

OPTIMIZAÇÃO DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO



Rui Miguel Ferreira
Professor Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

A grande maioria das especificações para betão são de natureza prescritivas. É do conhecimento comum geral que estas especificações limitam a capacidade dos intervenientes no processo construtivo em tirar partido do conhecimento e da experiência adquirida, bem como a de aproveitar materiais economicamente disponíveis.

Especificações prescritivas tradicionais tratam o betão de uma forma demasiado simplista, assumindo que um conjunto de especificações prescritivas resultarão na produção de um betão com o mesmo desempenho, quando na realidade o betão, como a maioria dos materiais, varia consideravelmente. Duas amassaduras com proporções de constituintes idênticas poderão exibir propriedades muito diferentes. Por outro lado, as especificações baseadas no desempenho realçam as propriedades tais como a consistência, a resistência, a durabilidade, e a estética, premiando a qualidade, a inovação e o conhecimento tecnológico para além de promover um uso melhorado dos materiais.

De forma a obter uma durabilidade controlada e um desempenho de longa duração de estruturas de betão armado é necessário uma atenção especial na fase de projecto da estrutura. Desenvolvimentos recentes sobre procedimentos baseados na avaliação do desempenho têm criado as bases para o projecto de durabilidade de estruturas de betão armado. Apesar da falta de dados relevantes, esta abordagem tem sido aplicada com sucesso em várias estruturas de betão armado onde foram especificados requisitos para um maior controlo da durabilidade e da vida útil.

Neste artigo são abordados, genericamente, os princípios relacionados com a execução de um projecto de durabilidade. As vantagens da abordagem baseada no desempenho das estruturas

de betão são demonstradas através de exemplos com a aplicação de um modelo para a degradação do betão devido à corrosão das armaduras na presença de cloretos.

Palavras-chave: durabilidade, desempenho, modelação, vida útil, corrosão, cloretos.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, as normas apenas contêm exigências específicas quanto ao projecto de estruturas tendo em conta a capacidade de carga dos seus elementos. A durabilidade é muitas vezes colocada em segundo plano e por isso as exigências para a durabilidade são tipicamente implícitas nas normas de estabilidade estrutural.

A durabilidade das estruturas de betão é geralmente baseada em requisitos prescritivos. Exemplo disso são as exigências de recobrimento mínimo, máxima razão água/cimento, quantidade mínima de cimento e tipo de cimento. Ao aplicar estes requisitos, o projectista assume que uma determinada estrutura atinge uma vida de serviço longa mas não especificada, isto é, não quantificada. Esta situação é, em muitos casos, inaceitável.

A exigência de um formato de projecto que incorpore a durabilidade e vida de serviço da estrutura nasceu do crescente interesse expresso pelos donos-de-obra em colocar exigências para a vida útil de serviço da estrutura. Actualmente, começa-se a compreender que a durabilidade é parte essencial na qualidade e desempenho das estruturas e que a qualidade e custo total inclui não só o custo de construção mas também o de manutenção e reparação.

O controlo da durabilidade de estruturas de betão armado será um dos principais desafios para o engenheiro do futuro. O passado ensinou-nos que o procedimento tradicional de projecto, construção e uso de estruturas de betão armado não tem resultado no desempenho de longa duração esperado. Os processos de deterioração, em particular a corrosão das armaduras, as reacções álcali-agregado, e os ataques de sulfatos têm causado imensos danos a estruturas.

A aplicação de metodologias probabilísticas ao projecto de durabilidade e avaliação de estruturas tem contribuído com maior realismo na avaliação das estruturas. Apesar de haver uma falta de informação base para este tipo de aplicação, esta abordagem já foi aplicada com sucesso a diversas estruturas de betão em que os requisitos de durabilidade e de desempenho forma especificados [1, 2].

Uma vez que os parâmetros de durabilidade do betão e de exposição ambiental demonstram tipicamente variação, a abordagem probabilística fornece as bases essenciais para análise de durabilidade [3-6].

De forma a melhorar esta situação um novo conceito de projecto de durabilidade precisa de ser implementado [7]. De forma análoga ao procedimento de projecto estrutural, o projecto de durabilidade deve ser baseado no desempenho tendo em conta a natureza probabilística da agressividade ambiental, dos processos de degradação e das propriedades dos materiais envolvidos.

De forma a obter uma durabilidade controlada e um desempenho de longa duração de estruturas de betão armado é necessário uma atenção especial na fase de projecto da estrutura. Desenvolvimentos recentes sobre procedimentos baseados na avaliação do desempenho têm criado as bases para o projecto de durabilidade de estruturas de betão armado [3]. Apesar da falta de dados relevantes, esta abordagem tem sido aplicada com sucesso em várias estruturas de betão armado onde foram especificados requisitos para um maior controlo da durabilidade e da vida útil [8,9].

No presente artigo, um modelo genérico é descrito e aplicado de forma a demonstrar a importância e sensibilidade dos diversos parâmetros de durabilidade que afectam e controlam a durabilidade de estruturas de betão. O estado limite de despassivação da armadura e início de corrosão é utilizado. O cálculo da probabilidade de rotura é efectuado em função do tempo. Para estruturas novas, fornece informação apropriada à definição geral dos critérios de durabilidade da estrutura [10]. Para estruturas existentes, quando os cloretos ainda não atingiram o aço, o procedimento pode ser utilizado para estimar a probabilidade de corrosão para a vida útil restante [11].

