



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

**DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO**

**PROJECTO FCT  
PTDC / ECM / 118372 / 2010**



## Tarefa 5

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELLentSUSustainableCONCcrete)**

**APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BETÕES RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO (2ª FASE)**

**RELATÓRIO**

Julho de 2015

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

## **Índice**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO</b>	<b>1</b>
<b>3. MATERIAIS UTILIZADOS</b>	<b>3</b>
<b>4. PROCEDIMENTO DE MISTURA UTILIZADO</b>	<b>5</b>
<b>5. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO</b>	<b>6</b>
5.1. Abaixamento (cone de Abrams)	7
5.2. Massa volúmica	7
<b>6. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO</b>	<b>8</b>
6.1. Propriedades em termos mecânicos	8
6.1.1. Resistência à compressão em cubos	8
6.1.2. Resistência à tracção por compressão diametral	12
6.1.3. Módulo de elasticidade	13
6.1.4. Velocidade de propagação dos ultra-sons	15
6.2. Propriedades em termos de durabilidade	17
6.2.1. Absorção de água por imersão	17
6.2.2. Absorção de água por capilaridade	19
6.2.3. Resistência à carbonatação	22
6.2.4. Resistência à penetração de cloretos	24
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>27</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>29</b>

## Índice de figuras

Figura 1 - Mistura com agregados grossos, sílica de fumo e 75% da água .....	6
Figura 2 - Mistura com agregados finos, agregados grossos, sílica de fumo e 75% da água .....	6
Figura 3 - Introdução de cimento na mistura .....	6
Figura 4 - Resultado final.....	6
Figura 5 - Resultados do ensaio de massa volúmica.....	8
Figura 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias .....	10
Figura 7 - Evolução resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 0% SF .....	10
Figura 8 - Evolução resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 5% SF .....	11
Figura 9 - Evolução resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 10% SF .....	11
Figura 10 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral....	13
Figura 11 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade .....	14
Figura 12 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.....	15
Figura 13 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.....	15
Figura 14 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade .....	16
Figura 15 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.....	18
Figura 16 - Relação entre absorção de água por imersão e resistência à compressão ....	18
Figura 17 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas.....	19
Figura 18 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 0% SF.....	20
Figura 19 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 5% SF.....	20
Figura 20 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 10% SF.....	20
Figura 21 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade .....	21
Figura 22 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão .....	22
Figura 23 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 e 91 dias .....	23

Figura 24 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão .....	25
Figura 25 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade.....	25
Figura 26 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias .....	26
Figura 27 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 91 dias e absorção de água por imersão .....	27

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição dos betões analisados (/m <sup>3</sup> ).....	3
Tabela 2 - Resistência à compressão dos betões de origem PF 65 .....	4
Tabela 3 - Propriedades dos agregados.....	4
Tabela 4 - Propriedades da sílica de fumo .....	5
Tabela 5 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	7
Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa volúmica .....	7
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.....	8
Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	9
Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias.....	9
Tabela 10 - Resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias .	12
Tabela 11 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias .....	13
Tabela 12 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons .....	15
Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão .....	17
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas ....	19
Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade .....	21
Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 dias .....	22
Tabela 17 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias .....	22
Tabela 18 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 56 dias .....	23
Tabela 19 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 91 dias .....	23
Tabela 20 - Resultados dos coeficientes de carbonatação.....	24
Tabela 21 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias.....	25
Tabela 22 - Perdas de desempenho devidas à utilização de 100% de AR.....	28
Tabela 23 - Perdas de desempenho devidas à utilização de sílica de fumo .....	28

## Abreviaturas

AFN	Agregados finos naturais
AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGN	Agregados grossos naturais
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
BAR	Betões com agregados reciclados
BED	Betões de elevado desempenho
BR	Betões de referência
CV	Cinzas volantes
$D_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima do agregado
PF	Família de betão pré-fabricado
Relação a/l	Relação água / ligante
SF	Sílica de fumo

## **1. Introdução**

O presente relatório tem como objectivo apresentar os resultados experimentais da 2ª fase da tarefa 5 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUS-tainableCONcrete)”.

