

Vida útil de estruturas de betão armado face à carbonatação. Prescrição (LNEC E464) vs Desempenho (LNEC E465)



Pedro F. Marques¹



António Costa²

RESUMO

A degradação prematura de estruturas de betão armado e pré-esforçado devido à corrosão do aço e a ineficácia de meios para a combater no passado, têm sido largamente discutidas. Com efeito, verificou-se na última década uma mudança na filosofia de abordagem na prevenção deste problema introduzindo metodologias baseadas em critérios de desempenho. A investigação neste campo é da maior importância, sendo necessárias contribuições para a convergência de regras baseadas em metodologias opostas – prescritivas e de desempenho. Na recente alteração à regulamentação portuguesa referente a este tema, estas metodologias são o objecto das especificações LNEC E464 e LNEC E465, inseridas no Documento Nacional de Aplicação da NP EN 206-1. Neste sentido, foi desenvolvido um estudo que incluiu um trabalho experimental para a determinação das propriedades de desempenho de diferentes composições de betão sujeitas à acção do dióxido de carbono. Estas composições foram concebidas de forma a cumprir com os requisitos prescritivos da especificação LNEC E464 para períodos alvo de vida útil 50 e 100 relativos a estruturas de betão armado. Os resultados experimentais foram introduzidos nos modelos matemáticos definidos na especificação de desempenho LNEC E465. O objectivo prendeu-se com a determinação do período de vida útil de estruturas de betão armado executadas com as composições anteriormente referidas. Os valores de vida útil foram determinados, no que respeita aos níveis de fiabilidade considerados pelos códigos europeus, com base numa abordagem semi-probabilística usando os factores de segurança estabelecidos pela especificação LNEC E465 e, alternativamente, através de uma abordagem probabilística baseada em simulação matemática. O objectivo do estudo consistiu na comparação e averiguação da convergência dos períodos de vida útil obtidos a partir das duas abordagens de desempenho (probabilística e semi-probabilística) com os que a metodologia prescritiva definiu como alcançáveis usando composições com os requisitos por si definidos.

PALAVRAS-CHAVE

Análise probabilística, betão armado, corrosão, carbonatação, durabilidade, metodologia de desempenho, metodologia prescritiva, vida útil.

¹ LEB, Projectistas e Consultores - Reabilitação de Construções, 2645-094 Alcabideche, Portugal. pedromarques@leb.pt

² Universidade Técnica de Lisboa, IST, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal, acosta@civil.ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de dimensionar estruturas duráveis conduz ao desenvolvimento de soluções para a sua efectiva protecção, dependam estas dos tradicionais critérios prescritivos ou dos de desempenho que se baseiam em modelos de previsão da vida útil (FIB bol. 34, CEB 238) [1, 2] cada vez mais utilizados no presente. Este artigo analisa e compara duas especificações alternativas que fazem parte do Documento Nacional de Aplicação (DNA) da NP EN 206-1 [3], no que se refere ao período de vida útil de estruturas de betão armado sob a acção do dióxido de carbono: metodologia prescritiva – LNEC E464 [4]; metodologia de desempenho – LNEC E465 [5]. Os micro-ambientes considerados são os relacionados com ambiente de humidade moderada e de ciclos de molhagem/secagem, correspondendo respectivamente às classes de exposição ambiental XC3 e XC4 da NP EN 206-1.

2. FIABILIDADE ESTRUTURAL

Actualmente a maioria dos países europeus tem em consideração as regras e princípios estabelecidos pela EN 1990 (2002) – Eurocódigo 0 [6]. De acordo com esta norma são definidas três classes de fiabilidade diferentes: RC1; RC2; RC3.

O quadro 1 representa o mínimo índice de fiabilidade β e a correspondente máxima probabilidade de falha para as três classes de fiabilidade para os Estados Limite Último e de Utilização de acordo com o Eurocódigo 0 e a especificação LNEC E465.

