

Estimativa semiprobabilística da vida útil de betões estruturais de agregados leves sujeitos a corrosão induzida por carbonatação

Semi-probabilistic service life estimation of lightweight aggregate concrete subjected to carbonation induced corrosion

Sofia Real
José A. Bogas

Resumo

O presente artigo aborda a estimativa semiprobabilística da vida útil dos betões estruturais de agregados leves (BEAL) sujeitos a carbonatação, com base num extenso trabalho experimental anteriormente realizado em BEAL com diferentes relações água/ligante, tipos de agregado e tipos e volumes de ligante. Tendo em consideração a metodologia da LNEC E465 (2007), são apresentados ábacos de previsão de vida útil dos BEAL com agregados leves de diversas massas volúmicas em função da relação água/cimento, para diferentes recobrimentos nominais. Seguindo a metodologia definida na NP EN 206 (2013) e na LNEC E464 (2007), são sugeridos limites de composição para BEAL sujeitos a diferentes classes de exposição para satisfazer uma vida útil prevista de 50 anos. Mesmo quando são consideradas pastas de baixa a moderada qualidade, a corrosão induzida por carbonatação não deverá ser o mecanismo determinante para a vida útil de estruturas de BEAL, desde que sejam adotados recobrimentos apropriados.

Abstract

This paper discusses the semi-probabilistic service life estimation of structural lightweight aggregate concrete (SLWAC) subjected to carbonation induced corrosion, based on an extensive experimental campaign previously performed on SLWAC with different water/binder ratios, types of aggregate and types and volumes of binder. Taking into consideration LNEC E465 (2007) methodology, abacuses for service life prediction of SLWAC with lightweight aggregates of different density as a function of the water/cement ratio are presented, for various nominal covers. Following the methodology defined in NP EN 206 (2013) and LNEC E464 (2007), composition limits for SLWAC subjected to different environmental exposure classes are suggested, for an intended service life of 50 years. Even when pastes of low to moderate quality are considered, carbonation induced corrosion should not be a decisive mechanism for the service life of SLWAC structures, as long as appropriate covers are considered.

Palavras-chave: Betão estrutural de agregados leves / Vida útil / Corrosão induzida por carbonatação

Keywords: Structural lightweight aggregate concrete / Service life / Carbonation induced corrosion

Sofia Real

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
sofia.real@tecnico.ulisboa.pt

José A. Bogas

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

REAL, S. [et al.] – Estimativa semiprobabilística da vida útil de betões estruturais de agregados leves sujeitos a corrosão induzida por carbonatação. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 7-16.

1 Introdução

A previsão de vida útil de estruturas de betão pode ser dividida em metodologias prescritivas e baseadas no desempenho. A maioria dos documentos normativos relativos à durabilidade baseiam-se em metodologias prescritivas, que implicam a especificação de limites de parâmetros como a relação água/cimento (a/c), resistência à compressão, tipo e teor de ligante, dependendo da classe de exposição, recobrimento e vida útil prevista. Esta abordagem é adotada pelo Anexo F da norma portuguesa NP EN 206 [1], em que são estabelecidas as composições prescritas para betões de massa volúmica normal (BAN) com CEM I para uma vida útil de 50 anos. No entanto, o conhecimento da vida útil dos betões estruturais de agregados leves (BEAL) ainda é reduzido. Além disso, não existem estudos fundamentados que validem os valores prescritos por esta norma.

Nas últimas décadas, têm sido desenvolvidos e implementados modelos de vida útil baseados no desempenho [2]: os documentos normativos fib34 [3], CEB238 [4], RILEM Report 14 [5], ACI 365.1R [6] e Duracrete R17 [7], entre outros. Nestes documentos, a previsão de vida útil baseia-se na teoria dos estados limite adotada no projeto estrutural. Com base no modelo de Tuutti, a despassivação das armaduras pode ser considerada um estado limite de serviço para a corrosão induzida por carbonatação [8]. A vida útil de uma estrutura de betão armado, associada a um nível de deterioração aceitável, pode ser obtida através da soma do período de iniciação e do período de propagação até que o estado limite de serviço seja atingido. Têm sido propostos vários modelos para corrosão induzida por carbonatação dos BAN [7, 9, 10], com base no princípio de que a corrosão se inicia quando a frente de carbonatação atinge as armaduras. Com base no método dos fatores de segurança, a metodologia de projeto de vida útil adotada neste estudo encontra-se associada à probabilidade máxima aceitável, P_a , de não excedência da vida útil pretendida, t_L (Equação (1)).

$$P\{t_L < t\} \leq P_a \quad (1)$$

Com base numa extensa campanha experimental envolvendo a resistência à carbonatação dos BEAL [11], este estudo pretende analisar a vida útil de BEAL com diferentes tipos de agregado, sujeitos a corrosão induzida por carbonatação. A previsão de vida útil é realizada de acordo com um modelo baseado no desempenho sugerido pela especificação LNEC E465 [12]. Assim, são apresentados ábacos de previsão de vida útil de BEAL em função da relação água/cimento, para diferentes recobrimentos. Finalmente, com base na análise de vida útil realizada, são sugeridos limites de composição para BEAL e BAN sujeitos a diferentes classes de exposição em ambiente de carbonatação, de acordo com a NP EN 206 [1], de modo a satisfazer uma vida útil prevista de 50 anos.

