recebeu muitos reparos localizados, primeiro com a limpeza do local dos danos e, em seguida, com concreto projetado, mas em curto período de tempo a corrosão contínua do aço foi observada. Durante sua vasta pesquisa de campo sobre essa ponte, Stratfull (1974) realizou pela primeira vez um mapeamento detalhado do potencial de corrosão da estrutura que sofrera reparos, por meio de eletrodos meia célula cobre/sulfato de cobre. Dessa forma, ele demonstrou que as áreas reparadas tinham formado áreas catódicas, circundadas por áreas anódicas, como mostra a Fig. 8.6.

No início dos anos 1970, Stratfull também demonstrou que a proteção catódica seria a maneira mais eficiente de controlar a corrosão induzida por cloretos (Stratfull, 1974). Mais tarde, extensa experiência confirmou que a proteção catódica é mesmo a única maneira de controlar a grave corrosão do aço induzida por cloretos (Broomfield, 1997; Bertolini et al., 2004).

8.5 Estudo de caso

Para demonstrar como se faz a avaliação das condições de uma estrutura portuária de concreto em ambiente marinho, foi escolhido como estudo de caso o terminal de cruzeiros do porto de Trondheim (Fig. 2.20). A avaliação ocorreu após oito anos de operação, sem que nenhum controle da penetração do cloreto tivesse sido realizado antes. Construída em 1993, a estrutura tem frontão de 95 m e consiste em um deque ou tabuleiro exposto de concreto apoiado em tubos de aço preenchidos com concreto. O deque é do tipo viga e laje, cujo topo tem uma elevação de 3 m sobre o nível médio da água. A durabilidade especificada baseou-se nas normas do concreto então vigentes na Noruega, apresentando uma relação água/aglomerante de $\leq 0{,}45$, um teor de aglomerante ≥ 300 kg/m^3 e um cobrimento mínimo de 50 mm. O concreto aplicado, que tinha uma resistência à compressão de 45 MPa, foi produzido com 380 kg/m^3 de cimento Portland puro de alto desempenho e 19 kg/m^3 de sílica ativa (5%). De acordo com os arquivos do período de concretagem, todos os requisitos de qualidade do concreto e do cobrimento foram atendidos.

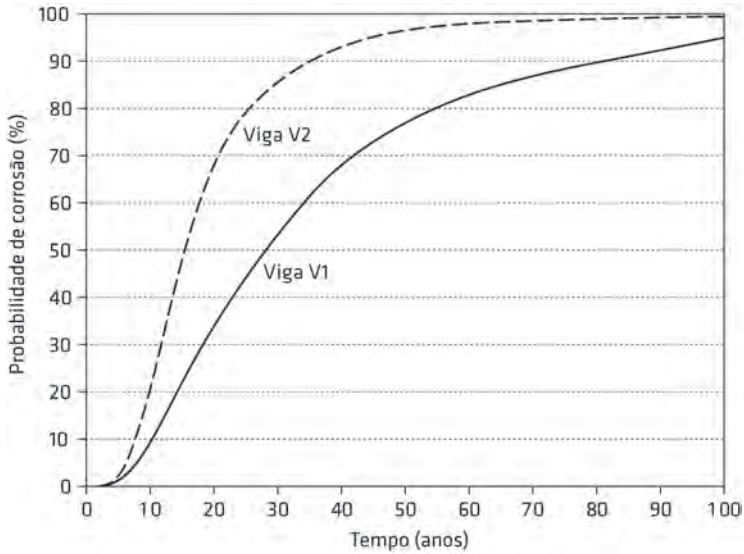


Fig. 8.7 *Probabilidade de corrosão nas duas vigas do deque depois de oito anos de operação*

8.5.2 Medida de proteção

Como o estágio inicial da corrosão do aço ainda não havia causado nenhum dano visível, a aplicação do sistema de prevenção catódica teria sido a medida mais apropriada para interromper tanto a corrosão já em andamento como a penetração adicional de cloretos. No entanto, como a continuidade elétrica dentro do sistema de armaduras era muito fraca e, por isso, a aplicação de um sistema de prevenção catódica ficaria muito cara, o proprietário decidiu aplicar apenas um tratamento hidrofugante da superfície sob o deque de concreto. Acreditava-se que essa medida de proteção pelo menos retardaria a penetração adicional de cloretos nas partes do deque de concreto nas quais a penetração do cloreto observada ainda não tinha chegado muito fundo.