Quadro 1 Valores mínimos de β / Valores máximos de P_f				
Classes de Fiabilidade	ELU		ELS	
	Eurocódigo 0	LNEC E465	Eurocódigo 0	LNEC E465
RC3	4,3 / $1,0 \times 10^{-5}$	-	-	2,0 / $2,3 \times 10^{-2}$
RC2	3,8 / $7,0 \times 10^{-5}$	-	1,5 / $6,7 \times 10^{-2}$	1,5 / $6,7 \times 10^{-2}$
RC1	3,3 / $4,8 \times 10^{-4}$	-	-	1,2 / $11,5 \times 10^{-2}$

A determinação do período de vida útil de projecto de uma estrutura pode ser efectuado através de uma abordagem semi-probabilística na qual o valor determinístico é dividido por um factor de segurança. A quantificação deste factor é baseada na assunção de que o período de vida de uma estrutura é representado por uma distribuição log-normal [7]. A este respeito a especificação de desempenho LNEC E465 define um coeficiente de variação de 0,5. Como consequência, os valores dos factores de segurança γ associados às classes de fiabilidade RC3, RC2 e RC1 são, respectivamente, 2,8; 2,3 e 2,0.

3. CRITÉRIOS PRESCRITIVOS PARA O BETÃO: RECOBRIMENTO; COMPOSIÇÃO E RESISTÊNCIA

3.1 Recobrimento

O recobrimento dos elementos de betão armado é definido pela EN 1992-1-1 – Eurocódigo 2 [8]. A incerteza desta variável em relação à sua execução é também considerada de acordo com a NP ENV 13670-1 [9]. Neste sentido, para além do recobrimento mínimo $c_{min,dur}$, o Eurocódigo 2 define o recobrimento nominal c_{nom} a ser especificado nas peças desenhadas:

$$c_{nom} = c_{min,dur} + \Delta c_{dev} \quad (1)$$

Em que Δc_{dev} é o desvio expectável que depende do controlo de qualidade, que independentemente deste, no caso português [9] foi fixado em 10 mm.

O recobrimento mínimo $c_{min,dur}$, pode ser interpretado como o valor característico de quartil 5% [1, 10], onde $\Delta c_{dev} = 1.645s$, sendo s o desvio padrão de uma distribuição normal do recobrimento. O desvio padrão é neste caso 6 mm e o valor médio correspondente ao recobrimento nominal.

A especificação LNEC E464 [4] está incluída no Documento Nacional de Aplicação da NP EN 206-1. Consequentemente é esta especificação que determina quais os requisitos de composição dos betões e os valores mínimos de recobrimento nominal (recobrimento mínimo acrescido do desvio).

3.2 Limites prescritivos para a composição de betões

Os limites definidos na E 464 [4] constituem a metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 anos (período alvo) face à exposição ambiental, considerando a classe estrutural 4. Os mesmos limites prescritos para a composição dos betões e um recobrimento acrescido em 10 mm permitirão, segundo esta especificação, uma vida útil de projecto de 100 anos – classe estrutural 6.

Quadro 2. Limites prescritivos para uma vida útil de projecto de 50 anos

Tipo de cimento	CEM I (Referência); CEM II/A				CEM II/B; CEM III/A; CEM IV; CEM V/A			
Classe de exposição	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Recobrimento nominal mínimo (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima A/L	0,65	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65	0,55	0,55
Dosagem mínima cimento, C (kg/m ³)	240	240	280	280	260	260	300	300
Classe de resist. mínima	C25/30 LC25/28	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C25/30 LC25/28	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33

Como se pode observar no Quadro 2, os limites na composição dos betões referem-se à razão água/ligante, às dosagem e tipo de cimento e à classe de resistência.

4. MODELAÇÃO DA VIDA ÚTIL

4.1 Evolução geral dos níveis de deterioração

Considerando que grande parte da deterioração de estruturas de betão armado se deve à corrosão das armaduras, o modelo de deterioração de Tuutti, em função do tempo, distingue claramente duas fases: iniciação e propagação.