2 Programa experimental

Este estudo tem como base um estudo anteriormente realizado, acerca da influência de diferentes parâmetros na resistência à carbonatação dos BEAL [11]. Para o estudo, foram selecionados quatro tipos de agregado grosso leve: dois de argila expandida de origem nacional (Leca e Argex: Argex 2-4 e Argex 3-8F); um de cinzas

Quadro 1 Caracterização dos agregados

Propriedade	Agregados leves					Agregados de massa volúmica normal			
	Leca	Argex 2-4	Argex 3-8F	Lytag	Stalite	Bago de Arroz	Brita 1	Areia Fina	Areia Grossa
Massa volúmica seca (kg/m ³)	1076	669	597	1338	1483	2646	2683	2605	2617
Baridade seca (kg/m ³)	624	377	330	750	760	1309	1346	1569	1708
Absorção às 24h (%)	15,8	21,4	19,3	17,9	3,6	0,7	0,4	0,2	0,3
Fração granulométrica (d_i/D_i)*	4/11,2	4/8	4/11,2	4/11,2	8/16	0/8	4/11,2	0/1	0/4
Porosidade aberta (%)	40,7	55,5	58,0	39,8	14,9	–	–	–	–

* d_i – dimensão mínima do agregado; D_i – dimensão máxima do agregado

volantes sinterizadas (ALCS) proveniente de Inglaterra (Lytag); e um de ardósia expandida proveniente dos EUA (Stalite). As principais características destes agregados com porosidades bastante distintas são indicadas no Quadro 1. Para os betões de referência produzidos com agregados grossos de massa volúmica normal, foram selecionadas duas britas calcárias de diferente granulometria (Bago de arroz e Brita 1, Quadro 1). Tanto as duas frações de Argex como as de brita calcária foram posteriormente combinadas de modo a possuírem granulometria idêntica à dos restantes agregados grossos leves (66% Brita 1 e 34% Bago de Arroz; 30% Argex 3-8F e 70% Argex 2-4). Todos os betões foram produzidos com areia natural siliciosa, correspondendo a cerca de 30% de Areia Fina e 70% de Areia Grossa. Na produção dos betões foi utilizado cimento tipo I 42,5R, cinzas volantes (Cz), sílica de fumo (SF) e filler calcário (FL) [11]. Nas misturas de maior compactidade, foi ainda utilizado um superplastificante de base policarboxilica.

Para cada tipo de agregado, os betões foram produzidos tendo em consideração diferentes relações a/l e tipos e volumes de ligante, conforme referido em Bogas *et al.* [11]. Os betões foram produzidos com 350 L/m³ de agregado grosso com uma dimensão máxima de 11,2 mm. Em média, foi utilizado 0,3% da massa de cimento de superplastificante em misturas com relação a/c de 0,45. Os betões foram produzidos de acordo com o referido por Bogas *et al.* [11]. Para cada mistura, foram produzidos provetes cilíndricos de $\phi 105 \times 50$ mm, seccionados de cilindros de 250 mm de altura, para determinação da resistência à carbonatação de acordo com a especificação LNEC E391 [13]. Após desmoldagem às 24 horas, os provetes foram sujeitos a 6 dias de cura húmida. Após a cura húmida, os cilindros foram seccionados e colocados em câmara controlada a 20 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ HR até aos 28 dias. De seguida, procedeu-se à impermeabilização das duas faces dos provetes, de modo a garantir apenas a penetração radial de CO₂. Os ensaios foram realizados numa câmara de carbonatação acelerada a $60 \pm 5\%$ HR, 23 ± 3 °C e $3 \pm 0,1\%$ CO₂. Os provetes foram retirados da câmara de carbonatação às seguintes idades: 28, 91, 182, 273 dias e 1 ano, para betões com relação a/c de 0,45; 7, 28, 91, 119, 182, 273 dias e 1 ano, para betões com relação a/c de 0,55; 7, 14, 28, 56, 91 e 119 dias para betões com relação a/c de 0,65. Após serem retirados da câmara, cada provete foi partido em 4 partes, tendo

as superfícies sido pulverizadas com uma solução de fenolftaleína a 0,2%.

A profundidade de carbonatação foi obtida através da medição da largura da área carbonatada do betão que corresponde à zona não colorida do betão. A zona rosada do betão corresponde à área não carbonatada, em que o pH é superior a 9. Com base na primeira lei de difusão de Fick, a profundidade de carbonatação, x_c , no tempo, t , pode ser definida de acordo com a Equação 2, onde K_c é o coeficiente de carbonatação obtido por regressão linear entre x_c e t^n , sendo n usualmente assumido de valor 0,5, especialmente para condições de ensaio constantes no tempo [14].

$$x_c = x_0 + K_c \times t^n \quad (2)$$

3 Metodologia semiprobabilística da E 465

3.1 Metodologia geral de projeto de durabilidade

A norma portuguesa NP EN 206 [1] remete o projeto de durabilidade de estruturas de betão através de metodologias prescritivas e baseadas no desempenho para as especificações LNEC E464 [13] e E465 [12], respetivamente. A especificação LNEC E 465 [12] segue a metodologia semiprobabilística do RILEM Report 14 [5], enquadrada na abordagem dos fatores parciais de segurança da EN 1990 [15]. A vida útil pretendida, t_d , é afetada de um fator de segurança, γ , através da Equação (3), em que t_l é a vida útil de cálculo, t_i é o período de iniciação e t_p é o período de propagação. A norma europeia EN 1990 [15] estabelece as classes de fiabilidade RC1, RC2 e RC3, associadas a índices mínimos de fiabilidade, β , de 1,2, 1,5 e 2,0, a que correspondem os fatores de segurança para estado limite de utilização, g , de 2,0, 2,3 e 2,8, respetivamente. Os β estão associados a uma probabilidade máxima de falha, P_f , de $11,5 \times 10^{-2}$, $6,7 \times 10^{-2}$ e $2,3 \times 10^{-2}$, respetivamente (Equação (4)). Na determinação dos fatores parciais de segurança, assume-se que t_l é representada por uma distribuição log-normal com um coeficiente de variação de 0,5.