Depois de dois anos de exposição adicional, foram feitas algumas medições da penetração do cloreto para investigar o efeito do tratamento hidrofugante da superfície. Como se vê na Fig. 8.8, ocorreu uma certa redistribuição do teor de cloreto: havia um teor reduzido de cloretos na camada superficial do cobrimento e uma penetração mais profunda da frente de cloreto abaixo do cobrimento. Esse tipo de redistribuição da penetração do cloreto também já havia sido reportada na literatura (Arntsen, 2001). Embora a taxa de penetração do cloreto tivesse sido retardada de maneira geral, o tratamento de superfície não tinha sido muito eficaz na prevenção de penetração adicional de cloretos. Portanto, essa medida protetora não deve ser aplicada se os cloretos já atingiram níveis demasiadamente profundos.

nove

Aplicações práticas

Várias novas e importantes infraestruturas de concreto foram construídas nos últimos anos ao longo da costa norueguesa. Para a maioria delas, a durabilidade especificada foi baseada principalmente nos requisitos de durabilidade das atuais normas para o concreto, com uma relação água/aglomerante ≤ 0,40 e um teor de aglomerante de ordem ≥ 330 kg/m^3 (Standard Norway, 2003a, 2003b, 2003c). Para novas pontes costeiras de concreto, especificou-se uma relação água/aglomerante de ordem ≤ 0,38 (NPRA, 1996).

Para obter informação adicional sobre a qualidade do concreto aplicado a todas essas estruturas, foram coletadas amostras do concreto de alguns canteiros de obra para testar o desenvolvimento da difusividade do cloreto, com base no método da rápida migração do cloreto (método RCM, na sigla em inglês) (Nordtest, 1999). A Tab. 9.1 mostra que, embora todos esses tipos de concreto atendessem aos requisitos de durabilidade especificados para uma vida útil de cem anos em ambiente marinho, a difusividade do cloreto ou a resistência à penetração do cloreto dos vários tipos de concreto variou dentro de limites muito vastos. Todos os ensaios foram realizados com amostras de concreto dos vários canteiros de obra, concretadas separadamente e depois curadas em água no laboratório até o momento do teste.

Para obter uma vida útil e uma durabilidade maiores e mais controladas, algumas das estruturas de concreto citadas também foram submetidas a um projeto de durabilidade e a um controle de qualidade do concreto, de acordo com as recomendações de 2004 da Norwegian Association for Harbor Engineers (Nahe) (Nahe, 2004a, 2004b, 2004c). Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição da experiência obtida com essas aplicações práticas, cujos procedimentos são praticamente os

documentação sobre a qualidade potencial da estrutura. Mantidos todos os outros parâmetros de entrada (Tab. 9.2), a nova análise mostrou que uma probabilidade de corrosão de aproximadamente 60% seria atingida durante a vida útil de cem anos.

Tomando como base os resultados anteriores sobre a qualidade efetiva da obra, a experiência geral indica que um nível relativamente alto de custos de manutenção deve ser esperado para manter a operação e o desempenho de longo prazo adequados durante a vida útil especificada de cem anos.

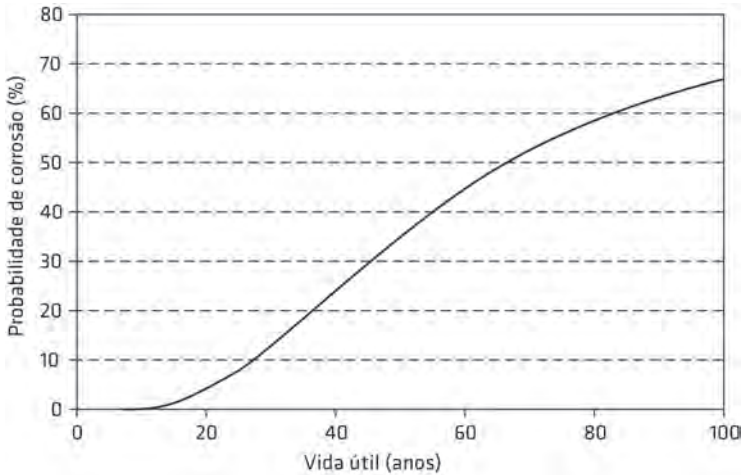


Fig. 9.3 *Probabilidade de corrosão* versus *tempo para o terminal de contêineres 1, no porto de Oslo (2002)*

