

Desenvolvimento de um modelo de absorção capilar



José Gonzalez¹



Said Jalali²

RESUMO

A avaliação da durabilidade de uma matriz depende da sua maior ou menor permeabilidade aos agentes patológicos, que encontram na estrutura poro-capilar as vias de penetração no interior da mesma. A absorção capilar desempenha um papel fundamental para disponibilizar as vias de acesso a diversos agentes patológicos, citando-se o caso dos cloretos. Actualmente admite-se que a alteração da matriz decorre da absorção, que acontece em meios não saturados, e não da permeabilidade, que ocorre em ambientes saturados. Existe uma relação entre a rapidez em que se processa o fenómeno da capilaridade e a velocidade da degradação.

O presente trabalho propõe um novo modelo de avaliação do fenómeno de capilaridade, baseado na aplicação da equação de Avrami, estabelecendo uma relação entre a absorção capilar e a capacidade máxima de absorção M_{max} e a velocidade com que é atingida, N , parâmetros independentes, por outro, variando em função do tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Degradação; Modelação; Absorção capilar; Durabilidade

¹ Instituto Politécnico da Guarda, ESTG, Departamento de Engenharia Civil, , 6300-559 Guarda, Portugal. gonzalez@ipg.pt

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

1. INTRODUÇÃO

A percolação capilar nos betões foi então considerada matéria relevante devido às implicações na durabilidade da matriz por mecanismos de transporte e circulação de agentes patogénicos que na estrutura poro-capilar da matriz encontram as vias de penetração no interior. Considera-se actualmente que o principal mecanismo de transporte dos agentes da degradação da matriz é a absorção, que ocorre em meios não saturados, e não a permeabilidade do betão que ocorre em meios saturados [1]. A maior ou menor velocidade de degradação está portanto relacionado com rapidez com que ocorre o fenómeno de capilaridade.

O fenómeno da capilaridade no betão é também dependente das propriedades do agregado, e a própria durabilidade deste relaciona-se com os coeficientes de absorção da rocha [2].

2. MÉTODOS ACTUAIS DE AVALIAÇÃO.

Existem diversas documentações normativas para quantificar a ascensão capilar em rochas e no betão, nomeadamente a norma NPEN1925 de 2000 desenvolvida para a caracterização do fenómeno em rochas e a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) E 393 com aplicabilidade em betões.

2.1. Especificação E393

A especificação E393 prevê que os provetes sejam constituídos por um volume mínimo de 0.001 m^3 , de base quadrada ou circular com uma superfície não inferior a 10000 mm^2 , sendo a dimensão da aresta ou do diâmetro de preferência igual a 150 mm, e a altura do provete o dobro desta última. O ensaio consiste em medir o aumento de massa do provete em intervalos de tempo iguais a 3, 6, 24 e 72 horas, desde a colocação do provete em contacto com a água, a qual deve atingir uma altura exterior de 5 mm sobre o plano da base.

A absorção por capilaridade é calculada dividindo o aumento de massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água, onde M_0 representa a massa do provete seco em estufa a 50°C e M_i é massa do provete no tempo t_i .

2.2. Norma NPEN 1925-2000

A norma NPEN 1925-2000 é destinada à caracterização do fenómeno de capilaridade em rochas, e prevê um procedimento mais elaborado, que conduz à definição de um coeficiente de absorção capilar, S . Este coeficiente S caracteriza a rapidez de absorção capilar e é determinado a partir do ajuste de uma recta sobre os cinco ou quatro primeiros pontos do gráfico que representa o ganho de massa unitário (por unidade de área de base) em ordenada *versus* a raiz quadrada do tempo expresso em segundos em abcissa. Este método pressupõe que o fenómeno de absorção se realiza num tempo relativamente curto, não devendo o ensaio prolongar-se para além de 1440 minutos. Quando o fenómeno apresenta taxas absorção baixas, em que o declive da curva sofre um decréscimo progressivo e permanente ao longo do tempo, a norma prevê a utilização de um método alternativo descrito em anexo, em que a curva de absorção é determinada por ajuste a uma equação empírica em que y representa o ganho de massa e t o tempo expresso em segundos (ver equação 1).