$$t_l = \gamma t_d = \gamma (t_i + t_p) \quad (3)$$

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

Além disso, o estado limite de serviço é definido como fendilhação do betão por corrosão das armaduras, de forma a permitir a estimativa do t_p , de acordo com o modelo de Tuutti [16], para as classes XC1 a XC4 definidas na NP EN 206 [1]. A metodologia da E 465 [12] consiste na estimativa do t_p e na determinação do período de iniciação de projeto, t_{ic} , garantindo o cumprimento da Equação (5).

$$t_{ic} = \gamma t_i = \gamma (t_g - t_p) \quad (5)$$

3.2 Modelação do período de iniciação

De acordo com a E465 [12], o modelo de previsão do período de iniciação aplicado neste estudo baseia-se na primeira lei de Fick, assumindo fluxo de CO₂ estacionário de concentração na atmosfera constante igual a $0,7 \times 10^3$ kg/m³, segundo a Equação (6), em que R_{ca} corresponde à resistência à carbonatação (kg.ano/m⁵), k_0 o fator relativo às condições de ensaio ($k_0 = 3$), k_1 o fator que tem em conta a humidade relativa do betão e n o fator que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo (Quadro 2), k_2 o fator que considera a influência da cura ($k_2 = 1$, para cura normalizada), t_0 o período de referência ($t_0 = 1$ ano) e c o recobrimento (m), correspondendo ao recobrimento mínimo, $c_{min,dur}$ definido na norma europeia EN 1992-1-1 [17] para cada classe de exposição, assumindo uma classe estrutural S4 associada a uma vida útil pretendida de 50 anos (Quadro 2). De acordo com a EN 1992-1-1 [17], o recobrimento nominal, c_{nom} , corresponde à soma do recobrimento mínimo, $c_{min,dur}$ e do desvio esperado, Δc_{dev} (recomendado 10 mm).

$$R_{ca} = \frac{1,4 \times 10^{-3} t_{ic} k_0 k_1 k_2 \left(\frac{t_0}{t_{ic}}\right)^{2n}}{c^2} \Leftrightarrow t_{ic} = \left(\frac{R_{ca} c^2}{1,4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}}\right)^{\frac{1}{1-2n}} \quad (6)$$

Quadro 2 Parâmetros ambientais, k_1 e n , tempo de propagação, t_p , estimado para t_g de 50 anos, de acordo com a E465 [12], e recobrimento mínimo, $c_{min,dur}$ de acordo com a EN 1992-1-1 [17]

Classe de exposição	Parâmetros ambientais		t_p (anos)	$c_{min,dur}$ * (mm)
	k_1	n		
XC1	1	0	>100	15
XC2	0,2	0,18	10	25
XC3	0,77	0,02	45	25
XC4	0,41	0,09	15 (região seca) 5 (região húmida)	30

* $c_{min,dur}$ definido para classe estrutural S4

3.3 Modelação do período de propagação

O modelo considerado na E465 [12] para a estimativa do período de propagação baseia-se na intensidade de corrente eletroquímica, de forma a estimar períodos de propagação mínimos. Este modelo

recorre à lei de Faraday para a estimativa do período de propagação, t_p , através da Equação (7), onde ϕ_0 é o diâmetro inicial das armaduras (mm), α um fator de valor 2 para corrosão induzida por carbonatação e I_{cor} a intensidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). A redução do raio das armaduras, k , que provoca o início da fissuração é dada pela Equação (8), em que c é o recobrimento (mm), ϕ_0 o diâmetro inicial das armaduras passivas e f_{cd} a resistência à compressão diametral do betão (MPa).

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

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

Os períodos de propagação mínimos recomendados pela E 465 [12] para cada classe de exposição e uma vida útil pretendida de 50 anos encontram-se no Quadro 2.

4 Análise e discussão de resultados

4.1 Estudo anterior da resistência à carbonatação [11]

Num estudo anterior [11], foram estabelecidas relações entre o coeficiente de carbonatação acelerada, K_{ca} , e a relação a/c, por tipo de agregado. Com base nos resultados obtidos, foi sugerido um modelo bifásico que descreve a resistência à carbonatação dos BEAL, tendo sido analisados dois coeficientes de carbonatação, K_{c1} e K_{c2} , correspondentes às fases 1 e 2 do modelo bifásico, respetivamente. O modelo propõe que até que a frente de carbonatação ultrapasse uma camada de $D_{max}/2$ a D_{max} (dimensão máxima do agregado grosso) e atinja os AL, a taxa de carbonatação dos BEAL é semelhante à dos BAN da mesma composição, K_{c1} . Após esta fase, a taxa de carbonatação, K_{c2} , depende do tipo de agregado. Considerou-se razoável e conservativo considerar a contribuição da fase 1 apenas nos BEAL com relação a/c inferior a 0,5.

