

## **Resistências estimada e real do betão à carbonatação** **Aplicação da especificação LNEC E465**



**Sofia Ribeiro<sup>1</sup>**



**António  
Bettencourt  
Ribeiro<sup>2</sup>**



**Arlindo  
Gonçalves<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

A especificação LNEC E 465 permite estimar as propriedades do betão que, para determinado recobrimento das armaduras, se espera poderem garantir a vida útil das estruturas de betão armado, como sejam, a resistência à carbonatação e o coeficiente de difusão dos cloretos.

Num estudo efectuado no LNEC, foram definidas composições de betão, em que se fez variar a razão A/C e o tipo de cimento, a partir das quais foram fabricados provetes para caracterização em laboratório das propriedades relevantes dos betões, bem como para exposição natural em ambiente urbano e em ambiente marítimo.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados experimentais de carbonatação após pouco mais de 5 anos de exposição natural e comparam-se estes valores com os estimados a partir da metodologia prevista na especificação LNEC E 465. Conclui-se que esta metodologia permite fazer estimativas credíveis de profundidade de carbonatação, ainda que necessite de confirmação com maiores tempos de exposição natural.

### **PALAVRAS CHAVE**

Carbonatação; Acção ambiental; Modelos de previsão

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Betões, 1700-066 Lisboa, Portugal. [sribeiro@lnec.pt](mailto:sribeiro@lnec.pt)

<sup>2</sup> Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Betões, 1700-066 Lisboa, Portugal. [bribeiro@lnec.pt](mailto:bribeiro@lnec.pt)

<sup>3</sup> Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Betões, 1700-066 Lisboa, Portugal. [arlindo@lnec.pt](mailto:arlindo@lnec.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

A fixação dos requisitos de desempenho do betão relacionados com a durabilidade das estruturas tem sido normalmente realizada através de prescrições da composição e da resistência à compressão e, só em alguns casos têm sido fixados limites para algumas propriedades do betão, como a penetração de água, porosidade, coeficiente de difusão dos cloretos, resistência à carbonatação, entre outras.

A Especificação LNEC E 465 [1] desenvolve metodologias probabilísticas para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado e pré-esforçado, sujeitas à acção do dióxido de carbono (XC) ou dos cloretos (XS).

Num estudo efectuado no LNEC [2] foram fabricados betões, que satisfazem as exigências de composição respeitando os limites recomendados no Anexo F da NP EN 206-1 [3] para várias classes de exposição ambiental, betões que foram caracterizados em laboratório e foram colocados em exposição natural em ambiente urbano e marítimo. Para avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades do betão foram também fabricados outros betões com composições idênticas mas utilizando cimento tipo IV/B (V) 32,5 N.

Na caracterização em laboratório foram avaliadas propriedades relacionadas com o transporte de gases, de líquidos e de espécies iónicas, tais como permeabilidade ao oxigénio, absorção capilar e absorção de água, coeficiente de difusão dos cloretos por imersão, resistência à penetração de cloretos por condução de corrente eléctrica (AASHTO) e a resistência à carbonatação.

Nesta comunicação apresentam-se as profundidades de carbonatação obtidas até ao momento nos betões em exposição natural e comparam-se com as profundidades estimadas a partir da metodologia da especificação LNEC E 465 [1].

## **2. FORMULAÇÃO DOS BETÕES**

### **2.1 Materiais**

Os cimentos usados foram o CEM I 32,5R, o CEM I 42,5R e o CEM IV-B (V) 32,5 N com 39,3% de cinzas volantes. O agregado fino foi uma areia siliciosa com massa volúmica de 2590 kg/m<sup>3</sup>, módulo de finura de 2,63 e absorção de água de 0,4%. Na primeira fase do estudo usaram-se agregados grossos de natureza calcária com duas fracções granulométricas de  $D_{máx}$  25 mm e 12,5 mm, com massas volúmicas de 2690 e 2670 kg/m<sup>3</sup>, módulos de finura de 7,23 e 6,22 e absorção de água de 0,6 e 0,9%. Numa segunda fase, os agregados grossos foram de natureza granítica com duas fracções granulométricas de  $D_{máx}$  25 mm e 19 mm, com massas volúmicas de 2630 e 2620 kg/m<sup>3</sup>, módulos de finura de 7,49 e 6,51 e absorção de água de 0,7 e 0,8%.

### **2.2 Composições**

No Quadro 1 apresentam-se os três tipos de betão definidos no estudo [2] com valores da razão água/cimento (A/C) e da dosagem de cimento (C) iguais aos limites recomendados para as classes de exposição ambiental do Quadro F.1 do Anexo F da NP EN 206-1 [3]. É também apresentado um betão, designado pela letra D, para representar uma formulação de elevado desempenho. No Quadro 2 são apresentadas as composições destes betões.

*BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*  
*S.Ribeiro, e tal.*

Quadro 1. Valores de A/C e de C dos quadro tipos de betão A, B, C e D

<i>Betão</i>	<i>Classe de exposição ambiental de acordo com a Tabela 1 da EN 206-1</i>	<i>Limites recomendados na tabela F.1 da NPEN 206-1</i>	
		<i>A/C máxima</i>	<i>C mínimo (kg/m<sup>3</sup>)</i>
A	XC1	0,65	260
B	XC4 ou XS1	0,50	300
C	XS3	0,45	340
D*		(0,30)	(530**)

\* Betão de elevado desempenho

\*\* Total de ligante: 580 kg/m<sup>3</sup> (50 kg de sílica de fumo)

Quadro 2. Composições dos quatro tipos de betão A, B, C e D

<i>Fase do estudo</i>	<i>Betão</i>	<i>Tipo de cimento</i>	<i>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Sílica de fumo, S (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>A/(C+S)</i>	<i>Adjuvante* (designação comercial)</i>	<i>Abaixamento (cm)</i>
1**	A1	I 32,5 R	260	-	0,65	Pozzolith 390N	15±1
	B1		300	-	0,50	Rheobuild 1000	
	C1		340	-	0,45	Rheobuild 1000	
	D1		530	50	0,30	Glenium 27	
	A2	IV 32,5 N	260	-	0,65	Pozzolith 390N	15±1
	B2		300	-	0,50	Rheobuild 1000	
	C2		340	-	0,45	Rheobuild 1000	
	D2		530	50	0,30	Glenium 27	
2***	A1-L	I 42,5 R	260	-	0,65	nenhum	15±1
	C1-L		340	-	0,45	Rheobuild 1000	15±1
	Z1-L		400	-	0,45	Pozzolith 390N	3±1

\* A dosagem de adjuvante foi estabelecida de forma a atingir a trabalhabilidade pretendida

\*\* Composições com agregados grossos de origem calcária

\*\*\* Composições com agregados grossos de origem granítica

### 2.3 Condições de exposição em ambiente natural

Foram fabricados provetes de betão com as composições referidas para caracterização em laboratório das propriedades relevantes dos betões, bem como para colocação em exposição natural. Esta comunicação apenas respeita aos provetes de betão simples colocados nos locais seleccionados com as condições ambientais estabelecidas na NP EN 206-1 [3] para o ataque por carbonatação, Quadro 3.

Quadro 3. Locais e classes de exposição onde foram colocados os provetes de betão

<i>Locais de exposição dos provetes de betão</i>	<i>Classe de exposição de acordo com NP EN 206-1[3]</i>	
Local protegido (parcialmente) urbano (Fig. 1)	XC3	LNEC, junto à Rua das Murtas
Local desprotegido urbano (Fig. 2)	XC4 <sub>urbano</sub>	
Local desprotegido marítimo (Fig. 3)	XC4 <sub>marítimo</sub>	Cabo Raso - Guincho

*Resistências estimada e real do betão à carbonatação.  
Aplicação da especificação LNEC E 465*



Figura 1. Local protegido urbano



Figura 2. Local desprotegido urbano



Figura 3. Local desprotegido marítimo

## 2.4 Ensaios

Nesta comunicação apresentam-se apenas os resultados dos ensaios para a determinação da resistência à compressão e da profundidade de carbonatação, embora no estudo [2] tenham sido avaliadas várias propriedades relacionadas com o transporte dos agentes agressivos, tais como, permeabilidade, absorção capilar e resistência à penetração de cloretos.

A resistência à compressão dos betões foi determinada aos 3, 7, 28, 90 e 365 dias em cubos com 15 cm de aresta de acordo com a especificação LNEC E 226 [4], sendo cada valor a média de dois provetes de diferentes amassaduras.

A resistência à carbonatação  $R_{c65}$  foi determinada de acordo com a especificação LNEC E 391 [5] com as seguintes excepções: i) após a desmoldagem, os provetes foram curados em água durante 14 dias e depois em ar a  $65\% \pm 2\%$  de HR e  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura até atingir os 28 dias, ii) as condições de exposição na câmara foram de  $65\% \pm 2\%$  de HR e  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura e  $5\% \pm 0,1\%$  de  $\text{CO}_2$ ; iii) as faces laterais dos provetes foram isoladas para que o acesso do  $\text{CO}_2$  se fizesse unicamente pelos topos.

A profundidade de carbonatação foi determinada segundo o método descrito na especificação LNEC E 391 [5] nos provetes de betão simples em exposição natural. As faces laterais dos provetes foram protegidas com uma resina epoxídica, de forma que a penetração do  $\text{CO}_2$  fosse unidireccional. Os provetes de betão utilizados na primeira fase do estudo foram prismas de secção 10 cm x 10 cm e 51 cm de comprimento e na segunda fase de 15 cm x 15 cm e 30 cm de comprimento.