2. PROJECTAR A DURABILIDADE

2.1 Abordagem tradicional (requisitos prescritivos) e de desempenho

As normas e as especificações são a referência para comparação da qualidade e manutenção das construções. A conformidade com normas pode ser baseada quer em requisitos prescritivos quer em requisitos de desempenho.

As normas de betão são de uma forma geral do tipo prescritivo, com requisitos para diversos parâmetros que controlam a qualidade do betão para condições de exposição pré-definidas. Ao aplicar requisitos prescritivos no projecto de estruturas de betão armado, não há indicação da vida útil espectável e não existem indicações de como variar os valores prescritos de forma a verificar uma vida útil pré-determinada [12]. Cabe ao projectista estimar qual a vida útil esperada ao aplicar os requisitos das normas. Esta situação é inaceitável pois não concretiza as necessidades quer do projectista quer do dono da obra.

Contudo, as normas prescritivas são fáceis de aplicar porque baseiam-se em abordagens simplificadas que se aplicam geralmente, a muitas situações, mas não a todas. Possuem também limitações, como a tendência em tornar projectos demasiado conservadores, ou, em alguns casos, o inverso sendo potencialmente perigosos [13]. Exemplos destas exigências são o recobrimento mínimo, a máxima razão água/cimento, a quantidade mínima de cimento, o teor de ar e o tipo de cimento. Os projectos baseados em normas prescritivas são afectadas pela escolha dos materiais e, se o produtor/construtor compreende claramente a sua aplicação.

A abordagem de desempenho permite ao engenheiro otimizar o projecto, e alcançar um benefício potencial em termos de custo, sem sacrificar a segurança geral da estrutura [14]. Esta abordagem concentra-se no objectivo a alcançar em vez do meio como o obter. É especificado o desempenho desejado e não o método de ensaio nem o material a utilizar para o alcançar.

Podem existir graus, ou níveis, de desempenho. O desempenho não tem que ser absoluto, contudo, nunca deve comprometer outros atributos da estrutura. A abordagem de desempenho tem a vantagem de retirar barreiras à inovação e permitir a optimização dos materiais, e por conseguinte, do custo da estrutura. A abordagem de desempenho requer uma compreensão clara da escolha de materiais o que nem sempre é obtida. Esta abordagem requer que hajam ensaios de referência ou meios aceitáveis para calcular o desempenho, ou uma combinação dos dois [15].

Ao comparar ambas as abordagens, verifica-se que a prescritiva descreve uma solução aceitável enquanto que a de desempenho descreve a solução necessária. A abordagem de desempenho requer ensaios e verificação do material específico em obra, enquanto que normas prescritivas assumem que a verificação tenha sido efectuada, o que nem sempre garante a qualidade necessária em obra [14].

A transição de normas prescritivas para normas de desempenho nem sempre é fácil; requer ponderação e experiência para desenvolver ensaios de desempenho que avaliam os materiais em condições aplicáveis na vida real.

No contexto nacional de normas e especificações para o betão, verifica-se que os *Eurocódigos* [16,17], a *NP EN 206-1* [18] e a especificação do *LNEC E 464* [19] são do tipo prescritivo. Contudo, a *NP EN 206-1*, através do anexo J, prevê a possibilidade de estudo da composição baseado em metodologia de desempenho. A especificação do *LNEC E 465* [20] é o primeiro passo no sentido de desenvolver metodologias de avaliação de durabilidade baseadas no desempenho do betão.

3. PROJECTO DE DURABILIDADE

O projecto de durabilidade serve para garantir o cumprimento da vida útil da estrutura e melhorar o controlo da durabilidade. É uma parte integrante do projecto geral de uma estrutura. Tem como objectivo garantir um nível de segurança aceitável contra a degradação. Tal como para o projecto estrutural, o procedimento para elaborar o projecto de durabilidade deve basear-se no desempenho da estrutura. O projecto de durabilidade permite ao projectista ajustar ou adaptar a estrutura de forma a enfrentar a agressividade ambiental e relacioná-lo com a vida útil de projecto e com os custos totais da estrutura [21].

O dono da obra deverá definir os requisitos presentes e futuros a que a construção deve obedecer, criando um guia para o projecto que inclua também a vida útil desejada e o nível necessário de manutenção e monitorização da estrutura, dentro dos limites orçamentais expectáveis. O projectista deverá definir as especificações e condições do projecto (incluindo os esquemas de controlo de qualidade propostos), identificando as condições ambientais e quantificando a qualidade do betão e o recobrimento necessário para resistir às solicitações, bem como o tipo de monitorização da estrutura, se estipulado pelo dono da obra.

É a responsabilidade do dono da obra exigir qualidade e uma vida útil longa, verificar o desempenho da estrutura entregue e, mais importante ainda, estar disposto a pagar pela

qualidade [22]. Os passos recomendados para a definição de um projecto de durabilidade são apresentados na Figura 1 [6].

