

Avaliação de modelos de degradação de estruturas de betão armado em ambiente marítimo



**Miguel Tomás
Silva¹**



**Rui Miguel
Ferreira²**

RESUMO

Após o fim da segunda grande guerra verificou-se um crescimento exponencial das estruturas de betão armado o que correspondeu a um dos mais dispendiosos investimentos na nossa sociedade. De um modo geral, a programação das tarefas de manutenção das estruturas não era realizado, uma vez que no seu dimensionamento, cumprindo os requisitos de projecto, estava subjacente que esta duraria a correspondente vida útil para a qual teria sido dimensionada.

Contudo, veio a verificar-se que o desempenho de muitas construções diminui de forma significativa, afectando as condições de segurança e de utilização das mesmas e em último caso, a ruína, o que conduz a avultados custos na reconstrução.

Nos dias de hoje, uma das principais áreas de estudo no qual a comunidade científica se debate é a durabilidade das estruturas de betão armado, em especial aquelas que se encontram sujeitas a condições de exposição ambiental marítimas. O crescente interesse em aferir a durabilidade, assim como as condições de serviço das estruturas de betão armado, permite que seja maximizado a sua vida útil conduzindo a uma economia não só em termos de custos mas também ao nível ambiental.

Actualmente existem diversos modelos de deterioração do betão armado que simulam os mecanismos de degradação e transporte de uma dada estrutura. Pretende-se neste artigo efectuar um estudo comparativo da aplicabilidade à realidade portuguesa de dois modelos já desenvolvidos e analisar os desempenhos de durabilidade para as vidas úteis consideradas (50 e 100 anos).

PALAVRAS-CHAVE

Degradação; Modelação; Difusão, Cloretos, Vida útil

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

² Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal.
rmf@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

Um dos mecanismos mais importantes para a deterioração das estruturas de betão armado é a corrosão induzida por cloretos resultantes de sais descongelantes ou do ambiente marítimo no qual uma estrutura se encontra exposta. Os cloretos penetram através da camada de recobrimento e destroem a camada protectora alcalina existente na superfície das armaduras. Uma vez dissolvida essa camada, dá-se início à corrosão quando uma determinada concentração de cloretos é excedida para além de um dado valor limite.

A corrosão pode ser de natureza localizada ou de natureza generalizada. Enquanto a primeira é devida principalmente a fenómenos de penetração de cloretos, a corrosão de natureza generalizada (que ocorre igualmente por destruição da camada protectora alcalina) caracteriza-se por o betão se encontrar exposto ao dióxido de carbono da atmosfera. A corrosão de natureza generalizada afecta grandes áreas de armadura no betão com maior ou menor perda de diâmetro efectivo, por outro lado a corrosão de natureza localizada afecta apenas pontualmente, contudo provoca uma redução substancial do diâmetro da armadura tornando-a frágil e mais susceptível a uma falha da estrutura sem aviso prévio.

O elevado grau de incerteza, associado aos parâmetros ambientais, propriedades físicas dos materiais assim como as cargas a que estão sujeitas, uma vez que envolve fenómenos mecânicos e químicos bastante complexos e de natureza aleatória, conduz a uma maior dificuldade na previsão da durabilidade das estruturas de betão armado devido à corrosão das armaduras.

De modo a verificar a durabilidade das estruturas de betão armado, as normas apresentam requisitos prescritivos que, uma vez cumpridos, devem garantir a durabilidade para a vida útil considerada. São especificados requisitos como o recobrimento mínimo, a máxima razão água/ligante, dosagem máxima de ligante, entre outros. Devem também ser tomadas medidas de modo a garantir a qualidade no fabrico do betão, na sua colocação e cura. Os donos de obra recorrem frequentemente a planos de manutenção que limitam o custo das intervenções necessárias, não contabilizando o desempenho actual e futuro da estrutura. A gestão do processo de manutenção pode beneficiar de uma análise do desempenho de durabilidade actual da estrutura.

