

Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação

M. G. Alexander^{1*}

* Autor de Contato: mark.alexander@uct.ac.za

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>

Recepção: 21/030/2018 | Aceitação: 05/07/2018 | Publicação: 31/08/2018

RESUMO

O artigo apresenta uma visão internacional do conhecimento atual e do progresso na modelagem de um projeto de vida útil de estruturas de concreto. Explora porque a modelagem da vida útil é necessária e mostra que as demandas modernas de longevidade, durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto não podem ser atendidas sem uma correta modelagem da vida útil. Discute as abordagens atuais de projeto e especificação da durabilidade e conclui que uma mudança para uma abordagem baseada em desempenho é imperativa para que um desenvolvimento significativo seja logrado. Exemplos da experiência internacional são citados para ilustrar o progresso que tem sido obtido. Por último, é discutido como avançar, reconhecendo que as bases filosóficas já estão em vigor na forma de formulações gerais nas normas prescritivas e de desempenho, mas que precisam ser transformadas em abordagens úteis ao exercício profissional.

Palavras-chave: modelagem do projeto de vida útil; especificações baseadas em desempenho; durabilidade do concreto; indicadores de durabilidade; norma modelo.

Citar como: M. G. Alexander (2018) “*Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação*”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 224-245, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>

¹ CoMSIRU, Department of Civil Engineering, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo ou terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2019.

Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation

ABSTRACT

The paper presents an international overview of current knowledge and progress in service life design and modelling of concrete structures. It explores why service life modelling is needed, and indicates that modern demands for longevity, durability, and sustainability of concrete structures cannot be fulfilled without service life modelling. It addresses the current approaches to durability design and specification and concludes that a move to performance-based approaches is imperative for progress to be made. Examples from international experience are cited to illustrate progress that has been made. Lastly, the paper discusses ways of moving forward, recognizing that the philosophical bases are already in place in the form of general code formulations, but which need to be converted into useful approaches.

Keywords: service life modelling; performance-based specifications; concrete durability; durability indicators; model code.

Diseño y modelado de vida útil de estructuras de hormigón: antecedentes, desarrollos e implementación

RESUMEN

Se presenta una visión general internacional del conocimiento actual y el progreso en el diseño de vida útil y el modelado de estructuras de hormigón. Explora por qué es necesario el modelado de la vida útil e indica que las demandas modernas de longevidad, durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de hormigón no pueden cumplirse sin un modelo de vida útil. Aborda los enfoques actuales del diseño y la especificación de la durabilidad y concluye que es imperativo avanzar hacia enfoques basados en el desempeño para avanzar. Se citan ejemplos de la experiencia internacional para ilustrar el progreso que se ha logrado. Por último, el documento discute formas de avanzar, reconociendo que las bases filosóficas ya están en su lugar en formulaciones de códigos generales, pero que deben convertirse en enfoques útiles.

Palabras clave: modelado de vida de servicio; especificaciones basadas en el desempeño; durabilidad del concreto; indicadores de durabilidad; código modelo.

1. INTRODUÇÃO - porque a necessidade de modelar a vida útil de projeto VUP?

Estruturas de concreto podem se deteriorar prematuramente, resultando em baixo desempenho frente à durabilidade. As razões incluem uma má compreensão dos processos de deterioração, avaliação equivocada da agressividade local, e mudanças nas propriedades do cimento e práticas de construção com o tempo (Neville, 1987). Os problemas de durabilidade em estruturas de concreto cobrem uma vasta gama incluindo agentes agressivos externos (por exemplo, sulfatos), incompatibilidades de material interno (por exemplo, reação álcali agregado) e ambientes agressivos tais como aqueles sujeitos à ação de congelamento-descongelamento. A maior ameaça ao concreto armado é a corrosão da armadura, levando a fissuras, manchas e destacamento do cobrimento de concreto - veja a Fig. 1. Isso pode comprometer a funcionalidade das estruturas, comprometer a segurança, a estabilidade e a estética. Tais estruturas se tornam um passivo indesejável para seus proprietários ou gestores, resultando em perdas econômicas substanciais, além de serem insustentáveis por desperdiçar recursos naturais valiosos.



Figura 1. Danos causados por corrosão em uma ponte de concreto exposta à brisa marinha (cloretos) próxima à costa da Cidade do Cabo na África do Sul.

Atualmente está ocorrendo uma “crise de durabilidade do concreto”. Isso tem várias consequências: para proprietários de infraestrutura que exigem cada vez mais tempo de vida útil; pelo imperativo de uma gestão adequada do financiamento de infraestruturas públicas; e para o desenvolvimento de soluções de engenharia que estabeleçam uma base de confiança na provisão futura de infraestrutura. Essas consequências são sérias e precisam de atenção contínua e urgente da comunidade do concreto.

1.1 Durabilidade e corrosão de estruturas de concreto armado

Como mencionado, a maior ameaça à durabilidade do concreto armado é a corrosão da armadura. A corrosão é iniciada por uma alteração na solução do poro em torno do aço, devido tanto à acidificação por carbonatação, quanto devida à entrada de íons cloreto a partir da brisa marinha num ambiente junto à costa. A armadura é protegida do meio ambiente por uma camada de cobrimento de concreto relativamente fina, que deve "garantir" a vida útil da estrutura. A durabilidade é controlada pela qualidade do concreto de cobrimento, que é suscetível às influências de deterioração de uma cura insuficiente, secagem em idade precoce, compactação inadequada, e a penetração de agentes ambientais agressivos. O problema da durabilidade em estruturas de concreto depende em grande parte da qualidade do concreto e da espessura da sua camada de cobrimento, que é função de uma decisão de projeto e um correto procedimento de execução. A Fig. 2 apresenta um esquema da camada de cobrimento do concreto, ilustrando os seus elementos mais importantes.

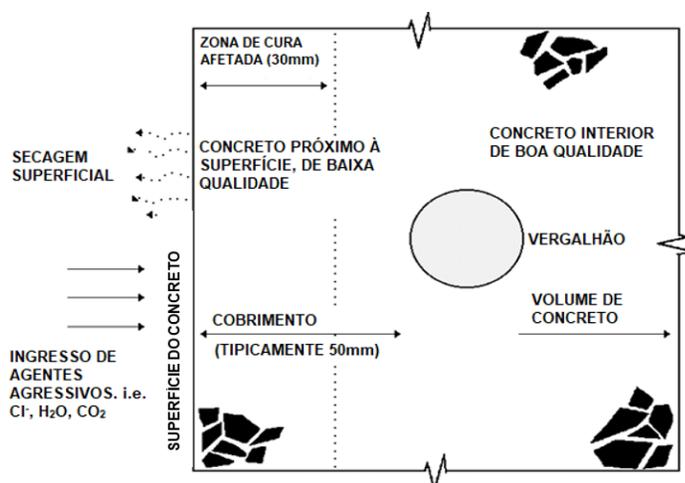


Figura 2. Esquema dos fatores relevantes na qualidade do concreto e de sua espessura de cobrimento

Consequentemente, as estratégias de durabilidade que provavelmente proporcionarão os maiores benefícios devem abordar diretamente a qualidade e a espessura do concreto de cobrimento da

armadura. “Qualidade” refere-se, principalmente, à capacidade de resistir à penetração de fluidos/gases agressivos a partir do ambiente externo, que é uma função do tipo de aglomerante e da relação água/aglomerante, supondo que a cura é efetivamente realizada (uma premissa falsa, em muitos casos!). O sistema aglomerante é importante porque sua composição química governa a interação e a imobilização de íons agressivos, como os cloretos. Para os projetistas, isso está relacionado a dois aspectos: a capacidade de (1) quantificar as propriedades da camada de cobertura para fins de especificação e (2) realizar a previsão da vida útil de projeto VUP, o que significa prever a taxa de deterioração de uma estrutura de concreto. Para os construtores, a questão é selecionar os materiais e proporções de concreto apropriados e implementar locais adequados que garantam que as propriedades do concreto de cobertura especificadas sejam alcançadas na construção real.

1.2 Vida Útil de Projeto VUP

Os engenheiros precisam de ferramentas para modelar ou prever a deterioração das estruturas de concreto ao longo de sua vida útil. O chamado 'Service Life Modeling' (SLM) ou Modelagem da Vida Útil destina-se a permitir a quantificação da vida útil de projeto de estruturas, para fins de otimização econômica, eficiência operacional e desempenho estrutural e estético. Assim, 'modelagem da vida útil' SLM e 'projeto da vida útil' estão intimamente relacionados: o projeto racional precisa de bons modelos e os modelos alimentam o projeto (modelos também são usados para outros fins, como pesquisa e diagnóstico).

A norma de Modelo de Previsão da Vida Útil de Projeto (*fib*, 2006) define 'Vida útil de projeto' como o período assumido para o qual uma estrutura ou parte dela é usada para o propósito pretendido, e em que:

- a deterioração e o desempenho do material são quantificados tanto quanto possível (incluindo cinética do processo)
- é adotada uma abordagem adequada de 'risco', geralmente baseada na probabilidade que leva a medidas de confiabilidade
- quantificações, custos, intervenções (por exemplo, manutenção) e similares podem ser racionalmente considerados.

