

Análise crítica do projecto de vida útil **Abordagem probabilística vs. abordagem semi-probabilística**



**Rui Miguel
Ferreira¹**



**Arlindo
Gonçalves²**



André Monteiro³

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise comparativa das abordagens utilizadas para estimar a vida útil das estruturas de betão armado, tendo por base os modelos apresentados na especificação LNEC E465. A especificação em questão apresenta uma metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão para as classes de exposição ambiental XC e XS.

É apresentada uma comparação entre a abordagem probabilística e a abordagem semi-probabilística para a aplicação dos modelos da especificação LNEC E465, mas considerando para o estado limite o início da corrosão das armaduras como resultado da carbonatação ou do ataque de cloretos. Para o estudo são utilizados resultados de ensaios sobre betões que respeitam as exigências da especificação LNEC E464

Como resultado desta análise, as vantagens e desvantagens destas abordagens são apresentadas. A análise é baseada na interpretação dos resultados e na forma como estes influenciam o processo de tomada de decisões.

PALAVRAS-CHAVE

Durabilidade, análise probabilística, vida útil, carbonatação, penetração de cloretos

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

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Avenida Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, arlindo@lnec.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Avenida Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, avmonteiro@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade dos materiais é uma parte integrante do projecto de estruturas de betão armado, sendo normalmente garantida com base em requisitos prescritivos como a razão água/ligante máxima, dosagem mínima de cimento, mínima classe de resistência e recobrimento mínimo das armaduras. Mesmo para estruturas relativamente novas em ambientes agressivos, onde os requisitos prescritivos de durabilidade estavam em consonância com as normas europeias para betão, verifica-se a corrosão prematura das armaduras [1]. As normas em vigor, até há pouco tempo atrás, não permitiam uma avaliação quantitativa da vida útil das estruturas em betão armado, pelo que as alternativas no projecto de durabilidade eram bastante restritas.

Novos procedimentos para o projecto de durabilidade têm surgido recentemente através da introdução de modelos baseados nas propriedades de desempenho dos materiais, nomeadamente do betão. Em Portugal, estes procedimentos são apresentados no Documento Nacional de Aplicação da NP EN 206-1 [2], através da especificação LNEC E465 [3], usando uma abordagem que podemos designar como semi-probabilística.

A especificação LNEC E465 representa um avanço significativo para o projecto de durabilidade, deixando para trás a abordagem prescritiva e todas as limitações a ela associadas. O Documento Nacional de Aplicação da NP EN 206-1 vai mais longe e, para além da abordagem da especificação LNEC E465, permite que a a vida útil de projecto seja avaliada através de modelos que utilizem uma abordagem probabilística.

Neste artigo pretende-se analisar e comparar a aplicação de duas abordagens, a abordagem semi-probabilística e a abordagem probabilística, para as classes de exposição XC e XS, considerando diferentes tipos de betão e dois tempos de vida útil (50 e 100 anos). Os resultados são também comparados com as exigências da especificação LNEC E464.

2. PROJECTO DE DURABILIDADE

Segundo a EN 1990 (Eurocódigo 0) [4], a vida útil de projecto é definida como sendo o período durante o qual a estrutura (ou parte dela) deve satisfazer o uso pretendido com manutenção antecipada mas sem necessidade de grandes reparações.

Para a verificação da vida útil de projecto é necessário estabelecer qual o estado limite e o índice de fiabilidade pretendidos.

Segundo o *fib*-Model Code for Service Life Design [5], a durabilidade da estrutura deve ser tal que esta se mantenha apta para a utilização durante a vida útil de projecto. Este requisito pode ser satisfeito adoptando uma, ou mais, das seguintes medidas em combinação com uma inspecção apropriada (em intervalos regulares ou dependente da condição da estrutura) e actividades de manutenção apropriadas [5]:

- Projectando sistemas de protecção ou de mitigação;
- Recorrendo a materiais que, se bem mantidos, não se degradam ao longo da vida útil de projecto;
- Utilizando dimensões tais que a deterioração durante a vida útil de projecto é compensada;
- Escolhendo vida úteis mais curtas para os elementos que podem ser substituídos uma ou várias vezes ao longo da vida útil de projecto.