Os resultados obtidos evidenciaram uma maior participação dos AL na taxa de carbonatação com o incremento da relação a/c. Em geral, a redução da massa volúmica dos AL conduziu a K_{c2} mais elevados nos BEAL correspondentes. Assim, tipificou-se o comportamento dos BEAL de acordo com a origem e massa volúmica dos AL, tendo-se distinguido as seguintes classes para AL expandidos (ALE): $\rho_{AL} < 1000$ kg/m³ (AL de porosidade elevada); $1000 < \rho_{AL} < 1400$ kg/m³ (AL de porosidade moderada); $\rho_{AL} > 1400$ kg/m³ (AL de porosidade reduzida); e para ALCs: $\rho_{AL} > 1300$ kg/m³. A partir dos resultados obtidos, foi possível estimar a resistência à carbonatação, R_{ca} , acelerada, em função da relação a/c, para cada tipo de agregado (Equação (9), Quadro 3). Na Equação (9), R_{ca} corresponde ao quociente do dobro da concentração de CO₂ na câmara de carbonatação acelerada (54×10^{-3} kg/m³ para 3% de CO₂) e do quadrado do coeficiente de carbonatação, K_{ca} . A R_{ca} foi obtida assumindo que os BEAL se encontram em fase 2 (K_{c2}), tendo-se desprezado o potencial contributo da fase 1. Os BAN foram calculados de acordo com a fase 1 (K_{c1}).

$$R_{ca} = \frac{0,108}{[f(a/c) \times 10^{-3}]^2} \text{ (kg.ano/m}^5\text{)} \quad (9)$$

Quadro 3 $f(a/c)$ para estimativa de R_{ca} na Equação (9)

Tipo de agregado	Classe de massa volúmica	K_{c1} (mm/ano ^{0,5}) a/c < 0,45	K_{c2} (mm/ano ^{0,5})
ALE	$\rho_{AL} < 1000 \text{ kg/m}^3$	136,7(a/c) - 54,4	220,8(a/c) - 81,1
	$1000 < \rho_{AL} < 1400 \text{ kg/m}^3$		181,9(a/c) - 67,4
	$1000 < \rho_{AL} < 1400 \text{ kg/m}^3$	(para a/c > 0,45, K_{c1} é desprezado)	128,0(a/c) - 43,1
ALCS	$\rho_{AL} > 1300 \text{ kg/m}^3$		159,2(a/c) - 50,3

4.2 Previsão de vida útil de acordo com a E465 [12]

A vida útil dos BEAL mais comuns sujeitos a corrosão induzida por carbonatação foi estimada de acordo com a metodologia semiprobabilística da E465 [12]. Esta metodologia de fatores parciais de segurança baseia-se na Equação (6) para modelar o período de iniciação, t_i , que depois é dividido por um fator de segurança, γ , associado a um nível de fiabilidade e somado a um período mínimo de propagação, t_p , dado pelo Quadro 2, de forma a obter a vida útil pretendida, t_g , de acordo com a Equação (10), decorrente das Equações (3) e (5).

$$t_g = \frac{t_i}{\gamma} + t_p \quad (10)$$

Assim, com base na metodologia da E465 [12], foram definidos ábacos para previsão da vida útil dos BEAL com diferentes tipos de agregado, em função da sua relação a/c ou do coeficiente de carbonatação acelerado e a resistência à carbonatação (Figuras A.1-A.4, em Anexo). A determinação da vida útil foi realizada para as diversas classes de exposição, exceto para XC1, que corresponde a condições que não são relevantes para a corrosão induzida por carbonatação, com períodos de propagação superiores a 100 anos. Apenas foi considerada a classe de fiabilidade RC2, associada à probabilidade máxima de falha de 6,7%, com um fator de segurança de 2,3, para uma vida útil pretendida de 50 anos. Esta análise foi realizada para diferentes recobrimentos nominais ($20 \leq c_{nom} \leq 60 \text{ mm}$), tendo o c_{nom} especificado por EN1992-1-1 [17] para cada classe de exposição sido destacado com uma curva tracejada. Além disso, apresenta-se também uma linha tracejada representativa da vida útil pretendida de 50 anos.

Tendo em conta os resultados e os recobrimentos apresentados no Quadro 2, conclui-se que os betões com relação a/c < 0,5 apresentam elevada resistência à carbonatação, conduzindo a longos períodos de iniciação, que ultrapassam largamente a vida útil pretendida, independentemente do tipo de agregado e classe de exposição. Os ábacos demonstram que os BEAL com ALE mais densos ($\rho_{AL} > 1400 \text{ kg/m}^3$) podem apresentar resistências à carbonatação consideravelmente superiores a outros tipos de BEAL, em especial com relações a/c elevadas.

O cumprimento da vida útil pretendida em betões com relações a/c intermédias está relacionado com o tipo de agregado e condições de exposição, uma vez que estas afetam diretamente a taxa de carbonatação. Tendo em conta os recobrimentos nominais de

referência, as relações a/c de 0,65, 0,55 e 0,5 conduzem a vidas úteis de BEAL com ALE de elevada porosidade ($\rho_{AL} < 1000 \text{ kg/m}^3$) superiores a 50 anos, para as classes de exposição XC2, XC3 e XC4, respetivamente. O mesmo se verifica para BEAL com ALE de porosidade intermédia ($1000 < \rho_{AL} < 1400 \text{ kg/m}^3$) com relações a/c de 0,70, 0,60 e 0,55, para BEAL com ALE de porosidade reduzida ($\rho_{AL} > 1400 \text{ kg/m}^3$) com relações a/c de 0,85, 0,65 e 0,60, para BEAL com ALCS ($\rho_{AL} > 1300 \text{ kg/m}^3$) com relações a/c de 0,70, 0,60 e 0,50 e para BAN com relações a/c de 0,85, 0,70 e 0,65, para as classes de exposição XC2, XC3 e XC4, respetivamente. De referir que os valores obtidos para os BEAL com ALCS se assemelham aos obtidos para os BEAL com ALE de porosidade moderada e que os valores obtidos para os BEAL com ALE de porosidade reduzida se aproximam dos obtidos para os BAN. Assim, desde que sejam adotados recobrimentos adequados, a carbonatação não é um mecanismo determinante para a durabilidade dos BEAL, mesmo aqueles com pastas de baixa a moderada qualidade, pelo que será pouco provável que a corrosão induzida por carbonatação seja o mecanismo dominante na estimativa de vida útil de estruturas de BEAL.