## 3. ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A propriedade resistência à carbonatação,  $R_{C65}$ , dos onze betões referidos em 2.2 foi obtida experimentalmente através da Eq. (7) da secção 6.2.1 da especificação LNEC E 465 [1].

$$R_{c65} = \frac{2 \cdot c_{acel}}{k_{acel}} \quad (1)$$

sendo  $c_{acel}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) a concentração de  $\text{CO}_2$  no ensaio acelerado,  $k_{acel}$  ( $\text{mm}/\text{t}^{1/2}$ ) obtido a partir da Eq. (2) onde  $X$  (m) é a profundidade de carbonatação e  $t$  (anos) o tempo de exposição do betão.

$$X = k_{acel} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Os onze valores experimentais da resistência à carbonatação,  $R_{c65}$ , destes betões foram integrados num conjunto mais vasto de resultados abrangendo vários cimentos, e que foi analisado no estudo publicado por Gonçalves et al. [6]. De acordo com este estudo, a resistência à carbonatação,  $R_{c65}$ , pode ser estimada através das Eqs (3) e (4):

$$R_{c65} = 0,0016 \cdot \sigma^{3,106} \quad \text{CEM I; II/A} \quad (3)$$

$$R_{c65} = 0,0018 \cdot \sigma^{2,8618} \quad \text{CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V} \quad (4)$$

em que  $\sigma$  (MPa) é o valor da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade.

A partir dos valores de  $R_{c65}$  obtidos pelas Eqs (3) e (4), a estimativa da profundidade de carbonatação dos quatro tipos de betão indicados em 2.2 foi obtida utilizando o modelo de previsão da profundidade de carbonatação,  $X$  (mm), dada pela Eq. (1) da secção 6.2.1 da especificação LNEC E 465 [1].

$$X = 0,064807 \cdot \sqrt{\frac{k_1 \cdot t}{R_{c65}}} \cdot \left(\frac{1}{t}\right)^n \quad (5)$$

sendo  $t$  (anos) o tempo de exposição do betão,  $k_1$  e  $n$  os valores dos parâmetros indicados no Quadro 6 da especificação LNEC E 465 [1] para as classes de exposição XC3 e XC4.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 4 apresentam-se os resultados obtidos no estudo [2] da resistência à compressão aos 28 dias de idade,  $\sigma$ , e dos valores agora estimados para a resistência à carbonatação,  $R_{c65}$ . Como seria de esperar, verifica-se que a resistência à carbonatação aumenta com a resistência do betão.

Com os cimentos CEM I o valor da resistência à carbonatação,  $R_{c65}$ , foi cerca do dobro do valor obtido com o cimento CEM IV, Quadro 4, comprovando o melhor desempenho dos cimentos ricos em clínquer Portland ao ataque por carbonatação.

Os valores da profundidade de carbonatação obtidos sobre os provetes mantidos em ambiente natural ao fim de 5,3 anos (que designaremos por “reais”), Quadro 5, revelaram uma maior progressão da carbonatação no local protegido (urbano), para os quatro tipos de betão, como exceptável.

Quadro 4. Resistência à compressão e à carbonatação dos quatro tipos de betão A, B, C e D

Betão	Tipo de cimento	Resistência à compressão aos 28 dias, $\sigma$ (MPa)	Resistência à carbonatação, $R_{c65}$ (kg.ano/m <sup>5</sup> ) Correlações de $R_{c65}$ e $\sigma$
A1	I 32,5 R	36,9	118
B1		49,7	297
C1		52,9	361
D1		80,7	1339
A2	IV 32,5 N	32,4	38
B2		46,4	106
C2		52,5	151
D2		76,2	438
A1-L	I 42,5R	35,4	104
C1-L		58,9	504
Z1-L		63,9	649

*Resistências estimada e real do betão à carbonatação.  
Aplicação da especificação LNEC E 465*

Quadro 5. Profundidade de carbonatação real ao fim de 5,3 anos em exposição natural  
*Profundidade de carbonatação real ao fim de 5,3 anos em  
exposição natural (mm)*

Betão	Tipo de cimento	Local desprotegido urbano	Local desprotegido marítimo	Local protegido urbano
		$XC4_{urbano}$	$XC4_{marítimo}$	$XC3$
A1	I 32,5 R	8,5	7,8	12,2
B1		4,8	3,8	8,9
C1		5,0	3,3	7,1
D1		1,5	1,0	2,5
A2	IV 32,5 N	17,0	11,0	21,5
B2		10,0	5,3	14,1
C2		8,2	4,8	11,8
D2		2,9	1,5	5,7
A1-L	I 42,5R	9,3	7,6	-
C1-L		1,0	0,8	-
Z1-C		0,9	0,6	-

De acordo com o Quadro 2 da especificação LNEC E 464 [7], a classe de exposição XC3 abrange ambientes moderadamente húmidos, incluindo superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento. Como ilustra a Fig. 1, os provetes conservados no local urbano protegido, embora tenham estado debaixo de uma cobertura, sofreram a influência da chuva transportada pelo vento, tendo os provetes junto à bordadura sido molhados com maior frequência, situação intermédia entre as classes de exposição XC3 e XC4, mas a que se atribuiu a classe XC3.