A metodologia seguida procurou modificar alguns dos princípios da fase anterior, nomeadamente a não utilização de sílica de fumo (SF) como um substituto do cimento mas sim como um material adicional presente na composição do betão (adição). Paralelamente, foi considerado um novo equipamento de mistura (betoneira eixo vertical) e adoptado um procedimento distinto no fabrico dos betões.

Neste sentido, a campanha experimental englobou a produção de três famílias de betão de elevado desempenho (BED) com quantidades de SF de 0, 5 e 10% da massa de cimento, material que permaneceu constante e com um valor de 550 kg/m<sup>3</sup>. As amassaduras incorporaram ainda cinzas volantes (CV) e superplastificante. As CV representaram 10% da massa de cimento e o superplastificante foi adicionado na proporção de 2% da massa de cimento e de cinzas volantes. Cada família compreendeu um betão de referência (BR) e três betões reciclados (BAR) com percentagens de substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados e de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados de 50/50, 0/100 e 100/100%, respectivamente.

Na avaliação realizada, foram efectuados ensaios de carácter mecânico e de durabilidade: resistência à compressão; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; ultra-sons; resistência à carbonatação; resistência à penetração por cloretos; absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

## **2. Enquadramento e contexto**

O BED deve ser visto como um betão modificado / optimizado para atingir exigências especiais e não como um produto diferente do betão convencional.

As primeiras exigências especiais estiveram relacionadas com a necessidade de se obter resistências elevadas em idades precoces, a fim de colocar estruturas em serviço. No entanto, a alta resistência tem-se tornado também necessária a longo prazo. Esta realidade deve-se à construção em altura e à utilização de elementos estruturais com secções cada vez menores que permitem uma redução no peso e, por conseguinte,

menores cargas aplicadas às fundações. A utilização de pilares e paredes com menores secções constitui também uma mais-valia económica associada à menor área ocupada.

No que respeita aos elementos de flexão, os benefícios da elevada resistência são mais difíceis de explorar. Esta situação prende-se com a fissuração na zona de tracção de uma viga, pois a resistência à tracção não aumenta na proporção da resistência à compressão.

A elevada resistência do betão pode também ser necessária, não *per si*, mas para se atingir altos valores de módulo de elasticidade, importantes no que respeita à deformação dos elementos estruturais.

Contudo, salienta-se que a resistência nem sempre é a principal propriedade requerida. Nas situações que exigem baixas permeabilidades do betão, é necessário recorrer-se a BED, sendo esta utilização particularmente importante para este tipo de betões.

Por exemplo, no trabalho desenvolvido por Bickley e Fung (2001) demonstrou-se que betões economicamente viáveis com 40 MPa poderiam ser utilizados como BED na construção de pontes enquanto determinados factores de durabilidade fossem garantidos.

Um outro aspecto importante a focar é que existem situações em que a baixa permeabilidade dos BED pode constituir uma desvantagem. Isto sucede em casos de incêndio, onde se verifica um aumento rápido da temperatura do betão. Devido à baixa permeabilidade, a água presente no seu interior pode não conseguir escapar com a rapidez suficiente; a pressão do vapor de água resultante pode causar rotura da pasta de cimento e fragmentação do betão.

Na composição dos betões de elevado desempenho, são utilizados geralmente cimentos do tipo CEM I (42,5R ou 52,5R) de endurecimento rápido, com baixo calor de hidratação e resistentes aos sulfatos. A quantidade de materiais cimentícios é muito elevada: 400 e 550 kg/m<sup>3</sup> (Neville e Aïtcin, 1998). A massa de sílica de fumo, quando utilizada, representa 5 a 15% da massa de cimento, sendo o valor de 10% considerado o ideal. Além da sílica, podem ser utilizadas outras adições como cinzas volantes e escórias. Estes materiais são geralmente mais baratos do que o cimento e a sílica e reagem um pouco mais tarde. A dosagem de superplastificante é de 5 a 15 litros por metro cúbico de betão e depende, entre outros factores, da “reactividade” do cimento (Neville e Aïtcin, 1998). A relação entre a massa de água e a massa total dos materiais cimentícios está normalmente entre 0,25 e 0,35 (Neville e Aïtcin, 1998). No que respeita aos agregados, a fracção grossa deve possuir uma dimensão máxima entre 10 e 14 mm e apresentar o seguinte conjunto de características: ser resistente; ter uma superfície absolutamente limpa, isto é, livre de impurezas aderidas ou poeiras; não conter sílica reactiva e