O período de iniciação t_i corresponde à penetração dos agentes agressores no betão de recobrimento até se alcançarem as armaduras e se originar a despassivação e o consequente início de corrosão das mesmas.

O período de propagação t_p é definido a partir do início da corrosão das armaduras, a que corresponde o fim do período de iniciação, até à deterioração da estrutura a níveis inaceitáveis. Estes níveis [12, 13] podem ser a delaminação ou fendilhação do betão de recobrimento [14, 15], ou ainda a perda da secção das armaduras suficiente para por em causa a segurança última da estrutura.

4.2 Modelos de difusão e propagação

4.2.1 Período de iniciação – modelo de difusão

Levando em conta os aspectos referidos e os modelos propostos por [2], a carbonatação do betão no tempo é expressa no seguinte:

$$x = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta C t} \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (2)$$

x – profundidade de carbonatação, m

a – quantidade de CO_2 para a completa carbonatação de um volume unitário de betão, kg/m^3

D – coeficiente de difusão, m^2/ano

k_0 – constante que tem em conta o tipo de ensaio utilizado

k_1 – constante que tem em conta a presença de humidade relativa

k_2 – constante que tem em conta a influência da cura

t – tempo, anos

t_0 – período de referência, anos

n – parâmetro que considera o efeito dos ciclos molhagem/secagem com o tempo

Seguindo a equação (2) a especificação de desempenho (LNEC E465) estabelece o conceito de resistência à carbonatação R_{C65} :

$$R_{C65} = \frac{a}{D} \quad (3)$$

A resistência à carbonatação é obtida em laboratório através de um processo acelerado com uma concentração de dióxido de carbono C_{accel} de $90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. A duração do ensaio é representada por t_1 e a profundidade de carbonatação por X_1 :

$$R_{C65} = \frac{2 C_{accel} t_1}{X_1^2} \quad (4)$$

A equação (2) é reescrita da seguinte forma:

$$x = \sqrt{\frac{2 \times \Delta C}{R_{C65}}} t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (5)$$

ΔC – $0.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

t_0 – 1 ano

k_0 – 3 (quando as condições de ensaio são as da especificação LNEC E 391)

k_2 – 1 para cura normalizada; 0,25 para cura de 3 dias

Os valores de k_1 e n são definidos de acordo com o quadro 3:

Quadro 3. Constantes dos parâmetros k_1 e n – LNEC E465: 2007

Parâmetro	XC1	XC2	XC3	XC4
k_1	1.00	0.20	0.77	0.41
n	0	0.183	0.02	0.085

Uma vez que a despassivação devida à carbonatação tem início quando a profundidade x iguala o recobrimento das armaduras c , o tempo de iniciação t_i é expresso pelo seguinte:

$$t_i = \left[\frac{R_{C65} c^2}{1,4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}} \right]^{\frac{1}{1-2n}} \quad (6)$$

4.2.2 Período de propagação – modelo de corrosão

A estimativa do período de propagação depende dos níveis de corrosão definidos como limites e que podem depender de determinados níveis de abertura de fendas, consoante os tipos de consequência quanto à perda de secção das armaduras: aumento da taxa de corrosão; perda de aderência [13, 16]. Na especificação LNEC E465, com base na Lei de Faraday, o período de propagação é relacionado com a taxa de corrosão I_{corr} e representado pela expressão seguinte:

$$t_p = k \phi_0 \frac{I}{1,15 \alpha I_{corr}} \quad (7)$$

Em que $\alpha = 2$ para corrosão uniforme – corrosão associada à carbonatação – e k é definido pela expressão (8)

$$k = \left(74,5 + 7,3 \frac{c}{\phi_0} - 17,4 f_{cd} \right) \frac{0,2}{\phi_0} \quad (8)$$

Os valores de I_{corr} relacionados com os níveis de corrosão das armaduras no interior do betão são também relacionados com as classes de exposição ambiental [5].

Com base nos pressupostos anteriores a especificação LNEC E465 [5] define o mínimo período de propagação estimado para cada classe de exposição ambiental e para cada período alvo de 50 e 100 anos (quadro 4).