Como se observa nas Figs 4 e 5, a diferença da profundidade de carbonatação ao longo dos 5,3 anos, entre os locais urbanos, protegido (XC3) e desprotegido (XC4), foi quase sempre superior à observada entre os locais desprotegidos, marítimo ( $XC4_{marítimo}$ ) e urbano (XC4), resultante da menor humidade relativa do ar e menor pluviosidade no ambiente protegido. Saliente-se, porém, que a diferença, no máximo, foi inferior a 2 mm.

Na Fig. 6 indicam-se a humidade relativa média do ar e os períodos de pluviosidade ao longo dos 5,3 anos de exposição na zona urbana [8], verificando-se que os períodos de secagem foram mais longos que os períodos de molhagem, justificando a maior progressão da carbonatação neste ambiente, ainda que a secagem dos provetes seja mais lenta que a sua molhagem.

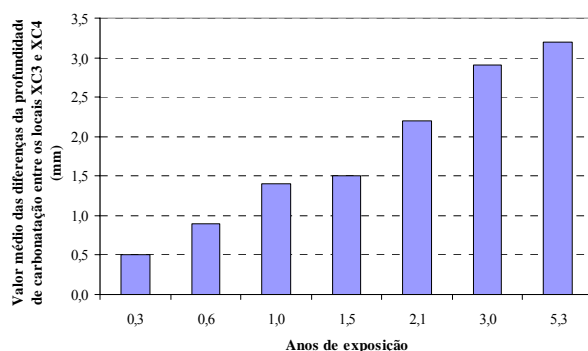


Figura 4. Diferença da profundidade de carbonatação ao longo dos 5,3 anos de exposição natural entre os locais urbanos, protegido (XC3) e desprotegido (XC4)

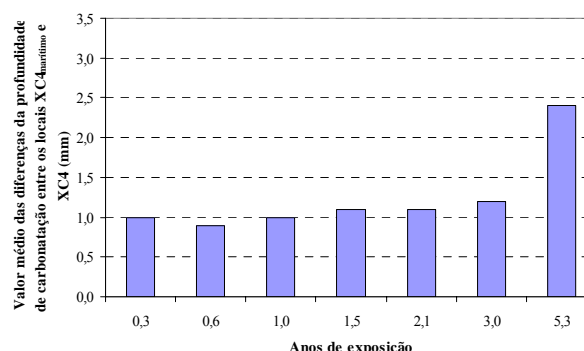


Figura 5. Diferença da profundidade de carbonatação ao longo dos 5,3 anos de exposição natural entre os locais desprotegidos, urbano ( $XC4_{urbano}$ ) e marítimo ( $XC4_{marítimo}$ ) e

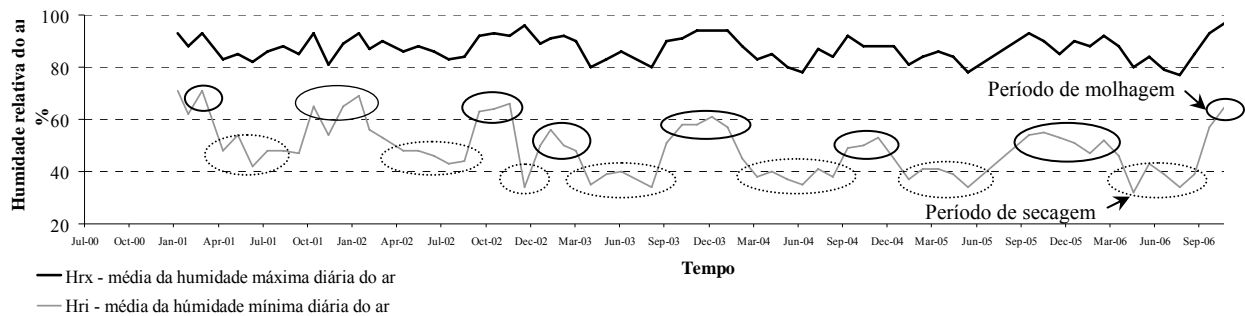


Figura 6. Humidade relativa média máxima e mínima diária do ar nos locais urbanos, protegido e desprotegido, durante os 5,3 anos de exposição [8]

As curvas real e estimada da profundidade de carbonatação ao fim de 5,3 anos no ambiente XC3 são apresentadas nas Figs 7 e 8 para os betões com cimento CEM I 32,5 R e CEM IV 32,5 N, respectivamente.