3.1 Abordagem ao projecto de durabilidade

Existem, genericamente, duas estratégias para abordar um projecto de durabilidade. A primeira estratégia consiste em evitar a degradação da estrutura isolando a agressividade do meio envolvente. A segunda estratégia consiste em seleccionar e aplicar composições de materiais e detalhes estruturais para resistir, durante um período de uso específico, à degradação da estrutura.

A primeira estratégia pode subdividir-se em três diferentes tipos de medidas [3]: 1) mudar o micro ambiente recorrendo, por exemplo, a membranas ou revestimentos; 2) seleccionar materiais não reactivos, como por exemplo, agregados, cimentos resistentes a sulfatos ou cimentos com baixa teor de alcalis; 3) inibir as reacções recorrendo a, por exemplo, protecção catódica, ou introduzindo ar. É de salientar que estas medidas não levam à protecção total das estruturas. A eficiência destas medidas depende de vários factores como, por exemplo no caso de revestimentos, da espessura e da permeabilidade destes.

Na segunda estratégia as estruturas podem tornar-se mais resistentes à agressividade do meio se adoptarmos procedimentos adequados que minimizem a superfície exposta, como por exemplo, um recobrimento apropriado ou uma composição de betão adequada podem impedir ou atrasar a corrosão das armaduras.

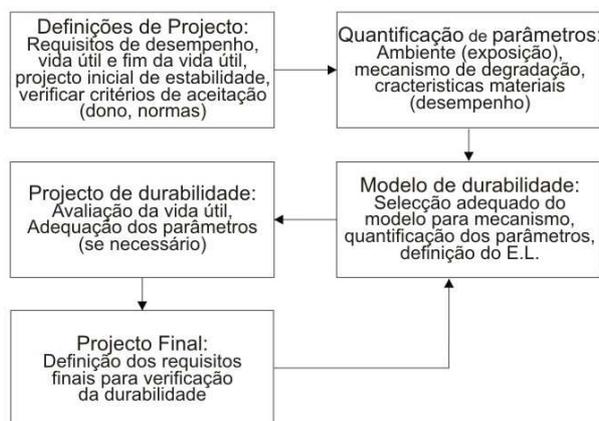


Figura 1: Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil de componente de construção [6].

A modelação dos mecanismos de degradação é, em princípio, aplicável a ambas as estratégias. No entanto, existe pouco conhecimento prático sobre a eficiência dos revestimentos e de diversas medidas protectoras. Como tal, é sugerida a segunda estratégia para a modelação dos mecanismos de deterioração num projecto de durabilidade. Consequentemente, o princípio base é resistir aos mecanismos de deterioração relevantes,

através de uma selecção de composição óptima de materiais e uma espessura de recobrimento adequada.

3.2 Quantificação de parâmetros

O projecto de durabilidade deve ser baseado em definições suficientemente realistas e precisas das acções ambientais, do tipo de degradação, dos parâmetros materiais para o betão e a armadura, e dos modelos realísticos para simulação do processo de degradação. O ponto de partida é a junção de toda a informação necessária para a implementação do modelo. Esta informação pode ser dividida em três grupos: o meio ambiente, a estrutura e o material (betão). A análise do meio ambiente é crucial pois é com base nesta informação que o carregamento ambiental é dimensionado. É necessário definir bem a localização da estrutura, identificar a direcção dos ventos predominante e quantificar a agressividade do meio (se necessário, recorrendo a estruturas vizinhas).

A análise do projecto de estabilidade fornece informação sobre a protecção da estrutura prevista. Deve-se juntar informação quanto à vida útil pretendida e o estado limite que o define, identificar os elementos estruturais de acordo com as classes de exposição, estudar as superfícies expostas e protegidas, identificar o recobrimento nominal de projecto e o tipo de aço a utilizar.

As propriedades materiais (betão) fornecem informação sobre a qualidade do betão a ser utilizado. A informação necessária é a classe de betão, a razão água/ligante, o tipo e quantidade de cimento, e se possível um indicador de durabilidade relevante.

3.3 Implementação da avaliação

Com a compilação da informação necessária, o projectista pode iniciar a análise da durabilidade, efectuando a modelação da degradação do betão recorrendo a modelos para os mecanismos de degradação, e, conseqüentemente, à avaliação do desempenho. Este procedimento é demonstrado no exemplo a seguir apresentado.

Com base nos resultados obtidos e tendo em conta o estado limite considerado, o desempenho é classificado como sendo aceitável ou não. No caso de ser inaceitável, é necessário intervir no projecto de forma a melhorar o desempenho. Pode-se intervir ao nível do material, do projecto estrutural e ao nível do ambiente, atenuando a sua agressividade.

O resultado da análise fornece algumas garantias que a vida útil será alcançada desde que haja o acompanhamento adequado que permite ainda avaliar a evolução do estado da estrutura ao longo do tempo. Inspeções e ensaios são, portanto, parte integral do projecto de durabilidade.

Esta abordagem não implica que seja dada menos atenção a factores relacionados com o projecto estrutural ou com processos construtivos como a cura, execução, detalhes

apropriados, etc. De facto, esta abordagem apenas pode ser usada se for implementada segurança e qualidade suficientes para assegurar que as consequências dos factores ligados ao projecto e aos processos de construção sejam minimizadas. Da mesma forma que o projecto estrutural, o projecto de durabilidade deve ser desenvolvido com base em análises probabilísticas que considerem o meio envolvente e o desempenho estrutural.