$$y = a [1 - \exp(-b t^{\frac{1}{2}})] \quad (1)$$

2.3. Desenvolvimento do modelo de absorção capilar proposto

A questão estudada e caracterizada aqui consiste em desenvolver um modelo de previsão do fenómeno da ascensão capilar em matrizes cimentícia que caracterizam o betão convencional, com o objectivo de prever o desenvolvimento do fenómeno a partir dos estágios iniciais.

Os casos em estudo analisam a ascensão capilar da água numa matriz, rocha ou betão, previamente seca em estufa e portando como uma estrutura poro-capilar capaz de receber e acomodar a água em contacto com a sua base, nas condições de ensaio, definidas segundo as normas já citadas.

Considere-se o volume de água, V_i , presente num capilar i . Será então:

$$V_i = \pi r_c^2 h \quad (2)$$

em que r_c é o raio da secção do tubo e h a altura da subida da água.

Assumindo que o sistema poro-capilar é constituído por n tubos, o volume de água absorvida no tempo t , sem qualquer constrangimento externo, será:

$$V_{ext} = n V_i \quad (3)$$

ou:

$$V_{ext} = n A t^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

O volume estendido é neste caso o volume de água nos tubos considerando a independência de cada capilar em relação à rede, ou seja, o fenómeno de absorção capilar acontece independente e isoladamente em cada tubo.

Havendo um constrangimento, seja devido ao esgotamento da força de ascensão capilar, seja ainda por uma ligação dos tubos capilares, podendo em ambos os casos ser considerada uma sobreposição ‘soft’, aplica-se o postulado de Avrami [5], para determinar o volume real unitário, V_f , de água nos capilares no tempo t , a partir do volume estendido V_{ext} .

$$V_f = 1 - \exp(-V_{ext}) \quad (5)$$

Sabendo que o volume de água absorvida não poderá ultrapassar um valor limite quando t cresce para infinito, este volume será limitado pelo esgotamento da força de ascensão capilar, definindo-se por V_{max} o seu valor. Assim o valor de absorção no instante t pode ser expresso a partir da Eq. (6):

$$V_t = V_{max} [1 - \exp(-V_{ext})] \quad (6)$$

ou ainda, substituindo V_{ext} pela sua relação expressa na Eq. (4)

$$V_t = V_{max} [1 - \exp(-n A t^{\frac{1}{2}})] \quad (7)$$

Uma vez que n e A são valores constantes, e fazendo $N = n A$, a Eq.(7) poderá assumir a forma:

$$V_t = V_{max} [1 - \exp(-N t^{\frac{1}{2}})] \quad (8)$$

em que V_t volume de água absorvida no tempo t , V_{max} volume de água absorvida quando $t \rightarrow \infty$ e N uma constante definidora da matriz

O valor de V_{max} representa o volume da estrutura poro-capilar em comunicação com o exterior que a água consegue preencher por capilaridade. O parâmetro N define a velocidade de absorção do sistema capilar.

Os ensaios de absorção são realizados em provetes de massa inicial conhecida, o volume de água absorvida é determinado por diferença de massas $M_i - M_0$, sendo M_0 a massa inicial do provete, M_i a massa no tempo t_i medida a intervalos mais curtos na fase inicial do ensaio, mais espaçados nas fases seguintes. Assumindo que a massa volúmica de água é igual a 1, a Eq. (8) pode ser enunciada por:

$$M_i - M_0 = M_{max} [1 - \exp(-N t^{\frac{1}{2}})] \quad (9)$$

3. COMPARAÇÃO DO MODELO COM A NP EN 1925 2000

É sabido que:

$$\exp(-x) = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} \dots \quad (10)$$

e para valores suficientemente pequenos de x pode-se exprimir pelos dois membros iniciais:

$$\exp(-x) = 1 - x \quad (11)$$

e de forma semelhante, quando o valor de n é positivo

$$\exp(-ax^n) = 1 - ax^n \quad (12)$$

Assim a Eq. (9) para valores suficientemente pequenos de tempo será:

$$M_i - M_0 = M_{max} [1 - (1 - N t^{\frac{1}{2}})] \quad (13)$$

e finalmente, pode ser descrita por:

$$M_i - M_0 = (M_{max} N) t^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Verifica-se que a Eq. (9) consegue prever dois parâmetros independentes que são o valor de absorção máxima, i.e., M_{max} , e o parâmetro N , que caracteriza a velocidade com que a absorção máxima é atingida, ou seja, caracteriza a qualidade da matriz, em termos de maior ou menor absorção que por sua vez determina a durabilidade do betão armado. Por outro lado verifica-se que o coeficiente de absorção da norma EN 1925 2000 é um caso especial do modelo apresentado.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO

4.1 Aplicação do modelo em provetes de betão convencional

Os resultados dos ensaios usados foram obtidos por Ferreira [3] e para os quais foram determinados os coeficientes de absorção S para diferentes amassaduras com teores de água distintos. Assim foram realizadas medições de ganhos de massa a intervalos de 3, 6, 24 e 72 horas em quatro séries de quatro provetes de amassaduras fabricadas com razão A/C de 0.40, 0.53, 0.65 e 0.78. Os provetes apresentavam uma secção circular com diâmetro médio de 10.5 cm sendo a altura do provete igual a pelo menos o dobro do seu diâmetro. Durante o ensaio, preconizado conforme a especificação E 393 [4], manteve-se a base do provete em contacto com a água, estando o nível desta 5 mm acima do plano

da base. Durante o ensaio os provetes e o tabuleiro foram cobertos com uma caixa para conservar as perdas por evaporação num valor reduzido. Ao logo do ensaio foram adicionadas, quando necessário, as quantidades de água precisas para manter o nível da superfície.

Os ensaios foram realizados também a diferentes tempos de endurecimento dos provetes para estudar o comportamento da absorção perante uma evolução da estrutura poro-capilar, ela própria alterando-se pela formação de novos compostos resultantes do processo de hidratação. Assim foram realizados ensaios aos 28, aos 56 e aos 90 dias de idade das diferentes amassaduras. O valor dos coeficientes de absorção S foi obtido por ajustamento de uma recta aos valores de ganho de massa versus $t^{\frac{1}{2}}$, sendo o ganho de massa expresso em g/cm^2 , o tempo t em horas e o declive designado por coeficiente de absorção. Os coeficientes de absorção S foram estimados para diferentes razões de A/C e calculados para diferentes idades da mesma amassadura.

Os valores de S determinados dessa forma estão patentes no Quadro 1.

Quadro 1 – Coeficientes de absorção S em betões convencionais segundo LNEC E939

| A/C | 0.40 | 0.53 | 0.65 | 0.78 |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 28 dias | 0.251 | 0.546 | 0.64 | 1.603 |
| 56 dias | 0.256 | 0.345 | 0.672 | 1.072 |
| 90 dias | 0.269 | 0.36 | 0.578 | 1.061 |

A Figura 1, a título de exemplo, apresenta a determinação do coeficiente de absorção S segundo a LNEC E939.