Pretende-se neste artigo efectuar um estudo comparativo da aplicabilidade à realidade portuguesa de dois modelos já desenvolvidos, nomeadamente o apresentado na LNEC E465 **Error! Reference source not found.** assim como o modelo contemplado pela *Fédération Internationale du béton* apresentado no *Model Code for Service Life Design (fib-MC)* **Error! Reference source not found.**, e analisar os desempenhos de durabilidade para as vidas úteis de 50 anos e de 100 anos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MODELOS DE PREVISÃO DA INICIAÇÃO DE CLORETOS

Tanto a LNEC E465 como o *fib-MC* apresentam uma metodologia de cálculo e avaliação do desempenho do betão quando expostos a ambientes marítimos, logo, quando expostos a cloretos. A presença dos cloretos pode comprometer a durabilidade das armaduras. A evolução no tempo do mecanismo de transporte dos cloretos para o interior do betão e a interacção destes com a armadura é habitualmente dividida em duas fases distintas [3]: fase de iniciação (onde é contemplado o transporte dos cloretos até junto da armadura na concentração necessária para iniciar o processo de corrosão), e fase de propagação (contempla as condições para desenvolver activamente a corrosão). Este trabalho foca o período de iniciação nos modelos.

A metodologia de cálculo presente em ambos os modelos, para o período de iniciação, relaciona a profundidade de penetração dos cloretos em função do tempo com a concentração de cloretos à superfície do betão e a qualidade do betão traduzida no indicador de durabilidade coeficiente de

difusão. O modelo de cálculo base para a penetração iónica dos cloretos por difusão é dado pela 2ª Lei de Fick de acordo com a Eq.(1):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Em que C é a concentração de iões de cloreto, t o tempo, x a profundidade e D o coeficiente de difusão. Considerando as seguintes condições fronteira: $C(x,0)=0$ e $C(0,t)=C_s$, a determinação da vida útil de uma estrutura de betão armado, no que diz respeito à penetração de cloretos, é normalmente baseado na solução matemática da Eq.(1) para a difusão, expresso por [5]:

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

Em que C_s é a concentração de iões de cloreto à superfície, D_A é o coeficiente de difusão aparente, e erf é a função erro de Gauss. A Eq.(2) é utilizada na LNEC E465 para estimar a concentração de cloretos no tempo e em função da profundidade. Ao contrário do *fib*-MC (Eq.(3)), a LNEC E465 não contempla o efeito de sucção capilar na camada exterior de betão das estruturas que promove a deslocação de iões cloreto no betão. Desta forma, o *fib*-MC apresenta uma equação ligeiramente diferente:

$$C(x,t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_A \cdot t}} \right) \right) \quad (3)$$

Em que Δx corresponde à profundidade da zona de convecção, e $C_{s,\Delta x}$ é a concentração de iões de cloreto à profundidade Δx . A espessura Δx é desprezada ao aplicar a 2ª Lei de Fick.

Outro parâmetro fundamental é o coeficiente de difusão aparente. Este indicador de durabilidade caracteriza o desempenho, ou qualidade, do betão. Baseado nos resultados obtidos para períodos longos, tem sido demonstrado que o coeficiente de difusão aparente diminui gradualmente com o tempo de acordo com a relação empírica [5]:

$$D_A(t) = D_A(t_0) \times \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (4)$$

Em que t_0 é a idade de referência, t a idade para o qual se pretende determinar o coeficiente de difusão e n é uma variável que descreve a variação do coeficiente de difusão no tempo. Contudo, de forma a permitir o cálculo de vida útil de estruturas nova 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 [5] e mais tarde na LNEC E465 e no *fib*-MC, expressões matemáticas para D_A têm sido introduzidas para ter 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 days). Este valor é de seguida transformado num valor prático, i.e. o $D_{A,0}$, através da multiplicação de um ou mais factores de correcção.

Assim, na LNEC E465, o cálculo do coeficiente de difusão resulta de:

$$D_A(t) = k_{D,c} \cdot k_{D,RH} \cdot k_{D,T} \cdot D_{RCM,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (5)$$

Em que $k_{D,c}$ é um factor que tem em conta as condições de cura; $k_{D,RH}$ é um factor que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente e $k_{D,T}$ é um factor que tem em conta a influência da temperatura. Estes três factores encontram-se tabelados na LNEC E465. Por outro lado, o *fib*-MC adopta dois factores apresentados no qual resultam a seguinte expressão:

$$D_A(t) = k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (6)$$

Em que k_e consiste numa variável ambiental em que tem em conta a influência da temperatura sendo baseada na equação de Arrhenius, e k_t é uma variável de regressão constante de valor unitário. Por sua vez, k_e é definido pela seguinte expressão:

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (7)$$

Em que b_e é uma variável de regressão, T_{ref} é a temperatura de referência tendo o valor de 293K e T_{real} a temperatura do elemento de betão armado em análise.

3. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Para comparar a aplicação dos modelos, foi necessário caracterizar os diversos parâmetros que estes contemplam. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos valores adoptados para os parâmetros.

Quadro 1. Parâmetros utilizados na modelação e respectivos valores.