Note-se que nesta análise semiprobabilística, o efeito benéfico da fase 1 do modelo bifásico de carbonatação foi desprezado para os BEAL com relação a/c superior a 0,5. Para ter em conta o modelo bifásico, o período de iniciação, t_{ic} , deve ser estimado de acordo com a Equação (11), baseada na Equação (5), em que R_{ca1} e R_{ca2} são as resistências à carbonatação acelerada das fases 1 e 2, respetivamente, D_{max} é o diâmetro máximo do agregado grosso e os restantes parâmetros se encontram definidos em 3.2.

$$t_{ic} = \left[\left(\frac{R_{ca1} \left(\frac{D_{max}}{2} \right)^2}{1,4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}} \right)^{0,5} + \left(\frac{R_{ca2} \left(c - \frac{D_{max}}{2} \right)^2}{1,4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}} \right)^{0,5} \right]^{\frac{2}{1-2n}} \quad (11)$$

Assim, tendo em consideração o potencial contributo da fase 1, prever-se-iam maiores vidas úteis nos BEAL sujeitos a corrosão induzida por carbonatação. Por exemplo, um BEAL com AL de elevada porosidade ($\rho_{AL} < 1000 \text{ kg/m}^3$) e relação a/c de 0,45 pode apresentar a mesma resistência à carbonatação que um BAN para profundidades de carbonatação de até 5 mm ($D_{max}/2$), pelo que, para os recobrimentos do Quadro 2, a vida útil seria cerca de 1,66 (XC2), 1,17 (XC3) e 1,39 (XC4) vezes superior à obtida quando se desprezou a fase 1 do modelo bifásico.

5 Metodologia prescritiva

Com base nas equações definidas no Quadro 3 e no modelo da E 465 [12] definiram-se valores limite para a composição dos BEAL e BAN, para uma classe de fiabilidade RC2 e uma vida útil pretendida de 50 anos. Assim, no Quadro 4 apresenta-se a proposta de tabela prescritiva com base nos ensaios acelerados. Estes limites foram definidos por tipo de agregado e classe de exposição, em vez de por tipo de ligante e classe de exposição como recomendado pela NP EN 206 [1] e pela E 464 [13], uma vez que conforme anteriormente verificado a resistência à carbonatação de um betão pode ser obtida em função da relação a/c, independentemente do tipo de ligante. Os limites prescritos incluem o recobrimento nominal mínimo, a

Quadro 4 Limites de composição recomendados para BEAL e BAN sujeitos a corrosão induzida por carbonatação para uma vida útil pretendida de 50 anos (classe de fiabilidade RC2)

Tipo de agregado	CEM I; CEM II/A ^a ; CEM II/B ^b ; CEM IV/A ^c ; CEM IV/B ^d																			
	BEAL																			
	ALE								ALCS				BAN							
Classe de exposição	$\rho_{AL} > 1000 \text{ kg/m}^3$				$1000 < \rho_{AL} < 1400 \text{ kg/m}^3$				$\rho_{AL} > 1400 \text{ kg/m}^3$				$\rho_{AL} > 1400 \text{ kg/m}^3$							
Recobrimento nominal mínimo (mm)	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Recobrimento nominal mínimo (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40	25	35	35	40	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima relação a/c	0,65	0,65	0,55	0,50	0,70	0,70	0,60	0,55	0,85	0,85	0,65	0,60	0,70	0,70	0,60	0,50	0,85	0,85	0,70	0,65
Teor de ligante mínimo (kg/m ³)	320	350	350	370	320	350	350	370	320	350	350	370	320	350	350	370	260	280	280	300

a – CEM II/A-D (6 e 9% SF); CEM II/A-V (15% Cz); CEM II/A-L (15% FL); b – CEM II/B-V (30% Cz); CEM II/B-L (30% FL); c – CEM IV/A (10% SF e 20% Cz); d – CEM IV/B (10% SF e 40% Cz).

relação a/c máxima e o teor de ligante mínimo. A relação a/c máxima foi definida de acordo com os resultados dos ensaios acelerados. O recobrimento nominal mínimo foi definido de acordo com os valores recomendados pela EN1992-1-1 [17]. De forma semelhante, o teor de ligante mínimo foi estabelecido de acordo com a NP EN 206 [1] e a E 464 [13], considerando a produção de betão conforme com D_{max} até 12,5 mm, conforme usualmente considerado para os BEAL. Dado que nestes documentos os valores recomendados são referentes a betões produzidos com agregados com D_{max} entre 20 e 32 mm, o teor de ligante adotado no Quadro 4 resultou da multiplicação dos valores recomendados por um fator de 1,23, conforme sugerido pela E 464 [13].

