

## **Avaliação dos Ensaios Correntes para a Medição da Durabilidade do Betão**

Rui Miguel Ferreira, Saíd Jalali

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

### SUMÁRIO

Medidas prescritivas como a razão água /material cimentício máxima, dosagem mínima de material cimentício e recobrimento mínimos são apresentadas pela NP ENV 206 [1] como medidas para assegurar a durabilidade do betão. Estes parâmetros variam muito num só elemento de betão dependendo de diversos factores como as condições de cura, a mão de obra, a qualidade do betão, entre outros [2]. Há a necessidade de implementar normas baseadas no desempenho em que a qualidade do betão é determinado adequadamente. São necessários ensaios de durabilidade que avaliam o desempenho do betão.

O trabalho desenvolvido baseia-se na avaliação de cinco ensaios diferentes [3]: a resistência à compressão, a resistividade eléctrica, a permeabilidade ao oxigénio, o ensaio de migração do ião de cloro “CTH Rapid Method”, a absorção capilar e a permeabilidade ao oxigénio. Verifica-se que, os resultados tornam-se mais fiáveis quanto maior a idade e melhor a qualidade do betão. A comparação do factor de sensibilidade dos ensaios indica que a permeabilidade ao oxigénio é extremamente sensível a variações na qualidade do betão.

### 1. INTRODUÇÃO

Há uma preocupação a nível mundial pela durabilidade do betão armado devido ao aumento do número de estruturas degradadas. De modo a garantir adequadamente a durabilidade do betão, terão que ser especificados outros requisitos para além das propriedades mecânicas. Presentemente a resistência à compressão é o parâmetro mais correntemente utilizado para a aceitação do betão. É geralmente aceite que o desempenho de durabilidade do betão precisa de ser ensaiado.

É conhecido que a interacção entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o início dos diversos processos de degradação. Uma avaliação das propriedades de transporte da camada superficial deverá fornecer alguma indicação quanto à durabilidade de determinado betão. Daí que, os ensaios utilizados para a avaliação da durabilidade do betão estimam os parâmetros de transporte do betão.

Contudo, podem ser realizados ensaios diferentes. A questão principal que se coloca relaciona-se com o que realmente medem os ensaios. Até que ponto são representativos dos fenómenos reais no betão? Será que os ensaios são igualmente sensíveis às variações na qualidade do betão? Será possível correlacionar os resultados obtidos destes ensaios? Será possível executar um só ensaio que possa representar as diferentes propriedades de transporte

do betão? Apenas recentemente iniciou-se investigação nesta área de modo a procurar as respostas a estas e outras questões pertinentes.

O presente trabalho de investigação baseia-se na avaliação de quatro ensaios diferentes, normalmente utilizados para medir os parâmetros de durabilidade do betão. Os resultados obtidos para quatro tipos de betões diferentes, com períodos de cura até 90 dias, são apresentados e analisados. As correlações possíveis entre os resultados, e a sensibilidade dos ensaios, são também considerados.

Daí que, é desejável que houvesse um ensaio especificado, para além da resistência à compressão, que poderia fornecer dados suficientes e fiáveis do desempenho de durabilidade do betão. Isto terá um efeito de longa duração na indústria e no controlo de qualidade do betão. A possível indicação de tal ensaio constitui a motivação para este trabalho de investigação.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

### 2.1 Materiais Utilizados

Na investigação efectuada foi utilizado um cimento do tipo CE I e da classe 42,5. Os agregados eram constituídos por duas britas graníticas e uma areia de rio bem graduada. Na Tabela 1 é apresentada a composição dos quatro betões utilizados. Os resultados dos ensaios de consistência, por meio de abaixamento e flow table, são também apresentados.

Tabela 1 - Composição e consistência do betão.

Materiais (kg)	M40	M53	M65	M78
Cimento	300.00	300.00	300.00	300.00
razão W/C	0.40	0.53	0.65	0.78
Areia do rio	721.17	673.56	629.62	582.03
Brita 5/7	206.29	200.70	195.53	189.92
Brita 9/12	945.28	901.55	861.17	817.43
Abaixamento	1.5 (cm)	3.0	16.0	24.5
Flow Table	36.0 (cm)	40.5	49.5	69.5

Os provetes foram moldados e conservados à temperatura laboratorial durante 24 a 48 horas, após o qual foram desmoldados e curados em água a 21 °C até à data de ensaio.

### 2.2 Procedimentos de Ensaio

Realizaram-se os ensaios de resistência à compressão, da resistividade eléctrica, da migração de iões de cloro, da absorção por capilaridade e da permeabilidade ao oxigénio. Os ensaios foram efectuados em provetes moldados a partir das quatro amassaduras diferentes com idades de cura de 28, 56 e 90 dias.

#### 2.2.1 Ensaios de resistência à compressão

Os ensaios de determinação da resistência à compressão foram realizados segundo o procedimento descrito na especificação do LNEC E226 [4]. A carga foi aplicada a uma velocidade de 10 kN/s. Foram utilizados os provetes cúbicos com aresta de 10 cm. Cada resultado representa a média de quatro ensaios.

## 2.2.2 Migração de íons de cloro

O coeficiente de migração do íon de cloro foi calculado pelo método *CTH Rapid Method*, desenvolvido por Luping [5]. Um provete cilíndrico é submetido a uma diferença de potencial durante um período pré-estabelecido, em função da corrente inicial. Ao fim deste período, o provete é dividido axialmente sendo medido a profundidade de penetração do íon através de um processo colorimétrico. A voltagem de  $30 \pm 0.2$  V foi aplicado. A duração do ensaio foi determinada segundo a sugestão do Luping. A Tabela 2 foi baseada no trabalho efectuado por Luping sendo ampliado com base em ensaio preliminares efectuados nesta investigação.