Parâmetros	LNEC E465	<i>fib</i> -MC
C_s (%/peso cimento)	3.1	-
$C_{s,\Delta x}$ (%/peso cim.)	-	3.1
C_{CRIT} (%/peso cim.)	0.4	0.4
C_0 (%/peso cim.)	0.01	0.01
$D_{RCM,0}$ (m ² /s.e ⁻¹²)	7.2	7.2
n	0.65	0.60
t_0 (dias)	28	28
t (anos)	50/100	50/100
Δx (mm)	-	6.0
$k_{D,c}$	2.4	-
$k_{D,T}$	0.88	-
$k_{D,RH}$	1.0	-
k_t	-	1.0
T_{ref} (°C)	-	20
T_{real} (°C)	-	17
b_e	-	4800

Os valores do coeficiente de migração foram baseados num estudo do LNEC sobre os parâmetros de desempenho de durabilidade do betão em função das classes de resistência e tipo de cimento[6]. A definição da concentração crítica de cloretos e a concentração de cloretos à superfície foi realizada de

acordo com o estipulado na LNEC E465. De acordo com a LNEC E464 [7], considerou-se o betão como sendo da classe de resistência C35/45, com uma razão água/ligante de 0.42. Considerou-se ainda que o ligante utilizado possui pozolanas, sendo o apropriado para a classe de exposição XS3. O factor de idade, n , é definido em cada um dos modelos em função da classe de exposição e do tipo de cimento.

3.1 Variação do coeficiente de difusão aparente no tempo

Tendo com base os valores do coeficiente de migração, o factor de idade, e os restantes factores k apresentados no Quadro 1, efectuou-se uma comparação da evolução do coeficiente de difusão aparente de cada um dos modelos. Para tal, aplicou-se as Eqs. (5) e (6) fazendo variar a idade até aos 100 anos. No Quadro 2 apresenta-se os coeficientes de difusão aparente obtidos entre os 28 dias, e os 100 anos. Na Figura 1 é ilustrado a evolução no tempo dos coeficientes de difusão aparente.

Quadro 2 – Coeficientes de difusão aparente		
Idade (anos)	D_A ($m^2/s \cdot 10^{-12}$)	
	LNEC E465	<i>fib</i> -MC
0.0767 [†]	15.21	6.08
5	1.01	0.50
10	0.64	0.33
25	0.35	0.19
50	0.23	0.13
75	0.17	0.10
100	0.14	0.08

[†] Corresponde aos 28 dias

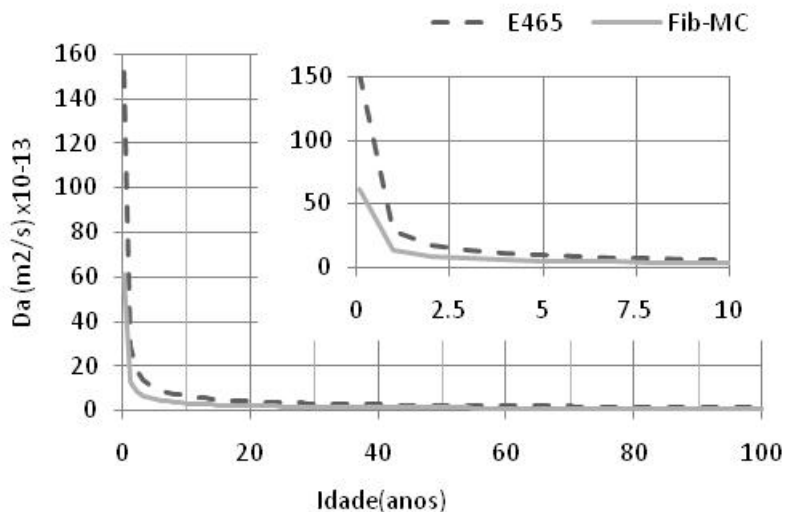


Figura 1 – Evolução no tempo do coeficiente de difusão aparente.

A partir do Quadro 2 e da Figura 1, verifica-se que os modelos apresentam comportamentos distintos no tempo para o mesmo betão. Isto deve-se essencialmente aos factores correctivos aplicados na determinação do coeficiente de difusão aparente, e na definição do factor de idade. O factor de idade é um parâmetro importante, cuja definição ainda não é suficientemente compreendida [8]. Verifica-se que o coeficiente de difusão aparente aos 28 dias (idade de referência) para o *fib*-MC é 40 % inferior ao valor obtido pela LNEC E465. A proporção entre os coeficientes de difusão aparente do *fib*-MC e da LNEC E465 aumentam no tempo, sendo que para 50 anos é de 55 % e para os 100 anos de 57 %.