Por outro lado, ao contrário do sugerido pela NP EN 206 [1] e pela E 464 [13], no Quadro 4 não foram prescritas classes de resistência mínimas, uma vez que, conforme verificado por Bogas *et al.* [11], a durabilidade de BEAL não deve ser caracterizada em função da resistência à compressão, sendo mais adequada a prescrição de valores limite para a relação a/c. O Quadro 4 permite concluir que, apesar de pequenas diferenças entre classes de exposição, a máxima relação a/c dos BEAL com ALE de massa volúmica reduzida e moderada deverá ser, em média, cerca de 0,20 e 0,15 inferior à dos BAN, respetivamente. No entanto, os BEAL com ALE mais densos podem ser especificados com aproximadamente os mesmos limites que os BAN, atingindo desempenhos semelhantes em termos de durabilidade. O desempenho dos BEAL com ALCS deverá ser semelhante ao dos BEAL com ALE de massa volúmica moderada.

Os valores da máxima relação a/c prescritos no Anexo F da NP EN 206 [1] para os BAN com CEM I (a/c < 0,60 para XC2; a/c < 0,55 para XC3; a/c < 0,50 para XC4) são inferiores aos indicados no Quadro 4. Os valores especificados na E 464 [13] para os BAN (a/c < 0,65 para XC2; a/c < 0,60 para XC3 e XC4) são menos conservativos que os da NP EN 206 [1] e consequentemente, apresentam menores diferenças em relação aos indicados no Quadro 4, variando cerca de 0,20 para a classe XC2 e 0,05 para

a classe XC4. De facto, de acordo com outros autores [18-20], os valores recomendados pela NP EN 206 [1] para betões com CEM I podem ser demasiado conservativos. No entanto, é necessário intensificar a investigação nesta área para validar os valores prescritos, nomeadamente tendo em conta resultados experimentais de exposição a ambiente real. Por esta razão, foram produzidos e estão a ser monitorizados provetes com as mesmas composições sujeitos a diferentes ambientes de exposição real.

6 Conclusões

No presente artigo, estimou-se a vida útil dos BEAL produzidos com diferentes tipos de ligante sujeitos a corrosão induzida por carbonatação. As principais conclusões foram:

- Avaliaram-se as equações para estimativa da resistência à carbonatação acelerada em função da relação a/c, e os resultados foram utilizados na metodologia baseada no desempenho com fatores parciais de segurança, de acordo com o sugerido pela E 465 [12], o anexo nacional da NP EN 206 [1].
- Com base na metodologia dos fatores parciais de segurança da E465 [12], estimou-se a vida útil dos BEAL e BAN sujeitos a corrosão induzida por carbonatação para as classes de exposição definidas na NP EN 206 [1], tendo resultado em ábacos de previsão de vida útil dos BEAL e BAN em função da relação a/c e da resistência à carbonatação acelerada, tendo em conta diferentes recobrimentos.
- Com base na análise de vida útil executada, foram prescritos limites de composição para cada classe de exposição, para uma vida útil prevista de 50 anos.
- Os resultados revelam que mesmo quando são consideradas pastas de baixa a moderada qualidade, a corrosão induzida por carbonatação não deverá ser o mecanismo determinante para a vida útil de estruturas de BEAL, desde que sejam adotados recobrimentos apropriados.

Agradecimentos

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECM-COM1734/2012. Os autores agradecem ainda o apoio do CERis/IST no financiamento do presente trabalho e a colaboração das empresas Saint-Gobain Weber Portugal, Argex, Stalite, Lytag, SECIL e BASF pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental. O primeiro autor gostaria de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/100397/2014.

Referências

- [1] NP EN 206 (2013) – *Betão - Especificação, desempenho, produção e conformidade*. IPQ.
- [2] RILEM TC 230-PSC (2016) – *Performance based specifications and control of concrete durability*. Beushausen H, Luco L-F (eds) RILEM State-of-the-Art Reports, Vol. 18, Springer, Netherlands, 373 p. doi: 10.1007/978-94-017-7309-6.
- [3] fib 34 (2006) – *Model code for service life design*. CEB-FIB, fib bulletin 34, 116 p.
- [4] CEB 238 (1997) – *New approach to durability design – An example for carbonation induced corrosion*. CEB, CEB bulletin 238, Switzerland, 138 p.
- [5] RILEM TC 130-CSL (1996) – *Durability design of concrete structures*. Sarja A, Vesikari E (eds) RILEM Report 14, E&FN Spon, London, UK, 165 p.
- [6] ACI 365.1R (2000) – *Service-life prediction – State-of-the-art report*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 44 p.
- [7] DuraCrete R17 (2000) – *Final Technical Report - General guidelines for durability design and redesign*, The European Union – Brite EuRam III, Document BE95-1347/R17, 138 p.
- [8] fib 3 (1999) – *Structural concrete – Textbook on behaviour, design and performance* (Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990) Vol. 3: Durability – Design for fire resistance – Member design – Maintenance, assessment and repair – Practical aspects, CEB-FIP, fib bulletin 3, 292 p.
- [9] Papadakis, V.G.; Fardis, M.N.; Vayenas, C.G. (1992) – "Hydration and carbonation of pozzolanic cements". *ACI Materials Journal*, Vol. 89, N 2, pp. 119-130.
- [10] Holm, T.A.; Bremner, T.; Vaysburd, A. (1988) – "Carbonation of marine structural lightweight concrete". In: Malhotra VM (ed) *Second International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment*, St. Andrews, NB, Canada, ACI SP 109, pp. 667-676.
- [11] Bogas, J.A.; Real, S.; Ferrer, B. (2016) – "Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 71, pp. 110-121.
- [12] LNEC E 465 (2007) – *Betões – Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- [13] LNEC E 464 (2007) – *Betões – Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*. Especificação LNEC, Lisboa, Portugal.
- [14] Kropp, J. (1995) – "Relations between transport characteristics and durability" in: J. Kropp, H.K. Hilsdorf (Eds.), *Performance Criteria for Concrete Durability – State of the art report* by Rilem Technical Committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability, Rilem Report 12, E&FN Spon, pp. 65-89.
- [15] EN 1990 (2002) – *Eurocode: Basis of structural design*. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, Belgium, 87 p.
- [16] Tuutti, K. (1982) – *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 468 p.
- [17] EN 1992-1-1 (2004) – *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, CEN, Belgium, 225 p.
- [18] Ribeiro, M.S.S.; Ribeiro, A.B.; Gonçalves, A.F. (2009) – "Resistance of concrete to carbonation, predicted and measured values in natural exposure". In: *2nd International Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning* (ConcreteLife'09), 7-9 September 2009, Haifa, Israel.
- [19] Marques, P.F.; Chastre, C.; Nunes, A. (2013) – "Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with portland and blended cements". *Cem.Conc.Comp.* Vol. 37, pp. 171-184.
- [20] Marques, P.F.; Costa, A. (2010) – "Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies". *Const.Build.Mat.* Vol. 24, pp. 258-265.