Tabela 2 - Duração dos ensaios CTH Rapid Method

Corrente Inicial, $I_0$ (mA)	Duração do Ensaio, $t_{CTH}$ (horas)
$I_0 < 5$	$t_{CTH} = 168$
$5 \leq I_0 < 10$	$t_{CTH} = 96$
$10 \leq I_0 < 30$	$t_{CTH} = 48$
$30 \leq I_0 < 60$	$t_{CTH} = 24$
$60 \leq I_0 < 120$	$t_{CTH} = 8$
$120 \leq I_0 < 240$	$t_{CTH} = 4$
$I_0 > 240$	$t_{CTH} = 2$

Para intensidades de corrente superiores a 120 mA, a duração do ensaio seria de quatro horas, segunda a proposta de Luping [5]. Verificou-se que, para o betão com razão A/C = 0.78, a penetração de cloretos era excessiva, penetrando em alguns casos a quase totalidade do provete. Por este motivo considerou-se um intervalo de tempo mais reduzido, 2 horas, para intensidade de corrente inicial superior a 240 mA.

A profundidade de penetração é determinada por um processo colorimétrico, recorrendo a nitrato de prata. A profundidade media de penetração é medida com a precisão de 0.5 mm.

O coeficiente de difusão é calculado pela seguinte expressão [5]:

$$D = \frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

Sendo:

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

Onde:

- $D$ : coeficiente de difusão,  $m^2/s$ ;
- $z$ : valor absoluto de valência do íon, para íões de cloro,  $z = 1$ ;
- $F$ : constante de Faraday,  $F = 9.648 \times 10^4$  J/(V.mol);
- $U$ : valor absoluto da diferença de potencial, V;
- $R$ : constante dos gases,  $R = 8.314$  J/(K.mol);
- $T$ : temperatura da solução, K;
- $L$ : espessura do provete, m;
- $x_d$ : profundidade de penetração, m;
- $t$ : duração do ensaio, segundo,  $t = t_{CTH} \times 3600$ ;
- $\operatorname{erf}^{-1}$ : inverso da função de erro;

$c_d$ : concentração de cloro com o qual a cor altera,  $c_d \approx 0.07$  N;  
 $c_0$ : concentração de cloro na célula a montante, N.

Cada coeficiente de difusão representa uma média de seis ensaios efectuados em provetes individuais.

### 2.2.3 Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica foi determinada recorrendo às leituras de intensidade de corrente inicial do ensaio de migração. Foi aplicado a Lei de Ohm [6] para estimar os valores de resistividade:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (4)$$

Daí que,

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (5)$$

Onde:

$R$ : resistência eléctrica ( $\Omega$  - Ohms);  
 $I$ : intensidade de corrente (A - Amperes);  
 $V$ : diferença de potencial (V - Volts);  
 $\rho$ : resistividade eléctrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  
 $L$ : comprimento (cm);  
 $A$ : área ( $\text{cm}^2$ ).

Os valores de resistividade eléctrica apresentados resultam da média de ensaios em seis provetes.

### 2.2.4 Permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de permeabilidade ao oxigénio foi efectuado com recurso à Célula de Permeabilidade de Leeds. Um provete é rodeado por uma borracha que é colocado na câmara da célula. Com a compressão da borracha, esta vede lateralmente o provete permitindo o fluxo unidireccional. O coeficiente de permeabilidade ao oxigénio é obtido pela lei de D'Arcy modificada, que calcula o volume de fluido que atravessa o provete, para determinada pressão média no interior do provete [7]:

$$K_G = \frac{2Q \cdot L \cdot \eta \cdot p_f}{A \cdot (p_1^2 + p_2^2)} \quad (6)$$

Onde:

$K_G$ : coeficiente de permeabilidade ( $\text{m}^2$ );  
 $\eta$ : viscosidade do gás ( $\text{Ns}/\text{m}^2$ );  
 $Q$ : volume de gás escoado ( $\text{m}^3$ );  
 $L$ : espessura da secção atravessada (m);  
 $A$ : área penetrada ( $\text{m}^2$ );  
 $p_f$ : pressão a que o volume  $Q$  é medido ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  
 $p_1$ : pressão de entrada do gás ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  
 $p_2$ : pressão de saída do gás ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).

Os valores de pressão de oxigénio utilizados variaram entre 2 e 4 bar de acordo com a permeabilidade dos betões ensaiados, de modo a permitir leituras correctas de fluxo, i.e., de modo a que o tempo de um percurso de 10 cm de uma bolha de sabão no tubo de vidro se situe entre os 30 e 60 segundos. Os valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio apresentados resultam da média de ensaios em seis provetes.

### 2.2.5 Absorção por Capilaridade

Para medir a absorção por capilaridade dos provetes de betão adoptou-se o procedimento descrito na E 393 [8]. A absorção de água por capilaridade é calculada dividindo o aumento de massa ao fim de intervalos de tempo pré-determinados pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

Após o condicionamento adequado do provete, uma vez em contacto com a água são efectuado leituras às 3, 6, 24 e 72 horas.

Para determinar a absorção de água por capilaridade, é calculado o aumento de massa ( $M_i - M_0$ ) dividindo-o pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água. Os resultados são apresentados em curva como  $\text{kg/m}^2$  versus  $\sqrt{t_i}$ . Efectua-se o melhor ajuste de uma recta aos pontos obtidos. O declive da recta corresponde ao coeficiente de absorção capilar,  $K_C$  ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ ).

Os valores do coeficiente de absorção por capilaridade apresentados resultam da média de ensaios em quatro provetes.

## 3. RESULTADOS E ANÁLISE

### 3.1 Resistências à Compressão.

Na Tabela 3 apresentam-se as resistências à compressão médias para idades diferentes, o valor do desvio padrão, e o coeficiente de variação para as medições efectuadas. As Figuras 1 e 2 ilustram a variação da resistências à compressão com a razão água/cimento e com a idade de cura.