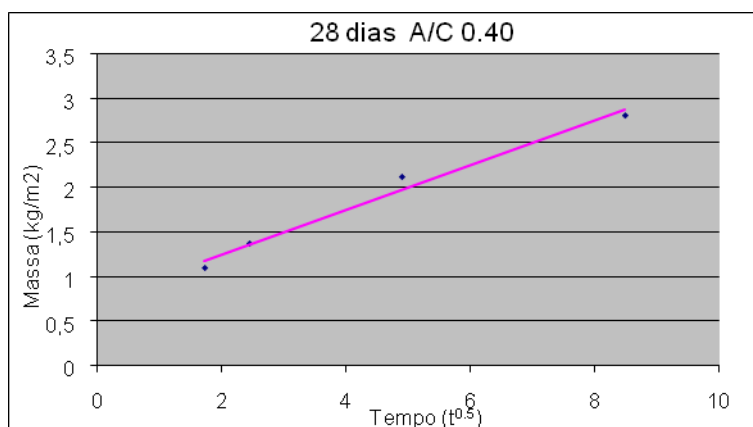


Figura 1. Determinação de S segundo o procedimento da especificação LNEC E393

Da análise aos valores, verifica-se que S é sensível à variação da razão A/C, aumentando com o aumento da razão A/C [3].

Os mesmos dados dos ensaios foram utilizados para avaliar o ajustamento da equação do modelo proposto para a representação da absorção conforme a Eq. (9) na qual, recorda-se, $M_i - M_0$ refere-se ao ganho de massa, M_{max} a quantidade de água máxima que a matriz pode absorver, N representa a velocidade com que evolui a absorção e t é o tempo decorrido desde o início do ensaio.

Desse modo fica representada a evolução da variação de massa no provete desde os tempos iniciais até que o ganho de massa atinge o seu valor máximo, nas condições do ensaio.

Os valores de M_{max} N , resultado da aplicação do modelo, estão patentes no Quadro 2, e a Fig. 2 faz a sua representação gráfica.

Quadro 2- Valores de $M_{max} N$ em betões convencionais segundo o modelo proposto.

| A/C | 0.40 | 0.53 | 0.65 | 0.78 |
|---------|------|------|------|------|
| 28 dias | 0.07 | 0.11 | 0.25 | 0.27 |
| 56 dias | 0.08 | 0.07 | 0.30 | 0.21 |
| 90 dias | 0.09 | 0.16 | 0.22 | 0.29 |

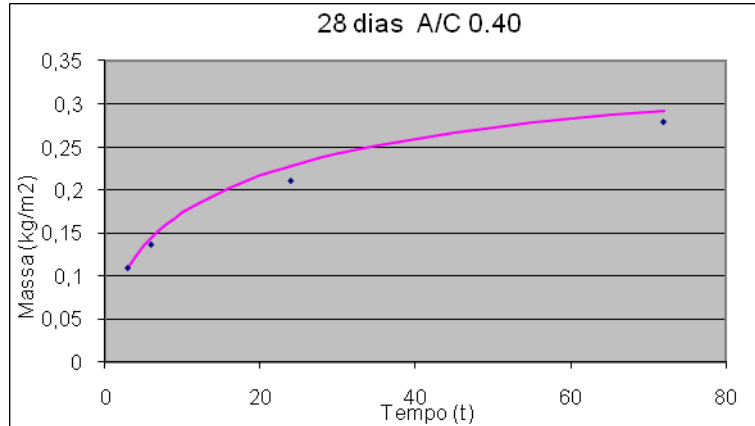


Figura 2. Ajustamento da equação do modelo proposto aos resultados dos ensaios do provete A/C = 0.4 com 28 dias de idade

Os valores de $M_{max} N$ correspondem a tempos muito pequenos em comparação com o tempo do ensaio, enquanto que os valores de S apresentados no Quadro 1 correspondem à totalidade do tempo do ensaio e por essa razão não são comparáveis.

A preferência por usar o método proposto para avaliação do ganho de massa está relacionada com o facto deste permitir interpretar o fenómeno numa forma mais ajustada ao mecanismo real, ou seja, para valores crescentes de tempo, o fenómeno tende para um valor máximo e a sua equação tem dois parâmetros, M_{max} e N , que traduzem propriedades físicas bem definidas. M_{max} é o valor máximo que o modelo prevê para a absorção da água, enquanto o N representa a facilidade com que a matriz absorve a água.

