

Considerações sobre a avaliação do estado limite de utilização de durabilidade



**Rui Miguel
Ferreira¹**



**Joost
Gulikers²**

RESUMO

Até recentemente, o projecto de uma estrutura de betão armado não tinha em conta, directamente, a agressividade do meio ambiente, não abrangendo a análise da durabilidade da mesma. Em geral, esta era incorporada indirectamente, de forma prescritiva, e sem qualquer tipo de verificação. Esta abordagem não quantifica o desempenho de durabilidade do betão e já demonstrou, em algumas situações, não garantir a verificação da vida útil especificada. A inexistência de informação específica sobre a durabilidade do betão faz com que seja difícil avaliar a sua qualidade e desempenho. Para determinado ambiente, sem conhecimento prévio do desempenho de durabilidade do betão, as soluções de projecto não podem ser optimizadas.

Contudo, e em parte graças a projectos Europeus como o LIFECON e o DURACRETE, foi desenvolvida uma abordagem diferente, baseada na verificação de equações de estado limite que definem a aceitação ou rejeição de uma solução de projecto. Os estados limite podem ser avaliados deterministicamente, semi-probabilisticamente ou probabilisticamente. A abordagem probabilística permite a optimização do projecto, mas requer mais dados, nem sempre disponíveis.

Tendo em conta o acima descrito, pretende-se neste artigo analisar criticamente a avaliação do estado limite de durabilidade de início de corrosão recorrendo a uma abordagem probabilística. Tendo em consideração que para a avaliação correcta do projecto de durabilidade de estruturas de betão armado é necessária uma compreensão profunda dos princípios base de aplicação desta metodologia, pretende-se alertar para a dificuldade de definição e quantificação dos parâmetros envolvidos nos modelos aplicáveis, e contribuir para uma mais correcta interpretação dos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Durabilidade, análise probabilística, vida útil, fiabilidade, cloretos

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. rmf@civil.uminho.pt

² Centre for Public Works, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, NL-3502 LA, Utrecht, The Netherlands. joost.gulikers@rws.nl

1. INTRODUÇÃO

Até recentemente, estruturas de betão armado não eram projectadas especificamente para serem duráveis. Contudo, este aspecto foi incorporado nas normas em vigor sem qualquer tipo de verificação matemática ou científica. Tradicionalmente, o projecto de durabilidade tem sido baseado numa abordagem de prescritiva. A falta de informação fiável sobre as propriedades de durabilidade do betão faz com que seja difícil avaliar a sua qualidade e desempenho. Uma abordagem prescritiva não quantifica a durabilidade do betão, logo, também não o desempenho. Contudo, uma abordagem diferente tem sido desenvolvida baseado na verificação de um estado limite que define a aceitação ou rejeição das soluções de projecto. Os estados limites podem ser avaliados deterministicamente, semi-probabilisticamente ou probabilisticamente. A abordagem probabilística permite uma melhor optimização mas requer mais informação/dados, que nem sempre estão disponíveis.

Existem formas diferentes para definir um estado limite de utilização (ELU) de acordo com o grau de deterioração da estrutura, como por exemplo início de corrosão, fendilhação, destacamento, etc. No entanto, é difícil definir o critério de verificação para estes estados limites. Uma vez que o início de corrosão é considerado um ponto crítico e relativamente bem definido, é o ELU relativo à durabilidade mais utilizado.