9.2 Terminal de contêineres 2, Oslo (2007)

Entre 2005 e 2007, foi construída a primeira parte de outro terminal de contêineres no porto de Oslo. Essa estrutura, com uma extensão exposta de cerca de 300 m, também consiste em um deque ou tabuleiro exposto sobre tubos de aço preenchidos com concreto. De acordo com as atuais normas norueguesas do concreto, para uma vida útil de cem anos, os requisitos mínimos de durabilidade devem incluir uma relação água/aglomerante ≤ 0,40, um consumo de aglomerante ≥ 330 kg/m^3 e uma espessura de cobrimento mínimo de 60 mm (Standard Norway, 2003a, 2003b, 2003c). Um teor total de ar do concreto fresco da ordem de 4% a 6% deve garantir a resistência adequada ao gelo.

Contudo, para obter uma durabilidade maior e mais controlada, o proprietário da estrutura, Oslo Harbor KF, decidiu aplicar as novas recomendações Nahe de 2004, que tinham acabado de ser publicadas (Nahe, 2004a, 2004b, 2004c).

9.2.1 Durabilidade especificada

Como um requisito geral para a estrutura, o proprietário requereu uma vida útil de cem anos antes que fosse atingida uma probabilidade de corrosão de 10%. Para satisfazer esse requisito de durabilidade, foi realizada uma análise inicial de durabi-

Durante a concretagem, foram feitas 344 medições individuais da resistividade elétrica e esse controle da qualidade mostrou um nível aceitável de difusividade do cloreto, sem grandes desvios por todo o período de execução da estrutura. O resultado foi um valor médio de 7,9 × 10^{-12} m^2/s para a difusividade do cloreto, com um desvio padrão de 3,2 (Tab. 9.5).

Tab. 9.5 Difusividade do cloreto (D_{28}) obtida com base nas medições da resistividade elétrica durante a execução da estrutura

Idade no ensaio (dias)	Resistividade elétrica[a] (ohm · m)	Difusividade do cloreto[a] (× 10^{-12} m^2/s)
28	260; 102	7,9; 3,2

[a] Valor médio e desvio padrão.

Ao longo da concretagem, também foram feitas várias medições de controle do concreto executado. Devido ao cobrimento muito espesso e a um sistema de armaduras muito congestionado (Figs. 9.5 e 9.6), não foi fácil obter medições confiáveis com base num instrumento convencional de medição do cobrimento. Portanto, todas as medições de controle foram feitas com base na observação visual dos cobrimentos em barras salientes nas juntas de construção durante a concretagem. Com base no total de 68 medições individuais, obteve-se uma média de 99 mm de cobrimento, com um desvio padrão de 11 mm.



Fig. 9.5 *Barras salientes nas juntas do deque de concreto*

Com base nesses dados de controle, tanto sobre a difusividade do cloreto como sobre o cobrimento como novos parâmetros de entrada, fez-se uma nova análise de durabilidade, mantendo todos os demais parâmetros de entrada (Tab. 9.6). Obteve-se, assim, uma probabilidade de corrosão de aproximadamente 2% até os cem anos de vida útil, demonstrando que a durabilidade especificada fora atingida com a margem adequada.

9.2.3 Qualidade *in situ*

Durante a concretagem, diversos testemunhos de concreto de Ø100 mm foram extraídos em vários estágios da estrutura em construção e também dos protótipos produzidos separadamente no canteiro de obra. Imediatamente depois da remoção, todos esses testemu-

concreto, um ou mais protótipos foram produzidos e esses eram do tipo laje, parede ou ambos (Figs. 9.12 e 9.13). A Fig. 9.14 mostra a evolução típica da difusividade do cloreto no canteiro de obra e no laboratório por até um ano.