3.2 Comparação do perfil de cloretos para os 50 e 100 anos

Aplicando as Eqs. (2) e (3) com os parâmetros apresentados no Quadro 1, é possível estimar o perfil de cloretos resultante para as vidas úteis de projecto de 50 e 100 anos. As Figuras 2 e 3 ilustram os perfis estimados para cada uma das vidas úteis.

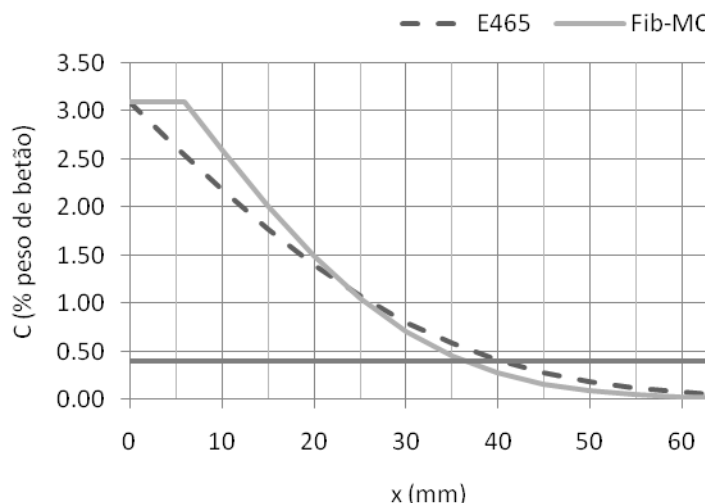


Figura 2. Estimativa dos perfis de cloretos para uma vida útil de 50 anos.

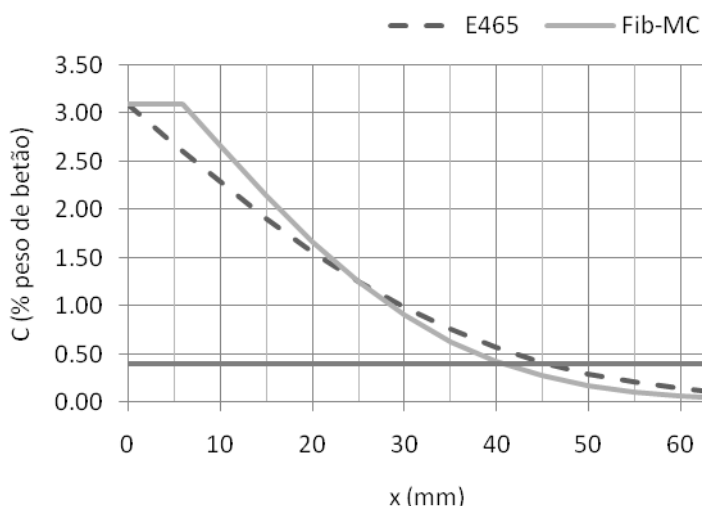


Figura 3. Estimativa dos perfis de cloretos para uma vida útil de 100 anos.

A partir das Figuras 2 e 3 verifica-se que os perfis do modelo da LNEC E465 convergem para o mesmo ponto à superfície do betão correspondente à concentração superficial de cloretos, enquanto os perfis de cloretos do *fib*-MC convergem num ponto Δx da superfície por este modelo considerar que nesta faixa o principal fenómeno de transporte é a absorção capilar e não a difusão. Considerando a mesma concentração crítica para ambos os modelos, verifica-se que, para uma vida útil de 50 anos, em que o recobrimento mínimo especificado é de 45 mm, esta concentração atinge a profundidade de 39 mm para o LNEC E465 e 36 mm para o *fib*-MC. A diferença na aplicação dos dois modelos para a mesma situação é de 3 mm. No caso de uma vida útil de 100 anos, em que o recobrimento mínimo especificado é de 55 mm, a concentração crítica de cloretos atinge a profundidade de 45 mm para o LNEC E465 e 40 mm para o *fib*-MC. A diferença na aplicação dos dois modelos para a mesma situação é de 5 mm. A diferença deve-se, não só ao analisado no §3.1, mas também pelo facto do *fib*-MC considerar uma redução do recobrimento mínimo em consequência do efeito da absorção capilar no transporte de cloretos para profundidade maiores.