Quadro 4 Períodos de propagação mínimos desde o início a corrosão até à fendilhação

Período alvo - t_g	$t_g=50$ anos	$t_g=100$ anos
Classe de exposição	t_p estimado(anos)	t_p estimado (anos)
XC1	>100	>100
XC2	10	20
XC3	45	90
XC4	Região seca 15	Região seca 20
	Região húmida 5	Região húmida 10

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS DE ENSAIOS

Foram realizadas diferentes composições de betão de forma a cumprir os limites da especificação prescritiva da LNEC E464 [4] com base nas classes de exposição ambiental XC3 e XC4. O trabalho experimental desenvolvido teve por objectivo a determinação da resistência à compressão e da resistência à penetração acelerada de CO_2 , cujos resultados foram incluídos nos modelos matemáticos da especificação de desempenho LNEC E465 [5] com o objectivo de estimar a vida útil das composições estudadas sujeitas à acção referente às classes de exposição mencionadas.

5.1 Composições de betão

O quadro 6 apresenta os diferentes tipos de cimento usados nas quatro composições estudadas, bem como a dosagem de cimento e a relação água/ligante.

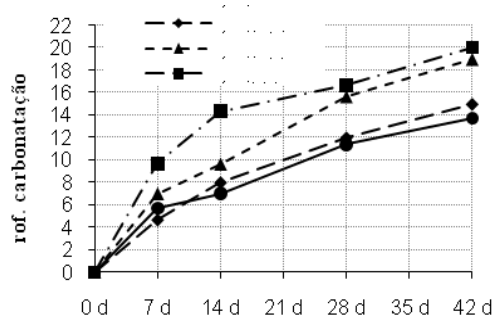
Quadro 5. Composição de betões. Classes de exposição XC3 e XC4

Tipo de cimento	Constituintes	Dosagem kg/m^3	A/L
CEM I	>95% clínquer	320	0,60
CEM II/A-L	14% filler; >81% clínquer	320	0,60
CEM II/A-V	15% cinzas; >80% clínquer	320	0,60
CEM IV/B-V	40% cinzas; >55% clínquer	320	0,55

5.2 Resultados dos ensaios

A figura 1 apresenta o desempenho das composições analisadas no que respeita à carbonatação acelerada e o quadro 8 apresenta a resistência à compressão no seu valor característico de quantil de 5% f_{ck} , o coeficiente de carbonatação k e a resistência à carbonatação R_{C65} . Com base em regressões lineares, k e R_{C65} são obtidos para cada composição a partir de (5) e (8).

a) Função do tempo



b) Função de raiz do tempo – regressão linear

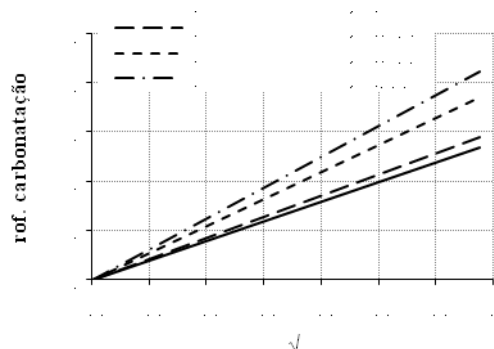


Figura 1 Resultados de carbonatação acelerada.

Perante a figura 1 e o quadro 6 o desempenho das composições aos 28 dias é distinto. As composições de betão com cinzas volantes (CEM II/A-V e CEM IV/B-V) demonstram que a resistência à carbonatação é significativamente inferior às composições CEM I e CEM II/A-L.

Quadro 6 – Caracterização experimental do betão. Resultados.

Composição	Resistência compressão - f_{ck} MPa	Coefficiente de carbonatação - k mm/ $\sqrt{\text{ano}}$	Resistência à carbonatação - R_{C65} kg ano/ m^5
CEM I	42.5	39.6	114.7
CEM II/A-L	47.7	42.4	100.2
CEM II/A-V	38.0	54.4	60.7
CEM IV/B-V	46.0	62.0	46.8

* $f_{ck} = f_{cm} - 1.645 s$, sendo f_{cm} o valor médio de resistência à compressão e s o desvio padrão.