Fig. 9.12 *Produção de um protótipo do tipo parede no canteiro de obra*



Fig. 9.13 *Produção de um protótipo do tipo laje no canteiro de obra*

Para cada estrutura de concreto, também foram realizadas medições contínuas do cobrimento executado durante a execução da estrutura. Todas essas medições foram feitas manualmente nas barras salientes das juntas construtivas (junta fria ou de construção).

dez

Custos do ciclo de vida

Cálculos ou estimativas dos custos *versus* os benefícios podem ser realizados de diferentes maneiras, considerando vários tipos de custo ou benefício, o que é geralmente referido em termos de custo do ciclo de vida completo, análise de custo-benefício ou análise de risco de custo-benefício.

A metodologia conhecida como análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC, *life cycle costs*) pode ser uma importante ferramenta para avaliar a eficiência do custo de várias soluções técnicas para otimizar um projeto de durabilidade. Também podem ser usados para avaliar as várias soluções técnicas em estratégias de inspeção e avaliação do estado de conservação, manutenção e reparos, durante a etapa de operação da estrutura.

Como base para os LCC de uma estrutura de concreto até o tempo t_N, pode-se usar a seguinte expressão:

$$LCC(t_N) = C_I + C_{QA} + \sum_{i=1}^{t_N} \frac{C_{IN}(t_i) + C_M(t_i) + C_R(t_i) + \sum_{LS=1}^{M} \rho_{fLS}(t_i)\, C_{fLS}}{(1+r)^{t_i}} \quad \textbf{(10.1)}$$

em que C_I é o custo do projeto e da construção; C_{QA} é o custo de garantia e controle de qualidade; $C_{IN}(t)$ é a expectativa de custo de reparos; M é o número de estados-limite (EL); $p_{fLS}(t)$ é a probabilidade anual de falha para cada estado-limite; C_{fLS} é o custo da falha associado com a ocorrência do estado-limite; e r é a taxa de desconto.

No entanto, esse cálculo dos LCC não considera a vantagem de projetar e manter a estrutura para conseguir uma vida útil mais longa. Portanto, pode ser mais significativo comparar todos os custos numa base anual equivalente, distribuindo todos os custos do ciclo de vida por toda a vida útil da estrutura. Isso pode ser feito por meio de um fator anual que

onze

Avaliação do ciclo de vida

Recentemente, tem havido uma preocupação crescente com o impacto das atividades humanas no meio ambiente por conta da perda de biodiversidade e da redução do ozônio estratosférico, assim como das mudanças climáticas e do esgotamento dos recursos naturais. A expressão *desenvolvimento sustentável* foi introduzida no relatório final da Comissão Brundtland (World Commission on Environment and Development, WCED), em 1987, que a definiu como um tipo de desenvolvimento que visa atender às necessidades atuais sem comprometer as das futuras gerações.

Com base em peso, volume e dinheiro, a indústria da construção é a maior consumidora de materiais em nossa sociedade atual. Assim, cerca de 40% de todos os materiais usados estão relacionados à indústria desse setor (Ho et al., 2000). Do ponto de vista da produção, muitos dos materiais de construção têm grande impacto tanto no ambiente local como no global, o que é verdade particularmente no caso do concreto, um dos principais materiais de construção. Portanto, um dos grandes e crescentes desafios para a indústria da construção é a consciência ambiental na forma de melhor utilização do concreto como material de construção e para gerar harmonia e equilíbrio com nosso ambiente natural. Essa foi a conclusão de dois eventos internacionais que focaram esse problema, um em 1996 e outro em 1998. O primeiro resultou na Declaração de Hakodate (Sakai, 1996), e o segundo, na Declaração de Lofoten (Gjørv; Sakai, 2000, p. X), as quais afirmavam:

> nós, especialistas em concreto, devemos direcionar a tecnologia do concreto para um desenvolvimento mais sustentável no século XXI mediante o desenvolvimento e a introdução na prática de:

da consideração da durabilidade durante as fases de projeto e construção de novas infraestruturas de concreto. Maior durabilidade e vida útil em novas infraestruturas de concreto não são importantes apenas do ponto de vista econômico, mas também afetam diretamente a sustentabilidade.