3.3 Comparação da profundidade de penetração da concentração crítica de cloretos

Para comparar a profundidade de penetração da concentração crítica de cloretos, foi aplicando as Eqs. (2) e (3) recorrendo aos parâmetros apresentados no Quadro 1. As Eqs. (2) e (3) foram reformuladas de forma a permitir o cálculo, para determinado instante no tempo, a profundidade da concentração crítica de cloretos. As Eqs. (8) e (9) apresentam as expressões utilizadas, para o LNEC E465 e *fib*-MC, respectivamente.

$$x(t) = 2 \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{CRIT}}{C_s} \right) \right) \sqrt{D_A \cdot t} \quad (8)$$

$$x(t) = \Delta x + 2 \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{CRIT}}{C_s} \right) \right) \sqrt{D_A \cdot t} \quad (9)$$

Na Figura 4 são apresentados os resultados da determinação da profundidade de penetração da concentração crítica de cloretos em função do tempo.

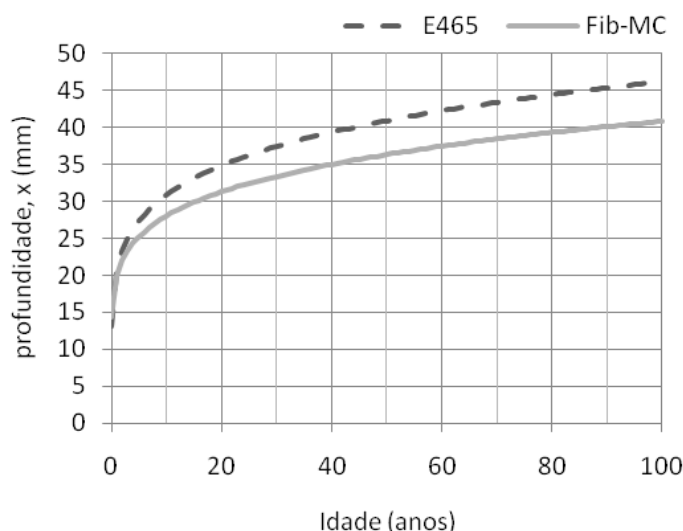


Figura 4. Profundidade de penetração da concentração crítica de cloretos no tempo.

Verifica-se uma penetração significativa em profundidade para idade jovens – para uma vida útil de 50 anos, cerca de 60 % do recobrimento mínimo já foi alcançada pela concentração crítica de cloretos aos 10 anos para o modelo do *fib*-MC, sendo que essa percentagem é de 69 % para a LNEC E465. Este resultado realça a importância da qualidade da cura do betão.

3. CONCLUSÕES

Pretendeu-se efectuar um estudo comparativo de dois modelos já desenvolvidos e analisar os desempenhos de durabilidade para as vidas úteis consideradas.

As diferenças observadas na evolução das curvas de previsão da difusão aparente no tempo (Figura 1) de cada um dos modelos pautam-se pela diferença de valores obtidos no produto dos parâmetros específicos. No caso do modelo especificado na LNEC E465 o produto desses parâmetros foi de 2.11 enquanto no modelo da *fib*-MC foi de 0.84. Esta diferença de valores resulta numa deslocação da curva do modelo do LNEC E465 no eixo vertical resultando em valores mais exigentes. Enquanto o modelo contemplado na *fib*-MC os parâmetros definidos servem para contemplar a influência da

temperatura na evolução do coeficiente de difusão, na LNEC E465 não só é tido em conta o efeito da temperatura com também o processo de cura do betão e o tipo de exposição ambiental a que se encontra sujeito.

O modelo especificado na LNEC E465 apresenta-se mais exigente uma vez que apresenta maiores valores do coeficiente de difusão no tempo, o que em termos de dimensionamento se encontra pelo lado da segurança.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] FIB Bulletin 34. Model code for service life design
- [3] n. Lausanne. 2006
- [4] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. 1982
- [5] L.O.Nilsson *et al*, HETEK Report nº53, “Chloride penetration into concrete. State of the Art” , 1996
- [6] DURACRETE: General Guidelines for Durability Design and Redesign, The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347: “Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures”, Document R 15, February 2000, 109 p
- [7] GONÇALVES, A.; RIBEIRO, A.B.; ESTEVES FERREIRA, M.J.; The new LNEC specifications on reinforced concrete durability. Proceedings of International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, University of Minho, Guimarães, 5-6 November (2007). 131-139.
- [8] LNEC E464. Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa. 2007
- [9] FERREIRA, R.M.; GULKERS, J.; Critical considerations on the assessment of the durability (serviceability) limit state of reinforced concrete structures. Proceedings of 11th DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Component, Istanbul, Turkey, 11-14 May (2008)..