3.4 Definição do estado limite de durabilidade

A análise de durabilidade baseia-se na determinação da probabilidade de ocorrência de um dado acontecimento, por exemplo do acontecimento que marca o fim da vida útil da estrutura. Este acontecimento pode descrever-se como uma função estado limite $G(x,t)$ em que x representa o vector das variáveis básicas e t o tempo. Na sua forma mais simples, a função estado limite pode escrever-se como:

$$G(x,t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

em que

$R(t)$ – representa a função das variáveis de resistência, dependente do tempo;

$S(t)$ - representa a função das variável de carga, dependente do tempo

Esta função caracteriza-se por apresentar um valor positivo se a estrutura é considerada capaz de desempenhar adequadamente. A maior parte das abordagens de vida útil determinam um desempenho médio, que corresponde à vida útil alcançado com 50% probabilidade de incumprimento da função estado limite. Isto não é aceitável de um ponto de vista de segurança e economia.

A vida de útil de projecto depende do nível de segurança escolhido como objectivo a alcançar. Probabilidade de rotura são definidos pela EN 1990 [23] nos Anexos B e C. Para um estado limite de utilização e uma vida útil de 50 anos, o valor recomendado é aproximadamente igual a 7 %. Como o início de corrosão não possui consequência extremas imediatas, outros autores sugerem valores de 10% para este limite [7].

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM MODELO DE DEGRADAÇÃO

4.1 Descrição do modelo

Para este exemplo, pressupõem-se que o principal mecanismo de degradação é a corrosão das armaduras induzidas pela presença de cloretos no betão. O mecanismo que define este processo de degradação é apresentado na Figura 2 [24].

Durante a fase de iniciação, o betão não é danificado, contudo a frente de cloretos progride para o interior até alcançar a armadura. Quando atingir uma concentração crítica junto da armadura, inicia-se a corrosão desta. Este acontecimento marca o início da fase de propagação, em que, na presença de oxigénio e humidade suficiente, ocorre a corrosão da

armadura. Posteriormente, surgem fissuras seguido do destacamento do betão de recobrimento.

Quando a corrosão é provocada pela presença de cloretos, considera-se a vida útil equivalente ao período de iniciação. O período de propagação, que poderá ser de curta duração, tradicionalmente não é considerado devido à incerteza associado às consequências da corrosão localizada [25]. A modelação da penetração de cloretos e o tempo até a despassivação da armadura é normalmente baseado na segunda Lei de Fick. Contudo, uma vez que esta Lei não modela correctamente a difusão do ião através do betão, modificações são introduzidas de forma a ter em conta diversos fenómenos, tais como a variação do coeficiente de difusão com o tempo (devido à hidratação do cimento e à temperatura) e a concentração superficial de cloretos, entre outros. A natureza estocástica dos parâmetros de durabilidade (traduzido na média, desvio padrão e tipo de distribuição) requer que o modelo seja aplicado de uma forma probabilística. Salienta-se que todo o modelo tem as suas limitações, contudo, é a responsabilidade do projectista compreender essas limitações e avaliar os resultados obtidos à luz delas.

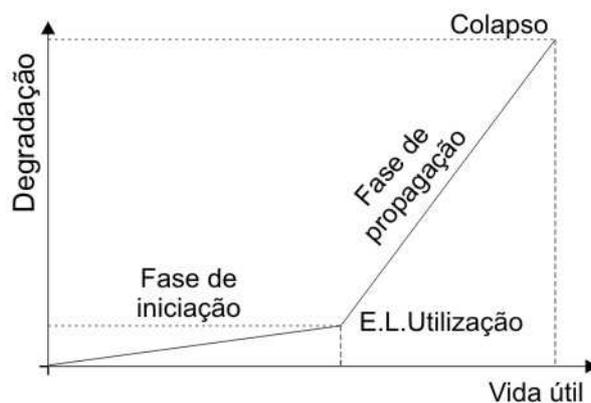


Figura 2: Esquema do mecanismo de degradação para a corrosão [24].

De forma a simplificar o exemplo, o modelo utilizado apenas contempla a dependência do coeficiente de difusão com o tempo [6]. O fluxo de cloretos a penetrar o betão como função da profundidade da superfície é dada pela segunda Lei de Fick:

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D_C \cdot \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} \quad (2)$$

em que $C(x,t)$ é a concentração do ião cloreto à distância x da superfície do betão após um período de exposição de t . D_C é o coeficiente de difusão. A solução desta equação diferencial para condições de fronteira predefinidas resulta na expressão

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (3)$$

onde C_s é a concentração do ião cloreto à superfície do betão (% por peso de cimento), C_0 é a concentração inicial do ião cloreto na mistura do betão (% por peso de cimento), e erf é a expressão matemática de função erro.