Anexo

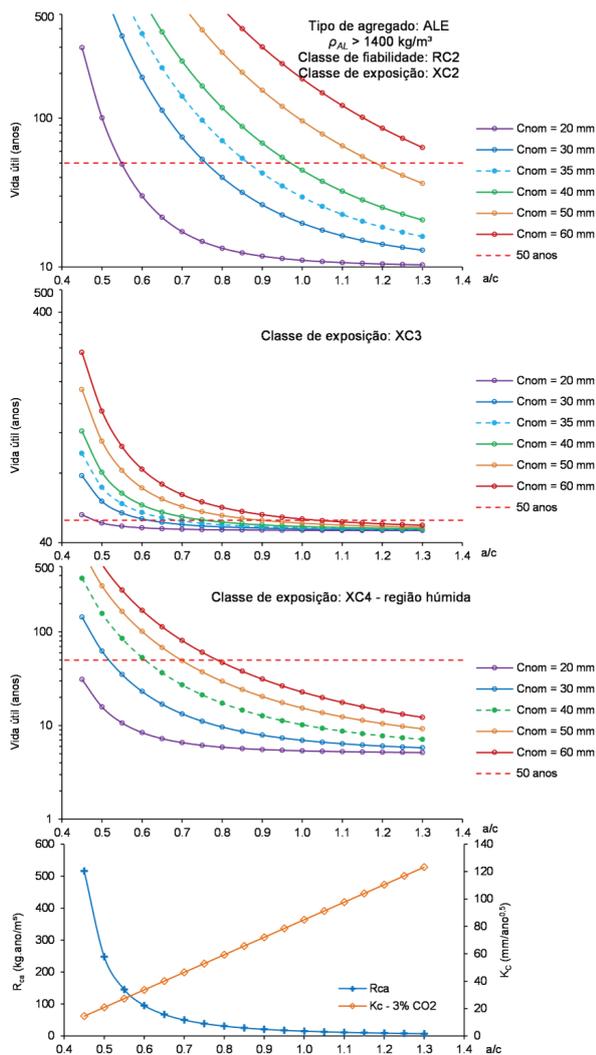


Figura A.1 Vida útil de BEAL com ALE mais densos sujeitos a XC2, XC3 e XC4 – região húmida para diferentes recobrimentos nominais, c_{nom} , em função da relação a/c, da resistência à carbonatação, R_{ca} , e do coeficiente de carbonatação acelerada a 3% de CO_2 , K_c , para uma classe de fiabilidade RC2

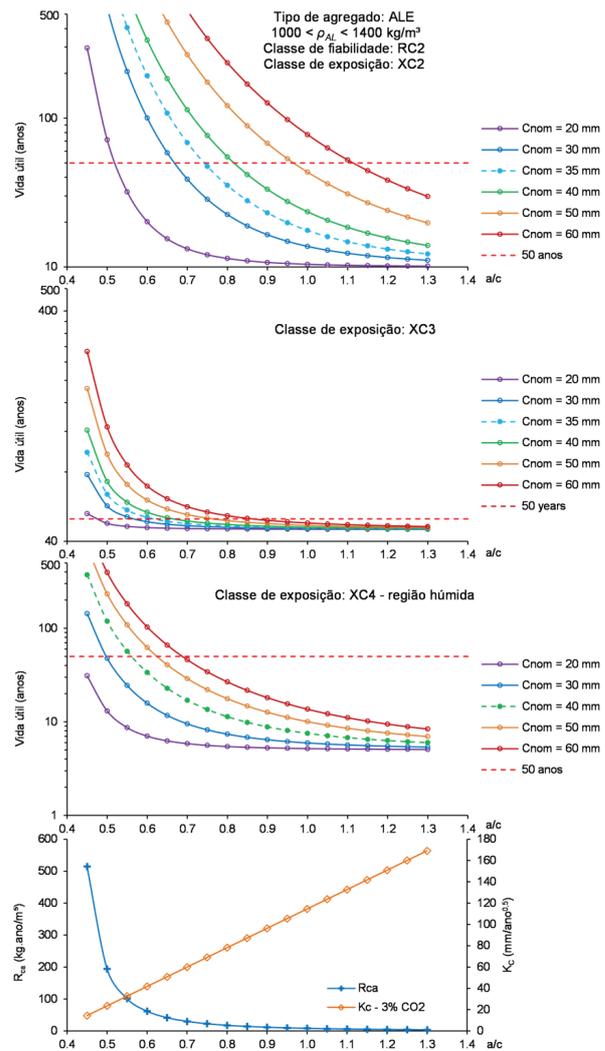


Figura A.2 Vida útil de BEAL com ALE de massa volúmica intermédia sujeitos a XC2, XC3 e XC4 – região húmida para diferentes recobrimentos nominais, c_{nom} , em função da relação a/c, da resistência à carbonatação, R_{ca} , e do coeficiente de carbonatação acelerada a 3% de CO_2 , K_c , para uma classe de fiabilidade RC2