O principal objectivo deste artigo consiste em analisar criticamente a avaliação dos estados limites através da abordagem probabilística baseada na simulação pelo método de Monte Carlo. Uma revisão crítica da avaliação do ELU é apresentada. Uma compreensão aprofundada das condições subjacentes à aplicação desta metodologia é vital para o sucesso do projecto de durabilidade das estruturas de betão armado.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VERIFICAÇÃO DO ELU

2.1 Definição de probabilidade de rotura e grau de fiabilidade

O ELU define a condição a partir da qual um requisito especificado para a estrutura já não é verificado para determinado nível de fiabilidade (DR). A probabilidade de rotura (P_f) é definida como sendo a probabilidade de a estrutura não satisfazer os requisitos de desempenho de projecto, sendo que o índice de fiabilidade (RI) é definido como sendo o percentil da função probabilidade normal normalizada correspondendo à capacidade da estrutura desempenhar, de acordo com os requisitos estabelecidos, a sua função durante um determinado período de tempo. A P_f e o DR não são facilmente compreendidos quer pelo projectista quer pelo dono de obra uma vez que não fornece informação do estado actual da estrutura em termo de deterioração. Aparentemente, não é possível definir probabilidade de forma não ambígua, e por conseguinte o DR é baseado em conceitos arbitrários [1]. O DR é, normalmente, indicado através do índice de fiabilidade, β .

Para o ELU de início de corrosão, o fenómeno físico está associado a um momento relativamente bem definido. Resta definir o valor aceitável de P_f e o valor correspondente para o RI. Será que a P_f representa um grau físico de deterioração da estrutura, ou será apenas um valor matemático/estatístico acordado como sendo razoável? Para o ELU de início de corrosão, a P_f pode ser descrita como a probabilidade matemática de a corrosão ter iniciado. Não há indicação da extensão de corrosão, contudo, é assumido que, quanto maior a probabilidade maior a extensão do fenómeno. Daí que, uma P_f de 10% ou 90% apenas indica a probabilidade de a corrosão ter iniciado, mas não a extensão nem a gravidade da corrosão. Uma situação extrema é a P_f assumir o valor 0%. Este valor corresponde, logicamente, à ausência de corrosão da armadura. Outra situação extrema é a P_f ser de 100%. É uma garantia matemática que a corrosão iniciou, num ponto qualquer da estrutura, mas não significa que toda a estrutura tenha iniciado a corrosão, ou seja, toda a armadura. De acordo com a especificação do LNEC E465 [2] o nível aceitável da P_f para o ELU de início de corrosão varia entre 2% e 12%,

dependendo da classe de fiabilidade da estrutura (RC). No entanto, na Alemanha, níveis até 30% estão a ser sugeridos de forma a resultar em valores de recobrimento aceitáveis [1].

Como deverá o DR ser quantificado? Deverá representar um valor óptimo tendo em conta questões económicas? O DR deve depender do tipo de estrutura, da acessibilidade, das consequências da degradação e da rotura, da manutenção, entre outros factores. Em diversas publicações, o RI depende da Classe de fiabilidade (RC) da estrutura, que por sua vez depende da Classe de Consequência (CC) de rotura estrutural. Em geral, para o ELU, os valores de RI variam entre 1.3 e 1.8, sendo, normalmente considerado como sendo adequado o limite superior. Estes valores- β correspondem a Pf de aproximadamente 10% e 3%, respectivamente. Cálculos de vida útil efectuados já demonstraram que na maior parte dos casos, a adopção de $\beta = 1.7$ a 1.8 resultará em recobrimento excessivo, razão pelo qual o valor $\beta = 1.3$ será sugerido. No *fib* Model Code for Service Life Design [3], $\beta = 1.3$ é apresentado como o valor mínimo recomendado para a classe de exposição XS independentemente da RC da estrutura [1]. De acordo com a especificação LNEC E465, o RI varia consoante o RC de 1.2 até 2.0 para RC1 e RC3 respectivamente. Estes valores correspondem a probabilidades de aproximadamente 12% e 2%, respectivamente. É aparente que não existe um consenso sobre o valor adequado para o RI. Como é pouco claro qual o valor aceitável de Pf (que fenómeno físico representa), logo também o valor adequado de DR ou RI, então parece pouco provável que a abordagem probabilística para o início de corrosão pode ser conclusiva. Este assunto deve ser analisado com urgência, sendo que, no extremo, seja definido por convenção a interpretação dos significados de Pf e RI e os valores correspondentes.

3. MODELAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS: PRESSUPOSTOS E ANÁLISE DOS PARÂMETROS

A determinação da vida útil de uma estrutura de betão armado, no que diz respeito à penetração de cloretos, é normalmente baseada na solução matemática da segunda Lei de Fick para a difusão, expressa por:

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

em que C_s – teor superficial de cloretos (%/massa cimento); C_i - teor inicial de cloretos (%/massa cimento); D_a - coeficiente de difusão aparente (m^2/s); t - duração da exposição aos cloretos (s); erf - função erro.

Na prática, tanto o teor superficial de cloretos como o coeficiente de difusão aparente são obtidos a partir de perfis de cloretos retirados da própria estrutura. Normalmente, a camada superficial não é considerada pois nesta região o perfil de cloretos demonstra um desvio distinto do perfil sugerido pela Eq.(1). Consequentemente, o valor do C_s reflecte um teor de cloretos mais ou menos fictício, quantificado pela extrapolação do perfil de cloretos a profundidades maiores. Baseado nos resultados obtidos para períodos longos, verificou-se que o coeficiente de difusão aparente diminui gradualmente com o tempo de acordo com a relação empírica:

$$D_a = D_{a,o} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (2)$$

em que a - factor idade (-); $D_{a,o}$ – coeficiente de difusão aparente na idade de referência t_0 (m^2/s); t_0 - idade de referência do betão (s); t - idade actual do betão (s).

Contudo, de forma a permitir o cálculo de vida útil de estruturas novas de betão armado na fase de projecto, a utilização do coeficiente de difusão aparente obtido a partir de estruturas existentes é considerado menos apropriado. Consequentemente, no DuraCrete [4] e mais tarde no *fib* Model Code, têm sido definidas expressões matemáticas para o D_a que têm em conta a qualidade do betão pretendida. A forma encontrada foi através da utilização do coeficiente de migração, $D_{RCM,0}$, determinado no betão padrão através de um ensaio laboratorial à idade t_0 (normalmente 28 dias). Este

valor é de seguida transformado num valor prático, i.e. o $D_{a,o}$, através da multiplicação de um ou mais factores de correcção.

Em contraste ao DuraCrete, o *fib* Model Code apenas considera o factor de temperatura, k_e , enquanto a cura, o tipo de cimento e a exposição ambiental não são considerados relevantes. De forma a contabilizar o transporte de cloretos por acção capilar na camada superficial, no *fib* Model Code, uma superfície de substituição exposta é sugerida à profundidade Δx da superfície exposta real. Consequentemente, teores de cloretos podem apenas ser calculadas a partir de $x > \Delta x$ [3].

Tendo em conta a presença de uma zona de convecção, a expressão geral empregue no *fib* Model Code é dada por:

$$C(x,t) = C_i + (C_{s,\Delta x} - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{a,o} \cdot t}} \right] \right) \quad (3)$$

em que $C_{s,\Delta x}$ – teor de cloretos na superfície de substituição exposta (%/massa de cimento)

$$D_{a,o} = k_e \cdot D_{RCM,0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (4)$$

e

$$k_e = \exp \left(b_e \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right] \right) \quad (5)$$

em que k_e – parâmetro de transferência ambiental (-); b_e - parâmetro de regressão (K); T_{ref} - temperatura de ensaio de referência (K); T_{real} - temperatura do elemento estrutural ou do ambiente (K).

De facto, a Eq.(3) não descreve o processo real de transporte, fornecendo, no entanto, uma estimativa do perfil de cloretos após um período de tempo de exposição considerável. Mais ainda, a Eq.(3) é aplicável apenas a situações 1-D, logo menos adequado para pilares e vigas, especialmente nas zonas junto das esquinas. Estas situações requerem uma abordagem 2-D ou mesmo 3-D.