A dependência no tempo do coeficiente de difusão é conhecida desde que [26] apresentou uma equação para modelar este comportamento. Muita investigação tem sido efectuada neste tema [3, 27-31], e, verifica se que a variação do coeficiente de difusão com o tempo depende de vários factores, dos quais os mais importantes são a razão água/ligante, tipo e quantidade de cimento, e as condições de exposição. A dependência do coeficiente de difusão é modelada pela seguinte expressão [26]:

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

onde D_0 o coeficiente de difusão ($\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^{-12}$) no instante t_0 (dias), e o expoente α representa a dependência no tempo do coeficiente de difusão.

Substituindo a equação 4 na equação 3, a equação modelo para determinar a penetração do cloreto baseado num coeficiente de difusão dependente no tempo é dado por:

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(x / 2 \sqrt{D_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^\alpha \cdot t} \right) \right] \quad (5)$$

Para a corrosão provocada por cloretos, a resistência é definida pela capacidade do betão resistir à penetração onde a carga é influenciada pelo meio ambiente, nomeadamente a concentração de cloretos. Tendo em conta a forma genérica da função de estado limite definido na equação 1, esta pode ser concretizada das seguintes formas para este exemplo concreto:

$$G(x, t) = C_{CR} - C(x, t) > 0 \quad (6)$$

$$G(x, t) = X_C - X(t) \quad (7)$$

Salienta-se que a penetração de cloretos pode ser controlado por outros mecanismo como a absorção capilar ou a penetração em fissuras. Contudo, baseado no conhecimento actual, é assumido que a difusão é o mecanismo de transporte dominante no processo de penetração de cloretos em estruturas de betão em ambiente marítimos.

4.2 Quantificação dos parâmetros

Tendo definido o principal mecanismo de degradação e a forma como será modelado, o desempenho do betão da estrutura pode ser avaliado. A aplicação do modelo passa pela definição dos parâmetros para esta situação específica. De forma a demonstrar a aplicação do modelo para análise da durabilidade, i.e., vida útil da estrutura de betão armado, é necessário caracterizar o ambiente, a qualidade do betão e as características geométricas da estrutura [5, 6, 32].

Como input ao modelo (equação 5), os seguintes parâmetros foram quantificados:

- t – período de exposição ao meio com cloreto. Adoptado período de 50 anos;
- C_S – concentração superficial de cloretos. Baseado em valores obtido em provetes de ensaio expostos em Cascais, possuindo uma distribuição normal com uma média de 2.3 % por peso de cimento e um coeficiente de variação de 15 % [33];
- X_C – recobrimento da armadura. Considerado tendo uma distribuição normal com uma média de 50 mm e um desvio padrão de 10 mm;
- D_0 – coeficiente de difusão no instante t_0 . O valor sugerido baseou-se num betão com 300 kg/m³ de CEM I 42,5 e uma razão água/ligante de 0.45 [34, 35]. Admitiu-se uma distribuição normal com um valor médio de 10.5 e-12 m²/s e um desvio padrão de 0.7 e-12 m²/s;
- t_0 – idade a que o coeficiente de difusão, D_0 , foi determinado. Corresponde aos 28 dias.
- C_{CR} - concentração crítica de cloretos. Baseado em estudo publicados, possuindo uma distribuição normal com uma média de 0.48 e um coeficiente de variação de cerca de 10 % [36];
- α – Expoente traduz a variação no tempo do coeficiente de difusão. Baseado em estudos publicados, adoptou-se um valor com distribuição normal com média de 0.37 e um coeficiente de variação de cerca de 10 % [3];

O período até iniciação da corrosão é calculado em função das propriedades de transporte do ião cloro no betão (normalmente o coeficiente de difusão aparente que pode ser determinado em laboratório em ensaios acelerados [37] ou através do ajuste da segunda *Lei de Fick* aos perfis de cloretos recolhidos da estrutura), a dependência no tempo do coeficiente de difusão do betão, a concentração superficial de cloretos influenciado pelo meio ambiente (baseado em medições ou experiência), o recobrimento de betão (obtido a partir de normas ou com base em experiência anterior) e a concentração crítica de cloretos (depende entre outras coisas do tipo de cimento).

4.3 Exemplo de resultado

Com base nos valores acima apresentados, recorreu-se ao software DURACON [5] para o cálculo probabilístico do desempenho de durabilidade. Na Figura 3 apresenta-se a variação do desempenho de durabilidade do betão. Verifica-se que, caso a análise tenha sido efectuada apenas com valores médios, o resultado obtido terá indicado que demoraria 18 anos a iniciar a corrosão. Com a análise probabilística, e assumindo o valor aproximado de 7 % como limite para verificação do estado limite de utilização [23], o desempenho do betão é insuficiente sendo o limite excedido em apenas 4 anos.

Verifica-se que, para a situação descrita, o desempenho da solução proposta para a estrutura é inadequado. Recorrendo à mesma metodologia, o projectista pode procurar uma solução que satisfaça os requisitos exigidos, variando os parâmetros do modelo e de forma a controlar a durabilidade, analisando o efeito no desempenho. Como exemplo, de seguida analisa-se o efeito de variação do tipo de cimento e do recobrimento na durabilidade da estrutura.