6. RESULTADOS DAS METODOLOGIAS DE DESEMPENHO – ANÁLISE DE VIDA ÚTIL

6.1 Abordagem semi-probabilística

Esta abordagem tem por base a equação (10) do período de iniciação utilizando os parâmetros da especificação de desempenho LNEC E465 [5], através de cálculo determinístico equivalente a uma abordagem probabilística.

Com efeito, para determinação do período de vida útil o resultado da equação (10) é dividido pelo factor de segurança (secção 2) em função da classe de fiabilidade pretendida e acrescido do mínimo período de propagação (quadro 4).

6.1.1 Resultados semi-probabilísticos (E465) vs períodos alvo da metodologia prescritiva (E464)

Os quadros 9 e 10 expressam os valores de projecto da vida útil de estruturas de betão armado para as classes de exposição XC3 e XC4.

Os resultados apresentados no quadro 7 indicam que os valores para a classe XC3 coincidem com os valores alvo de 50 e 100 anos. Quanto à classe XC4 (quadro 8), os resultados demonstram que as composições CEM I e II/A-L (14% de filer calcário) cumprem os períodos alvo pretendidos, enquanto as composições com cinzas (CEM II/A-V e CEM IV/B-V) se afastam destes.

Quadro 7. Classe XC3. Vida útil para a classe de fiabilidade RC2

Composição	R_{C65} $kg.ano/m^5$	Período alvo $t_g = 50$ anos:				Período alvo $t_g = 100$ anos:			
		$c_{min,dur} = 25$ mm.				$c_{min,dur} = 35$ mm.			
		t_p	t_{ic}	t_i	t_L	t_p	t_{ic}	t_i	t_L
		anos	anos	anos	anos	anos	anos	anos	anos
CEM I	115	45	25	11	56	90	51	22	112
CEM II/A-L	100	45	22	10	55	90	44	19	109
CEM II/A-V	61	45	13	6	51	90	26	11	101
CEM IV/B-V	47	45	10	4	49	90	20	9	99

t_p – período de propagação obtido de (quadro 4)

p

t_{ic} – período de iniciação obtido de (6)

i

$t = t_p / \gamma$ – período de iniciação de projecto

i

$t_L = t + t_p$ – período de vida útil de projecto

L

p

Enquanto a classe XC3 se refere a ambientes moderadamente húmidos, a classe XC4 está associada a ciclos de molhagem/secagem, que afectam (reduzem) de forma significativa o período de propagação. Porém, a ocorrência destes ciclos de molhagem/secagem numa estrutura de betão armado podem ter lugar em diferentes circunstâncias dependendo da presença de humidade relativa. Deste modo são definidos valores de período de propagação diferentes considerando uma região húmida ou seca.

Quadro 8. Classe XC4. Vida útil para a classe de fiabilidade RC2

Composição	R_{C65}	Período alvo $t_g = 50$ anos:				Período alvo $t_g = 100$ anos:				Região
		$c_{min,dur} = 30$ mm.				$c_{min,dur} = 40$ mm.				
		t_p	t_{ic}	t_i	t_L	t_p	t_{ic}	t_i	t_L	
	$kg.ano/m^5$	anos	anos	anos	anos	anos	anos	anos	anos	
CEM I	115	5	139	60	65	10	277	121	131	Húmida
		15			75	20			141	Seca
CEM II/A-L	100	5	118	51	56	10	236	102	112	Húmida
		15			66	20			122	Seca
CEM II/A-V	61	5	64	28	33	10	129	56	66	Húmida
		15			43	20			76	Seca
CEM IV/B-V	47	5	47	20	25	10	94	41	51	Húmida
		15			35	20			61	Seca