É de referir que a expressão inclui um conjunto de pressupostos implícitos, relacionados com o início de exposição aos cloretos ($t = 0$), i.e. imediatamente após a colocação do betão, a presença contínua e constante das condições de exposição tal como evidenciado pela constante $C_{s,\Delta x}$, a dependência generalizada de D_a com tempo e temperatura apenas, e a diminuição gradual do coeficiente de difusão no tempo é a infinidade de acordo com a Eq.(4).

3.1 Considerações sobre o factor idade e a concentração crítica de cloretos

Uma das preocupações práticas no projecto de durabilidade é a grande influência que o factor de idade possui no resultado final [5], quer esteja expresso em termos de vida útil, t_{sl} , espessura de recobrimento ou o coeficiente de migração. O factor de idade, a , determinado empiricamente, expressa o desenvolvimento no tempo do coeficiente de difusão de acordo com a Eq.(2). Na prática, o valor de a pode variar entre 0.3 e 0.7, dependendo do tipo de cimento e das condições de humidade ambiental. A influência de a é ilustrada na Fig. 1 em função do recobrimento de betão e do coeficiente de migração, para uma situação de referência de $t_{sl} = 100$ anos, $C_s = 3.0\%$, $C_i = 0.1\%$, $C_{crit} = 0.6\%$, $\Delta x = 0.0$ mm. Na Fig. 2, o efeito de a no cálculo da vida útil é demonstrado (abordagem determinística). O aumento do factor de idade de 0.5 a 0.6 resultaria no aumento da vida útil prevista em uma ordem de grandeza, i.e. de 100 para 1000 anos ($c = 45$ mm). Pode ser concluído que na maior parte das situações, o factor de idade é mais determinante que qualquer outro parâmetro do modelo. Consequentemente, é requerido um especial cuidado na sua quantificação. Na literatura existe um leque variado de valores dependendo no tipo de cimento e condições de exposição. De forma a permitir uma quantificação fiável de a é necessária uma quantidade significativa de perfis de cloretos

de várias estruturas com o mesmo tipo de cimento e condições de exposição comparáveis ao longo de um período de tempo prolongado, i.e., mais de 50 anos. De referir que, no que diz respeito à dependência no tempo do coeficiente de difusão, os resultados obtidos em laboratório demonstram dependências diferentes. Para betões produzidos com CEM III/B um factor de idade de 0.36 foi sugerido para $D_{RCM,0}$, no entanto, um factor de idade baseado em perfis de cloretos de uma estrutura real sugeria um valor acima de 0.60 [6].

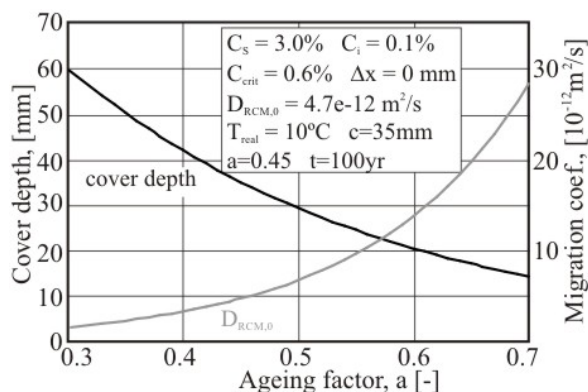


Figura 1. Influência do factor de idade no recobrimento e no coeficiente de migração.

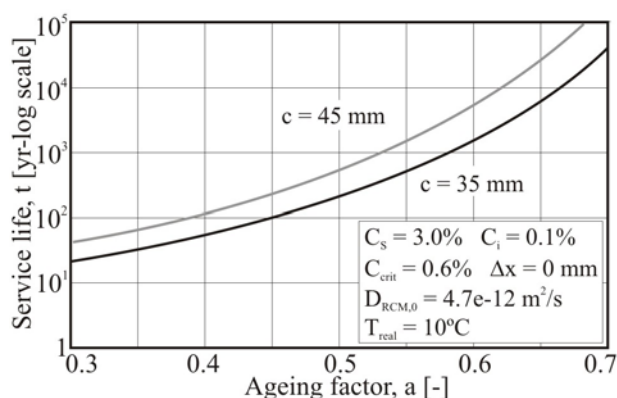


Figura 2. Influência do factor de idade no recobrimento e no coeficiente de vida útil.