Tabela 3 - Resistência à Compressão

Idade [dias]	M40 [MPa]		M53 [MPa]		M65 [MPa]		M78 [MPa]	
	$R_{CM}$	s / cv [%]						
28	44.03	2.289	36.94	0.711	23.39	2.319	16.13	0.525
		5.198		1.924		9.915		3.254
56	48.32	1.870	47.02	1.701	26.90	0.933	21.01	1.720
		3.871		3.618		3.467		8.188
90	52.21	1.628	47.69	1.578	27.85	0.891	20.02	0.727
		3.118		3.309		3.198		3.633

A Figura 1 ilustra que a resistência à compressão diminui com o aumento da razão água/cimento, qualquer que seja a idade do betão. Contudo, o incremento de resistência à compressão com a diminuição de razão A/C não é constante. Confirma-se esta observação pela inclinação das rectas resistência à compressão com razão A/C entre 0.53 e 0.65 na Figura 1. O ganho de resistência média entre o betão M40 e M53 é cerca de 12 %, e entre M65 e M78 é aproximadamente 25 %. No entanto, o ganho de resistência média entre M53 e M65 é cerca de 63%. Este aumento abrupto sugere que, ao mudar de uma razão A/C de 0.53 para 0.65, o tamanho e numero de poros na matriz cimentícia são tais que a hidratação do cimento não é suficiente para colmatar eficazmente estes vazios, daí a perda significativa de resistência.

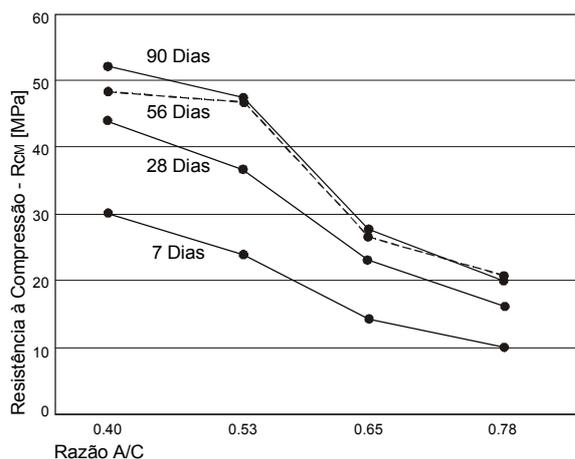


Figura 1 - Variação da resistência à compressão com a razão A/C.

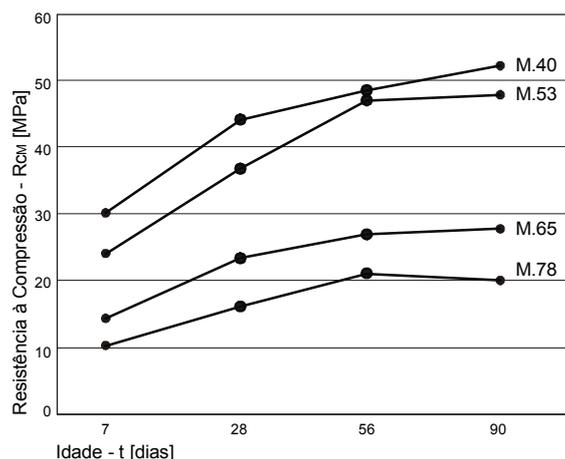


Figura 2 – Desenvolvimento da resistência à compressão com a idade de cura

De referir que, para razões A/C iguais ou superiores a 0.53, não há um ganho significativo de resistência entre os 56 e 90 dias. Este fenómeno poder-se-á dever ao volume do material cimentício formado, que é insuficiente para colmatar os poros, e por conseguinte, contribuir significativamente para o ganho de resistência.

### 3.2 Coeficiente de difusão de cloretos.

Na Tabela 4 apresentam-se os coeficiente de difusão médios para idades diferentes, o valor do desvio padrão, e o coeficiente de variação para as medições efectuadas. As Figuras 3 e 4 ilustram a variação dos coeficiente de difusão com a razão água/cimento e com a idade de cura.

A Figura 3 ilustra, como esperado, o aumento do coeficiente de difusão com o aumento da razão A/C. Para este ensaio, há um acréscimo significativo à medida que a razão A/C aumenta de 0.65 para 0.78. Esta alteração torna-se menos acentuado aos 90 dias, devendo-se provavelmente à criação de material cimentício nas idade avançadas, suficiente para impedir a migração do ião de cloro.

Tabela 4 - Coeficiente de difusão de cloretos

Idade [dias]	M40 [ $1e-12 \text{ m}^2/\text{s}$ ]		M53 [ $1e-12 \text{ m}^2/\text{s}$ ]		M65 [ $1e-12 \text{ m}^2/\text{s}$ ]		M78 [ $1e-12 \text{ m}^2/\text{s}$ ]	
	$D_M$	s / cv [%]						
28	18.56	1.583	22.71	2.875	29.28	4.223	54.48	9.338
		8.53		12.66		14.42		17.14
56	21.40	1.361	24.42	2.791	27.24	3.165	43.60	7.793
		6.36		11.43		11.62		17.87
90	18.31	1.229	26.24	2.417	33.55	3.742	42.84	5.016
		6.71		9.21		11.15		11.71

O ensaio CTH possui um coeficiente de variação ligeiramente maior, o que seria de esperar, dado o maior número de parâmetros variáveis existente no procedimento de ensaio mais complexo.

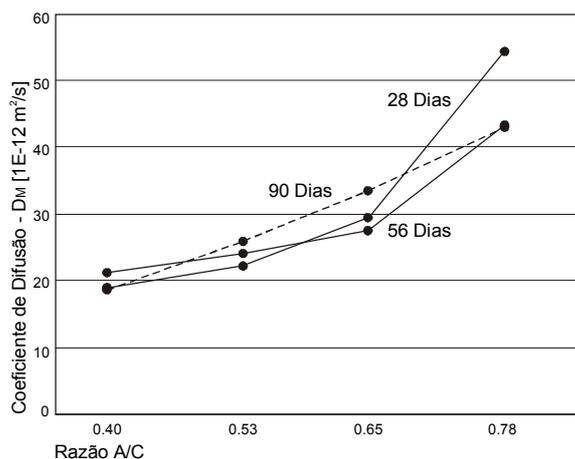


Figura 3 - Variação do coeficiente de difusão com a razão A/C.