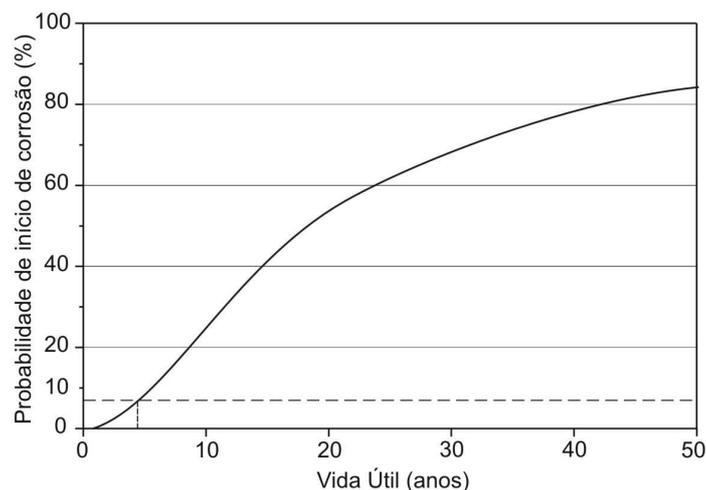


Figura 3: Curva de desempenho de durabilidade da estrutura.

5. ANÁLISE DE SOLUÇÕES

5.1 Influência do tipo de cimento

De forma a analisar o efeito do tipo de cimento no desempenho de durabilidade do betão, escolheu-se quatro tipos de cimentos (Tabela 1). Os cimentos são: um cimento Portland de elevado desempenho (CEM I 52.5), um cimento composto com cinzas volantes (CEM II/A-V 42,5) e um cimento de escória de alto forno com cerca de 70% de escória (CEM III/B 42.5). As composições tinham uma dosagem de cerca de 420 kg/m³ e uma razão água/ligante de 0.45. O quarto cimento era uma mistura do cimento Portland de elevado desempenho com cerca de 10 % de sílica de fumo [34].

O tipo de cimento influencia o desempenho do betão (permeabilidade, fixação de cloretos, ganho de resistência no tempo, etc.) conferindo-lhe características diferentes. No modelo em questão, é influenciado o coeficiente de difusão e a forma como varia no tempo, sendo os valores adoptados para os betões produzidos com estes cimentos apresentados na Tabela 1 [34,35].

Tabela 1: Parâmetros em função do tipo de cimento [35].

Tipo de cimento	D_0 ($m^2/s \cdot 10^{-12}$)	α
CEM I 52,5	*N(10.5; 0.66)	N(0.37;0.07)
CEM III/B 42,5	N(5.3; 0.59)	N(0.60;0.15)
CEM II/A-V 42,5	N(10.1; 0.81)	N(0.51;0.07)
CEM I + 10%CSF	N(4.7; 0.51)	N(0.39;0.07)

* N – distribuição normal (média, desvio padrão)

Na Figura 4 apresenta-se a variação do desempenho de durabilidade dos betões com diferentes tipos de cimento.

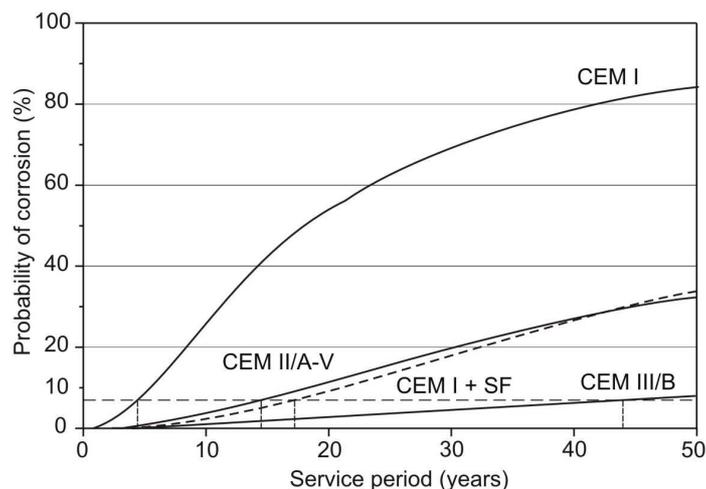


Figura 4: Efeito do tipo de cimento no desempenho de durabilidade da estrutura.

Pode-se observar a partir da Figura 4 que o tipo de cimento afecta significativamente o desempenho de durabilidade da estrutura. O gráfico da figura 4 fornece informação importante ao projectista quanto à variação do desempenho quando apenas o tipo de cimento é modificado. A figura demonstra claramente a diferença entre a resistência à penetração dos cloretos por parte do betão com cimento de escórias e o betão com cimento Portland. Para o cimento Portland, o limite de 7 % de probabilidade de rotura seria excedido em apenas 4 anos. Por outro lado, o betão com cimento de escórias apenas excede o limite após 44 anos, ou seja, quase que verifica a vida útil pretendida. Com desempenho intermédios e semelhantes encontram-se o betão com cinzas volantes e o betão com sílica de fumo, a probabilidade de início de corrosão excede o limite estabelecido após 15 a 17 anos. Como ambos estes betões

possuem desempenho semelhante, a escolha entre eles poderia ser baseada noutros critérios (estruturais, económicas, etc.).