O teor crítico de cloretos também é alvo de um debate internacional. Primeiro, é necessária uma definição clara e prática de C_{crit} de forma a ser empregue em modelos de vida útil. Contudo, a informação obtida a partir das estruturas é escassa e mal sustentada com informação (de projecto e de construção) essencial. Consequentemente, a maior parte da informação é baseada em ensaios laboratoriais de curta duração realizados em provetes pequenos, sem fissuras, bem curados, por vezes em argamassa, e utilizando métodos eléctricos acelerados. Tem-se verificado que os ensaios laboratoriais são pouco práticos para avaliar estruturas reais. Assim, é necessário desenvolver investigação aprofundada sobre o C_{crit} cobrindo aspectos como o tipo de cimento, condições de humidade, micro fissuração, etc.

4. CONSIDERAÇÃO SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO PROBABILÍSTICA DO ELU

Uma das formas mais práticas de realizar a análise probabilística é por intermédio de uma simulação de Monte Carlo (MC). A P_f é determinada pelo número de vezes que o resultado de uma simulação resulta na região de rejeição definida pela equação do estado limite. Cada simulação representa uma verificação da mesma equação do estado limite. A equação do estado limite é definida pela equação do modelo que, neste caso em particular, permite determinar o tempo até o início de corrosão da armadura devido à presença de cloretos, tais como as apresentadas, por exemplo, na DuraCrete ou no fib Model Code.

Normalmente, mais do que de 1×10^6 simulações são necessárias para este tipo de análise. Para executar uma simulação, é necessário gerar aleatoriamente valores para os parâmetros da equação do estado limite. Cada parâmetro do modelo é gerado a partir da sua função de distribuição de probabilidade (PDF) recorrendo ao método de transformação inversa. Assim que os PDFs dos diversos parâmetros são conhecidos, a P_f é baseada na avaliação da função estado limite para um grande número de simulações. A P_f é estimada com base nas seguintes equações:

$$p_f = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N I[g(x)] \quad (7)$$

em que $I[g(x)]$ – função indicador; $g(x)$ – equação de estado limite.

O índice de fiabilidade β pode ser determinado a partir da Pf recorrendo ao inverso da função distribuição normal padrão, $\Phi(\cdot)$, assumindo que o resultado final da simulação é uma variável normal aleatória baseado no Teorema do Limite Central.

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \quad (8)$$

Contudo, deve ser referido que, se o índice de fiabilidade é calculado com base na distribuição dos resultados das simulações, o valor, quando comparado com o do obtido a partir da Pf não é igual, mas semelhante. Esta diferença resulta da aleatoriedade inerente associada à criação do PDF da função estado limite.

A simulação MC é um método popular dada a facilidade de implementação, sendo intuitivo e relativamente simples de utilizar. A utilização da simulação MC requer conhecimentos de cálculo estatístico e de probabilidade. A maior parte dos problemas que ocorrem resultam da utilização incorrecta do método de simulação e da falta de compreensão do significado físico da equação de modelo e dos parâmetros. Como os parâmetros são maioritariamente aleatórios, é uma fonte potencial de erro na simulação.

4.1 Considerações sobre a definição dos parâmetros

O resultado de uma simulação depende da escolha acertada da PDF para representar os parâmetros e a respectiva dispersão (por exemplo: média e desvio padrão). A PDF deve ajustar-se adequadamente ao parâmetro, não apenas na vizinhança da média mas também nos extremos da distribuição. O PDF das variáveis deve ter em conta as limitações físicas do parâmetro. Valores negativos para o recobrimento e coeficiente de difusão não possuem significado físico.