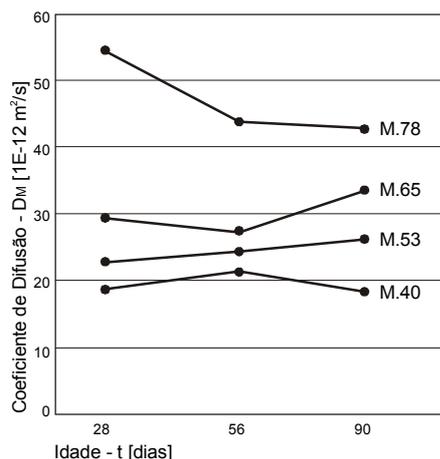


Figura 4 - Coeficiente de difusão em função da idade de cura

A Figura 4 ilustra a variação do coeficiente de difusão com a idade. Apesar de se esperar um decréscimo deste parâmetro com a idade, apenas se verificou nos betões com elevada razão A/C. Aparentemente o ensaio não é suficientemente sensível para detectar alterações com a idade em betões com baixa razão A/C. Contudo, o ensaio é capaz de classificar com distinção betões de qualidade diferentes.

### 3.3 Resistividade Eléctrica.

Na Tabela 5 apresentam-se os valores de resistividade eléctrica médios para idades diferentes, o valor do desvio padrão, e o coeficiente de variação para as medições efectuadas. As Figuras 5 e 6 ilustram a variação da resistividade eléctrica com a razão A/C e com a idade de cura.

Tabela 5 - Resistividade Eléctrica

Idade [dias]	M40 [ $\Omega.m$ ]		M53 [ $\Omega.m$ ]		M65 [ $\Omega.m$ ]		M78 [ $\Omega.m$ ]	
	$\rho_M$	s / cv [%]						
28	45.52	6.904	39.96	5.100	29.97	3.041	14.23	1.478
		15.17		12.76		10.15		10.38
56	46.24	2.211	44.64	2.417	32.98	3.531	20.18	1.018
		4.78		5.41		10.71		5.04
90	50.55	3.719	38.43	2.399	31.68	1.046	26.25	4.503
		7.36		5.42		3.30		17.16

A variação geral dos resultados do ensaio, medido pelo coeficiente de variação, apresenta um valor médio inferior a 10%, sendo o valor individual maior de 17%.

A Figura 6 ilustra uma diferenciação nítida entre as qualidades de betão diferentes enquanto a Figura 5 indica que a resistividade eléctrica diminui com a diminuição da razão A/C.

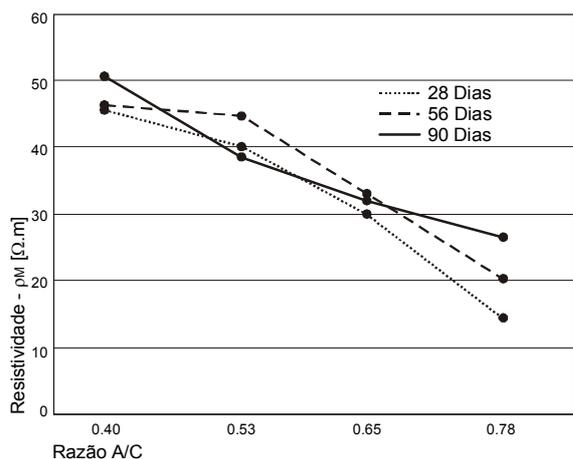


Figura 5 – Resistividade eléctrica função da razão A/C.

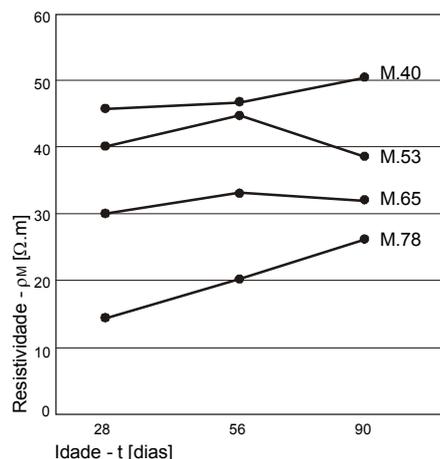


Figura 6 - Resistividade eléctrica função da idade de cura.

A Figura 6 ilustra ainda como a resistividade eléctrica varia com a idade. A tendência geral é para este parâmetro aumentar com a idade de cura. O ensaio aparentemente é sensível a diferentes qualidade de betão, contudo, nem sempre esta distinção é clara. Poderá dever-se ao curto período de cura a que os provete foram expostos, sendo provavelmente este ensaio mais indicado para idades superiores a 90 dias.

### 3.4 Permeabilidade ao Oxigénio.

Na Tabela 6 apresentam-se os valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio médios para idades diferentes, o valor do desvio padrão, e o coeficiente de variação para as medições efectuadas. As Figuras 7 e 8 ilustram a variação do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio com a razão água/cimento e com a idade de cura.

Tabela 6 - Permeabilidade ao Oxigénio

Idade [dias]	M40 [1e-16 m/s]		M53 [1e-16 m/s]		M65 [1e-16 m/s]		M78 [1e-16 m/s]	
	K <sub>GM</sub>	s / cv [%]						
28	0.99	0.029	0.88	0.015	5.69	0.837	21.03	4.345
		2.97		1.74		14.72		20.66
56	0.74	0.026	0.94	0.042	3.55	0.540	7.42	1.281
		3.61		4.44		15.19		17.26
90	0.51	0.021	0.81	0.061	2.39	0.490	6.52	2.014
		4.13		7.54		20.45		30.91

A partir dos dados apresentados na Tabela 6, pode-se observar que os resultados da permeabilidade ao oxigénio cobrem 3 ordens de grandeza. Será, aparentemente, indicação que o ensaio é capaz de distinguir diferenças na qualidade do betão. É interessante reparar que, para betões mais densos, i.e. M40 e M53, o coeficiente de variação é mais pequeno (4%) que o de betões mais permeáveis (20%). Apesar de relativamente alto, estas variações são consideradas normais por alguns autores [9] para o ensaio de permeabilidade ao oxigénio.

A Figura 7 ilustra que a permeabilidade ao oxigénio aumenta à medida que aumenta a razão A/C. De notar que a escala na Figura 7 é logarítmica. Enquanto que os betões mais densos partilharem a mesma ordem de grandeza, o M65 é uma ordem de grandeza superior, e o M78 ainda outro. Isto indica que o ensaio é capaz de diferenciar claramente variações na razão A/C.