ser equidimensional em forma, não sendo laminada nem alongada. Quanto à fracção fina, deve apresentar, de preferência, um módulo de finura de 2,7 a 3,0 (Neville e Aitcin, 1998).

Os betões de elevado desempenho exigem um processo de cura diferente, uma vez que os elevados teores de cimento e reduzida dosagem de água podem potenciar riscos de fissuração por retracção, nomeadamente por retracção plástica e autogénea. Este tipo de betões pode apresentar valores significativos de retracção autogénea (produtos de hidratação do ligante com menor volume do que os seus reagentes) se não for submetido a cura saturada durante o processo de hidratação (Aitcin, 2003). No caso de betão corrente, ou seja, betão com uma relação água / cimento de, por exemplo, 0,45 ou mais, uma cura adequada pode ter de alguma forma menor importância, mas isso irá melhorar o desempenho e durabilidade da estrutura do betão.

### 3. Materiais utilizados

Na composição dos betões (Tabela 1), foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (AFN), agregados grossos naturais (AGN), agregados finos reciclados de betão (AFRB), agregados grossos reciclados de betão (AGRB), cimento, cinzas volantes, sílica de fumo, superplastificante e água.

**Tabela 1 - Composição dos betões analisados (/m<sup>3</sup>)**

Família	Mistura	AFN (kg)	AGN (kg)	AFRB (kg)	AGRB (kg)	CEM I 52,5R (kg)	CV (kg)	SF (kg)	Água (l)	Relação a/l	Relação a/l <sub>ef</sub>	Superplastificante (kg)
0% SF	BR 0/0	705	900	0	0	550	55	0	169	0.28	0.28	12.1
	B 50/50	349	445	356	409	550	55	0	179	0.3	0.29	12.1
	B 0/100	698	0	0	819	550	55	0	179	0.3	0.29	12.1
	B 100/100	0	0	709	802	550	55	0	196	0.32	0.31	12.1
5% SF	BR 0/0	680	868	0	0	550	55	27.5	169	0.28	0.28	12.1
	B 50/50	336	429	343	395	550	55	27.5	179	0.3	0.29	12.1
	B 0/100	673	0	0	789	550	55	27.5	179	0.3	0.29	12.1
	B 100/100	0	0	682	772	550	55	27.5	196	0.32	0.31	12.1
10% SF	BR 0/0	655	836	0	0	550	55	55	169	0.28	0.28	12.1
	B 50/50	324	413	330	380	550	55	55	179	0.3	0.29	12.1
	B 0/100	648	0	0	760	550	55	55	179	0.3	0.29	12.1
	B 100/100	0	0	655	742	550	55	55	196	0.32	0.31	12.1

Os agregados reciclados (AR) tiveram origem nos produtos rejeitados da pré-fabricação (PF) com resistências-alvo de 65 MPa. A determinação da resistência dos produtos PF foi realizada através de extracção de carotes. No processo de extracção, foi seguida a norma NP EN 12504-1 (2003), sendo as questões relativas à forma, dimensão e outros requisi-

tos especificados para os provetes de ensaio consultados na norma NP EN 12390-1 (2003). Posteriormente, a resistência em cubos *in situ* foi estimada através das *British Standards* (BS 6089, 1981; BS 1881, 1983) e do relatório técnico da Concrete Society (1976). Na Tabela 2, são apresentados os resultados.

**Tabela 2 - Resistência à compressão dos betões de origem PF 65**

Betão de origem	Resistência à compressão (MPa)
PF65	74,5

Para a britagem dos produtos PF, foi considerado o método de trituração primário mais secundário que ocorreu numa pedreira em Rio Maior e que procurou reproduzir a técnica industrial que é utilizada na obtenção dos agregados naturais (AN).