Embora o treinamento e a experiência dos engenheiros estruturais se concentrem principalmente nos aspectos físicos e mecânicos do projeto e da especificação, a "nova demanda" é uma caixa de ferramentas mais abrangente, contendo dados para soluções práticas de problemas de deterioração com base no tempo. Isto também deve incluir provisões para deterioração e custos de manutenção que podem ser substanciais, facilmente chegando a vários pontos percentuais do PIB, e, frequentemente excedendo 50% dos orçamentos totais da construção. Hoje em dia, muita tecnologia e conhecimento é exigido dos engenheiros modernos, e a modelagem da vida útil é uma dessas "novas" demandas.

2. COMO PROJETAR PARA CONSIDERAR A VIDA ÚTIL DE PROJETO?

Praticamente, como projetar para uma vida útil de projeto de 50 ou 100 anos quando não há evidência objetiva sobre em que basear nossas decisões? A implementação da “modelagem da vida útil – SLM” racional é complexa e depende dos ambientes de exposição (por exemplo, aquecimento global, mudança rápida de materiais como cimentos mais novos), conhecimento e modelos inadequados, qualidade de construção variável, percepções diferentes do que significa 'vida útil' e impossibilidade de verificar os projetos a longo prazo. Claramente, o problema não é simples! Um exemplo histórico é a Casa Coignet em Paris, França, mostrada na Fig. 3. Esta foi provavelmente a primeira casa de concreto armado, construída em 1853, e agora com mais de 160 anos de idade. Para colocar isso no contexto: como essa casa deveria ter sido projetada no século XIX para se

adequar às exigências do século XXI? Muito poderia mudar durante a vida útil de uma estrutura que poderia tornar as melhores tentativas iniciais de SLM insignificantes.



Figura 3. Coignet House nos arredores de Paris, França (4 andares). Considerada a primeira casa em concreto armado do mundo, 1853. Argamassa ou concreto primitivo com argila calcinada misturada com cal.

A vida útil de uma estrutura de concreto é ilustrada esquematicamente na Fig. 4, que mostra o progresso da deterioração ao longo do tempo de uma estrutura (A), à medida que ela começa a se deteriorar a partir de sua condição inicial construída (no tempo zero). Idealmente, o tempo em que a estrutura atinge um nível inaceitável de dano deve ser igual ou superior à vida útil de projeto e deve ser capaz de ser modelado. No entanto, muitas estruturas deterioram-se prematuramente, como em (B) na Fig. 4, apresentando durabilidade inadequada e rápida deterioração, exigindo reabilitação durante sua vida útil. Essa deterioração muitas vezes não é esperada, o que ilustra a necessidade de prever com mais precisão o desempenho das estruturas de concreto durante sua vida útil. A crescente frequência de manifestações patológicas precoces e os custos de reparo associados demonstram que os proprietários de infraestrutura exigem que os projetistas e construtores forneçam garantia de uma vida útil de projeto, pré-acordada, de forma mais precisa e confiável, conduzindo a estruturas duráveis sem sobressaltos e reparos não previstos.

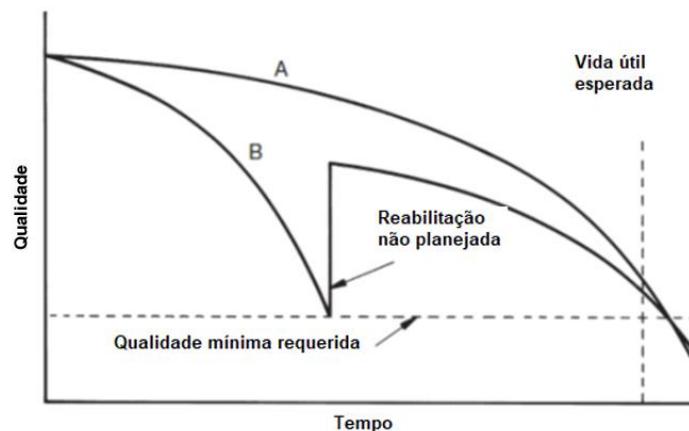


Figura 4. Ilustração esquemática do conceito de 'vida útil' de uma estrutura

Resumindo: a construção da vida útil de projeto, VUP, requer modelagem da vida útil e previsão da vida útil. A vida útil deve atender a um estado limite de durabilidade, que ainda não foi definido em normas, aderido ao estado limite de serviço. Portanto, no contexto deste artigo, é necessário rever os critérios, requisitos e procedimentos de projeto e especificação atualmente adotados nas novas obras.

2.1 Projeto de durabilidade atual e especificações

O projeto de durabilidade das estruturas de concreto armado é o processo de determinar a combinação mais adequada de materiais e detalhes estruturais para garantir a durabilidade (com facilidade de manutenção) da estrutura ao longo de sua vida útil e em seu ambiente de projeto (Alexander & Santhanam, 2013). Isso deve ser enquadrado em termos de confiabilidade aceitável ou probabilidade de a estrutura funcionar satisfatoriamente. O problema envolve o balanço entre o risco de deterioração indevida com a economia de garantir durabilidade e pode incluir manutenção e reparos planejados. As especificações de durabilidade estão intimamente ligadas ao projeto. A especificação estabelece requisitos para garantir que a estrutura seja construída de acordo com a intenção do projeto e deve fornecer informações claras sobre a natureza desejada ou os resultados da construção.

Existem dois tipos principais de especificações ou normas:

1. Prescritivas, estabelecendo métodos, materiais, processos e procedimentos que instruem exatamente como realizar o trabalho. O construtor tem poucas opções e deve simplesmente executar as instruções de especificação, deixando pouco espaço para inovação.
2. Desempenho, delineando o que é necessário como um produto acabado, ou seja, os resultados desejados da construção, definindo esses resultados claramente em termos de critérios de desempenho mensuráveis por ensaios e simulações.

2.1.1 Crítica aos procedimentos atuais de projeto da vida útil

Atualmente, há poucos projetos de durabilidade realmente desenvolvidos para estruturas de concreto. Qualquer projeto de durabilidade é geralmente limitado a especificações vagas (ou, especificações complexas e irrealizáveis), na esperança de que se a especificação for respeitada, a durabilidade da estrutura será assegurada (ou seja, uma abordagem "de receitas" "ou prescritiva" ou "considerada-a-satisfazer" do *fib* Model Code 2010).

Além disso, muitas especificações de durabilidade são frequentemente baseadas em abordagens ultrapassadas e suposições irrealistas. No entanto, existem alguns exemplos notáveis de projetos racionais da durabilidade (ver, por exemplo, Parte III [Alexander, 2016A]) que lida com estudos de casos práticos como a ponte Confederação do Canadá; da Marinha na região do Golfo; as Pontes dinamarquesas da Passagem do Estreito; o projeto Hong Kong-Zhuhai- Macau Sea Link; e o Novo Canal do Panamá.

A prática atual considera que a resistência à compressão é o fator crucial, muitas vezes usado como um substituto para a durabilidade (Alexander et al., 2008). No entanto, diferentes métodos para obter a mesma resistência do concreto não resultam na mesma durabilidade. Além disso, a resistência de amostras de laboratório bem compactadas e corretamente curadas não refletem os processos de construção como lançamento, compactação e cura, que afetam a qualidade do cobrimento de concreto. Os fatores importantes de controle da taxa de deterioração são os constituintes do material concreto, a qualidade do concreto de cobrimento e a agressividade do ambiente. Geralmente, é impraticável controlar ou modificar as condições de exposição. Portanto, as estratégias para melhorar a vida útil devem se concentrar nos materiais e na qualidade da construção. Tais estratégias requerem modelos de vida útil e especificações de desempenho e de durabilidade adequadas (Mackechnie & Alexander, 2002). Esses desenvolvimentos facilitam o projeto de durabilidade inovador e responsivo, que está em grande parte ausente no momento.

2.2 Necessidade de uma nova abordagem: do projeto e especificação prescritivos ao projeto por desempenho

Existem esforços internacionais concentrados para se deslocar de normas prescritivas a normas por desempenho. Por exemplo, a iniciativa P2P do Nacional Ready Mix Concrete Association (NRMCA) dos EUA e do programa francês PERFDUB (Linger & Cussigh, 2018). Há grandes benefícios em migrar de norma prescritiva para normas baseadas no desempenho (Simons, 2004,

Dia, de 2005, Bickley et al, 2006). No geral, embora a filosofia de especificações baseadas no desempenho estejam bem estabelecidas (Wolf et al, 2005, CAN / CSA, 2004), a divergência permanece em definições adequadas e medidas confiáveis de parâmetros de qualidade.

Métodos de ensaio apropriados são cruciais, e sem estes, pouco progresso real pode ser feito. As abordagens de ensaio foram revisadas pelo RILEM TC-NEC (RILEM, 2005), e outros desenvolvimentos podem ser esperados. Embora alguns ensaios estejam bem estabelecidos, como o ensaio de permeabilidade a cloretos (ASTM C1202, 2010), o desafio consiste em criar e padronizar novos métodos de ensaio.

2.2.1 Crítica das especificações prescritivas

O concreto estrutural é projetado para atender a critérios específicos de trabalhabilidade, resistência, durabilidade e assim por diante. Tal como indicado, as especificações atuais são em grande parte prescritivas, que estabelecem os valores para os parâmetros limitantes, tais como: consumo mínimo de ligante ou cimento, relação água/ligante máxima, resistência mínima à compressão, quantidade máxima ou mínima de ar aprisionado, e outras.