6.2 Abordagem probabilística

A abordagem probabilística é baseada nas equações e parâmetros definidos na especificação de desempenho LNEC E465 [5] do mesmo modo que a semi-probabilística. Todavia, os resultados de vida útil t_L são obtidos considerando a probabilidade de falha requerida (secção 2) que corresponde à probabilidade em que a soma dos períodos de iniciação e propagação são inferiores ao período alvo pretendido:

$$P_f = P[t_L < t_g] \quad (9)$$

A determinação dos resultados de tempo de vida útil foi efectuada através do método de Monte Carlo usando 10000 simulações. A modelação foi definida pela função de estado limite (10) e pelas variáveis definidas em função da sua natureza estatística e respectivos parâmetros (quadro 9).

*Vida útil de estruturas de betão armado face à carbonatação.
Prescrição (LNEC E464) vs Desempenho (LNEC E465)*

$$g(X) = t_L - t_g = \left[\left[\frac{R_{C65} c^2}{1,4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}} \right]^{\frac{1}{1-2n}} + \frac{k \phi_0}{1,15 \alpha I_{corr}} \right] - t_g \quad (10)$$

A probabilidade de falha pode ser expressa pela probabilidade da função de estado limite ser negativa:

$$P_f = P[g(X) < 0] \quad (11)$$

No cálculo probabilístico, cada uma das variáveis foi considerada na modelação matemática com o seu valor médio e a respectiva lei de distribuição estatística com base em [1, 10, 18, 19]. O valor médio da resistência à carbonatação R_{C65} e o correspondente coeficiente de variação (CV) foram obtidos com base nos resultados do programa experimental (secção 6.2). O diâmetro utilizado para as armaduras foi de 20 mm, os valores médios e de CV para a tensão de tracção por compressão diametral f_{cd} e para a taxa de corrosão I_{corr} foram obtidos de [5].

Quadro 9. Descrição estatística das variáveis aleatórias

Variável	unidades	Valores médios		CV	Distribuição
		XC3	XC4		
Resistência carbonatação, R_{C65}	kg.ano/m ⁵	114; 100; 61; 47		0,25	Normal
Recobrimento, c	mm	35; 45*	40; 50*	0,25	Log-normal
Taxa de corrosão, I_{corr}	μA/cm ²	0,1	1,0	0,25	Normal
Tensão de tracção por compressão, f_{cd}	MPa		2,0	0,20	Normal
Incerteza do modelo – Eq. (6) e (7)	-		1,0	0,15	Normal

*associado aos períodos alvo t_g de 50 e 100 anos, respectivamente.

6.2.1 Resultados probabilísticos vs períodos alvo da metodologia prescritiva (E464)

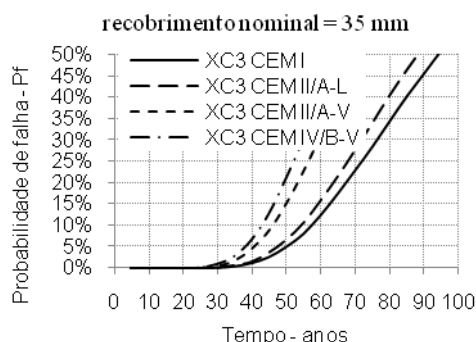
O desempenho das composições analisadas é expresso na figura 2, como resultado do programa experimental e da implementação do cálculo probabilístico.

No que se refere à classes de exposição XC3 e o período alvo de 50 anos, os resultados conduziram a menos de 5% de probabilidade de falha nos casos das composições CEM I e CEM II/A-L. As composições CEM II/A-V e CEM IV/A-V apresentaram valores de 15 e 20%, respectivamente, de probabilidade de falha, ultrapassando os limites definidos pelas três classes de fiabilidade.