Os valores estimados e reais são praticamente coincidentes, mostrando o diferente comportamento dos cimentos CEM I e CEM IV: os betões com CEM I exibem profundidades de carbonatação abaixo de 10 mm e os betões com CEM IV abaixo de 30 mm (dependendo principalmente da razão A/C e da dosagem de cimento).

As curvas real e estimada da profundidade de carbonatação ao fim de 5,3 anos no ambiente XC4 são apresentadas nas Figs 9, 10 e 11 para os betões com cimento CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R e CEM IV 32,5 N, respectivamente.

Estas figuras mostram, em primeiro lugar, que os ambientes marítimo e urbano, na classe XC4, conduziram a profundidades de carbonatação reais semelhantes, com os valores em ambiente marítimo inferiores aos do ambiente urbano. Exceptua-se o caso dos betões com cimento CEM IV 32,5 N (ao fim de 5,3 anos) esclarecendo a diferença encontrada na Fig. 5 ao fim destes anos. Em segundo lugar, os valores estimados estão também muito próximos dos valores reais, excepto no caso do betão C1-L e Z1-L, Fig. 11. O betão C1-L exhibe assim menores profundidades de carbonatação que o betão C1 (Fig. 9, Quadro 4) mas ele é mais resistente (58,9 MPa, Quadro 4) que o C1 (52,9 MPa, Quadro 4).

Assim, é lícito admitir que, embora a resistência à carbonatação,  $R_{c65}$ , tenha sido obtida a partir da resistência à compressão aos 28 dias de idade, tal permite obter valores da profundidade de carbonatação próximos dos reais, usando o modelo da especificação LNEC E 465 [1]. A diferença média dos resultados reais e estimados foi da ordem de 1 mm, ao fim de 5,3 anos.

## 5. COMENTÁRIOS FINAIS

A conclusão final sobre a fiabilidade do modelo da especificação LNEC E 465 [1] relativamente à profundidade de carbonatação atingida no betão exposto aos ambientes XC só será possível depois de um maior número de anos de exposição natural e com um maior número de provetes de ensaio.

Contudo, os resultados até à data sugerem uma satisfatória adequação do modelo às medições da profundidade de carbonatação, parecendo que a especificação LNEC E 465 [1] sobrestima a profundidade de carbonatação dos betões com cimento CEM I 42,5 R ou colocados em ambiente marítimo. O inverso verifica-se nos betões com cimento CEM IV expostos em ambiente urbano.

*Resistências estimada e real do betão à carbonatação.*  
*Aplicação da especificação LNEC E 465*