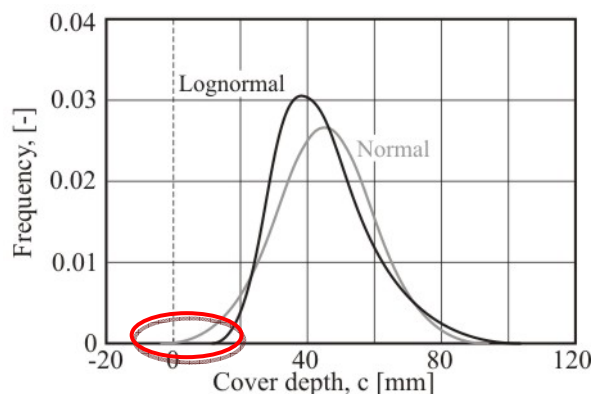


Figura 3. Comparação de PDF para o recobrimento de betão ($m = 45$ mm, $s = 15$ mm)

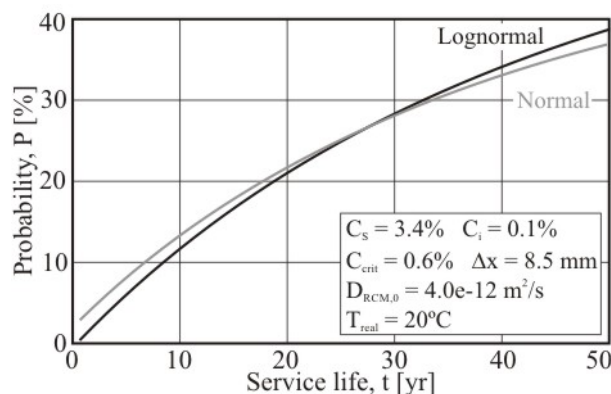


Figura 4. PF vs. tempo simulado com as PDF da Figura 3 para o recobrimento de betão.

Como outro exemplo, refira-se que parâmetros como o factor de idade possuem limites superiores e inferiores. Contudo, estes parâmetros são às vezes modelados com PDF que não têm isso em conta. A figura 3 apresenta a distribuição normal e lognormal para o recobrimento em betão da armadura, com média $\mu = 45$ mm e desvio padrão $\sigma = 15$ mm. A partir da Fig.3 pode-se observar que ao utilizar a distribuição lognormal para definir o parâmetro, não ocorrem valores negativos para o recobrimento. A distribuição é enviesada em relação à restrição. Isto também afecta o resultado da distribuição. A Figura 4 apresenta duas curvas PF vs. tempo onde as PDF do recobrimento de betão foram alteradas de acordo com a Fig.3. Ao observar o desempenho da curva na Fig.4, a diferença no desempenho pode ser observada. Para idades jovens, a utilização da PDF lognormal para o recobrimento de betão resultou no aumento do tempo até ao estado limite. O cálculo da Pf foi baseado em 1×10^6 simulações. Quando o recobrimento foi simulado com uma PDF normal, foram detectados 866 valores negativos.

Tal como anteriormente mencionado, o resultado de uma simulação depende da sensibilidade à alteração dos parâmetros da PDF. Também, alguns parâmetros têm maior influência no resultado final

que outros. Os parâmetros mais influentes são o recobrimento de betão, o factor de idade e o coeficiente de migração, e numa escala menor, o teor crítico de cloretos [5]. A sensibilidade dos parâmetros da equação estado limite pode ser vista na influência no resultado da simulação a alterações nas PDF dos parâmetros. Para demonstrar este ponto, dois exemplos são apresentados: o primeiro, em que o valor médio do recobrimento de betão é aumentado sucessivamente enquanto o desvio padrão é mantido constante (ver Fig. 5); e, o segundo, onde o coeficiente de variação é variado de 10 % até 30 % mantendo o valor médio constante (ver Fig. 6).