Especificações prescritivas geralmente são obscuras em questões como condições de exposição para a estrutura. Elas decorrem de uma experiência anterior em que a complexidade do material era menor e a durabilidade não era a questão crítica que é agora. Sua principal desvantagem é que elas especificam parâmetros que são geralmente inverificáveis na prática, e, portanto, não podem ser verificados objetivamente. Normalmente, nas obras, só a resistência à compressão é medida para garantir a conformidade com os requisitos de projeto. Mesmo nesse caso, os corpos de prova são produzidos e ensaiados sob condições de exposição de pouca semelhança com aquelas que a estrutura real está submetida.

Tomando a resistência à compressão como um referencial para a durabilidade, ignora-se o fato de que a resistência e a durabilidade não estão, necessariamente, diretamente relacionadas. Por exemplo, o ensaio de resistência à compressão não é capaz de explicar a natureza físico-química de diferentes ligantes e sua resistência aos efeitos agressivos do ambiente. Além disso, a resistência é regulada pelo volume de vazios interno do concreto do núcleo, nem sempre a principal variável de durabilidade, uma vez que o importante é o concreto da superfície correspondente à espessura de cobertura. Este concreto é criticamente afetado por manuseamento, lançamento, adensamento e cura. Uma medida confiável da qualidade da zona de cobertura só pode ser obtida avaliando-se o concreto após o endurecimento na estrutura, e não nas amostras de resistência.

A eventual conexão entre a durabilidade e a resistência à compressão é dada na Fig. 5, que mostra correlações entre um parâmetro de durabilidade OPI, índice de permeabilidade ao oxigênio (escala log) medidos nas estruturas existentes, e a resistência à compressão medida em cubos no laboratório, moldados e curados nas condições padrão. Como se mostra, está claro que não há correlação! Isso ilustra que as medições nas estruturas existentes são a única maneira confiável de avaliar e verificar a durabilidade do concreto.

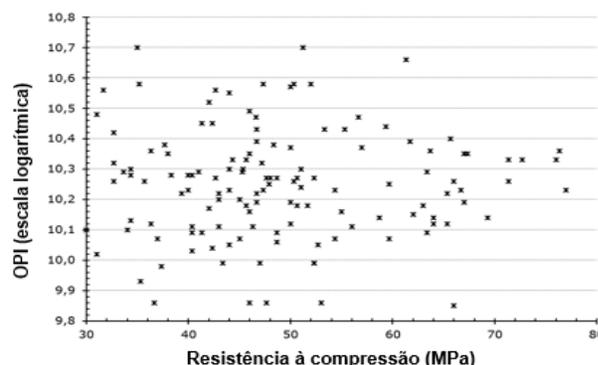


Figura 5. Falta de correlação entre a resistência à compressão padrão e a permeabilidade ao oxigênio medidas nas estruturas reais (Nganga et al, 2013)

Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação

Day (2005) sugere que as especificações prescritivas oferecem pouca vantagem ao produtor de concreto, porque limitam a extensão em que os desenvolvimentos mais recentes em tecnologia de materiais e técnicas de dosagem de mistura podem ser aplicados. Simplificando, as especificações prescritivas sufocam a inovação na fabricação e no uso do concreto.

Não obstante o exposto, alguns elementos de especificações prescritivas ainda são úteis, para orientação em processos como adensamento e cura. Na prática, e no futuro previsível, uma abordagem híbrida para as especificações, com maior ênfase em critérios de desempenho, é adequada quando o proprietário e projetista decidem juntos sobre o nível de desempenho desejado no ambiente de serviço e proponham ensaios comprobatórios (veja adiante), que são usados para respaldar as especificações. O fornecedor e o contratado fornecem então um sistema de concreto (pré-qualificado, utilizando ensaios realizados antes da construção real) que satisfaça os parâmetros ou limites definidos pelo proprietário / projetista. O “sistema concreto” não apenas descreve os requisitos, mas também abrange os procedimentos de concretagem adotados.

2.2.2 Especificações baseadas em desempenho

A discussão acima indica deficiências nas especificações prescritivas e aumenta a importância de que os principais parâmetros relacionados à durabilidade sejam medidos nas construções existentes, ou seja, já prontas. Assim, as especificações baseadas em desempenho estão ganhando terreno, o que ajuda a avaliar e garantir o nível necessário de qualidade do concreto para durabilidade de longo prazo no ambiente de serviço fornecido.

Lobo et al. (2005) descrevem as especificações de desempenho como “um conjunto de instruções claras, mensuráveis e exequíveis que descrevem os requisitos funcionais específicos da aplicação para o concreto endurecido”. As especificações baseadas em desempenho também mudam os responsáveis que, em geral, são apenas o projetista e o construtor. Em uma especificação prescritiva, o principal risco é colocado sobre o proprietário e projetista, enquanto especificações por desempenho coloca a responsabilidade ao proprietário, ao projetista, ao produtor de concreto, e ao construtor (Taylor, 2004).

A principal desvantagem das especificações baseadas em desempenho é a falta de concordância, consistência ou padronização em ensaios para medir as propriedades do concreto de cobrimento. Por exemplo, a EN 206-1 (2013), que trata da especificação, desempenho, produção e conformidade para a construção de concreto, “evita” a abordagem baseada no desempenho com base na falta de acordo sobre os métodos de ensaio. Como argumentado anteriormente, a resistência à compressão não é um indicador adequado de durabilidade. Em vez disso, são necessários ensaios e parâmetros que reflitam os fatores de deterioração, como os constituintes do material, a qualidade do concreto acabado e a agressividade do ambiente. Portanto, as especificações de durabilidade devem basear-se na medição das propriedades de transporte do concreto da espessura de cobrimento. Esses enfoques abrem caminho para a elaboração de especificações de desempenho inovadoras.

Resumindo: a chave para melhorar a durabilidade do concreto armado é exigir que as estruturas construídas atendam a certos critérios críticos de desempenho em termos de prováveis modos de deterioração, notadamente a corrosão da armadura. O objetivo é garantir que a estrutura, durante sua vida útil, não se aproxime do “estado limite” além do qual a capacidade funcional da estrutura ficaria comprometida. O objetivo das especificações baseadas em desempenho é garantir que uma probabilidade aceitável de desempenho seja alcançada. A mudança de especificações prescritivas para especificações de desempenho é um dos passos importantes e necessários para lidar com as deficiências que são frequentemente aparentes na atual construção de concreto armado.

2.2.3 Indicadores de durabilidade ou índices de durabilidade

O conceito de “indicadores ou índices de durabilidade” (DIs) originado a partir de trabalho realizados na década de 2000 (Andrade e Izquierdo, 2005; Alexander et al, 2001 e Baroghel-Bouny,

2004), todos propondo o uso de indicadores ou índices para controle de durabilidade. Esses DIs pretendem descrever e, portanto, controlar uma série de problemas de deterioração e incluem parâmetros físicos, químicos e eletroquímicos. Geralmente descrito com base em propriedade de transporte ou mecanismo de deterioração e pode ser utilizado para caracterizar o concreto em termos da sua durabilidade “potencial” (Alexander et al, 2017).

Refere-se ao potencial para o concreto para ser durável no ambiente considerado, desde que seja devidamente proporcionado com os constituintes correto e em seguida uma cura bem feita. Para obter estruturas de concreto duráveis usando este conceito, vários parâmetros são necessários para servir como 'índices' de durabilidade do material ou estrutura. Ao medi-los em curto prazo, eles podem ser usados como indicadores do provável desempenho de durabilidade da estrutura no longo prazo. Devem ser parâmetros fundamentais do material relacionados aos mecanismos de transporte e aos processos de deterioração. Estes parâmetros devem ser mensuráveis em ensaios simples, rápidos e precisos no sentido de que eles corretamente possam representar o problema durabilidade efetivo. A efetividade dos indicadores ou índices deve ser avaliada por ensaios *in loco* ao longo da vida útil da estrutura (Alexander & Ballim, 1993).

2.3 Prevendo e Modelando a Vida Útil de Projeto

A modelagem de vida útil para estruturas de concreto armado envolve cálculos quantitativos ou estimativas para prever o tempo de danos inaceitáveis (por exemplo, fissuras, corrosão, perda de seção, etc.) para um determinado ambiente. Os modelos de vida útil são geralmente de natureza semi-empírica, baseados em dados de laboratório e de campo, que são necessários para a calibração. Alternativamente, SLMs podem ser construídos a partir de conceitos básicos, usando modelos de transporte iônicos e princípios de fluxo em meios porosos (Van der Lee et al., 2008). Esses modelos representam os aspectos de 'interação-transporte' do fluido ou do fluxo iônico no concreto, com abordagens baseadas em princípios termodinâmicos e geoquímicos (Guillon et al, 2013). No entanto, esses modelos não são necessariamente mais precisos ou confiáveis em suas previsões, e a complexidade adicional nem sempre justifica os resultados obtidos. Em qualquer caso, estes modelos também devem ser calibrados com dados laboratoriais e de campo, e aqui reside o problema: em quase todos os casos, os concretos de um traço são únicos e precisam ser testados em ambientes apropriados para coletar dados que podem ser usadas para calibrar ou construir o modelo. Os SLMs também são úteis na 'retro-análise' de estruturas existentes quando a penetração de contaminantes, como os cloretos, é conhecida por concreto e ambiente específicos em um determinado momento; então é possível usar o modelo para determinar o tempo de corrosão necessário para danificar. Para uma abordagem probabilística completa, a variabilidade também precisa ser considerada (Muigai, et al, 2009).