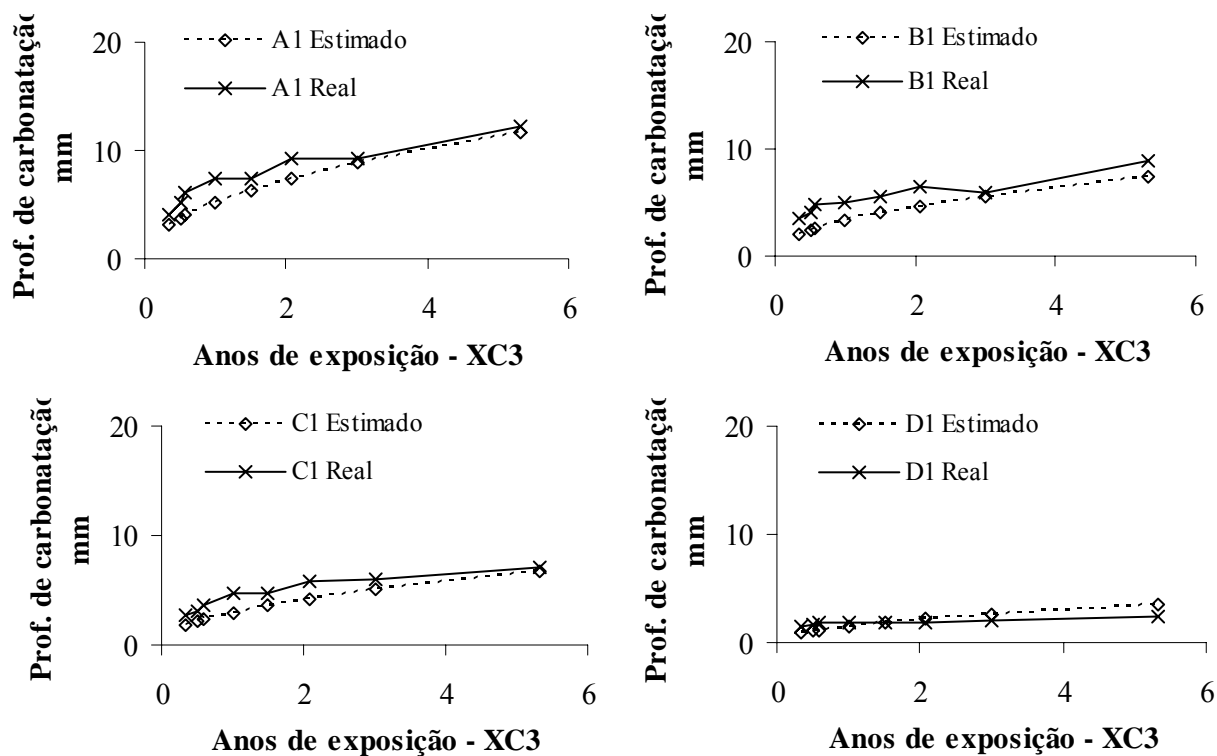


Figura 7. Progressão da carbonatação em 5,3 anos, dos quatro tipos de betão com cimento CEM I 32,5 R, em local urbano protegido XC3

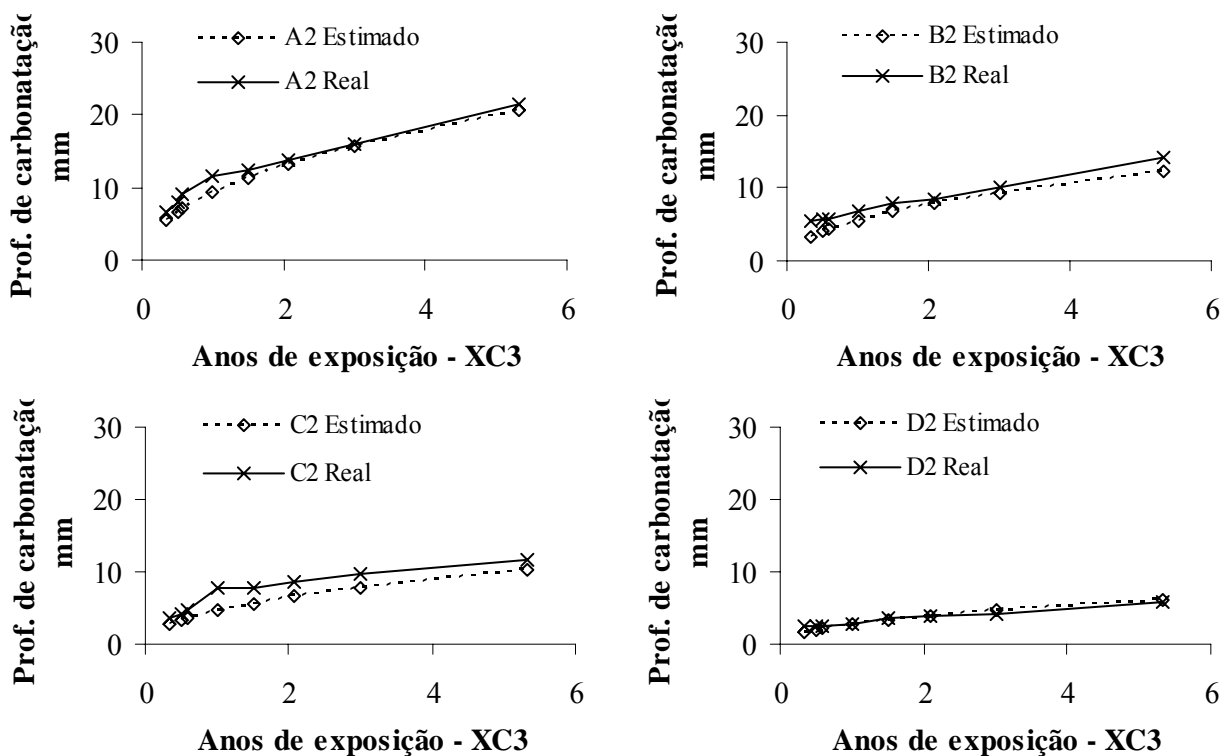


Figura 8. Progressão da carbonatação em 5,3 anos, dos quatro tipos de betão com cimento CEM IV 32,5 N, em local urbano protegido XC3