Estes e outros fatores estimularam o rápido desenvolvimento da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA, *life cycle assessment*) das estruturas. A estrutura e a metodologia para quantificar os efeitos e impactos econômicos e ecológicos de projeto, produção e manutenção de estruturas estão disponíveis nas normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). Essas normas demonstram que a LCA inclui avaliação do consumo de materiais e energia, geração de resíduos e emissão de poluentes, assim como os riscos ambientais e à saúde correlatos. Portanto, a LCA oferece um instrumento valioso para quantificar e comparar os efeitos de várias soluções técnicas para melhorias no projeto, na construção e na operação de novas infraestruturas de concreto.

A seguir, expõe-se uma breve descrição da metodologia da LCA. Apresenta-se também um estudo de caso para mostrar como essa avaliação pode ser aplicada para estimar os impactos ambientais de duas estratégias diferentes de manutenção para uma dada estrutura de concreto.

11.1 Diretrizes para a avaliação do ciclo de vida

De acordo com a norma ISO 14040 (ISO, 2006a), uma LCA visa entender e avaliar a magnitude e o significado dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto. Uma parte crucial da LCA é o desenvolvimento de um Inventário do Ciclo de Vida (LCI, *life cycle inventory*), que quantifica emissões e consumo de material necessários para produzir e usar o produto. Cada item listado no inventário é, então, correlacionado com os eventuais danos ambientais ou à saúde por meio dos indicadores de impacto (Fig. 11.1).

Os muitos indicadores de impacto incluem efeitos conhecidos, como as mudanças climáticas, a redução do ozônio estratosférico, formações fotoquímicas oxidantes e acidificação, mas há muitos outros efeitos envolvidos. As categorias finais incluem saúde humana, ambiente natural e disponibilidade de recursos. Um indicador de categoria, representando o volume do impacto potencial, pode estar em qualquer lugar entre os resultados do inventário do ciclo de vida e a categoria final.

Conduzir corretamente uma LCA é um processo muito difícil porque a relação entre o ambiente externo e a categoria final pode ser muito complexa e o limite pode ser afetado por múltiplas fontes e tipos de emissão. A Fig. 11.2, por exemplo, mostra algumas das emissões (mas não todas) que se sabe que afetam a acidificação, mas essas mesmas emissões também podem afetar a eutrofização, a ecotoxicidade ou outras categorias. Normalmente, a LCA cessa um passo antes da categoria final (Fig. 11.1), mostrando apenas as categorias de impacto que são mais fáceis de avaliar. Interpretam-se, então, os resultados dos vários indicadores de categoria. As normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b) oferecem mais informações sobre a estrutura metodológica para avaliação dos impactos ambientais.

Os cálculos devem prosseguir, alocando os resultados do LCI a categorias de impacto (Fig. 11.1). Classificação e caracterização devem ser realizadas de acordo com a ISO 14044 (ISO, 2006b), usando os fatores de efeito do Protocolo de Montreal (UN, 1987), IPCC 1995 (UN, 1995) e Heijungs et al. (1992). Emissões de um gás específico podem ser alocadas a mais de uma categoria. Por exemplo, emissões de NO_x serão alocadas às categorias de eutrofização e acidificação.

O resultado final pode ser apresentado como categorias de impacto ou ponderados num índice ambiental. Essa ponderação consiste no processo de converter os resultados dos indicadores de diferentes categorias de impacto por meio de fatores numéricos baseados em escolhas de valor. Este é um elemento opcional na ISO 14044. Assim, fatores advindos de escolhas de valor podem ser baseados em alvos políticos do Protocolo de Kyoto (UN, 1997) ou outras preferências similares. A interpretação dos resultados, com base na ISO 14044, deve identificar, qualificar, avaliar e apresentar questões significativas encontradas.

11.2 Estudo de caso

Para demonstrar como o esquema metodológico citado pode ser aplicado para avaliar os impactos ambientais de diferentes estratégias de manutenção de uma certa estrutura de concreto, dois exemplos de sistemas comumente usados foram analisados por Årskog, Fossdal e Gjørv. (2003). Os resultados da análise são brevemente descritos e discutidos a seguir.