Os AR resultantes foram separados em função da sua dimensão, através de peneiração mecânica, sendo apenas utilizadas as fracções compreendidas entre 0 e 16 mm (na fase anterior tinha sido considerado um  $D_{máx}$  de 22,4 mm). Após a separação, os agregados foram armazenados em recipientes hermeticamente fechados, para evitar trocas de humidade com o ambiente.

Relativamente ao cimento, foi utilizado o CEM I 52,5R numa quantidade constante de  $550 \text{ kg/m}^3$ . A sílica de fumo foi introduzida como um material suplementar ao cimento em proporções de 0, 27,5 e  $55 \text{ kg/m}^3$  nas famílias de 0, 5 e 10% SF, respectivamente. De igual modo, foi incorporada uma quantidade fixa de  $55 \text{ kg/m}^3$  de cinzas volantes. Em todas as amassaduras, foi adicionado ainda superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 2% da massa de cimento e de CV, diluído na água de amassadura, obtida da rede pública de abastecimento.

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentadas as propriedades dos agregados e da sílica de fumo, respectivamente.

**Tabela 3 - Propriedades dos agregados**

Tipo de agregado	Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )			Absorção de água (%)
	Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Areia fina	2663	2662	2617	0,2
Areia grossa	2640	2610	2615	0,5
Brita 1	2700	2680	2670	0,6
Brita 2	2710	2670	2690	0,6
AFRB	2855	2433	2580	6,1
AGRB	2614	2371	2464	3,9

**Tabela 4 - Propriedades da sílica de fumo**

Análise por fluorescência de raios x			
Parâmetro	Resultado	Unidades	Norma
SiO <sub>2</sub>	94,31	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
CaO	2,13	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
MgO	0,41	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
K <sub>2</sub> O	0,24	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Ensaio físico			
Propriedade	Resultado	Unidades	Norma
Massa volúmica	2,01	g/cm <sup>3</sup>	LNEC E 61 (1979)
Resíduo de peneiração, 45 µm	96,4	%	NP EN 196-6:2010

Analisando a Tabela 3, verifica-se que os valores da absorção de água dos AR, devido à quantidade residual de argamassa aderida, são muito superiores aos dos agregados naturais. Esta realidade é ainda mais evidente para a fracção fina. Por conseguinte, é expectável que os BAR apresentem maiores relações a/l. No entanto, os AR utilizados conseguem cumprir os requisitos necessários para a sua aplicação em betão (Building Contractors Society of Japan, 1981). Estes limites para agregados grossos e finos reciclados foram fixados em 7 e 13%, respectivamente.

Relativamente aos valores de massa volúmica, verifica-se uma maior proximidade entre AR e AN. As diferenças não ultrapassam 12%. Além disso, utilizando o sistema de classificação proposto por Silva et al. (2014), constata-se que todos os agregados reciclados desta campanha, em termos de valores de massa volúmica, poderiam pertencer à classe A (agregados de melhor qualidade).

No que respeita às propriedades da sílica de fumo (Tabela 4), constata-se que este material apresenta uma elevada quantidade de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), cerca de 94%. No entanto, apenas 4% das partículas têm dimensões inferiores a 45 µm, o que poderá afectar o seu desempenho nas amassaduras de betão.

#### **4. Procedimento de mistura utilizado**

Na amassadura dos betões, foi empregue um processo de mistura adaptado do *Silica Fume User's Manual* (Holland, 2005). O processo tem uma duração de 16 minutos e consiste nos seguintes passos:

- ligar a betoneira;
- colocar os agregados grossos (naturais e reciclados) com a sílica de fumo e 75% da água total (Figura 1);

- esperar 2:30 minutos e introduzir os agregados finos (naturais e reciclados) (Figura 2);
- esperar 2:30 minutos e introduzir o cimento, as cinzas volantes e os restantes 25% da água total misturada com o superplastificante (Figura 3);
- esperar mais 5 minutos, para homogeneização da mistura, e desligar a betoneira durante 3 minutos;
- ligar a betoneira e continuar a misturar durante mais 3 minutos (Figura 4).