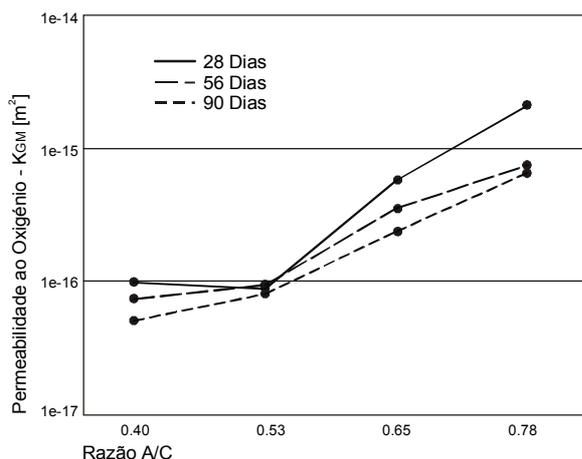


Figura 7 – Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio função da razão A/C.

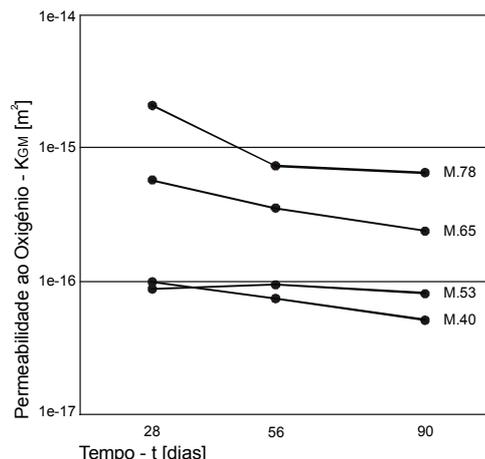


Figura 8 - Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio função da idade de cura.

A Figura 8 ilustra a sensibilidade do ensaio à idade de cura para um dado betão. Os valores diminuíram com a idade. O ensaio aparenta menor sensibilidade para betões mais densos .

### 3.5 Absorção por Capilaridade

Na Tabela 7 apresentam-se os valores do coeficiente de absorção por capilaridade médios para idades diferentes, o valor do desvio padrão, e o coeficiente de variação para as medições efectuadas. As Figuras 9 e 10 ilustram a variação da coeficiente de absorção por capilaridade com a razão água/cimento e com a idade de cura.

Tabela 7 - Absorção por Capilaridade

Idade [dias]	M40 [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]		M53 [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]		M65 [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]		M78 [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> ]	
	K <sub>CM</sub>	s / cv [%]						
28	0.251	0.025	0.546	0.039	0.640	0.045	1.603	0.074
		9.96		7.14		7.06		4.60
56	0.256	0.157	0.345	0.006	0.672	0.024	1.072	0.135
		6.12		1.72		3.54		12.56
90	0.269	0.003	0.360	0.013	0.578	0.038	1.061	0.106
		1.09		3.58		6.54		9.94

O coeficiente de absorção por capilaridade tende a diminuir com a idade de cura e aumentar com a diminuição da qualidade do betão.

A Figura 9 ilustra que o coeficiente de capilaridade aumenta com o aumento da razão A/C. Este comportamento confirma o facto conhecido que a porosidade do betão aumenta com o aumento da razão A/C.

A Figura 10 ilustra a sensibilidade do ensaio à idade de cura. Todos os valores diminuem com a idade de cura. O ensaio aparenta uma menor sensibilidade para betões mais densos.

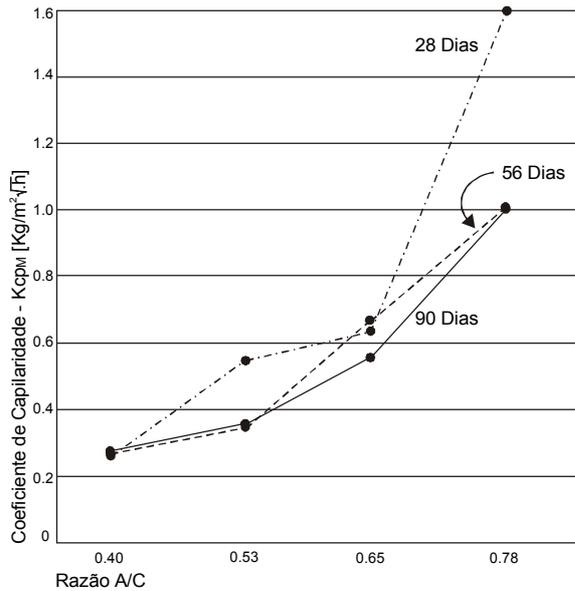


Figura 9 – Coeficiente de absorção capilar função da razão A/C.

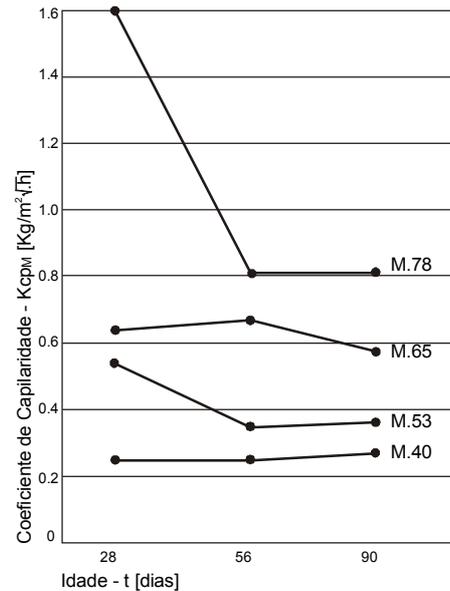


Figura 10 - Coeficiente de absorção capilar função da idade de cura.

### 3.6 Avaliação dos Ensaios

A primeira abordagem na avaliação dos ensaios efectuados consistiu na análise dos coeficientes de variação (ver Tabela 8). Os coeficientes de variação, que medem a dispersão relativa dos dados e indicam o grau relativo de concentração em torno do valor médio. Daí que, o coeficiente poderá ser utilizado para efectuar comparações da repetibilidade e reproducibilidade dos ensaios.