2.3.1 O modelo de vida útil conceitual de dois estágios

O bem aceito "modelo" conceitual para a vida útil é o modelo de dois estágios proposto por Tuutti (Tuutti, 1992) para o caso da corrosão de armaduras. A deterioração é concebida em duas fases distintas, a fase de iniciação e a fase de propagação - ver a Fig. 6. Durante o período de iniciação, há a penetração dos agentes agressivos. A duração deste período depende da qualidade do concreto, da espessura do revestimento, das condições de exposição e do limiar ou concentração crítica necessária para iniciar a corrosão.

Uma vez despassivado o aço, considera-se que houve o começo da segunda fase de propagação da corrosão. A Fig. 6 mostra a propagação e esse período pode ainda ser subdividido em diferentes estados limite, como manchas, fissuração devido a produtos de corrosão, delaminação por expansão e possível colapso final da estrutura.

2.3.2 Modelos práticos de vida útil

Vários modelos de vida útil existem em diferentes partes do mundo, em grande parte em resposta às condições ambientais nas várias localidades onde os SLMs foram desenvolvidos. A maioria dos modelos cobre a penetração de cloretos e dióxido de carbono no concreto, como o modelo europeu "DuraCrete" (DuraCrete, 1998) e o norte-americano "LIFE-365" (2005). Na África do Sul, os modelos de carbonatação e ingresso de cloreto também foram desenvolvidos (Mackechnie & Alexander, 2002).

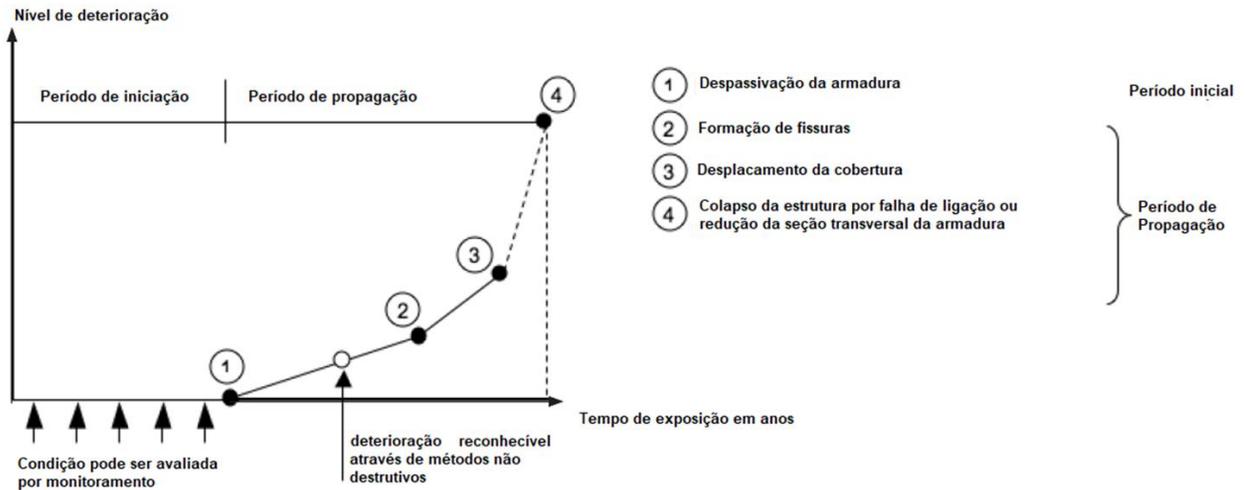


Figura 6. Modelo Tuutti de dois estágios

A Tabela 1 fornece um resumo de alguns dos modelos de vida útil mais proeminentes disponíveis no momento. A modelagem de cloretos é comumente representada. (Mais detalhes sobre SLMs são fornecidos na seção sobre esforços internacionais).

Tabela 1. Resumo de alguns modelos de vida útil para concreto armado

Modelo	Características	Referência
Life-365 [®]	Modelo de difusão de cloretos, baseado na lei de Fick. Semi-probabilístico. Fornece análise de custo do ciclo de vida.	Software gratuito. www.Life365.org
Stadium [®]	Modelo multi-iônico, baseado na equação de Nernst-Planck. Fornece taxa de entrada de cloreto e iniciação à corrosão. Também fornece perfis de carbonatação e sulfato. Probabilística completa.	Proprietário do software: www.simcotechologies.com
<i>fib</i> Bulletin 34	Baseado na segunda lei de Fick. Aborda principalmente entrada de cloreto e carbonatação. Usado em <i>fib</i> Model Code 2010. Full probabilístico.	Bulletin para livre acesso: ISBN: 978-2-88394-074-1
Concrete Works	Baseado na lei de Fick. Prevê concentração, entrada de cloreto, quebra térmica	www.texasconcreteworks.com (Folliard et al, 2008)
Clin Conc	Modelo de difusão de cloreto.	(Tang, 2008)

2.4 Esforços internacionais no desenvolvimento de SLMs e especificações baseadas em desempenho

Esta seção descreve os desenvolvimentos em SLMs e especificações baseadas em desempenho em várias partes do mundo. A maioria dos modelos está preocupada com a previsão do início da corrosão do aço no concreto e, portanto, com a reação do dióxido de carbono ou cloretos, e a discussão será limitada a esses mecanismos de deterioração. As observações gerais são dadas primeiro, seguidas de detalhes importantes para cada país ou região.

Os modelos de previsão de cloreto europeus, escandinavos e sul-africanos são abordagens baseadas no desempenho, ou seja, eles são baseados na medição atual das propriedades do material da mistura ou estrutura de concreto sob consideração. O início da corrosão é previsto usando a segunda lei de difusão de Fick, que permite modelar os perfis de cloreto usando um coeficiente de difusão relevante, as condições de exposição e a concentração superficial do cloreto. Os coeficientes de difusão baseados em vários materiais e proporções de mistura são experimentalmente determinados ou obtidos a partir da experiência.

Diferentes métodos de ensaio são usados em diferentes partes do mundo para estimar os coeficientes de difusão de cloreto. Os modelos europeus e escandinavos usam a ASTM C 1202 (NTBUILD 492, 1999), enquanto que o ensaio do índice de condutividade de cloreto (CCI) (Streicher e Alexander, 1995) é utilizado na África do Sul. Para os modelos de carbonatação, a resistência à carbonatação do concreto é geralmente encontrada em ensaios de carbonatação acelerada, normalmente usando espécimes curados em laboratório.

Por outro lado, o modelo norte-americano "LIFE-365" é baseado em simulações computacionais e não envolve ensaios. A vida útil e os custos do ciclo de vida de estruturas de concreto armado são estimados a partir de parâmetros de entrada, como proporções de mistura e materiais, medidas preventivas (inibidores de corrosão, revestimentos, aço inoxidável ou revestido com epóxi) e condições ambientais. Diversos países ao redor do mundo adotaram, em diferentes graus, o uso de especificações baseadas em desempenho para a construção em concreto, e são discutidos abaixo.

2.4.1 Canadá e Austrália

Bickley et al. (2006) fazem uma breve revisão do uso de especificações de desempenho na Austrália e no Canadá. Um fator comum nesses países é o refinamento das definições de classes de exposição, permitindo uma descrição clara do tipo de desempenho desejado em uma situação específica. A especificação de concreto australiana (AS, 2007) fornece uma classificação especial que pode ser solicitada usando critérios de desempenho ou prescritivos. De acordo com Day (2005), as especificações australianas proporcionam uma boa plataforma para produtores de concreto competentes. Um componente essencial desse arranjo é a presença de um sistema de qualidade que monitora o concreto e permite o controle de desvios. No entanto, o principal impulso dessas especificações ainda é o controle da resistência do concreto.

As normas canadenses de concreto (CAN / CSA, 2004) dão a opção de especificar critérios de desempenho ou prescritivos. As classes de exposição foram extensivamente definidas, e limites são sugeridos para constituintes ou propriedades que levarão à produção de concretos duráveis para a condição de exposição específica. Esses limites podem ser interpretados em especificações prescritivas ou de desempenho. No primeiro caso, o cumprimento dos limites seria necessário, enquanto no segundo, os limites serviriam como uma diretriz valiosa para o fornecedor.

Bickley et al. (2006) indicam que as normas canadenses usam requisitos de desempenho, tais como a carga total passante (em Coulomb) para categorias especiais de exposição a cloretos, além das prescrições normativas rotineiras. Vários métodos de ensaio padronizados estão disponíveis para usar em especificações de desempenho, ou seja, a resistividade elétrica (ASTM C1202, 2010), índice de vazios (ASTM C457, 2010), sorvidade (ASTM C1585, 2004), e difusão de íons cloreto (ASTM C1556, 2004). Esses ensaios podem ser realizados em amostras moldadas durante a

concretagem ou a partir de ensaios em testemunhos. No entanto, nem todos esses ensaios são úteis para fins de controle de qualidade de rotina.

2.4.2 EUA

Como mencionado, o modelo norte-americano de vida útil "LIFE-365" para cloreto é baseado em simulações de computador e não envolve ensaios diretamente. No entanto, Thomas et al., (2012) mostraram que o modelo previu com sucesso a penetração de cloretos em diferentes concretos em um local de exposição marinha em Maine, EUA (Thomas et al, 2012, Alexander e Thomas, 2015). Para outros tipos de deterioração, Simons (2004) descreveu a experiência com especificações de desempenho no Novo México, onde também há um alto risco de reação álcali agregado no concreto. A partir de uma especificação contra risco de AAR, congelamento e descongelamento e danos salinos relacionados, foram desenvolvidas especificações mais recentes que abordavam questões de variabilidade dos agregados, diferenças nos equipamentos e procedimentos operacionais e minimização de fissuras. Isso levou a controles sobre a quantidade de cimento, bem como o ganho controlado de resistência do concreto. Nas especificações mais recentes, referências ao consumo mínimo de cimento, teor máximo de água e proporção areia-agregado foram removidas, enquanto ensaios apropriados para medir o potencial de AAR, permeabilidade e ação do gelo-degelo foram delineados. As especificações mais antigas não podiam "garantir" a proteção contra os problemas de durabilidade, pois não havia ensaios diretos.