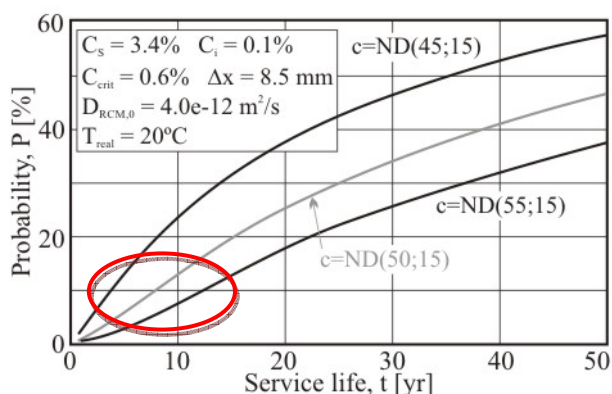


Figura 5. Influência do valor médio do recobrimento de betão na PF.

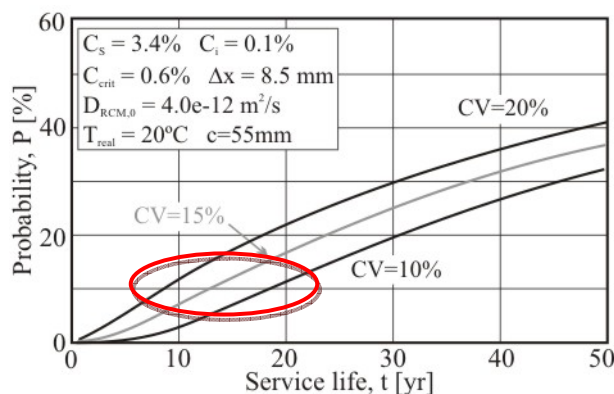


Figura 6. Influência do desvio padrão do recobrimento de betão na PF.

Na Fig. 5, o efeito da variação do valor médio do recobrimento na Pf é apresentado. Como o recobrimento do betão é um parâmetro influenciável, as alterações na Pf são claramente visíveis. Na Fig. 6, o mesmo efeito é observado, no que concerne à influência do desvio padrão do recobrimento de betão.

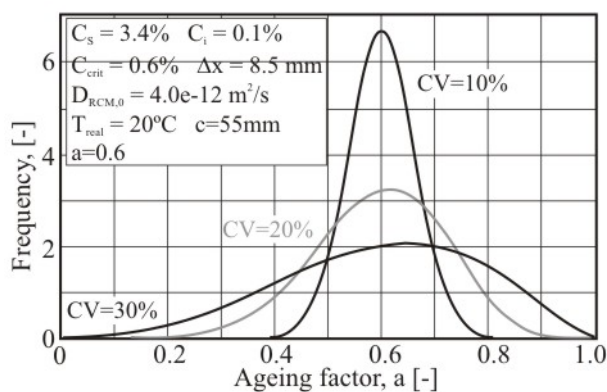


Figura 7. Efeito da modificação do coeficiente de variação da Pdf do factor de idade.

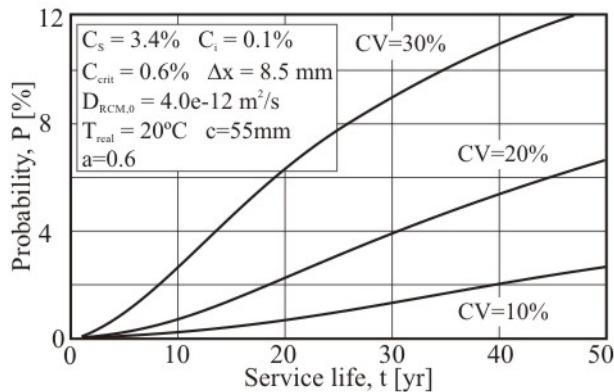


Figura 8. Comparação da Pf da simulação para um factor de idade (beta PDF): $a = 0.6$, COV = 10%, 20% e 30%.