O estado limite a adoptar (início da corrosão, início da fendilhação, destacamento do betão de recobrimento, etc.) deve ser especificado para cada projecto e ser acordado com o dono da estrutura. Um guia para a escolha destes estados limites, em conjunto com o nível de fiabilidade apropriado, é apresentado no *fib*-Model Code for Service Life Design.

2.1 Abordagens ao projecto de durabilidades

A verificação de segurança em relação a um estado limite pode ser realizada por uma abordagem totalmente probabilística, semi-probabilística ou prescritiva.

Numa abordagem probabilística, os modelos aplicados devem ser suficientemente validados de forma a fornecer resultados realísticos e representativos. Os parâmetros dos modelos aplicados e as suas incertezas devem ser quantificáveis por ensaios, observações e experiência [5]. Devem ser consideradas as incertezas associadas com os modelos e os ensaios utilizados. É necessário verificar que a fiabilidade especificada não é excedida aquando da verificação do estado limite em questão ao longo da vida útil de projecto.

Na abordagem semi-probabilística, os mesmos modelos podem ser utilizados, baseados em valores de projecto. Esta abordagem separa o tratamento da incerteza e variabilidade dos parâmetros do modelo. Para tal são utilizados factores de segurança. Esta metodologia está descrita na secção 6 da EN 1990. Nesta abordagem, é necessário verificar que a fiabilidade especificada não é excedida aquando da verificação do estado limite em questão ao longo da vida útil de projecto. A definição dos factores de segurança pode ser realizada quer pela avaliação estatística de dados experimentais e observações *in situ* quer com base na calibração a longo prazo baseado na experiência e tradição da construção. A especificação LNEC E465 é um exemplo da aplicação desta abordagem, recorrendo ao factor de segurança da vida útil.

A abordagem prescritiva é um conjunto de regras para o dimensionamento, selecção dos materiais e produtos bem como de procedimentos de execução, que garante à partida que a fiabilidade especificada não é excedida ao longo da vida útil de projecto quando a estrutura está exposta às condições de exposição de projecto. Tradicionalmente, esta abordagem inclui requisitos prescritivos para a execução, composição do betão, recobrimento das armaduras, limite de abertura de fissura, condições de cura, etc. A especificação LNEC E464 [6] é um exemplo da aplicação desta abordagem.

3. MODELOS E SUA IMPLEMENTAÇÃO

3.1 Implementação da abordagem probabilística e semi-probabilística

De acordo com a especificação LNEC E465, o projecto de vida útil de uma estrutura de betão armado procura garantir, para o estado limite especificado e vida útil pretendida (t_G), que a resistência da estrutura seja superior ao efeito das acções ambientais:

$$R_s(t_G) - S(t_G) > 0 \quad (1)$$

ou que a vida útil obtida através dos modelos (t_L) seja superior à vida útil pretendida:

$$t_L - t_G > 0 \quad (2)$$

A abordagem semi-probabilística apresentada na LNEC E 465 baseia-se na Eq.(2) para estimar as propriedades de desempenho. Para tal, recorre-se ao factor de segurança da vida útil (γ). Com o factor γ podem calcular-se de forma determinística as propriedades de desempenho para o valor da vida útil de cálculo, $t_D = \gamma \cdot t_G$, satisfazendo a Eq.(2) com uma abordagem probabilística. A definição do factor γ é baseada no pressuposto de que a vida útil é uma variável aleatória com distribuição lognormal [7].

Na abordagem probabilística, a vida útil de cálculo corresponde à vida útil pretendida. Os mesmos modelos empregues na abordagem semi-probabilística são utilizados na abordagem probabilística, sendo que os parâmetros podem ser estocásticos em vez de apenas determinísticos.

Para a verificação do estado limite são apresentados no Quadro 1, em função da classe de fiabilidade, os valores do índice de fiabilidade (β) utilizados na LNEC E465, as correspondentes probabilidades do estado limite de utilização não ser excedido (P_F), e o factor de segurança para obtenção da vida útil de cálculo pela abordagem semi-probabilística (γ).

Quadro 1. Parâmetros que caracterizam a verificação do estado limite e factor de segurança para cálculo da vida útil de cálculo.