**Figura 1 - Mistura com agregados grossos, sílica de fumo e 75% da água**



**Figura 2 - Mistura com agregados finos, agregados grossos, sílica de fumo e 75% da água**



**Figura 3 - Introdução de cimento na mistura**



**Figura 4 - Resultado final**

## **5. Ensaio ao betão no estado fresco**

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica). Estes ensaios têm por objectivo avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S4) e a massa volúmica dos betões produzidos.

## 5.1. Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi efectuado segundo a norma NP EN 12350-2 (2009). Foi definido um abaixamento alvo de 190 mm, com uma tolerância máxima de 20 mm relativamente a este valor. Na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos.

**Tabela 5 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento**

	0% SF		5% SF		10% SF	
	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)
BR 0/0	0,28	207	0,28	209	0,28	208
B 50/50	0,29	208	0,29	200	0,29	185
B 0/100	0,29	207	0,29	205	0,29	200
B 100/100	0,31	196	0,31	185	0,31	180

Através da observação da tabela, constata-se que todos os betões produzidos respeitaram o intervalo  $190 \pm 20$  mm. De forma a garantir trabalhabilidades idênticas, foi necessário aumentar a relação água / ligante dos BAR.

Esta situação foi mais evidente para as maiores taxas de substituição e pode ser explicada através da elevada absorção do material reciclado e pela sua forma achatada e angulosa.

## 5.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Na Tabela 6 e na Figura 5, são apresentados os resultados.

**Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa volúmica**

	0% SF		5% SF		10% SF	
	Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	2384,6	0,0	2373,3	0,0	2356,9	0,0
B 50/50	2340,2	-1,9	2326,8	-2,0	2311,6	-1,9
B 0/100	2359,8	-1,0	2348,0	-1,1	2334,1	-1,0
B 100/100	2297,7	-3,6	2287,0	-3,6	2274,9	-3,5

Analisando a Tabela 6, verifica-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui com o aumento da percentagem de AR. Esta diminuição parece ocorrer de forma aproximadamente linear (Figura 5). Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

Observa-se também uma diminuição desta propriedade com o aumento da quantidade de SF. Esta situação poderá ser justificada pelo facto de a massa volúmica da sílica

ser inferior à dos agregados. De notar que, para idênticos volumes de mistura, a introdução de SF implica a redução do volume de agregados (Tabela 1).

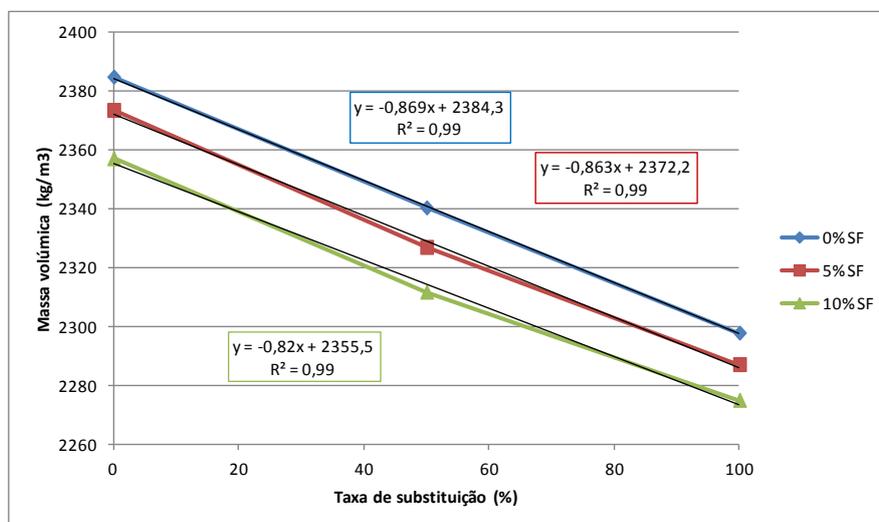


Figura 5 - Resultados do ensaio de massa volúmica

## 6. Ensaio ao betão no estado endurecido

No capítulo 6, são apresentados e comentados os resultados obtidos para o betão no estado endurecido, caracterizando a influência da incorporação de agregados reciclados (finos e grossos) e da sílica de fumo.