2.4.3 Escandinávia

Na Escandinávia, o modelo "ClinConc" de ingresso de cloreto foi desenvolvido (Nilsson et al, 1996, Tang, 2008). Ele modela o transporte de cloreto na estrutura de poros do concreto, a partir do teor de cloretos livres e do teor de cloretos totais. É, portanto, um tipo de modelo de 'transporte-interação'.

Na Noruega, Gjörv, pioneiro na abordagem do projeto baseado em probabilidade usando o DURACRETE para diretrizes de durabilidade, mas expressado em um modelo baseado em probabilidade chamado Duracon (Gjörv, 2014). Usando a segunda lei de Fick modificada e uma simulação de Monte Carlo, obtém-se a probabilidade de corrosão durante um certo "período de serviço" para a estrutura no ambiente dado, com os seguintes parâmetros de entrada:

1. Carga ambiental: carga ou concentração de cloreto, idade de atuação de cloreto e temperatura
2. Qualidade do concreto: difusividade do cloreto, dependência do tempo da difusividade do cloreto e teor crítico de cloreto
3. Cobrimento de concreto nominal

Um determinado "período de serviço" é especificado antes que a probabilidade de início da corrosão do aço exceda um nível de serviço superior a 10%, o que está de acordo com os padrões atuais de confiabilidade das estruturas. Com base nos cálculos, uma combinação da qualidade do concreto e do cobrimento de concreto pode ser selecionada, que reunirá o especificado "período de serviço." No caso de plataformas offshore de concreto do Mar do Norte, os requisitos de desempenho com base em difusividade de cloreto (medido no ASTM C 1202) e resistividade do concreto, bem como a espessura do cobrimento foram especificados. Gjörv sugere que a resistividade pode ser usada para avaliar a difusividade do cloreto do concreto estrutural, bem como para o controle de qualidade *in loco*.

2.4.4 Espanha

Na Espanha, Andrade et al (1993) propuseram o uso da resistividade elétrica para caracterizar os processos de transporte de massa universalmente no concreto, ou seja, para a difusão de cloreto e permeabilidade de gás. A resistividade fornece uma medida rápida, fácil e barata da penetração do concreto, também adequada para uso no local para controle de qualidade de novas estruturas. Uma

limitação do ensaio é que não pode considerar a influência da capacidade de ligação nos mecanismos de transporte. A resistividade tem a vantagem de possibilitar a avaliação das estruturas existentes por meio de mapeamento sistemático, descrito na Recomendação RILEM TC 154-EMC (Andrade et al, 2004). Além das medidas de resistividade, Andrade propôs o uso de medidas de potencial de meia-célula e determinação do local da taxa de corrosão usando Resistência de Polarização (Andrade et al, (2004).

Modelos de vida útil (SLM) para o período de iniciação e propagação da corrosão, com base na resistividade elétrica, foram desenvolvidos e são relatados em Andrade (2004) e Andrade e d'Andrea (2010). Os parâmetros de entrada no modelo são o tipo de cimento, classe de exposição a partir da qual o valor do CO₂ é obtido, vida útil, por ex. 100 anos, cobertura e fator de envelhecimento. A partir desses parâmetros de entrada, a resistividade é obtida como um indicador de corrosão (ou indicador de durabilidade) que pode ser usado para avaliar o desempenho de uma estrutura.

2.4.5 Suíça

A norma Suíça SN 505 262/1: 2013 incorpora vários DIs, prescrevendo valores limites para o cumprimento pelos produtores de concreto. Entre eles estão o ensaio de migração de cloreto ASTM C1202 e um ensaio de carbonatação acelerada. Uma DI é prescrita para conformidade, para o acompanhamento do produto final, usando o ensaio *in situ* de permeabilidade ao ar desenvolvido por Torrent (1992), com valores limite para cloretos e corrosão induzida por carbonatação.

As regras para a aplicação do ensaio de permeabilidade ao ar de Torrent para controle de qualidade e durabilidade são fornecidas na norma suíça SN 505 262/1 (2013), resumida por Torrent et al (2012). Limitando os valores de coeficiente de permeabilidade, kT, são fornecidos com base nas condições de exposição na EN 206-1. O concreto *in situ* deve ser ensaiado entre 28 e 91 dias após o seu lançamento. Para cimentos de reação lenta, com cinzas volantes, deve ser considerada uma idade mínima de ensaio de 63 dias. Precauções devem ser tomadas para evitar ensaios de concreto em temperaturas muito baixas ou com altos níveis de saturação. O teor de umidade é verificado usando um instrumento baseado em impedância elétrica, com um limite superior de umidade de 5,5% (em massa). Mais detalhes sobre avaliação de conformidade e ensaios de aceitação são dados na norma Suíça ou em (Jacobs et al., 2009), (Torrent e Jacobs, 2014).

2.4.6 África do Sul

A indústria de concreto da África do Sul tem experimentado especificações de desempenho e projeto de durabilidade há dois anos (Alexander et al, 2001). Uma abordagem de "índice de durabilidade" foi desenvolvida para melhorar a qualidade da construção de concreto armado, ou seja, visa controlar a corrosão do vergalhão. Baseia-se na medição das propriedades de transporte da camada de cobertura, tanto para o laboratório como para o concreto *in situ*. Os principais estágios na formulação dessa abordagem foram o desenvolvimento de métodos de ensaio adequados para medir os índices de durabilidade, caracterizando uma série de concretos usando esses ensaios, estudando o desempenho *in situ* e aplicando os resultados à construção prática. A abordagem progrediu até o ponto em que o projeto de durabilidade racional e as especificações de durabilidade baseadas em desempenho existem e estão sendo aplicados na construção real.

A abordagem do Índice de Durabilidade (DI) baseia-se nos seguintes princípios:

- A durabilidade do concreto armado depende da qualidade do concreto do cobertura ou camada superficial, ou seja, sua capacidade de proteger o aço.
- A durabilidade só pode ser garantida se um parâmetro de durabilidade puder ser medido.
- A qualidade da camada de cobertura deve ser caracterizada usando parâmetros que influenciam os processos de deterioração e que estão ligados a mecanismos de transporte relevantes.

- Os ensaios são necessários para cobrir o intervalo de problemas de durabilidade, cada ensaio deve ser vinculado a um mecanismo de transporte relevante para esse processo.
- A utilidade dos ensaios é avaliada por referência ao desempenho de durabilidade atual das estruturas construídas usando os índices para fins de controle de qualidade.

Três ensaios de DI foram desenvolvidos: índice de permeabilidade ao oxigênio, índice de condutividade do cloreto e ensaios do índice de sorvidade (absorção capilar) da água (ver Tabela 2). DIs são parâmetros quantificáveis de 'engenharia' que caracterizam o concreto na estrutura construída (ou do laboratório) e são sensíveis a fatores materiais, de processamento e ambientais, como tipo de cimento, relação água/aglomerante, tipo e grau de cura, etc. A indexação de materiais fornece medidas de engenharia reproduzíveis da microestrutura e das principais propriedades do concreto em uma idade relativamente precoce (por exemplo, 28 dias).

O ensaio dos valores DI é feito em amostras que são removidas de qualquer laboratório ou de painéis de ensaio ou estruturas reais. Ensaios de demonstração de locais rigorosos mostraram que a extração de testemunhos não é adequada, sendo os painéis de ensaio mais representativos da construção *in situ* (Ronny e Everitt, 2010). Normalmente, painéis de ensaio (400 mm de largura, 600 mm de altura e 150 mm de espessura) são construídos adjacentes à mesma estrutura de concreto, tipo de obturador, métodos de compactação e cura usados no painel e ao mesmo tempo na estrutura real. Os testemunhos são extraídos em 28 - 35 dias e levados para um laboratório para ensaios de durabilidade. Para elementos pré-moldados, as amostras para ensaio são obtidas diretamente dos elementos atuais.

A abordagem também permitiu correlações entre os índices de durabilidade, os resultados dos ensaios diretos de durabilidade e o desempenho estrutural, e os índices podem, portanto, ser usados da seguinte maneira:

- Para controlar uma determinada propriedade ou qualidade da zona de cobrimento, refletida por uma especificação de construção na qual os limites para valores de índice são especificados
- Para avaliar a qualidade de construção para conformidade com um conjunto de critérios de desempenho
- Para pagamento justo para a obtenção de qualidade concreta.
- Para prever o desempenho do concreto no ambiente de projeto, sendo vinculado aos Modelos de Vida útil. Dois SLMs que incorporam os índices de durabilidade relevantes foram desenvolvidos para condições de serviço - um modelo de entrada de carbonatação e um modelo de ingresso de cloreto (Mackechnie e Alexander, 2002).