Os valores relativos aos betões de 90 dias de idade do mesmo autor [3], ajustados segundo o modelo estão representados na Fig. 3, na qual está patente o comportamento progressivamente decrescente do valor do ganho de massa $M_t - M_0$, para valores crescentes de tempo, indicando que o fenómeno tende para uma estabilização. Também se pode reparar que os valores de S apresentam uma variação mais lenta para valores crescentes de razão A/C, ou seja, matrizes mais porosas, e com patamares de limite mais altos.

A curva representativa de provetes, matriz mais compacta, A/C = 0.40 apresenta um patamar de estabilização mais baixo, com uma rápida estabilização, que contrasta com a de A/C = 0.78, matriz mais porosa, a qual, ao fim de 120 horas apresenta ainda uma taxa de absorção significativa. No entanto, ao fim de 120 horas, último registo efectuado, pode-se constatar que em todos os casos existe ainda uma absorção com algum significado.

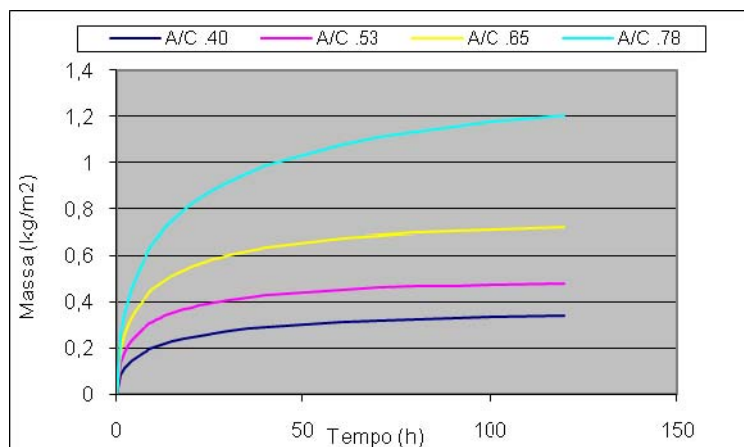


Figura 3. Absorção prevista para provetes de 90 dias de idade e com diferentes valores de A/C

4.2. Aplicação do modelo em provetes graníticos

O método foi igualmente testado em provetes de granitos da região da Guarda. Refira-se que existe na norma NP EN 1925 2000 sobre a determinação da capilaridade em rochas um anexo no qual se define uma equação empírica, Eq. (1), para descrever o fenómeno da absorção em função do tempo através de uma função de regressão não-linear.

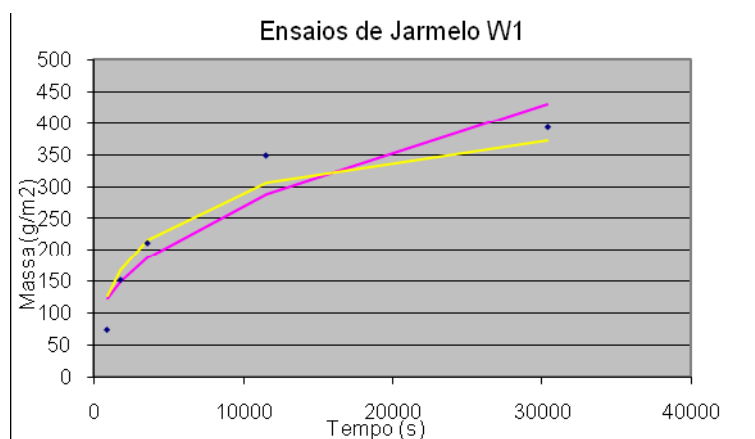


Figura 4. Previsão das equações da NP EN 2000 e do modelo para os valores de ensaio de absorção no granito de Jarmelo, W_1

Para estabelecer uma comparação entre os dois métodos, foi escolhida uma amostra do granito de Jarmelo, na região da Guarda, com um fraco grau de alteração, W_1 , e os valores do ensaio foram ajustados segundo os dois métodos, ou seja, ajustamento linear sobre uma escala de tempo $t^{0.5}$ e ajustamento pela equação do modelo.