### 6.1. Propriedades em termos mecânicos

Neste subcapítulo, são avaliadas as características mecânicas de betões com agregados reciclados e incorporando diferentes quantidades de sílica de fumo, através da comparação com betões de referência.

#### 6.1.1. Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 7, 28 e 91 dias segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Nas Tabelas 7, 8 e 9, são apresentados os resultados obtidos.

Através da observação da Tabela 8, verifica-se que os BR apresentaram nas famílias de 0, 5 e 10% SF valores, aos 28 dias, de 93,4, 97,9 e 102,2 MPa, respectivamente. Relativamente aos BAR, observa-se, na família sem sílica de fumo, valores entre 90,1 e 91,5

MPa. Na família com 5% SF, os valores foram entre 93,7 e 96,0 MPa. Por fim, na família 10% SF, as variações ocorridas nos betões reciclados situaram-se entre 97,3 e 100,4 MPa.

**Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	79,9	0,0	0,9	87,1	0,0	0,5	88,0	0,0	1,3
B 50/50	74,9	-6,3	1,0	82,6	-5,2	0,4	83,5	-5,1	2,1
B 0/100	76,6	-4,2	1,4	83,9	-3,7	0,5	86,5	-1,8	1,3
B 100/100	73,4	-8,1	1,6	80,3	-7,9	2,3	81,2	-7,8	2,8

**Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	93,4	0,0	2,9	97,9	0,0	2,0	102,2	0,0	1,7
B 50/50	91,3	-2,2	3,0	95,5	-2,4	3,0	99,3	-2,9	1,0
B 0/100	91,5	-2,1	1,8	96,0	-1,9	1,6	100,4	-1,8	0,4
B 100/100	90,1	-3,5	2,0	93,7	-4,2	1,9	97,3	-4,8	1,4

**Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	96,4	0,0	1,4	101,1	0,0	2,6	103,3	0,0	3,5
B 50/50	94,7	-1,7	2,3	97,8	-3,2	1,3	101,4	-1,8	1,3
B 0/100	95,2	-1,2	2,5	98,4	-2,7	2,2	101,5	-1,7	2,4
B 100/100	94,0	-2,5	2,1	96,4	-4,7	2,4	99,1	-4,1	2,9

Analisando estes valores, verifica-se que a substituição de AN por AR provoca diminuições ligeiras de resistência que não chegam a atingir 5% (Figura 6). As diferenças de resistência entre BR e BAR são também reduzidas aos 7 e 91 dias.

Esta situação poderá ser explicada pelas características dos AR utilizados (provenientes de betões de origem de elevada qualidade) e por se estar a trabalhar com BED. De facto, segundo Guedes et al. (2013), as zonas de transição, nomeadamente entre os AR e a nova pasta de cimento e entre os AR e a sua argamassa aderida, condicionam significativamente o comportamento dos betões. Deste modo, melhorar a microestrutura das zonas de transição pode melhorar o desempenho do betão.

Os resultados obtidos estão de acordo com o estudo de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), onde foi analisada a influência da incorporação de agregados reciclados em

BED. Estes investigadores registaram diminuições de cerca de 9% devidas à incorporação de 100% de AR.