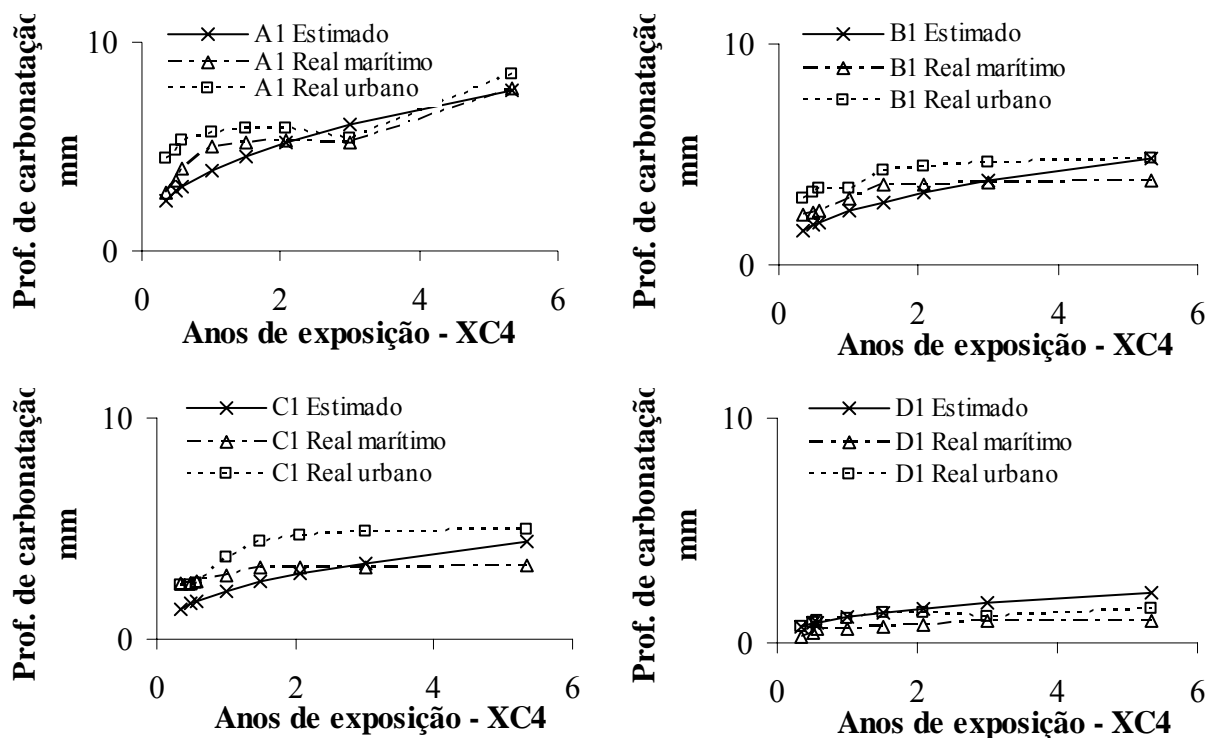


Figura 9. Progressão da carbonatação em 5,3 anos, dos quatro tipos de betão com cimento CEM I 32,5 R, em local desprotegido XC4, marítimo e urbano

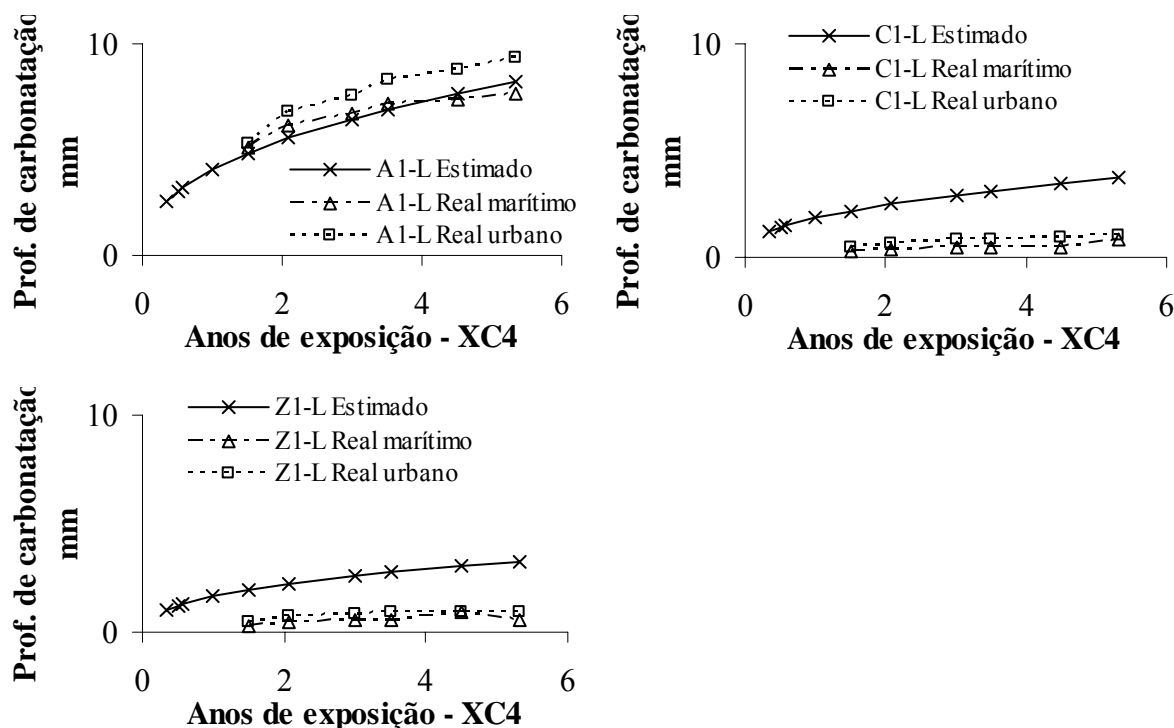


Figura 10. Progressão da carbonatação em 5,3 anos, dos quatro tipos de betão com cimento CEM I 42,5 R, em local desprotegido XC4, marítimo e urbano