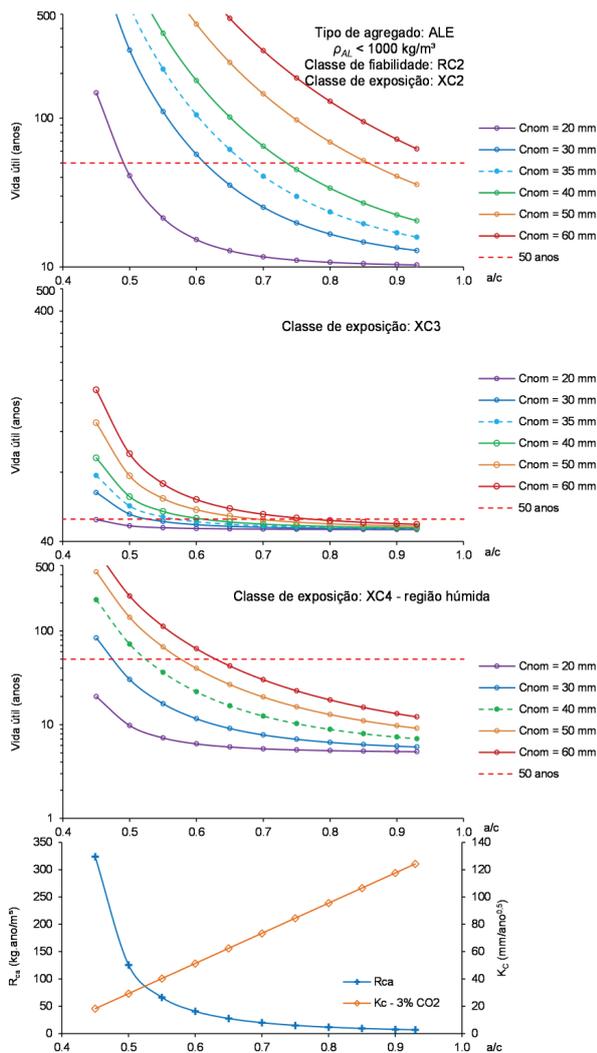


Figura A.3 Vida útil de BEAL com ALE mais porosos sujeitos a XC2, XC3 e XC4 – região húmida para diferentes recobrimentos nominais, c_{nom} , em função da relação a/c , da resistência à carbonatação, R_{ca} , e do coeficiente de carbonatação acelerada a 3% de CO₂, K_c , para uma classe de fiabilidade RC2

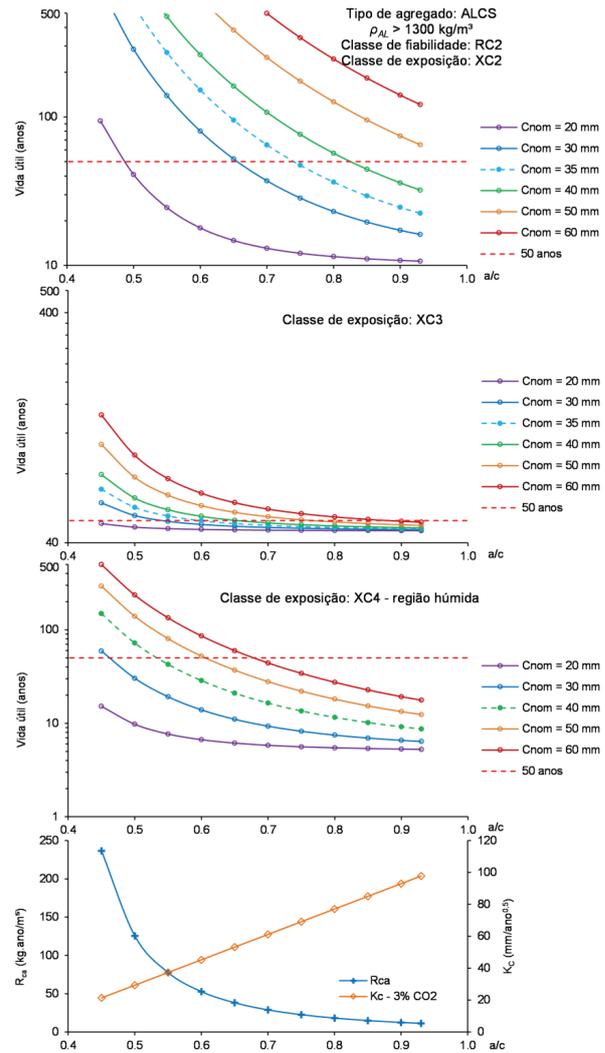


Figura A.4 Vida útil de BEAL com ALCS sujeitos a XC2, XC3 e XC4 – região húmida para diferentes recobrimentos nominais, c_{nom} , em função da relação a/c , da resistência à carbonatação, R_{ca} , e do coeficiente de carbonatação acelerada a 3% de CO₂, K_c , para uma classe de fiabilidade RC2