Tabela 8 - Coeficiente de variação dos ensaios

Test/ Dias	M40			M53			M65			M78		
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
R <sub>C</sub>	5.20	3.87	3.12	1.92	3.62	3.31	9.92	3.47	3.20	3.25	8.19	3.63
D	8.53	6.36	6.71	12.66	11.43	9.21	14.42	11.62	11.15	17.14	17.87	11.71
ρ	15.17	4.78	7.36	12.76	5.41	5.42	10.15	10.71	3.30	10.38	5.04	17.16
K <sub>G</sub>	2.97	3.61	4.13	1.74	4.44	7.54	14.72	15.19	20.45	20.66	17.26	30.91
K <sub>C</sub>	9.96	6.12	1.09	7.14	1.72	3.58	7.01	3.54	6.54	4.60	12.56	9.94

A tendência geral do coeficiente de variação é para diminuir com o aumento da idade de cura, indicando a diminuição da dispersão à medida que a idade de cura aumentar. Isto pode ser explicado devido à maior homogeneidade do material com a formação de produtos de hidratação com tempo. Seria de esperar que acontecesse, e é provavelmente uma das razões pela recomendação de ensaios a idades maiores. Em termos práticos, significa que pode-se obter resultados mais fiáveis a idade de cura mais avançada com o mesmo número de provetes.

Outra tendência geral do coeficiente de variação é de aumentar com a diminuição da qualidade do betão. Também seria de esperar, uma vez que os betões de baixa qualidade, i.e., razão A/C maiores, possuem uma maior heterogeneidade devido à escassez da matriz cimentícia, resultando numa maior dispersão dos resultados dos ensaios. Pode-se concluir que, quanto maior for a qualidade do betão, menor o número de provete necessário para obter um resultado com a mesma fiabilidade.

Quando se compara os ensaios, verifica-se que o ensaio de resistência à compressão mantém um coeficiente de variação baixo para todo os tipos de betão ensaiados. Por outro lado, a permeabilidade ao oxigénio possui uma grande variação tendo os maior valores de coeficiente de variação para os betões de baixa qualidade. De uma forma geral, sugere-se a seguinte classificação para a reproducibilidade dos ensaios, por ordem decrescente: resistência à compressão, resistividade eléctrica, *CTH Rapid Method* e finalmente a permeabilidade ao oxigénio.

### 3.7 Sensibilidade dos Ensaio

Para medir a sensibilidade de um ensaio, ou seja, o intervalo no qual o ensaio pode exprimir variação, os valores adimensionais dos resultados do ensaios são calculado e apresentados na Tabela 9. Os valores dimensionais são obtido dividindo cada resultado individual pelo resultado correspondente ao M40 aos 28 dias. Isto permite efectuar a comparação da gama dos valores obtidos. O factor de sensibilidade,  $\lambda$ , é sugerido, sendo obtido pela divisão do maior valor pelo menor valor para cada ensaio. Por exemplo, o maior valor fraccionário para a resistência à compressão é 1.19 enquanto que o menor é 0.37. Daí que, o factor de sensibilidade é:  $\lambda = 1.19/0.37 = 3.22$ .

É interessante realçar que para os ensaios efectuados, os valores utilizados para o calculo do factor de sensibilidade correspondem ao M40 aos 90 dias de cura, teoricamente o betão mais denso e mais durável, e ao M78 aos 28 dias cura, teoricamente o betão menos denso e durável.

Tabela 9 - Valores adimensionais e Factores de Sensibilidade ( $\lambda$ )

Test/ Dias	Rc			D			$\rho$			$K_G$			$K_C$		
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
M40	1.00	1.10	<b>1.19</b>	1.00	1.02	<b>1.11</b>	1.00	0.75	<b>0.52</b>	1.00	1.15	<b>0.99</b>	<b>1.00</b>	1.02	1.07
M53	0.84	1.07	1.08	0.88	0.98	0.84	0.89	0.95	0.82	1.22	1.32	1.41	2.18	1.38	1.44
M65	0.53	0.61	0.63	0.66	0.72	0.70	5.75	3.59	2.41	1.58	1.47	1.81	2.55	2.68	2.31
M78	<b>0.37</b>	0.48	0.45	<b>0.31</b>	0.44	0.58	<b>21.24</b>	7.49	6.59	<b>2.94</b>	2.35	2.31	<b>6.40</b>	4.28	4.23
$\lambda$	<b>3.22</b>			<b>2.97</b>			<b>3.58</b>			<b>40.85</b>			<b>6.40</b>		

Na Tabela 9 observa-se que o ensaio de permeabilidade ao oxigénio é extremamente sensível a variações na qualidade do betão, com  $\lambda \cong 40$ . Por outro lado, a resistência à compressão, o ensaio CTH e o ensaio de resistividade eléctrica possuem factores de sensibilidade semelhantes com  $\lambda$  variando de 3 a 6. O factor de sensibilidade da permeabilidade ao oxigénio é uma ordem de grandeza superior aos estimados para outros ensaios.

### 3.8 Relações entre os diversos ensaios de durabilidade

A passagem de líquidos, gases e iões, num determinado meio poroso deve estar, até determinado ponto inter-relacionado, uma vez que o sistema poroso é o mesmo. Assim, estudou-se as possíveis relações entre os resultados dos ensaios utilizados. Para tal, utilizou-se equações logarítmica, exponencial, quadrática e linear. Os resultados dos melhores ajustes dos dados das Tabelas 3-7 recorrendo a diversas equações são apresentados. A equação que correspondeu o maior coeficiente de determinação foi escolhida como sendo a que melhor descrevesse a relação entre os dois conjunto de dados.

As Figuras 11 a 20 ilustram os melhores ajustes e o respectivo coeficiente de

determinação. Como pode ser observado, os melhores ajustes foram logarítmicos ou exponenciais. A Tabela 10 apresenta os coeficiente de determinação dos melhores ajustes.

Tabela 10 - Coeficiente de determinação dos melhores ajustes.