Anteriormente, a importância do significado físico dos parâmetros da função estado limite na sua caracterização estocástica foi demonstrado. Para alguns parâmetros, a natureza estocástica descreve a variação inerente (exemplo: temperatura, teor superficial de cloretos), e a qualidade da construção e dos materiais utilizados (exemplo: recobrimento de betão, coeficiente de migração). Por outro lado, o factor de idade, a , depende do tipo de cimento utilizado e das condições de exposição actuais. A variação destes parâmetros implica a mudança dos materiais utilizados, ou seja, o betão ou tipo de cimento. Como exemplo, mantendo o valor médio do factor de idade e alterando o coeficiente de variação entre 10 % e 30 %, diferentes PDF são obtidos, como demonstrado na Fig. 7.

O factor de idade pode variar entre 0 (não existe influencia no tempo) e 1 (a influencia no tempo é máxima). Os valores entre estes limites representam a influência de diferentes cimentos (entre outros factores) no desenvolvimento do coeficiente de migração no tempo. Na Fig. 7, as PDF obtidas a partir

de diferentes coeficientes de variação demonstram os limites cada vez maiores para os valores do factor de idade. Para um coeficiente de variação de 10 %, o factor de idade varia entre 0.4 e 0.8. Para um coeficiente de variação de 30 %, o factor de idade varia entre 0.1 e 1.0. Tendo em conta o significado físico do parâmetro, a variação significa que diferentes tipos de cimento são considerados simultaneamente para caracterizar o desempenho do betão. Não há consenso quanto aos valores apropriados para o factor de idade para determinado cimento. Como exemplo, para um ambiente marítimo, valores para CEM I podem variar desde 0.3 [3] até 0.55 [2]. Como resultado, o efeito no desempenho é aparente, como demonstrado na Fig. 8. Com o aumento do coeficiente de variação do factor idade, significa que mais tipos de betão (ou tipos de cimento) estão, aparentemente, a ser considerados simultaneamente.

6. CONCLUSÕES

Presentemente a abordagem probabilística aparenta não ser a mais indicada para o projecto de durabilidade de estruturas de betão armado. Definições claras e concisas de Pf e índice de fiabilidade são necessárias, mesmo que por convenção, para que todos os projectos de durabilidade (modelação) possuam os mesmos critérios de desempenho. Os parâmetros intervenientes nos modelos variam consideravelmente e os seus valores ainda estão a ser discutidos. Como exemplo, uma definição mais prática do factor de idade é necessária. A característica material do factor de idade é muitas vezes ignorada, o que influencia seriamente o resultado final. Uma utilização determinística deste parâmetro deverá ser considerada.

Tendo em conta o estado do conhecimento actual, o projecto de durabilidade com base numa abordagem probabilística aparenta, ainda, ser pouco viável devido, principalmente, à sensibilidade excessiva a alguns parâmetros. É imperioso assegurar que os modelos resultem em abordagens mais estáveis, menos dependentes de eventuais manipulações pelo utilizador e devem ser acompanhados por limitações dos parâmetros envolvidos bem como as PDF recomendadas. Parece recomendável, que tanto a abordagem prescritiva como a probabilística devam ser avaliadas sendo as vantagens combinadas de forma a resultar numa abordagem melhorada mas ainda prática.

REFERÊNCIAS

- [1] Gulikers, J. 2007, “Critical issues in the interpretation of results of probabilistic service life calculations” in International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures. Eds Ferreira, R.M., Gulikers, J., Andrade, C., University of Minho, Guimarães, Portugal, ISBN 972-99179-2-2, pp 195-204.
- [2] LNEC E465. Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho de betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil de projecto sob as exposições ambientais XC ou XS, LNEC, Lisboa. 2007.
- [3] FIB. Bulletin 34. Model code for service life design. Lausanne. 2006.
- [4] DuraCrete, 2000, “Statistical quantification of the variables in the limit state function”, The European Union - Brite EuRam III, Project No. BE95-137, Document R9..
- [5] FERREIRA, R.M.; Sensitivity analysis of model parameters for corrosion initiation and implications on design. Proceedings of International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, University of Minho, Guimarães, 5-6 November (2007). 205-214. ISBN 972-99179-2-2

- [6] LNEC E464. Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa. 2007.