Classes de fiabilidade	RC3	RC2	RC1
β	2.0	1.5	1.2
P_F (%)	2.3	6.7	12.0
γ	2.8	2.3	2.0

3.2 Definição dos modelos

Pretendeu-se avaliar os resultados da aplicação dos modelos de durabilidade da LNEC E465 para o estado limite correspondente ao início de corrosão como resultado tanto da carbonatação do betão, como na presença de cloretos. A Eq.(3) apresenta o modelo para determinar a profundidade de carbonatação do betão *in situ* em função da resistência à carbonatação do betão determinada em laboratório.

$$x_C(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta c \cdot t}{R_{C65}}} \cdot \sqrt{k} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (3)$$

em que

x_C - profundidade da frente de carbonatação (m) em função do tempo, t (anos);

R_{C65} - resistência à carbonatação do betão (kg.ano/m⁵);

Δc - diferença de concentração de dióxido de carbono no exterior e na frente de carbonatação no betão (kg/m³);

k - representa conjunto de factores que tem em conta a influência das condições de cura, da humidade relativa do ambiente e das condições do ensaio;

t_0 - período de referência (=1 ano);

n - factor que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo.

O principal parâmetro de desempenho do modelo da Eq. 3 é a resistência à carbonatação do betão que representa o quociente entre a quantidade de CO₂ que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos do betão contidos numa unidade de volume do betão e o coeficiente de difusão do dióxido de carbono através do betão carbonatado em condições padrão. A resistência à carbonatação, depende do tipo e dosagem de ligante utilizado.

A Eq.(4) apresenta o modelo para a penetração de cloretos no betão em função do coeficiente de difusão dos cloretos.

$$x_C = 2 \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_S - C_{CR}}{C_S} \right) \cdot \sqrt{k \cdot D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot t} \quad (4)$$

em que

x_C - profundidade da frente de penetração de cloretos (m) em função do tempo, t (anos);

C_S - concentração dos cloretos na superfície do betão (% da massa de ligante);

C_{CR} - concentração crítica de cloretos (% da massa de ligante);

erf^{-1} - inverso da função erro;

D_0 - coeficiente de difusão por migração dos cloretos (m_2/s), determinado em laboratório de acordo com a LNEC E463, com o betão na idade de referência $t_0=28$ dias;

k - representa conjunto de factores que tem em conta a influência das condições de cura, da humidade relativa do ambiente e da temperatura;

n - factor idade que tem em conta o decréscimo de ingresso dos cloretos ao longo do tempo

O principal parâmetro de desempenho do betão é o coeficiente de difusão por migração dos cloretos, o qual varia com a idade.

4. CASOS DE ESTUDO

Com o objectivo de comparar ambas as abordagens, foram escolhidos os estados limites de início de corrosão resultante da carbonatação do betão (EL1) e da penetração de cloretos no betão (EL2). Para ambos os estados limites, foram realizadas comparações com todas as classes de fiabilidade. Para o EL1 apenas foram consideradas as classes de exposição XC2 e XC4, enquanto para o EL2 apenas foram consideradas as classes de exposição XS1 e XS3. Foram considerados os dois tempos de vida útil de projecto indicados na especificação LNEC E464, ou seja, 50 e 100 anos.

Apesar da especificação LNEC E465 para a carbonatação considerar que a vida útil é composta pelos períodos de iniciação e de propagação, nesta análise foi considerado apenas o período de iniciação, resultando assim uma avaliação mais conservadora.

Quadro 2. Características dos betões (carbonatação)

Variáveis	XC2-A	XC2-B	XC4-A	XC4-B
Classe $R_{C,MIN}$	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
a/c	0.50	0.50	0.46	0.46
R_{C65} [kg.ano/ m^5]	120	54	205	95
$x_{MIN,50 \text{ anos}}$ [mm]	25	25	30	30
$x_{MIN,100 \text{ anos}}$ [mm]	35	35	40	40

Quadro 3. Características dos betões (penetração de cloretos)