É importante ressaltar que o trabalho da África do Sul representa uma abordagem "integrada" na qual os índices de durabilidade medidos que fornecem a qualidade real do material em pré-ensaios, situações de laboratório ou na estrutura *as-built* estão vinculados às especificações de construção para fins de controle de qualidade e modelos de previsão de vida útil usados no projeto. Tal abordagem permite integração completa e consistência entre projeto, especificação e qualidade de construção. (A implementação da abordagem sul-africana é posteriormente explorada).

2.5 Resumo: abordagens baseadas no desempenho

A Tabela 2 resume modelos de previsão de vida útil de projeto em países selecionados para especificações baseadas em desempenho.

A Tabela 2 indica que houve de fato progresso em direção a métodos baseados em desempenho em várias partes do mundo. Os problemas ainda existem, e é duvidoso que uma abordagem universal possa surgir facilmente em breve. No entanto, é provavelmente mais apropriado que sejam encontradas soluções locais ou regionais que possam ajudar a levar adiante a construção de concreto nessas localidades.

No entanto, há uma ressalva importante: as especificações de desempenho devem exigir que a avaliação da qualidade do concreto, em relação à durabilidade, seja considerada verdadeiramente "baseada no desempenho". A pré-qualificação e o ensaio de misturas de laboratório não são

suficientes, o que significa que muitas das abordagens ditas de 'desempenho' são apenas parciais nesta fase. (Mais informações e sobre a implementação de abordagens baseadas em desempenho em partes do mundo podem ser encontradas no Capítulo 6 de Alexander et al, 2017).

Tabela 2. Resumo das abordagens baseadas em desempenho de durabilidade em vários países (com base em indicadores ou índices de durabilidade) (Detalhes em Alexander (2016b))

País	Parâmetro de Durabilidade (Indicador ou Índice)	Modelo de vida útil de projeto	Método de ensaio de durabilidade
Canadá	Penetração de íon cloreto	Nenhum identificado	ASTM C 1202 Ensaio de penetração de cloreto
França	Coefficiente de difusão de cloreto - permeabilidade ao gás aparente - permeabilidade à água líquida - Conteúdo inicial de Ca (OH) ₂ - Porosidade acessível por água	LCPC Modelos empíricos	Difusão de cloretos - ensaios de migração e difusão Permeabilidade ao ar e à água
Holanda	Penetração de íon cloreto	DuraCrete Projeto de durabilidade baseado em probabilidade	NT Build 492, ensaio rápido de migração de cloreto Dois Métodos de Eletrodo (TEM)
Noruega	Difusividade de Cloreto	DuraCon Baseado em probabilidade Projeto de durabilidade	NT Build 492, ensaio rápido de migração de cloretos Dois Método de Eletrodo (TEM)
Espanha	Resistividade elétrica	- Baseado em resistividade modelo - LIFEPROD	Dois pontos ou Wenner quatro pontos ensaio de resistividade
Suíça	Migração de Cloreto Carbonatação Acelerada Permeabilidade ao ar no local	Nenhum identificado	Limites Máximos: SN 505 262/1-B (NT Build 492) Limites Máximos: SN 505 262/1-I Limites Máximos: SN 505 262/1-E (Torrent kT)
África do Sul	Permeabilidade ao oxigênio Sorção de água Condutividade do cloreto Laboratório ou site	Cloreto e Modelos de iniciação de corrosão induzida por carbonatação	Índice de permeabilidade de oxigênio OPI Índice de condutividade de cloreto CCI Índice de absorção capilar da água WSI

3. CAMINHOS A SEGUIR E PASSOS PRÁTICOS

“Modelando Vida Útil e Projeto da Vida Útil” estão intimamente relacionados: i) ambos envolvem avaliação do desempenho em durabilidade de uma estrutura durante a sua vida útil projetada, ii)

projeto racional para durabilidade precisa de modelos de deterioração preditivos que fornecem a química e cinética do problema e iii) modelagem preditiva fornece a base para o projeto. No entanto, em última análise, os engenheiros de projeto trabalham com normas técnicas. Assim, os modelos preditivos precisam ser vinculados a normas, seja implicitamente sendo incorporados a eles ou explicitamente sendo aceitos como modelos adequados para o projeto que se vinculam aos requisitos da norma de projeto. Praticamente, o 'progresso real' só ocorrerá com a formulação e ratificação de normas e padrões de projeto. Esta seção revisa os aspectos da normalização atual para o projeto de durabilidade e fornece um exemplo da prática sul-africana da implementação de uma especificação de desempenho de durabilidade.

3.1 Ações para a normalização do projeto de vida útil

O *fib* Model Code for Service Life Design (2006) classifica abordagens para o projeto de vida útil como: probabilístico completo, método dos fatores parciais, método prescritivo ou considerada-para-satisfazer, e método para evitar a deterioração. Qualquer uma dessas abordagens pode ser usada, embora uma abordagem probabilística completa seja desejável para grandes projetos de infraestrutura pública ou estruturas de prestígio.

Atualmente, as abordagens para projeto de durabilidade racional são limitadas e de implementação variável. Por exemplo, as abordagens Europeias no DURACRETE (1998) e Life-365 (2005), embora úteis, são de localização específica e não representam totalmente uma abordagem integrada, que requer parâmetros de durabilidade mensuráveis do local, que são usados em uma especificação de desempenho e acoplado a modelos de vida útil. O projeto de durabilidade também precisa de uma especificação para implementação durante a construção, para garantir que as premissas de projeto para qualidade e composição do concreto sejam alcançadas. Uma vez que as abordagens mencionadas não são normalizadas, as autoridades de projeto e especificação encontram justificativa limitada para usá-las, especialmente se não tiverem os conhecimentos necessários.

3.1.1 Enfoque de vida útil de projeto e estados limites

Walraven sugere que a aplicação prática de uma abordagem baseada no desempenho para a avaliação de vida útil e normatização requer os seguintes elementos (Walraven, 2008): (i) limitar critérios estaduais, (ii) uma vida útil definida, (iii) modelos de deterioração, (iv) ensaios de conformidade, (v) estratégias de manutenção e reparo, e (vi) sistemas de controle de qualidade. Critérios de estado limite para durabilidade do concreto devem ser quantificados, com significado físico claro, como porcentagem de fissuras, e similares. Os modelos de deterioração são geralmente matemáticos e devem incluir parâmetros vinculados aos critérios de desempenho.

Como indicado, a importância das normas torna essencial que qualquer abordagem útil seja normalizada. As normas estruturais, que incluem previsões de durabilidade, costumam ser lentas para serem atualizadas, de modo que novos conhecimentos de pesquisa e prática demorem a entrar nas normas. Como um exemplo de projeto de durabilidade baseado em desempenho, a ISO 13823 (2008) descreve uma metodologia de estado limite, resumida na Fig. 7, que está relacionada a diferentes abordagens de projeto de vida útil.

A Fig. 7 também é refletida no *fib* Model Code (2010), com várias abordagens para o projeto da vida útil. Em princípio, as abordagens de projeto no Model Code evitam a deterioração causada pela ação ambiental, similar às abordagens atuais de projeto; eles são, portanto, "inteligíveis" para engenheiros de projeto estrutural. Baseado em modelos quantificáveis para as ações ambientais e a resistência (ou seja, a resistência contra a ação ambiental), as opções de projeto com o *fib* são sob uma abordagem probabilística completa; abordagem semi-probabilística (fatores parciais); regras prescritivas consideradas satisfatórias; ou evitar o ataque que acarreta deterioração.

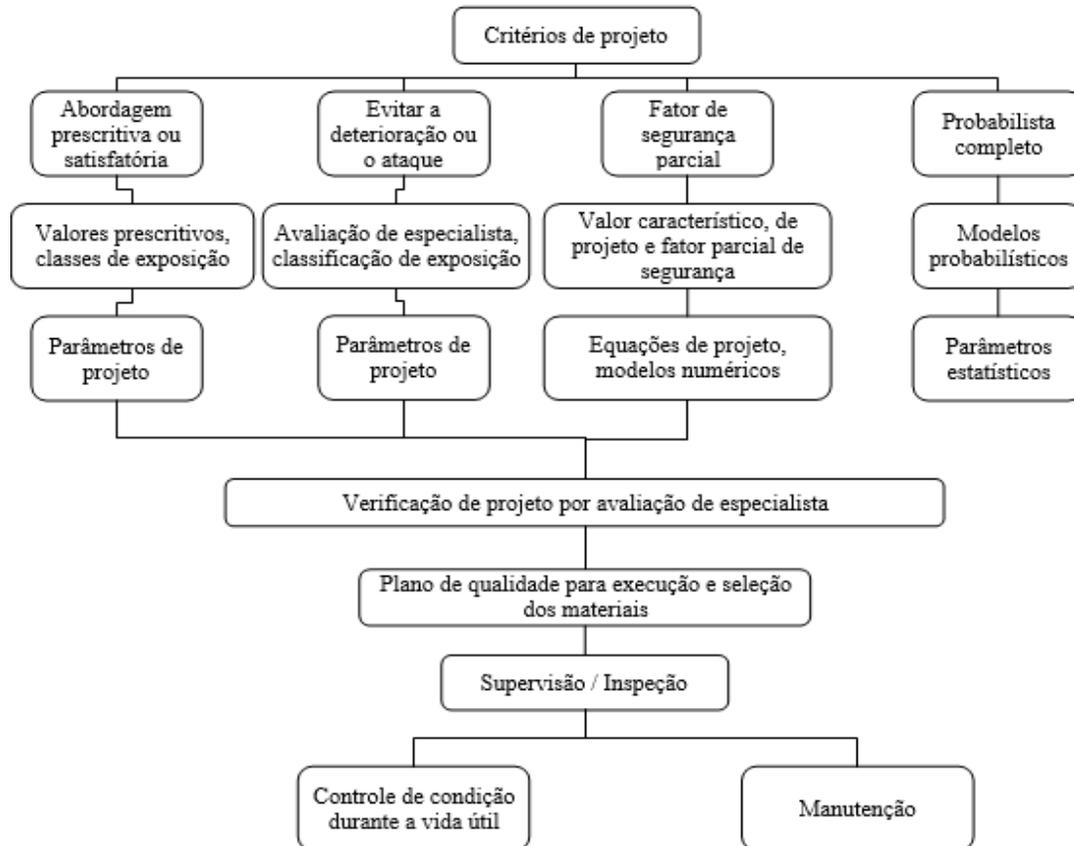


Figura 7. Resumo das abordagens de projeto de vida útil (ISO 13823, 2008)