5.2 Influência do recobrimento de betão

De forma a analisar o efeito do recobrimento no desempenho de durabilidade do betão, com base nas definições de referência, variou-se o recobrimento entre 45 mm e 75 mm. A partir da figura 5 verifica-se que o recobrimento também tem uma influência significativa do desempenho de durabilidade do betão. Enquanto que um recobrimento nominal de 45 mm apenas verifica o estado limite durante 3 anos, um recobrimento nominal de 75 mm o verifica durante 19 anos. Com esta análise, o projectista pode confirmar que o aumento de recobrimento até 75 mm não é suficiente para melhorar o desempenho de forma a verifica a vida útil pretendida. Outra estratégia terá que ser adoptada de forma a verificar a vida útil, como por exemplo combinar o aumento de recobrimento com outro tipo de cimento, ou aplicar uma protecção ao betão de forma a atrasar a penetração de cloretos no betão.

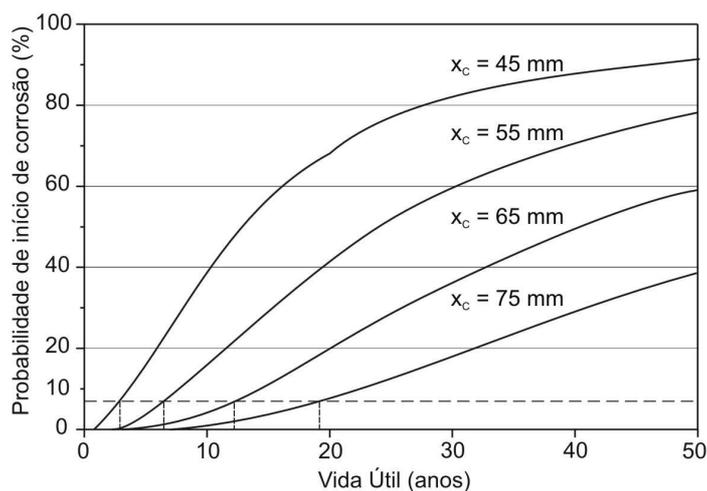


Figura 5: Efeito do recobrimento no desempenho de durabilidade da estrutura.

6. CONCLUSÕES

A importância de informação pertinente ao desempenho de durabilidade da estrutura durante a fase de projecto é vital para o processo de tomada de decisões. Este artigo demonstra como essa informação pode ser obtida.

No que diz respeito à abordagem de desempenho para a avaliação da durabilidade de estruturas de betão armado, é aplicado para que se possa obter maior controlo da durabilidade da estrutura e do desempenho ao longo da vida útil. A mesma metodologia poderá fornecer as bases para a avaliação do estado de estruturas existente.

Como parte da abordagem de desempenho na avaliação da durabilidade de estruturas de betão armado, diversos parâmetros foram estudados e a sua influência no desempenho de durabilidade da estrutura avaliada. Como consequência da análise, conclui-se que:

- o tipo de cimento influencia significativamente o desempenho de durabilidade da estrutura. Comparando o desempenho dos tipos de cimento estudado, e para o ambiente em questão, verifica-se que o cimento Portland normal possui o pior desempenho e o cimento de escórias o melhor. Com desempenho intermédio e semelhante encontram-se os cimentos de cinzas volantes e de sílica de fume.
- demonstrou-se que uma redução do coeficiente de difusão do betão de $10.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ reduz a probabilidade de início de corrosão de 85 % para 35 % após um período de 50 anos. Conclui-se que o coeficiente de difusão é um indicador de durabilidade muito sensível para estruturas em ambiente contendo cloretos.
- o recobrimento também tem uma grande influência do desempenho de durabilidade do betão. O aumento do recobrimento de 45 mm para 75 mm quadruplica o tempo necessário para exceder a probabilidade estabelecida como rotura do estado limite.

Uma abordagem mais realística ao projecto encontraria os parâmetros de projecto óptimos ao combinar o tipo de cimento, o recobrimento apropriado, a temperatura e outros parâmetros. Para estruturas nova, pode servir para estabelecer os critérios de durabilidade gerais que a estruturas deve obedecer.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Gehlen, C.; Schiessl, P., (1999) Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel. Structural Concrete, No. 2, pp. 1-7.
- [2] Edvardsen, C.K.; Kim, Y.I.; Kim, J.C.; (2005) Practical implementation of a reliability-based concrete durability design. Pro. Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting ICCRRR, Taylor & Francis, Cape Town, South Africa, 21-23 November, pp 109.
- [3] DuraCrete (2000). General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union - Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Document R 15, 109 p.
- [4] McGee, R., (1999) Modelling of Durability Performance of Tasmanian Bridges, Proceedings, The 8th Int. Conf on the Application of Statistics and Probability, Sydney, Australia.
- [5] DURACON (2004) Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures - Software Manual. University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal.
- [6] Ferreira, R.M.; (2004) Probabilistic-based durability analysis of concrete structures in marine environment, Doctoral Thesis, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. ISBN 972-8692-16-1, pp.321.
- [7] Fluge, F.; (2001). Marine chlorides. A probabilistic approach to derive provisions for EN206-1. 3rd Du-raNet Workshop, Trømso, Norway. 10-12-July.