$R^2$	$R_C$	D	$\rho$	$K_G$	$K_C$
$R_C$	---	0.83	0.92	0.91	0.89
D	0.83	---	0.94	0.84	0.93
$\rho$	0.92	0.94	---	0.92	0.95
$K_G$	0.91	0.84	0.92	---	0.90
$K_C$	0.89	0.93	0.95	0.90	---

De notar que o ensaio de resistividade eléctrica possui os coeficiente de determinação mais elevada. Significa que a resistividade eléctrica correlaciona-se bem com os restantes ensaios e poderá ser um ensaio adequado à determinação das características de durabilidade do betão. Por isto, os restantes ensaios podem ser estimados relativamente bem, se os resultados da resistividade eléctrica forem conhecidos. Isto possui um significado prático importante quanto à selecção do ensaio de durabilidade do betão a utilizar. Naturalmente, são necessários mais ensaios para validar esta conclusão, numa base generalizada com o intuito de controlo de qualidade.

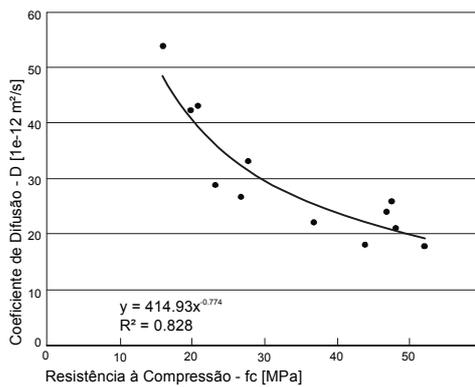


Figura 11 – Melhor ajuste para a resistência à compressão e o ensaio CTH.

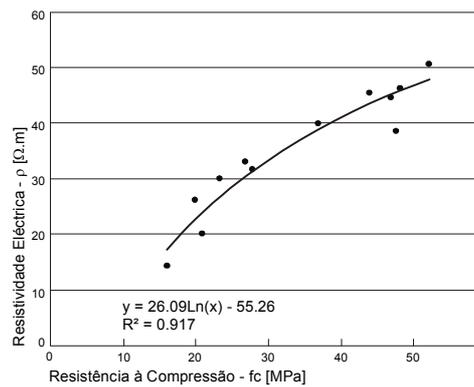


Figura 12 - Melhor ajuste para a resistência à compressão e a resistividade eléctrica.

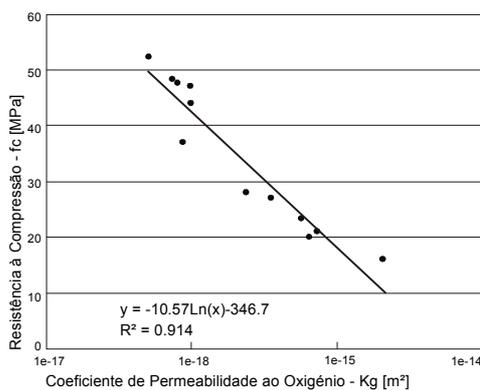


Figura 13 - Melhor ajuste para a resistência à compressão e a permeabilidade ao oxigénio.

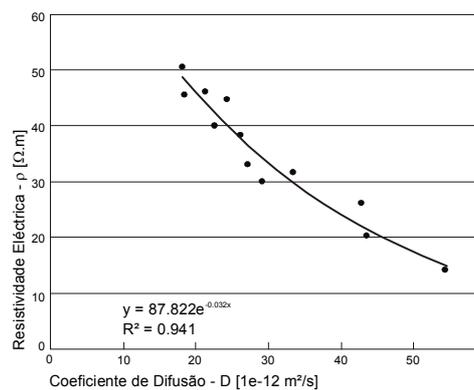


Figura 14 - Melhor ajuste para resistividade eléctrica e o ensaio CTH.

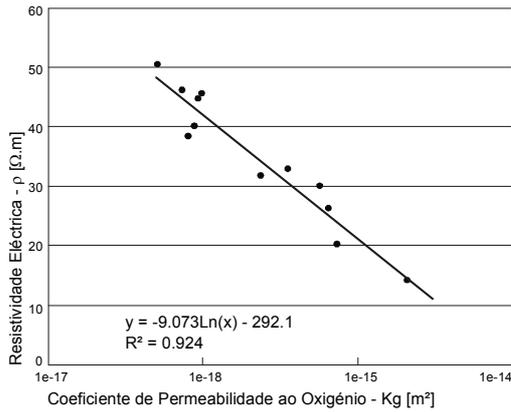


Figura 15 - Melhor ajuste para a resistividade eléctrica e a permeabilidade ao oxigénio.

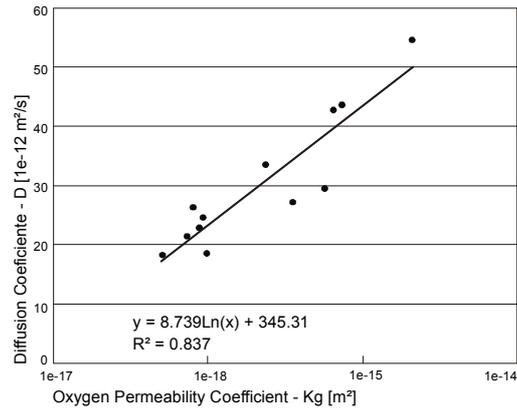


Figura 16 - Melhor ajuste para ensaio CTH e a permeabilidade ao oxigénio.

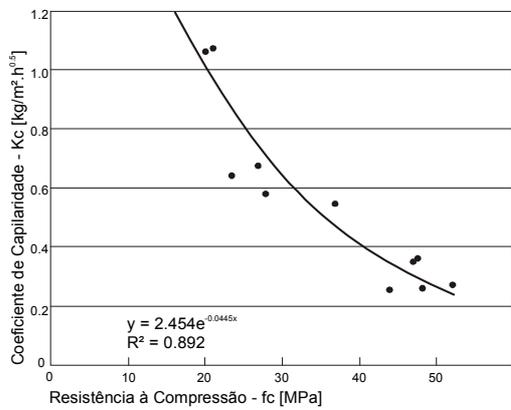


Figura 17 - Melhor ajuste para a resistência à compressão e a absorção capilar.