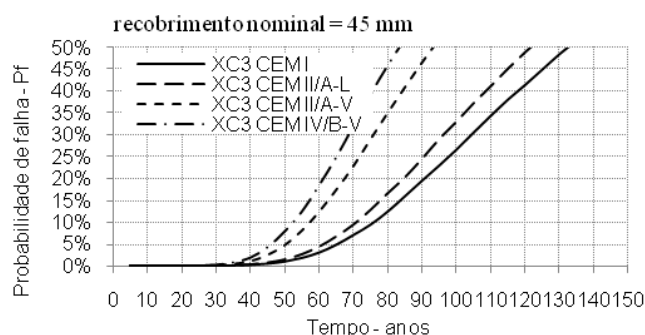
Para um período alvo de 50 anos e classe de fiabilidade RC2, as composições CEM I e II/A-L alcançam períodos de vida útil esperados de 55 e 50 anos respectivamente, enquanto as restantes atingem os 40 anos. Para um período alvo de 100 anos os valores obtidos são, respectivamente, 70 e 65 anos (CEM I e CEM II/A-L) e 53 e 50 anos (CEM II/A-V e CEM IV/A-V).

Relativamente à classe de exposição XC4, a diferença de resultados entre as composições sem e com cinzas volantes revela-se mais acentuada quando comparada com a classe XC3. Para a classe de fiabilidade RC2 as primeiras atingem valores de 85 e 70 anos e as últimas 43 e 32 anos.

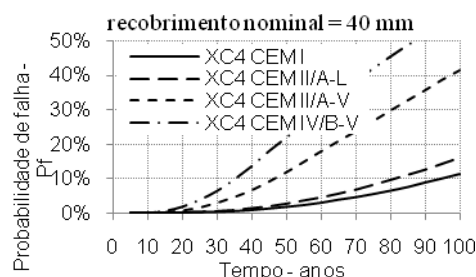
a) Classe de exposição XC3 – $t_g = 50$ anos



b) Classe de exposição XC3 – $t_g = 100$ anos



c) Classe de exposição XC4 – $t_g = 50$ anos



d) Classe de exposição XC4 – $t_g = 100$ anos

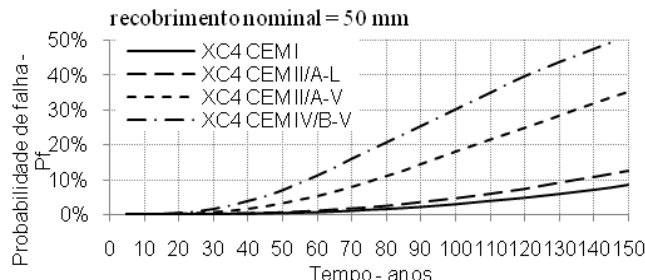


Fig. 2. Resultados de probabilidade de falha vs. Tempo

6.3 Abordagens de desempenho – Semi-probabilística vs Probabilística

Apesar de na abordagem semi-probabilística o resultado final ser obtido usando a equação (6) divididas pelos factores de segurança mais o período de propagação mínimo (quadro 4), o valor de recobrimento incluído nesta equação é o $c_{min,dur}$, que não é um valor médio mas sim um valor característico considerando uma distribuição normal e um desvio padrão de 6 mm.

Por outro lado, a abordagem probabilística considera o valor de recobrimento médio (nominal) com um CV de 0,25. Tem ainda em consideração a incerteza do modelo e a implementação na sua modelação o cálculo do período de propagação, o que a abordagem semi-probabilística [5] não faz.

Quadro 10 – Comparação entre as duas abordagens de desempenho. Classe de fiabilidade RC2.
Semiprobabilístico / Probabilístico

Composition	XC3		XC4 – Regiões húmidas		XC4 – Regiões secas	
	$t_g=50$ anos S.P. / P.	$t_g=100$ anos S.P. / P.	$t_g=50$ anos S.P. / P.	$t_g=100$ anos S.P. / P.	$t_g=50$ anos S.P. / P.	$t_g=100$ anos S.P. / P.
CEM I	1,02	1,74	0,76	0,95	0,88	1,02
CEM II/A-L	1,10	1,67	0,80	0,96	0,94	1,04
CEM II/A-V	1,19	1,91	0,77	0,99	1,00	1,13
CEM IV/B-V	1,23	1,98	0,78	0,96	1,09	1,15