Variáveis	XS1-A	XS1-B	XS3-A	XS3-B
Classe $R_{C,MIN}$	C40/50	C30/37	C50/60	C35/45
a/c	0.40	0.46	0.37	0.42
C_s [% massa lig.]	1.40	1.61	2.78	3.15
C_{CR} [% massa lig.]	0.5	0.4	0.4	0.3
D_0 [$m^2/s \cdot 10^{-12}$]	17.8	8.8	13.9	7.2
n [-]	0.55	0.65	0.55	0.65
$x_{MIN, 50 \text{ anos}}$ [mm]	35	35	45	45
$x_{MIN, 100 \text{ anos}}$ [mm]	45	45	55	55

Nos Quadros 2 e 3 apresentam-se apenas os dados e parâmetros mais relevantes utilizados na avaliação dos estados limites (EL1 e EL2 respectivamente). Os recobrimentos considerados referem-se aos exigidos pela especificação LNEC E464. As características dos betões estudados respeitam também as exigências da especificação LNEC E464. Os parâmetros de desempenho do betão (R_{C65} e D_0) foram baseados num estudo exaustivo de caracterização do desempenho dos betões realizado pelo LNEC [8]. De forma a comparar o desempenho distinto dos diferentes tipos de cimentos, foram consideradas duas situações: a situação A, para cimentos CEM I ou CEM II/A, e a situação B, para os cimentos CEM II/B

a CEM V [8]. Em anexo é apresentada a listagem completa dos parâmetros utilizados e os respectivos valores.

A implementação probabilística dos modelos foi realizada considerando que alguns dos parâmetros dos modelos são estocásticos. A escolha da distribuição e o coeficiente de variação deve basear-se nas características particulares de cada parâmetro. Dado a falta de informação necessária para quantificar adequadamente os parâmetros C_s , D_0 , x_{MIN} , e R_{C65} , estes foram simulados com distribuições normais com um coeficiente de variação de 10 %. Devido à maior dificuldade em medir o parâmetro C_{CR} , este foi simulado assumindo a mesma distribuição mas com um coeficiente de variação de 20 %. O parâmetro factor de idade (n) normalmente considerado aleatório, foi aplicado deterministicamente em consequência do erro de interpretação associado à sua representação estocástica [9,10]. Cada resultado do cálculo probabilístico representa cerca de 1.25×10^5 simulações pelo método de Monte Carlo.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

O Quadro 4 apresenta os resultados da aplicação das abordagens semi-probabilística e probabilística para o EL1, para tempos de vida útil de 50 anos e 100 anos. São apresentados os valores do recobrimento mínimo exigidos na especificação LNEC E464 ($x_{MIN,EL1}$), correspondentes a cada classe de exposição, tempo de vida útil e tipo de cimento utilizado, e os respectivos valores da profundidade da frente de carbonatação obtidos através da abordagem semi-probabilística ($x_{C,SP}$), recorrendo aos diferentes factores de segurança indicados na especificação LNEC E465, e da abordagem probabilística ($x_{C,P}$). Por fim é apresentada a probabilidade (P_F) de não verificação da segurança ao EL1 para o período de vida útil considerado.

Quadro 4. Recobrimento mínimo segundo a E464 vs. valores da profundidade de carbonatação obtidos através da abordagem semi-probabilística (E465) e probabilística (Monte Carlo).

Variáveis	t = 50 anos				t = 100 anos			
	XC2-A	XC2-B	XC4-A	XC4-B	XC2-A	XC2-B	XC4-A	XC4-B
$x_{MIN,EL1}$ [mm]	25	25	30	30	35	35	40	40
$x_{C,SP}$ (RC1) [mm]	11.4	17.0	19.6	28.8	14.2	21.2	26.1	38.4
$x_{C,SP}$ (RC2) [mm]	11.9	17.7	20.8	30.5	14.8	22.1	27.7	40.7
$x_{C,SP}$ (RC3) [mm]	12.7	18.9	22.5	33.1	15.8	23.5	30.0	44.1
$x_{C,P}$ [mm]	≈ 9	≈ 14	≈ 15	≈ 22	≈ 12	≈ 17	≈ 20	≈ 29
P_F [%]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5

Uma análise do Quadro 4 revela que, para a abordagem probabilística, não há situações em que a segurança ao EL1 não seja verificada ($P_F < 2.3$ % para a classe RC3, logo verifica RC2 e RC1). Para a abordagem semi-probabilística, surgem 4 situações em 24, em que a segurança ao EL1 não é verificada. Estas situações correspondem à classe XC4 (RC2 e RC3) para betões produzidos com os cimentos da situação B. É do conhecimento geral que estes cimentos são menos apropriados para situações em que ocorre carbonatação. Mesmo assim, o EL1 não é verificado por 0.5 mm (para RC2) e 3.1 mm (RC3) aos 50 anos, e por 0.7 mm (para RC2) e 4.1 mm (RC3) aos 100 anos.