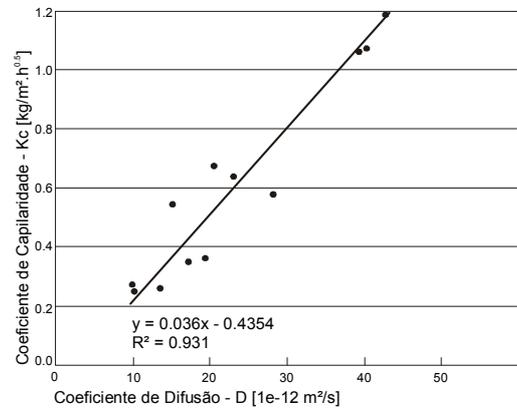


Figura 18 - Melhor ajuste para o ensaio CTH e a absorção capilar.

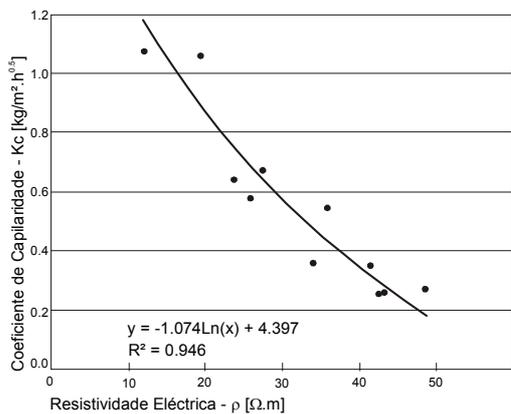


Figura 19 - Melhor ajuste para a resistividade eléctrica e a absorção capilar.

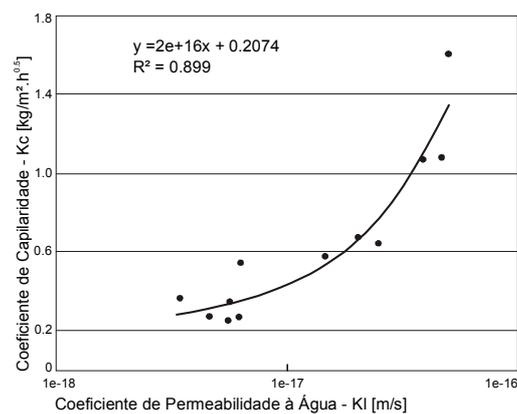


Figura 20 - Melhor ajuste para a permeabilidade ao oxigénio e a absorção capilar.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos e a análise dos mesmos indicam as seguinte conclusões relativamente aos ensaios realizados:

1. Os resultados da resistência à compressão são regulares apresentando os coeficientes de variação mais baixos (4 %). Contudo, este ensaio não traduz o estado de durabilidade do betão, especialmente quando a cura não é efectuada dentro de água.

2. O ensaio de determinação do coeficiente de difusão por migração (CTH) possui pouca sensibilidade a variações da idade do betão, entre 28 e 90 dias. Contudo, o ensaio é capaz de diferenciar entre betão diferentes, que é confirmado pelo factor de sensibilidade.
3. O ensaio da resistividade eléctrica é de execução rápida. O ensaio distingue mais claramente diferenças na qualidade do betão que o ensaio CTH. Contudo, mostra pequena sensibilidade para a idade do betão, entre 28 e 90 dias.
4. O ensaio de permeabilidade ao oxigénio possui uma grande sensibilidade à qualidade do betão, e numa menor escala, às variações da idade do betão.
5. Os resultados tornam-se mais fiáveis quanto maior a idade e melhor a qualidade do betão. Na prática, significa que, para betões de maior qualidade, i.e., menor razão A/C, menor número de provetes são necessários para obter um determinado nível de confiança no resultado do ensaio.  
Sugere-se a seguinte classificação para a reproducibilidade dos ensaios, por ordem decrescente: resistência à compressão, resistividade eléctrica, migração de iões de cloro e finalmente a permeabilidade ao oxigénio.
6. A comparação do factor de sensibilidade dos ensaios indica que a permeabilidade ao oxigénio é extremamente sensível a variações na qualidade do betão. Por outro lado, a resistência à compressão, o ensaio CTH e o ensaio de resistividade eléctrica possuem factores de sensibilidade equivalentes. O factor de sensibilidade da permeabilidade ao oxigénio é uma ordem de grandeza superior às restantes.
7. Quando os resultados de ensaios são correlacionados, verifica-se que o ensaio de resistividade eléctrica possui o maior coeficiente de determinação média, podendo ser bem correlacionado com os restantes ensaios. Por este motivo, o ensaio de resistividade eléctrica é um bom candidato para o ensaio padrão de durabilidade do betão, contudo são necessário mais ensaios para validar esta conclusão.

## 5. REFERENCIAS

- [1] LNEC - E226, “Betão: Ensaio de compressão”, LNEC, Lisboa, 1968.
- [2] Gjörv, O.E.; “Controlled service life of concrete structures and enviromental consciousness”, Concrete Technology for Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> Century, FN & Spon, 2000, pp. 1-14.
- [3] Ferreira, R. M.; “Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão”, Tese Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2000.
- [4] LNEC - E226, “Betão: Ensaio de compressão”, LNEC, Lisboa, 1968.
- [5] Luping, T., “Chloride transport in concrete - Measurement e prediction”. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gotemborg, Sweden, 1996, 88 pp.
- [6] Fishbane, P.M., Gasiorowicz, S. e Thorton, S.T., “Physics for scientists e engineers”, Prentice Hall, 1996, 1149 pp.
- [7] Yssorche, M.P., Bigas, J.P., *et al*, “Mesure de la perméabilité à lair des bétons au moyen d’un perméamètre à charge variable”, Materials e Structures, RILEM, 1995, Vol. 28, pp. 401-405.
- [8] LNEC - E393, “Betão: Ensaio de compressão”, LNEC, Lisboa, 1968.
- [9] Cabrera, J.G., Hassan, K.E., “Controlling the quality of concrete by measuring its permeability”, 13<sup>th</sup> Internationale Baustofftagung, Weimar, Germany