A abordagem probabilística completa deve ser usada apenas para estruturas excepcionais e é baseada em modelos probabilísticos que são suficientemente validados para fornecer resultados realistas e representativos de mecanismos de deterioração e resistência do material. A base é formada por métodos de ensaio apropriados e modelos de avaliação estatística, os quais ainda não são significativos. As duas primeiras opções de incluir a avaliação quantitativa do desempenho de uma estrutura utilizando a teoria de estado limite, documentada na norma ISO 2394 (2015), com três estados limite: estado limite último (ULS), estado limite de serviço (SLS), e estado limite de durabilidade (DSL). O ULS aborda a segurança e a estabilidade da estrutura (ver, por exemplo, EN 1990-1: 2002). O SLS considera deformações e vibrações na estrutura. O DLS marca o início da falha de durabilidade, por exemplo, a iniciação da corrosão em uma estrutura RC (ISO 13823: 2008). Cada um dos três estados é caracterizado por um limite de desigualdade. Equação 1:

$$R - S > 0 \quad (1)$$

A tarefa do projetista é realizar a verificação do desempenho de uma estrutura para garantir que as variáveis de projeto escolhidas sejam tais que o estado limite especificado não é alcançado dentro da vida útil projetada. A verificação do desempenho depende da abordagem probabilística utilizada, por exemplo, o fator probabilístico total ou parcial de segurança (semi-probabilístico). Discutindo ainda a abordagem do fator de segurança parcial, a natureza probabilística do problema (dispersão da resistência do material e dados de carregamentos) é considerada através de fatores de segurança parciais. Baseia-se nos mesmos modelos da abordagem probabilística completa e pretende apresentar uma ferramenta de projeto prática e estatisticamente confiável.

A abordagem considerada-a-satisfazer (prescritiva) é comparável às especificações de durabilidade dadas na maioria dos códigos e normas atuais, ou seja, especificações prescritivas com base em uma seleção de determinados valores de projeto (dimensionamento, seleção de materiais e

produtos, procedimentos de execução) dependendo das classes ambientais. A diferença entre a abordagem considerada-para-satisfazer do *fib* Model Code e as regras tradicionais de projeto de vida útil é que o último comumente não é baseado em modelos físicos e químicos para concreto, mas em grande parte na experiência prática anterior.

No entanto, uma estimativa de vida útil específica não é necessária na abordagem da 'Considerada-para-Satisfazer', tornando-a uma abordagem prescritiva. Por exemplo, a norma europeia EN 206-1:2013 adota uma abordagem Considerada-para-Satisfazer e prescreve consumo mínimo de cimento, máxima relação a/c, e classe mínima de resistência à compressão para componentes de concreto em várias classes de risco ambiental.

O quarto nível de projeto da vida útil (ou seja, evitar a deterioração) exige a utilização de materiais resistentes à deterioração, tal como o aço inoxidável ou revestimentos de proteção superficial do concreto, tais como, epóxi, membranas, poliuretano, etc. A manutenção pode ainda ser necessária com a renovação desses revestimentos de tempos em tempos.

Além disso, muitas estruturas ou partes de estruturas não estão expostas a graves mecanismos de deterioração ambientais ou operacionais, caso em que uma atenção simples de boas práticas construtivas já fará a diferença e se alcançará a vida útil desejada. Isto é exemplificado na categoria de exposição XO da EN 206-1:2013. Descrita como "Concreto dentro de edifícios com baixíssima umidade do ar", o que representa uma grande proporção de construção de concreto em ambientes suaves ou benignos, considerados de agressividade nula.

3.2 Exemplo de implementação: A abordagem do DI sul-africano na prática

A abordagem da modelagem do projeto de vida útil da África do Sul foi revisada anteriormente, e esta seção esboça brevemente um exemplo de implementação (Alexander, 2016b). A abordagem progrediu ao ponto em que tanto o projeto de durabilidade racional quanto as especificações de durabilidade baseadas em desempenho estão em vigor e sendo aplicadas na construção atual (Nganga et al, 2013, Alexander et al, 2001, Gouws et al, 2001, Raath, 2004). A abordagem permite que a variabilidade do material e da produção seja quantificada e que seja buscado um equilíbrio de forma que as metas sejam alcançadas tanto pelo produtor de concreto quanto pelo construtor de concreto, com base em princípios estatísticos (Alexander et al, 2008).

3.2.1 Implementação baseada no desempenho do Índice de Durabilidade DI nos principais projetos de pontes

Uma implementação significativa e em grande escala usando a abordagem baseada no desempenho do DI foi realizada em um grande projeto de infraestrutura - o Projeto de Melhoria da Freeway de Gauteng (GFIP) - que melhorou o sistema de autoestradas na província de Gauteng entre 2007 e 2012 para aliviar o congestionamento. O trabalho envolveu o alargamento da autoestrada através da adição de faixas de tráfego e a construção de intercâmbios com pontes associadas a um custo de cerca de US \$ 2 bilhões. Devido ao ambiente interno, a abordagem de DI exigiu que apenas os ensaios de OPI e de sorvidade (absorção capilar) fossem realizados no concreto *in situ*. Os valores limites adotados foram um mínimo de 9.70 para OPI e uma máxima de 10 mm / sorhr. As profundidades de cobrimento de concreto à armadura também foram monitoradas (ver Tabela 3). Os valores limites aplicados estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores limites utilizados no GFIP (SANRAL, 2010)

	Índice de Permeabilidade de Oxigênio (OPI)		Cobrimento de concreto	
	OPI (escala logarítmica)	Porcentagem pagamento	Cobrimento geral (mm)	Porcentagem pagamento
Aceitação total	> 9.70	100%	≥ 85% <(100%+15mm)	100%

Aceitação condicional^a	> 8.75 ≤ 9.70	80%	< 85% ≥ 75%	85%
Aceitação condicional^b	-	-	< 75%	70%
Rejeição	< 8.75	Não aplicável	< 65%	Não aplicável

Verificou-se que, embora os valores-limite tenham sido obtidos em média, os conjuntos individuais de resultados (de diferentes subprojetos) mostraram alta variabilidade, ilustrada na Tabela 4. A dispersão da variabilidade obtida em subprojetos selecionados é clara, e a diferenças entre a construção de 'qualidade' (aqui representada pela variabilidade) são removidas completamente. Somente o subprojeto 9 (um pátio de construção pré-moldado) alcançou uma variabilidade baixa aceitável, com todos os resultados atendendo às especificações do projeto. Os resultados *in-situ* dos outros subprojetos são uma boa ilustração da variabilidade que pode ser introduzida nas estruturas *as-built* pelos processos de construção *in loco*, uma vez que são basicamente os concretos da mesma fonte.

4. CONCLUSÃO

É claro que, para a modelagem do projeto de vida útil de estruturas de concreto, um progresso considerável foi alcançado em décadas, embora ainda haja muito progresso por alcançar. A necessidade de abordagens baseadas no desempenho, sem as quais o projeto de vida útil não pode ser implementado, é agora razoavelmente bem reconhecida, mas nem sempre pode ser praticada.

Tabela 4. Resumo numérico dos resultados de ensaio OPI – GFIP (Nganga et al, 2013)

Subprojeto	n	OPI (escala log)				Coeficiente de variação (%)	Porcentagem de falhas* (%)
		Médio	Máx.	Mín.	s		
1	172	9.75	10.41	9.07	0.28	2.84	40.1
2	94	9.91	10.42	9.37	0.22	2.24	13.8
4	116	9.87	10.40	9.39	0.23	2.33	18.1
6	91	10.06	11.10	8.83	0.46	4.60	26.4
9	132	10.25	10.70	9.85	0.18	1.75	0

*Valores que não atingiram o valor limite de 9,70

Abordagens surgiram em diferentes partes do mundo em grande parte em resposta às necessidades percebidas de melhor durabilidade das estruturas de concreto. No entanto, ainda falta uma abordagem verdadeiramente universal, embora os documentos do *fib* Model Code e outros tenham delineado a filosofia básica e as abordagens necessárias. Grandes progressos podem ser esperados nesta importante área de projeto e construção de concreto nos próximos anos.

5. REFERÊNCIAS

Alexander, M. G. & Ballim, Y. (1993), “*Experiences with durability testing of concrete: a suggested framework incorporating index parameters and results from accelerated durability tests*”. Proc. 3rd Canadian Symp. on Cement and Concrete, Ottawa, August 1993, Nat. Res. Council, Ottawa, Canada, 1993: 248-263.