Um sistema é um reparo localizado com base em concreto projetado que é aplicado a uma estrutura de concreto com danos devidos à contínua corrosão induzida por cloretos. Embora esse tipo de reparo não seja a maneira mais eficiente de controlar corrosão já em progresso, como discutido no Cap. 8, ele ainda é usado para esse tipo de dano (Cap. 2). O outro sistema é um tratamento hidrofugante de superfície, que é uma medida protetora comumente usada para manutenção preventiva (Cap. 5).

Para os dois sistemas, foram consideradas as seguintes premissas comuns para calcular os impactos ecológicos:

- 60 km de distância percorrida do fornecedor ao local do reparo;
- o transporte de materiais e equipamento por caminhão;
- o consumo de diesel do caminhão no valor de 0,2 kg por t/km;
- a unidade funcional compreendendo 1 m^2 de superfície de concreto reparada ou protegida por um período de dez anos.

11.2.1 Reparo localizado

Esta análise é baseada nas seguintes premissas:

- 30 m^2 de área de superfície reparada;
- rebote ou perda por reflexão de 25% no concreto projetado;
- energia no canteiro de obra proveniente de geradores a diesel.

doze

Normas e prática

Com base no desempenho de todas as estruturas de concreto descritas no Cap. 2, pode-se perguntar por que todas as estruturas de concreto em alto-mar construídas nos anos 1970 para a indústria de petróleo e gás no mar do Norte tiveram uma durabilidade tão superior às importantes estruturas de concreto costeiras construídas ao longo da costa norueguesa durante o mesmo período. Por muito anos, a vida útil exigida para as estruturas em alto-mar foi tipicamente de 30 anos, aumentando gradualmente para 60 anos, enquanto para todas as estruturas terrestres em ambiente marinho (costeiras) exigia-se uma vida útil de 60 anos, aumentando progressivamente para cem anos.

Por muitos anos, o aço foi o material estrutural tradicional para as plataformas da indústria de petróleo e gás. Assim, quando o primeiro conceito para instalações no mar do Norte com base em concreto foi apresentado no final dos anos 1960, houve muito ceticismo por parte da comunidade técnica de plataformas em alto-mar em relação ao uso do concreto como material estrutural para um ambiente marinho tão agressivo e hostil (Gjørv, 1996).

Ao mesmo tempo, porém, os resultados e as recomendações das amplas pesquisas de campo em mais de 200 estruturas de concreto ao longo da costa norueguesa tinham acabado de ser publicados (Gjørv, 1968). Como descrito e discutido no Cap. 2, a maioria dessas estruturas de concreto apresentava alta capacidade estrutural mesmo depois de 50 a 60 anos de solicitações combinadas de cargas estruturais pesadas sob exposição a um ambiente marinho agressivo. A boa condição geral dessas estruturas de concreto costeiras contribuiu, portanto, para convencer a comunidade técnica das plataformas em alto-mar de que o concreto também seria um material estrutural possível e confiável para as plataformas do mar do Norte.

programas extensos de controle de qualidade foram implementados para assegurar a melhor qualidade possível da construção.

O bom desempenho de todas essas plataformas de concreto no mar do Norte demonstra que, desde o início dos anos 1970, era possível tanto projetar como produzir estruturas de concreto muito duráveis mesmo nos ambientes marinhos mais agressivos e rigorosos. No entanto, os requisitos citados para durabilidade e controle de qualidade do concreto foram baseados na utilização correta do conhecimento e da experiência então disponíveis. Para todos os operadores profissionais do mar do Norte, era essencial e da maior importância um alto grau de segurança e baixos custos de operação.