É interessante verificar que, tendo em conta os valores e distribuições escolhidos para os parâmetros, as abordagens confirmam o mesmo desempenho. Para o modelo em questão, as abordagens demonstram um comportamento menos exigente dos requisitos prescritivos apresentados na especificação LNEC E464.

O Quadro 5 apresenta os resultados da aplicação das abordagens semi-probabilística e probabilística para o EL2, para vidas úteis de 50 anos e 100 anos. É apresentado o requisito prescritivo da especificação LNEC E464 ($x_{MIN,EL1}$) que corresponde ao limite de penetração dos cloretos a verificar para a vida útil considerada. São apresentadas também as profundidades de penetração dos cloretos em

função da classe de fiabilidade, calculadas com factor de segurança para cada vida útil ($x_{C,SP}$) e calculadas pela abordagem probabilística. Por fim é apresentado a probabilidade de não verificação do EL2 ao fim do período de vida útil considerado.

Quadro 5. Recobrimento mínimo segundo a E464 vs. valores da profundidade de penetração dos cloretos obtidos através da abordagem semi-probabilística (E465) e probabilística (Monte Carlo).

Variáveis	t = 50 anos				t = 100 anos			
	XS1-A	XS1-B	XS3-A	XS3-B	XS1-A	XS1-B	XS3-A	XS3-B
$x_{MIN,EL2}$ [mm]	35	35	45	45	45	45	55	55
$x_{C,SP}$ (RC1) [mm]	42.1	25.9	92.9	53.7	49.1	29.2	108.5	60.6
$x_{C,SP}$ (RC2) [mm]	43.4	26.5	95.8	55.0	50.7	29.9	112.0	62.1
$x_{C,SP}$ (RC3) [mm]	45.4	27.5	100.2	57.0	53.0	31.0	117.1	64.3
$x_{C,P}$ [mm]	≈ 37	≈ 23	≈ 80	≈ 48	≈ 42	≈ 26	≈ 93	≈ 54
P_F [%]	55.2	0.6	100.0	66.8	36.5	0.1	100.0	42.4

Uma análise do Quadro 5 revela que, para a abordagem probabilística, a utilização dos cimentos da situação A resulta no incumprimento do EL2. A abordagem semi-probabilística confirma esta tendência. Para os cimentos da classe B, o EL2 é verificado para a classe de exposição XS1, para ambas as abordagens, mas no caso da classe de exposição XS3 (a mais severa), não é verificado em qual quer das classes de fiabilidade e vidas úteis consideradas.

De referir que, tendo em conta os valores e distribuições escolhidos para os parâmetros, as abordagens confirmam, de uma forma geral, o mesmo desempenho. Verifica-se que a utilização dos cimentos da situação A é prejudicial à durabilidade da estrutura de betão armado em ambiente sujeito à penetração de cloretos. Nos restantes casos, para o modelo em questão, as abordagens demonstram um comportamento mais exigente do que verificado no estado limite considerado para os requisitos prescritivos apresentados na especificação LNEC E464.

6. CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo comparativo das abordagens semi-probabilística da especificação LNEC E465 e probabilística (Monte Carlo), de forma a garantir a vida útil das estruturas, com os requisitos prescritivos da especificação LNEC E464 para vidas úteis de 50 anos e 100 anos, e diferentes tipos de cimento. É de referir que toda a análise depende da escolha dos parâmetros e das suas distribuições. Para a abordagem semi-probabilística esta escolha foi feita com base nos valores indicados na LNEC E465 e para a abordagem probabilística foram considerados dados resultantes de investigações realizadas.

Os resultados da aplicação de ambas as abordagens demonstram uma tendência comum para quantificar o desempenho das estruturas de betão armado para o estado limite considerado. Enquanto para a carbonatação do betão as abordagens aparentam ser menos exigentes, tendo como referência as exigências da E464 (metodologia prescritiva), parece ser em certos casos insuficientes para garantir a vida útil pretendida. Já para a penetração de cloretos, as abordagens apresentam-se ser mais exigentes que a LNEC E464.