- [8] McGee, R., "Modelling of Durability Performance of Tasmanian Bridges", Proceedings, The 8th Int. Conf on the Application of Statistics and Probability, Sydney, Australia, 1999.
- [9] Leira, B. J., Hynne, T., Lindgård, J., "Marine Concrete Structures Subjected to Chloride Attack: Probabilistic Lifetime Assessment", Pro. The ETCE/OMAE2000 Joint Conf.: Energy for the New Millennium. ASME, New Orleans, USA, 2000.
- [10] Gjrv, O. E., (2004) Durability Design and Construction Quality of Concrete Structures, 4th Int. Conf. on Concrete Structures under Severe Conditions: Environment and Loading", Seoul, Korea
- [11] Ferreira, R.M.; Jalali, S.; et al (2004b) Probability-based Durability Analysis of Concrete Harbour Structures. CONSEC 04, 4th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading, Seoul, Korea, June 27-July . pp 999-1006.
- [12] Helland, S.; Basis of design. Structural and service life design, a common approach. DuraNet, Troms, pp16-23, 2001.
- [13] Gjrv, O.E.: Controlled service life of concrete structures and environmental consciousness, Proceedings, International Workshop on Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, ed. by O.E. Gjrv and K. Sakai, E & FN Spon, London and New York, pp. 1-13, 2000
- [14] Bukowski, R.W.; Risk and Performance standards. NIST Building and Fire Research Laboratory, USA, 1996
- [15] Bickley, J., Hooton, R.D., Hover, K.C.; Preparation of a Performance-based Specification for Cast-in-Place Concrete. RMC Research Council, 2006, pp. 155
- [16] NP EN 1991-1-1, Eurocdigo 1: Aco em estruturas. Parte 1.1: ACÇÕES GERAIS – Pesos volmicos, pesos prprios, sobrecargas em edifcios. CEN, Brussels, 2005.
- [17] NP ENV 1992-1-1, Eurocdigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifcios. CEN, Brussels, 1998.
- [18] NP EN 206-1:2005 Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. CEN, Brussels, 2005.
- [19] LNEC E-464, Betões. Metodologia prescritiva para uma vida til de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa, 2005.
- [20] LNEC E-465, Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida til de projecto de estruturas de betão armado ou pr-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS, LNEC, Lisboa, 2005.
- [21] Rostam, S.; Service Life Design of Concrete Structures - The potentials of the DuraCrete Methodology. DuraNet – 3rd Workshop SLD of Concrete Structures. Troms 2001, 48-68.
- [22] Rostam, S.; Schiessl, P.; Service Life Design in Practice - Today and Tomorrow. Proceedings of the International Conference "Concrete Across Borders", Denmark 1994.
- [23] EN 1990, Eurocode: Basis of structural design-Stage 34. CEN, Brussels, 2002.
- [24] Tuutti, K.; Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. Report No. CBI Research FO 4:82. 1982.
- [25] Bertolini, L.; et al. Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, diagnosis, repair. Wiley-VCH, ISBN 3-527-30800-8. pp 392, 2004.
- [26] Takewaka, K.; Mastumoto, S.; (1988) Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in ME, ACI SP 109-17, ACI, pp. 381-400.
- [27] Maage, M.; et al.: Service life model for concrete structures exposed to marine environment - Initiation period. LIGHTCON Report No. 2.4, STF70A94082 SINTEF, Trondheim, Norway.

-
- [28] Mangat, P.S., Molloy, B.T.: Predicting of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 338-346, 2004.
- [29] Bamforth, P. B., The derivation of input for modeling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials, *Magazine of Concrete Research*, 51-nº2, pp.87-96, 1999.
- [30] Gjrv, O.E., (2002a) Durability and Service Life of Concrete Structures, Pro., The First fib Con-gress 2002, Session 8, V. 6, JPCE Association, Tokyo, pp. 1-16.
- [31] Gjrv, O.E.; et al. Betongflter for maritime formal. Rapport BML 200125. NTNU, 2004.
- [32] Ferreira, R.M.; Jalali, S. (2005) Software for probability-based durability analysis of concrete structures. Pro. Int. Conf. Conc. Repair, Rehabilitation and Retrofitting ICCRRR, Alexander (eds.), Taylor & Francis, Cape Town, South Africa, 21-23 November, pg 117.
- [33] Lindvall, A.; Environmental Actions and Response - Reinforced Concrete Structures exposed in Road and Marine Environments. Lic. Thesis, Chamlers, Goteborg, 2001.
- [34] Årskog, V., *et al.* (2004) Durability Design and Performance of Concrete Barges, Proceedings, 4th Int. Conf. on Concrete Under Severe Conditions, Environment and Loading“, Seoul National University, Korea Concrete Institute, Seoul, Vol. 2, pp.1604-1611.
- [35] Ferreira, R. M.; et al; (2004c) Blast-Furnace Slag Cements for Concrete Durability in Marine Environment. CONSEC 04, 4th Int. Conf. Conc. under Severe Conditions: Environment and Loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, pp 109-116.
- [36] HETEK 53, (1996) Chloride penetration into concrete. State of the Art. Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models, Report No. 53, HETEK, Denmark.
- [37] LNEC E-462, Beto. Determinao do coeficiente de difusão dos cloretos por migrao em regime no estacionrio, LNEC, Lisboa, 2004.