Embora as estruturas mais velhas do mar do Norte ainda pareçam estar em condições bastante boas, muitas delas já sofreram alguma corrosão do aço e algumas passaram por reparos muito caros (Cap. 2). A despeito da produção de um concreto muito homogêneo e dos programas muito rigorosos de controle de qualidade, a maior parte dos problemas de corrosão observados mais tarde podem ser atribuídos à alta dispersão e variabilidade da qualidade executada do concreto; toda falha na qualidade especificada da execução foi logo revelada. Deve-se notar, porém, que também para essas plataformas do mar do Norte a durabilidade exigida foi baseada principalmente em requisitos normativos. Como se viu no Cap. 6, não é fácil verificar e controlar quaisquer especificações com base em requisitos normativos de composição do concreto e execução da concretagem.

Com exceção de uma plataforma de concreto construída na Holanda com cimento de escória de alto-forno, todas as outras foram produzidas com cimento Portland puro (CEM I), que não é o melhor sistema aglomerante para obter alta resistência à penetração de cloreto (Cap. 3). Só em poucas das plataformas construídas mais recentemente aplicou-se uma pequena quantidade de sílica ativa, usada principalmente para estabilizar e evitar a segregação do concreto fresco, altamente fluido durante a concretagem.

Na plataforma Brent B (1975), que não recebeu nenhum revestimento de superfície na zona de respingos, observou-se uma profunda penetração de cloretos e uma despassivação em estágio inicial após cerca de 20 anos de exposição (Cap. 2). No entanto, como o concreto dessa plataforma foi produzido com uma relação água/cimento de 0,40 e mais de 400 kg/m^3 de cimento, em combinação com um cobrimento nominal de 75 mm, foram atendidos todos os requisitos até das mais rigorosas normas europeias do concreto (CEN, 2009).

12.1.2 Estruturas de concreto terrestres

Do início dos anos 1970 até o final dos 1980, em todas as estruturas de concreto construídas ao longo da costa norueguesa, o requisito da qualidade do concreto era baseado principalmente numa certa resistência à compressão aos 28 dias. Durante a grande expansão das atividades de construção na época, tanto na Noruega como em outros países, muitas estruturas de concreto portuárias e pontes de concreto

estruturas de concreto em ambientes contendo cloreto, sempre ocorrerá uma certa taxa de penetração de cloreto durante a operação das estruturas. Portanto, uma vez terminadas as estruturas, também foi muito importante para os proprietários receber um manual de serviço para futuras avaliações das condições e manutenção preventiva dessas estruturas. É esse manual de serviço que fornece a base definitiva para atingir durabilidade e vida útil mais controladas.

Além da corrosão induzida por cloreto, outros problemas potenciais de durabilidade também devem ser devidamente considerados para um projeto mais completo de durabilidade de importantes estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade, o que também é válido para o controle da fissura nas primeiras idades. Em todas as novas estruturas de concreto, todos os requisitos de durabilidade das atuais normas devem ser atendidos. No entanto, nas infraestruturas em que alto desempenho e segurança têm importância especial, deve-se tentar atingir uma durabilidade maior e mais controlada, para além do que é possível com base nas atuais normas do concreto e na prática recente. Para isso, recomendam-se novas especificações, que serão brevemente descritas a seguir.

12.2 Requisitos gerais de durabilidade

12.2.1 Vida útil

Com base no projeto de durabilidade descrito e discutido no Cap. 4, para uma determinada estrutura de concreto em um dado ambiente, deve-se exigir um período de "vida útil" seguro antes que se atinja uma probabilidade de 10% de corrosão.

Para todas as grandes infraestruturas de concreto, uma *vida útil* de pelo menos cem anos deve ser requerida antes que a probabilidade de corrosão exceda um estado-limite de serviço com intensidade de corrosão de 10% (Cap. 4).

Para períodos de vida útil de mais de cem anos, porém, o cálculo da probabilidade de corrosão torna-se gradualmente menos confiável. Para períodos de até 150 anos, portanto, a probabilidade de corrosão deve ser mantida tão baixa quanto possível, não excedendo 10%, mas, além disso, é preferível requerer também algumas medidas de proteção adicionais, como o uso parcial de aço inoxidável. No entanto, para períodos de vida útil de mais de 150 anos, nenhum cálculo de probabilidade de corrosão é considerado absolutamente válido. Mesmo assim, para aumentar e garantir a durabilidade, a probabilidade de corrosão deve ser mantida o mais baixa possível, não excedendo 10%, além disso, devem sempre ser requeridas algumas estratégias e medidas de proteção adicionais (Cap. 5).