Os resultados demonstram também que a escolha do tipo de cimento é muito importante. Para o caso da carbonatação do betão esta pode não ser crítico, mas para a penetração de cloretos é fundamental.

Dado o comportamento idêntico dos resultados de ambas as abordagens e das incertezas associadas à análise probabilística e a quantificação estocástica dos parâmetros, aparente ser mais conveniente, por enquanto, utilizar a metodologia semi-probabilística na verificação da durabilidade de estruturas de betão armado.

REFERÊNCIAS

- [1] ÅRSKOG, V.; FERREIRA, R.M.; JALALI, S.; ET AL; Durability and Performance of Norwegian Concrete Harbour Structures. 4th Int.Con. on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, 2004.
- [2] NP EN 206-1. Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ. Lisboa. 2007.
- [3] 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.
- [4] EN 1990. Eurocode 0. Bases of structural design, CEN, Brussels. 2002.
- [5] FIB. Bulletin 34. Model code for service life design. Lausanne. 2006.
- [6] LNEC E464. Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, LNEC, Lisboa. 2007.
- [7] RILEM. Report 14. Durability design of concrete structures, E&FN Spon. 1996.
- [8] 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. ISBN 972-99179-2-2
- [9] FERREIRA, R.M.; GULIKERS, 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 Components, Istanbul, 11-14 May (2008). 1425-1432. ISBN 978-975-561-329-1.
- [10] FERREIRA, R.M.; Sensitivity analysis of model parameters for corrosion initiation and implications on design. Proceedings of International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, University of Minho, Guimarães, 5-6 November (2007). 205-214. ISBN 972-99179-2-2

ANEXO

A1. Parâmetros para o cálculo do da profundidade de penetração da frente de carbonatação (dados para $\gamma = 2.8$)

Variáveis	t = 50 anos e 100 anos			
	XC2-A	XC2-B	XC4-A	XC4-B
k_0 [-]	3	3	3	3
k_1 [-]	0.20	0.20	0.41	0.41
n [-]	0.183	0.183	0.085	0.085
k_2 [-]	1	1	1	1
t_0 [anos]	1	1	1	1
t [anos]	50	50	50	50
t_i [anos]	140	140	140	140
R_{C65} [kg.ano/m ⁵]	120	54	205	95
$x_{MIN, 50 \text{ anos}}$ [mm]	25	25	30	30
$x_{MIN, 100 \text{ anos}}$ [mm]	35	35	40	40

A2. Parâmetros para o cálculo do da profundidade de penetração dos cloretos (dados para $\gamma = 2.8$)

Variáveis	t = 50 anos e 100 anos			
	XS1-A	XS1-B	XS3-A	XS3-B
C_s [% massa lig.]	1.40	1.61	2.78	3.15
C_b [% massa lig.]	2.00	2.00	3.00	3.00
a/c [-]	0.40	0.46	0.37	0.42
$k_{A/C}$ [-]	1	1.15	0.925	1.05
k_{vert} [-]	0.7	0.7	1	1
k_{hor} [-]	1	1	1	1
k_{temp} [-]	1	1	1	1
C_{CR} [% massa lig.]	0.50	0.40	0.40	0.30
z em $erf^{-1}(z)$ [-]	0.643	0.752	0.856	0.905
ξ [-]	0.651	0.816	1.029	1.184
D_0 [m ² /s.10 ⁻¹²]	17.8	8.8	13.9	7.2
$k_{D,c}$ [-]	2.4	2.4	2.4	2.4
$k_{D,RH}$ [-]	0.4	0.4	1	1
$k_{D,T}$ [-]	1	1	1	1
n [-]	0.55	0.65	0.55	0.65
t_0 [anos]	28	28	28	28
t [anos]	50	50	50	50
t_i [anos]	140	140	140	140
D_A [m ² /s.10 ⁻¹²]	0.275	0.064	0.536	0.131
$x_{MIN, 50 \text{ anos}}$ [mm]	35	35	45	45
$x_{MIN, 100 \text{ anos}}$ [mm]	45	45	55	55