Esta equação é semelhante à equação do modelo proposto, o que reforça a possibilidade de aplicação do modelo para a caracterização de absorção em materiais rochosos.

Utilizando os cinco pontos iniciais, as equações de ajuste apresentam o andamento constante na Fig. 4.

Para o exemplo em análise, constata-se uma aproximação da equação representativa do modelo aos resultados do ensaio, $R^2 = 0.95$, melhor que o método convencional, $R^2 = 0.89$.

Quadro 3 - Valores de S da EN 1925 e parâmetros do modelo em rocha granítica W1

| Norma | | Modelo | |
|-------|------|-------------|-------|
| S | 2.1 | M_{max} | 429 |
| | | N | 0.012 |
| | | $M_{max} N$ | 5.1 |
| R^2 | 0.89 | R^2 | 0.95 |

O Quadro 4 apresenta os resultados do ajustamento da equação do modelo aos ensaios em granitos com grau de alteração W_1 , W_2 , W_3 e W_4 , nos quais foram determinados os valores máximos de absorção, M_{max} , e as velocidades com que o fenómeno se processa, N .

Quadro 4 - Valores de M_{max} , N e ($M_{max} N$) em rochas graníticas

| | W1 | W2 | W3 | W4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| M_{max} | 429 | 1597 | 3072 | 2781 |
| N | 0.012 | 0.013 | 0.026 | 0.051 |
| $M_{max} N$ | 5.0 | 20.7 | 78.9 | 141.2 |
| R^2 | 0.95 | 0.99 | 0.98 | 0.98 |

Os dados do quadro 4 representam estados de alteração de matriz de magnitude progressivamente maior e, consequentemente, com estruturas de rede poro-capilar menos densas, o que propicia ganhos de massa nitidamente maiores, no sentido crescente de W_1 para W_4 .

5. CONCLUSÕES

O modelo para a previsão da absorção baseado na equação do modelo proposto tem vantagens em relação ao procedimento convencional. Por um lado descreve o fenómeno físico de uma forma contínua, tendo parâmetros com significado físico, para além de se encontrar coeficientes de correlação mais elevados.

Quando a duração de exposição do provete à água cresce, o mecanismo que promove a absorção apresenta uma desaceleração e estabiliza ao fim de determinado tempo. A equação representa este valor máximo possível de ser atingido através do parâmetro M_{max} da equação. A velocidade do fenómeno está representada pelo parâmetro N . Maiores valores de N significam valores de absorção inicial mais acentuados.

O modelo de absorção foi avaliado com recurso a resultados de ensaios de betão convencional, betão reforçado com fibras de carbono com e sem adjuvantes e em granitos com diferentes graus de alteração. A equação do modelo proposto consegue descrever bem os resultados dos ensaios com valores elevados de coeficientes de correlação R^2 da ordem de 0.97.

A vantagem significativa da aplicação do modelo reside no facto dos parâmetros obtidos serem independentes da escolha do operador, i.e. não necessita de decidir quais os pontos a utilizar para ajuste da recta, enquanto que a aplicação do procedimento convencional faz depender os parâmetros da escolha de numero de pontos que conduzem a um melhor ajustamento.

REFERÊNCIAS

[1] Hudec, P., (1989); Durability of Rock as Function of Grain Size, Pore Size, and Rate of Capillary Absorption of Water; Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 1, No 1 pp 3-9.

- [2] IAEG, (1981); Rock and soil description and classification for engineering geological mapping; Report on Eng. Geol. Mapping, Bulletin of the IAEG, No. 24, pp 235-274.
- [3] Ferreira, M., (2000); “Avaliação de ensaios de durabilidade do betão”, Tese de mestrado; Universidade do Minho.
- [4] LNEC, (1993); E 393; Betões, Determinação de absorção de água por capilaridade.
- [5] Avrami, M., (1939) (1940) (1941); Journal of Chem. Phys. in Civil Engineering; Vol 7 1103, Vol 8 212, Vol 9 177.