Em ambientes marinhos, às vezes pode haver o risco de exposição durante a concretagem nas primeiras idades, antes que o concreto adquira maturidade e densidade suficientes. Também para esse caso é preciso levar em consideração algumas precauções ou medidas de proteção especiais. Como essas precauções ou medidas podem ter implicações tanto para o custo do projeto como para a futura operação da

Sobre o autor



Odd E. Gjørv, doutor em Engenharia e em Ciências, é professor emérito do Departamento de Engenharia Estrutural da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU, na sigla em norueguês), em Trondheim, Noruega. Em 1971, quando passou a integrar o corpo docente de Tecnologia e Engenharia da NTNU, introduziu extensos programas de ensino em tecnologia de concreto nos níveis de graduação e pós-graduação. Orientou um grande número de mestrandos e doutorandos em tecnologia de concreto. Como professor-visitante, lecionou no *campus* de Berkeley da Universidade da Califórnia e, a convite, tem dado muitas palestras em vários países. É membro da Academia Norueguesa de Ciências Técnicas (NTVA, na sigla em norueguês) desde 1979 e participou em muitas atividades e associações profissionais internacionais. Atualmente, é colaborador internacional no programa Infraestrutura Submersa e Cidade do Futuro Submersa *(Underwater Infrastructure and Underwater City of the Future)*, da Universidade Tecnológica de Nanyang, em Singapura.

Gjørv publicou mais de 350 artigos científicos e dois livros, tendo contribuído em muitos outros livros profissionais. Recebeu vários prêmios e honrarias internacionais por sua pesquisa. É membro do American Concrete Institute (ACI) desde 1989. De 1971 a 1995, envolveu-se continuamente no desenvolvimento e construção de todas as plataformas de concreto em alto-mar para exploração de petróleo e gás no mar do Norte. Sua pesquisa inclui materiais avançados de concreto e construção em concreto, assim como durabilidade e desempenho de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. O autor pode ser contatado pelo site: <http://folk.ntnu.no/gjorv/>.

O controle adequado da penetração do cloreto e a corrosão prematura das armaduras ainda se colocam como grandes desafios para o projeto de durabilidade de estruturas de concreto e a manutenção durante sua vida útil. Em ambientes agressivos, a durabilidade é ainda mais crítica e decisiva para o sucesso do empreendimento.

Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade apresenta os principais conceitos teóricos e dados práticos necessários para a análise de durabilidade e a tomada de decisões no projeto de estruturas de concreto.
A obra aborda o controle e a garantia da qualidade do concreto, medidas de proteção, documentação da qualidade de execução, avaliação e cálculo de custos do ciclo de vida e enfatiza as práticas recomendadas.

O livro apresenta exemplos práticos de terminais de carga e projetos de desenvolvimento urbano em ambientes agressivos, além de realizar uma ampla revisão de experiências de campo na área. Uma leitura fundamental para profissionais envolvidos no projeto e gerenciamento de obras de concreto.

Trata-se de um livro excepcional que descreve a complexa questão da durabilidade das estruturas de concreto conectando com maestria a pesquisa com a prática, a teoria com o projeto e o rigor de execução, fornecendo dados e ferramentas, com exemplos reais, que viabilizam o complicado cálculo da vida útil de estruturas de concreto em ambientes agressivos.

Prof. Paulo Helene
Diretor de Publicações e Conselheiro do IBRACON, Professor titular da Universidade de São Paulo e Presidente de Honor da ALCONPAT

O Prof. Gjørv proporcionou à comunidade de projeto um panorama atualizado sobre os principais problemas em durabilidade. Ele foi da teoria à prática, o que torna este livro relevante para os profissionais, e colocou à prova essa abordagem de avaliação do tempo de serviço de estruturas de concreto ao aplicá-la na prática em estruturas costeiras, demonstrando sua praticidade e aplicabilidade.

K. van Breugel
Universidade de Tecnologia de Delft

Patrocínio:
weber SAINT-GOBAIN produtos quartzolit

ISBN 978-85-7975-195-0