S.P. – Abordagem semi-probabilística

P. – Abordagem probabilística

De acordo com os resultados expressos no quadro 10, é possível verificar que, exceptuando a classe XC3 para um período alvo de 100 anos, existe convergência de resultados entre as ambas as abordagens. A maior diferença referente à classe XC3 para um período alvo de 100 anos reside na definição, pela abordagem semi-probabilística, de um período de propagação t_p de 90 anos (quadro 4) que se traduz no dobro do definido para um período alvo de 50 anos para mesma classe de exposição.

No que respeita à classe de exposição XC4 os resultados da relação entre as duas abordagens varia entre aproximadamente 0,80 e 1,10.

7. CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo acerca da convergência das metodologias prescritiva – LNEC E464 – e de desempenho – LNEC E465 – relativo a composições com diferentes tipos de cimento de acordo com a NP EN 197-1 sujeitas à acção da carbonatação.

Os resultados experimentais, após 28 dias de condicionamento, mostram que as composições com cinzas volantes (CEM II/A-V e CEM IV/B-V) apresentam cerca de metade da resistência à carbonatação das composições com clínquer e filer calcário, apesar da resistência à compressão não apresentar a mesma tendência.

Com base nos resultados de vida útil, as composições prescritas com cinzas volantes não atingem o desempenho pretendido (aos 28 dias de idade) na maior parte dos casos.

Quando consideradas ambas as abordagens de desempenho os resultados demonstram que há uma convergência generalizada, com excepção da classe XC3 para um período alvo de 100 anos.

Ainda assim, considera-se necessário um estudo mais abrangente de composições com diferentes tipos e dosagens de cimento tanto em laboratório como *in situ*.

8. REFERÊNCIAS

- [1] FIB Bulletin 34. Model code for service life design. Lausanne. 2006.
- [2] CEB Bulletin 238. New approach to durability design.. Lausanne. 1997.
- [3] NP EN 206-1. Betão – Parte 1: Especific., desemp., produção e conformidade. IPQ. Lisboa. 2007.
- [4] LNEC E464. Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa. 2007.
- [5] 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.
- [6] EN 1990. Eurocode 0. Bases of structural design, CEN, Brussels. 2002.
- [7] RILEM Report 14. Durability design of concrete structures, E&FN Spon. 1996.
- [8] EN 1992-1-1. Eurocode 2. Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels. 2004.
- [9] NP ENV 13670-1. Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras gerais, IPQ, Lisboa. 2005.
- [10] Ferreira RM. Probability based durability analysis of concrete structures in marine environment, PhD Thesis, Guimarães, Portugal. 2004.
- [11] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete, Swedish Cem. and Conc. Res. Inst., Stockholm. 1982.
- [12] Broomfield P. Corrosion of steel in concrete, E&FN Spon. 1997.
- [13] Alonso C, Andrade C, Rodriguez J, Diaz JM. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion, Materials and Structures, 1998; 31; 435-1.

- [14] Thoft-Christensen P. FEM modelling of the evolution of corrosion cracks in RC structures. In: Maes M, Hayse L, Editors. Proc. 11th IFIPWG7.5. Banff, Canada. 2004. p. 221-8.
- [15] Bhargava K, Ghosh AK, Mori Y, Ramanujam S. Model for cover cracking as a due to bar corrosion in RC structures, *Engineering Structures*, 2006; 28(8): 1093-109.
- [16] Andrade C, Alonso C, Molina FJ. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 – Experimental test, *Materials and Structures*, 1993; 26: p.453-64.
- [17] NP EN 197-1. Cimento – Parte 1: Cimento. Composição, especificações e critérios de conformidade, IPQ, Lisboa. 2005.
- [18] Duracrete. Probab. perf. based durability design of concrete structures. Brite EuRam. 2000.
- [19] Lindvall A. Environmental actions on concrete exposed to marine and road environments and its response. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg.2003.