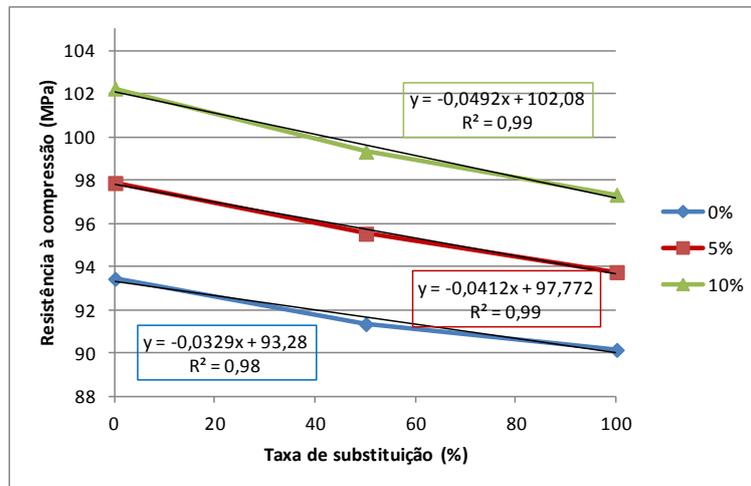


Figura 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

A evolução da resistência com o tempo é apresentada nas Figuras 7, 8 e 9.

Relativamente à incorporação de sílica de fumo, verifica-se que, à medida que a quantidade de SF aumenta, a resistência dos betões também aumenta. A maior parte do impacte deste material parece ocorrer por volta dos 7 dias. Nessa idade, os betões de referência e os betões reciclados das famílias de 5 e 10% SF, registaram aumentos de resistência, relativamente aos betões homólogos da família com 0% SF, de 9-13%. Contudo, aos 91 dias, as diferenças situaram-se entre 3 e 7%.