- Alexander, M. G., Mackechnie, J. R., Ballim, Y. (2001), *"Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures"*, Chapter, Materials Science of Concrete, V. VI, Ed. J. P. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, pp 483 – 511.
- Alexander, M. G., Ballim, Y., Stanish, K. (2008), *"A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures"*, Materials & Structures, V. 41, No. 5, pp. 921-936.
- Alexander, M. G., Santhanam, M. (2013), *"Achieving durability in reinforced concrete structures: durability indices, durability design and performance-based specifications"*. Keynote paper at International Conferences on Advances in Building Sciences & Rehabilitation and Restoration of Structures, IIT Madras, Chennai, India, 21pp.
- Alexander, M. G. & Thomas, M. (2015), *"Service Life Prediction and Performance Testing – Current Developments and Practical Applications"*. Cement & Concrete Research, Vol 78, pp. 155-164.
- Alexander, M. G. Ed. (2016a), *"Marine concrete structures. Design, durability and performance"*. Ed. M.G. Alexander, Cambridge: Woodhead Publishers (Imprint of Elsevier). 400 pp.
- Alexander, M. G. (2016b), *"Performance-based concrete durability design and specification in South Africa – background, implementation, and quo nunc?"* Proceedings fib Symposium, Cape Town, Lausanne, fib, pp. 52-62.
- Alexander, M. G., Bentur, A., Mindess, S. (2017), *"Durability of Concrete: Design and Construction"*. CRC Press, Taylor & Francis Group, U.K.
- Andrade, C., Alonso, C., Goni, S. (1993), *"Possibilities for electrical resistivity to universally characterize mass transport processes in concrete"*. In Concrete 2000 Economic and durable construction through excellence Volume Two: Infrastructure, research, new applications. Dhir, R. K. and Jones, M. R. ed. Scotland, UK: E & FN SPON, pp. 1639–1652.
- Andrade, C. (2004), *"Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity"*. In International Symposium: Advances in Concrete through Science and Engineering. Evanston, Northwestern University, USA, (2004) p. 8.
- Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland Ø, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B. (2004), *"RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method"*, Materials & Structures V. 37, No. 273, pp. 623-643.
- Andrade, C., Izquierdo, D. (2005), *"Benchmarking through an algorithm of repair methods of reinforcement corrosion: the Repair Index Method"*, Cement & Concrete Composites, V. 27, No. 6, pp.727-733.
- Andrade, C., d' Andrea, R. (2010), *"Electrical resistivity as microstructural parameter for modelling of service life of reinforced concrete structures"*, In 2nd International symposium on service life design for infrastructure. pp. 379–388.
- Australian Standard (AS) (2007), AS 1379: *"Specification and Supply of Concrete"*. Sydney: Standards Australia.
- ASTM International. (2010). *ASTM C457/C457M-10a Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0457_C0457M-10A
- ASTM International. (2010). *ASTM C1202-10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-10>
- ASTM International. (2004). *ASTM C1556-04 Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1556-04>

- ASTM International. (2004). *ASTM C1585-04e1 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1585-04E01>
- Bickley, J. A., Hooton, D. and Hover, K. C. (2006), “Performance specifications for durable concrete”. *Concrete International*, 28(9): 51-57.
- Canadian Standards Association (2004), *CAN/CSA-A23.1-04/A23.2-04: Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test and Standard Practices for Concrete*, Toronto, 516 pp.
- Day, K. W. (2005), “Prescriptive on prescriptions”, *Concrete International*, V. 7, pp.27–30.
- DuraCrete (1998), “Probabilistic performance-based durability design: modelling of degradation”, Document, D. P. No. BE95-1347/R4-5, The Netherlands.
- EN 1990-1 (2002), Eurocode: “Basis of structural design”, CEN, Brussels, 2002.
- EN 206-1 (2013), “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity”, CEN, Brussels, 2013.
- fib Model Code for Service Life Design (2006) *fib Bulletin 34, fib*, EPFL Lausanne, 116 pp.
- fib Model Code (2010, 2013), International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.
- Gjørsv, O. E. (2014), “Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments”, 2nd edition, Taylor & Francis, CRC Press, London.
- Gouws, S. M., Alexander, M. G., Maritz, G. (2001), “Use of durability index tests for the assessment and control of concrete quality on site”, *Concrete Beton*, 98 pp. 5-16.
- Guillon, E., Le Bescop, P., Lothenbach, B., Samson, E. and Snyder, K. (2013), “Modelling degradation of cementitious materials in aggressive aqueous environments”, Part II in Star 211-PAE, Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments, pp. 1- 39. Springer.
- ISO 13823-1 (2008), “General Principles on the design of structures for durability”, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 2394 (2015), “General Principles on Reliability for Structures”, International Organization for Standardization, Geneva, 111pp.
- Jacobs, F., Leemann, A., Denarié, E., Teruzzi, T. (2009), SIA 262/1. “Recommendation for the quality control of concrete with air permeability measurements”, VSS report, Zurich. 22 pp.
- LIFE-365 (2005). ACI-Committee-365, “Service life prediction model, Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides”. American Concrete Institute.
- Linger, L., Cussigh, F. (2018), “PERFDUB: A New French Research Project on Performance-Based Approach for Justifying Concrete Structures Durability”. In High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet.1. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2>
- Lobo, C., Lemay, L. and Obla. K. (2005), “Performance-based specifications for concrete”. *The Indian Concrete Journal*, 79(12): 13-17.
- Mackechnie, J. R, Alexander, M. (2002), “Durability predictions using early-age durability index testing”. Proceedings, 9th Durability and Building Materials Conference, Australian Corrosion Association, Brisbane, (2002) 11pp.
- Muigai, R. N., Alexander, M. G., Moyo, P. (2009), “Use of chloride conductivity index in probabilistic modelling for durability design of RC members”. *Restoration of Building Monuments Journal*, V. 15, No. 4, pp. 267-276.
- National Ready-mix Concrete Association, (NRMCA), n.d. www.nrmca.org/P2P
- Neville, A. M. (1987), “Why we have concrete durability problems”, ACI SP-100, Katherine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, American Concrete Institute, Detroit, USA, pp. 21-48.

- Nganga, G., Alexander, M. G., Beushausen, H. (2013), “*Practical implementation of the durability index performance-based design approach*”. Construction & Building Materials, Published online: 6-MAY-2013. Construction and Building Materials. V. 45, pp. 251-261.
- Nilsson, L. O., Poulsen, E., Sandberg, P., Sørensen, H.E., Klinghoffer, O. (1996), “*Chloride penetration into concrete*”, State of the Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models, Copenhagen: Danish Road Directorate, pp.23-25.
- NTBUILD 492, (1999), “*Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments*”. Esbo, Finland: Nordtest.
- Raath, B. (2004), “*Practical Issues of Concrete Specification*”. Concrete Society of Southern Africa, National Seminar: Specifying Concrete for Durability - State of the Art of South African Practice, Presented at Johannesburg Durban, Port Elizabeth and Cape Town, South Africa.
- RILEM TC 189-NEC (2005), “*Non-destructive evaluation of the concrete cover: Comparative test - Part I: Comparative test of ‘penetrability’ methods*”. Materials and Structures (284), 2005.
- Ronny, R., Everitt, P. (2010), “*Durability specification and testing results from four bridge structures in Kwa Zulu-Natal*”, In Concrete for a sustainable environment, Emperor's Palace, Kempton Park, Gauteng, South Africa.
- The South African National Roads Agency Limited (SANRAL) (2010), “*Project document: Project specifications*”.
- Simons, B. (2004), “*Concrete performance specifications: New Mexico Experience*”. Concrete International, 26(4): 68-71.
- Streicher, P., Alexander, M. G. (1995), “*A chloride conduction test for concrete.*” Cement and Concrete Research, V. 25, No. 6, pp 1284-1294.
- Swiss Standard SN 505 262/1 (2013), “*Concrete Construction – Complementary Specifications*”, Schweizer Norm, 52 p. (in German and French)
- Tang, L. (2008), “*Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete*”, Cement and Concrete Research, 38(8–9), 1092–1097.
- Taylor, P. (2004), “*Performance-Based Specifications for Concrete*”, Concrete International, 8: 91 – 93.
- Thomas, M. D. A., Green, B., O’Neal, E., Perry, V., Hayman, S. Hossack, A. (2012), “*Marine Performance of UHPC at Treat Island*”, Proceedings of Hipermat, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (Editors Michael Schmidt et al), Kassel, pp. 365-370.
- Torrent, R. J. (1992), “*A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*, Materials & Structures, V. 25, No. 6, pp.358-365.
- Torrent, R., Denarié, E., Jacobs, F., Leemann, A., Teruzzi, T. (2012), “*Specification and site control of the permeability of the concrete cover: The Swiss approach*”, Materials and Corrosion, V. 63, No. 12, pp.1127-1133.
- Torrent, R., Jacobs, F. (2014), “*Swiss Standards 2013: World's most Advanced Durability Performance Specifications*”, 3rd Russian Intern. Confer. on Concrete and Ferrocement, Moscow.
- Tuutti, K. (1992), “*Corrosion of steel in concrete*”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI Research Report, No. 4 p 82.
- Van der Lee, J., De Windt, L., Lagneau, V. (2008), “*Application of reactive transport models in cement-based porous media*”. Proceedings in the International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD’08, Delft, The Netherlands.
- Walraven, J. (2008), “*Design for service life: how should it be implemented in future codes*”, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Proceedings ICCRRR Cape Town, (2008) pp. 3-10.