*Resistências estimada e real do betão à carbonatação.  
Aplicação da especificação LNEC E 465*

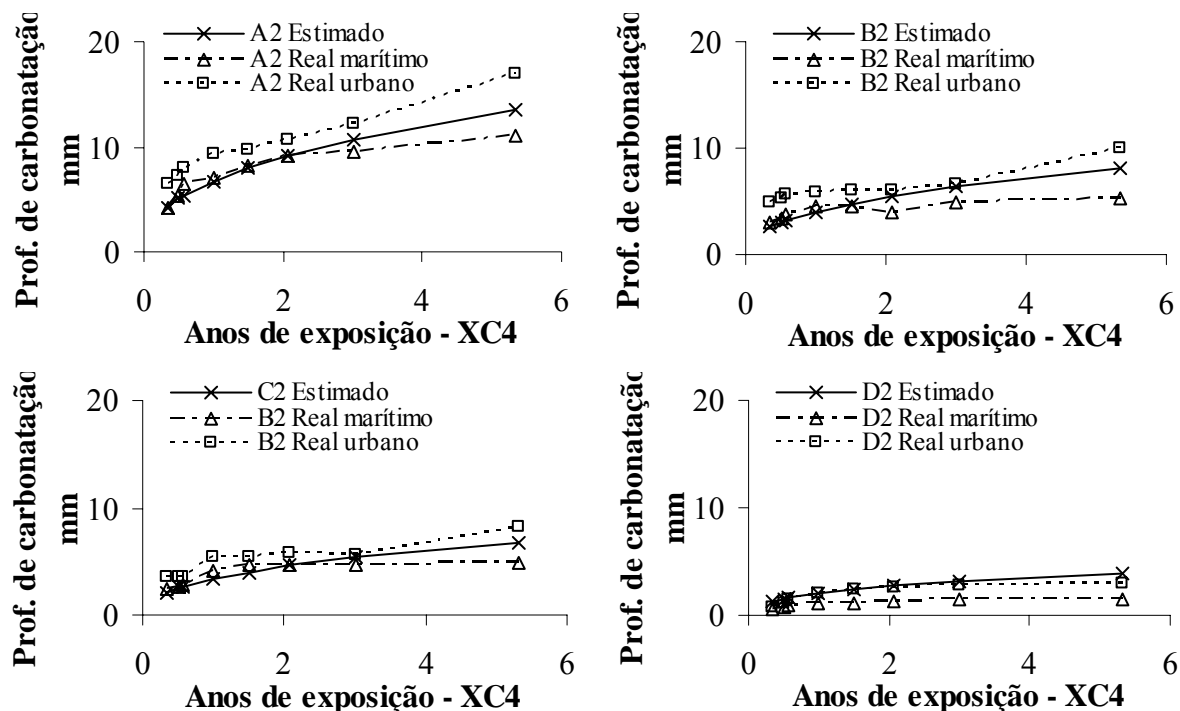


Figura 11. Progressão da carbonatação em 5,3 anos, dos quatro tipos de betão com cimento CEM IV 32,5 N, em local desprotegido XC4, marítimo e urbano

## REFERÊNCIAS

- [1] – Especificação 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, 24 p.
- [2] – BETTENCOURT, A.; GONÇALVES, A. – Estudo: Exigências de composição e de desempenho do betão relacionadas com as acções ambientais. Relatório 85/05-DM/NB. LNEC, 2005. 55 p.
- [3] – NP EN 206-1. 2004, Betão – Parte 1 :Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa. IPQ. 82 p.
- [4] – Especificação LNEC E 226. 1968, Betão. Ensaio de compressão. LNEC, 1 p.
- [5] – Especificação LNEC E 391. 1993, Betões. Determinação da resistência à carbonatação. LNEC, 1 p.
- [6] – GONÇALVES, A. [et al.] – The new LNEC specifications on reinforced concrete durability – Integral service life modeling of concrete structures: proceedings of the International RILEM workshop. PRO 56. Guimarães, Portugal (2007) 131-139.
- [7] – Especificação LNEC E 464. 2007, Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 501 e de 100 anos face às acções ambientais. LNEC, 14 p.
- [8] – FONSECA, S. – Estação meteorológica do LNEC. Edifício Principal – Terraço da Ala Nascente. Compilação de dados. Relatórios 383/2004, 26/05, 12/06 – DM/NMO. LNEC.