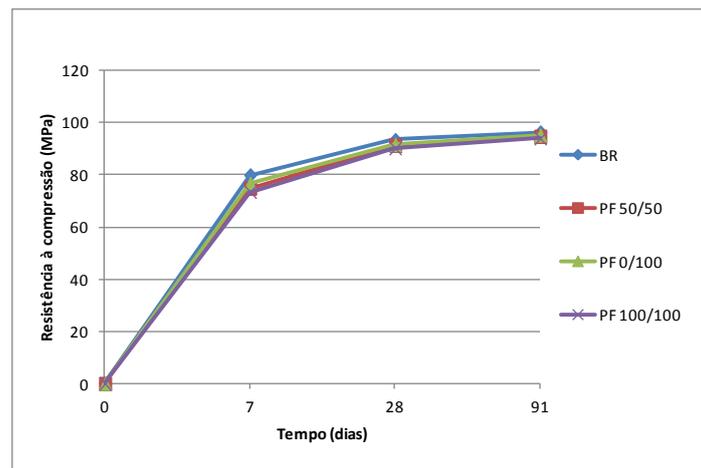


Figura 7 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 0% SF

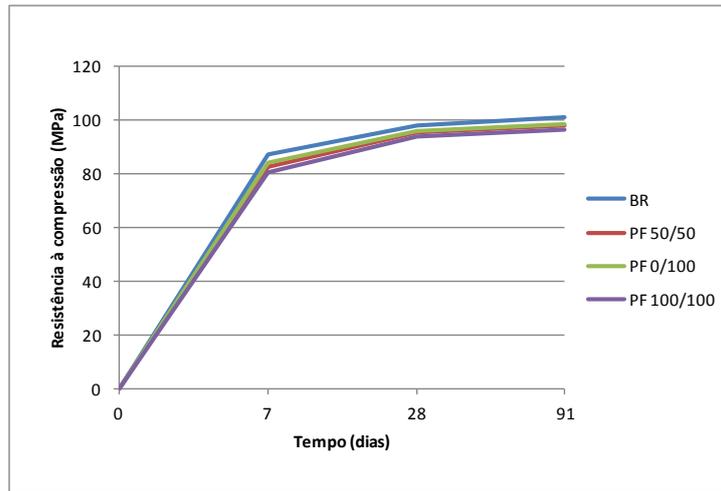


Figura 8 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 5% SF

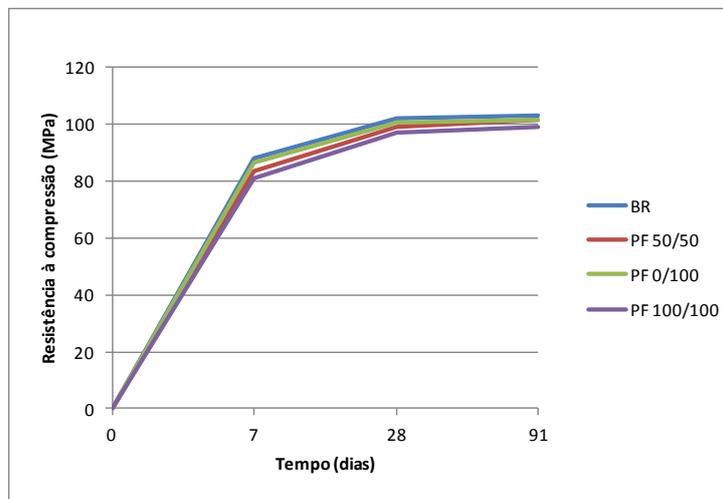


Figura 9 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões com 10% SF

Por conseguinte, a inclusão de SF nas amassaduras, parece afectar principalmente a resistência de curto prazo do betão. Conclusões semelhantes foram obtidas no estudo de Mazloom et al. (2004). Esta realidade pode ser devida à elevada velocidade de reacção das partículas de sílica com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento Portland (Neville, 1981)

As vantagens conseguidas através da adição de SF poderão então ser explicadas por dois motivos distintos (Aïtcin,2000): efeito de fíler e efeito pozolânico. O efeito pozolânico está relacionado com a elevada reactividade da sílica de fumo que é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Por seu lado, o efeito de fíler prende-se com a finura das partículas de SF que conseguem ocupar os espaços vazios que surgem entre as partículas, originando um aumento da compacidade e da coesão da mistura.

Nesta investigação estes dois efeitos podem ter sido diminuídos devido à granulometria da sílica de fumo utilizada, onde só 4% das partículas têm dimensões inferiores a 45  $\mu\text{m}$ . No estudo de Mazloom et al. (2004), onde a sílica foi utilizada como um substituto do cimento e não como um material adicional, as variações percentuais motivadas pela sua presença foram semelhantes às do presente trabalho.

### 6.1.2. Resistência à tracção por compressão diametral

Este ensaio foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 12390-6 (2011). Na Tabela 10, são apresentados os resultados obtidos.

**Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias**

Tipo de betão	0%			5%			10%		
	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	5,1	0,0	0,1	5,2	0,0	0,1	5,3	0,0	0,2
B 50/50	3,9	-23,0	0,1	4,0	-23,8	0,1	4,2	-21,6	0,2
B 0/100	4,0	-20,8	0,1	4,3	-18,3	0,1	4,4	-18,2	0,2
B 100/100	3,6	-29,0	0,2	3,8	-26,6	0,1	3,9	-27,3	0,1

Os resultados mostram que os BR das famílias de 0, 5 e 10% SF atingiram valores de 5,1, 5,2 e 5,3 MPa, respectivamente.

Na família com 0% SF, os resultados dos BAR variaram entre 3,6 e 4,0 MPa. Na família com 5% SF, os BAR registaram variações entre 3,8 e 4,3 MPa. Por fim, na família com maior incorporação de sílica de fumo, os valores dos betões reciclados oscilaram entre 3,9 e 4,4 MPa.

Deste modo, constata-se que as reduções de desempenho devidas à incorporação de AR são semelhantes nas diversas famílias (entre 18 e 29%), sendo visível que, quanto maior a quantidade de agregados reciclados, maior a diminuição da resistência (Figura 10).

De notar que a resistência à tracção por compressão diametral não é tão influenciada pela quantidade de cimento, como a resistência à compressão (Coutinho e Gonçalves, 1997). Por estes motivos, esta propriedade não beneficia particularmente do cimento adicional que é incorporado juntamente com os AR, sobretudo com os agregados finos reciclados de betão (AFRB). Assim, é natural a ocorrência de maiores perdas de desempenho com a incorporação de AR, devido à estrutura mais porosa dos agregados reciclados.

Os valores obtidos estão de acordo com os de Khoshkenari et al. (2014). Neste estudo, observou-se uma diminuição de cerca de 26-32%, quando agregados naturais (finos e grossos) foram substituídos por agregados reciclados. Verificou-se, igualmente, que a

diminuição de resistência à tracção por compressão diametral foi mais acentuada do que a ocorrida na resistência à compressão.

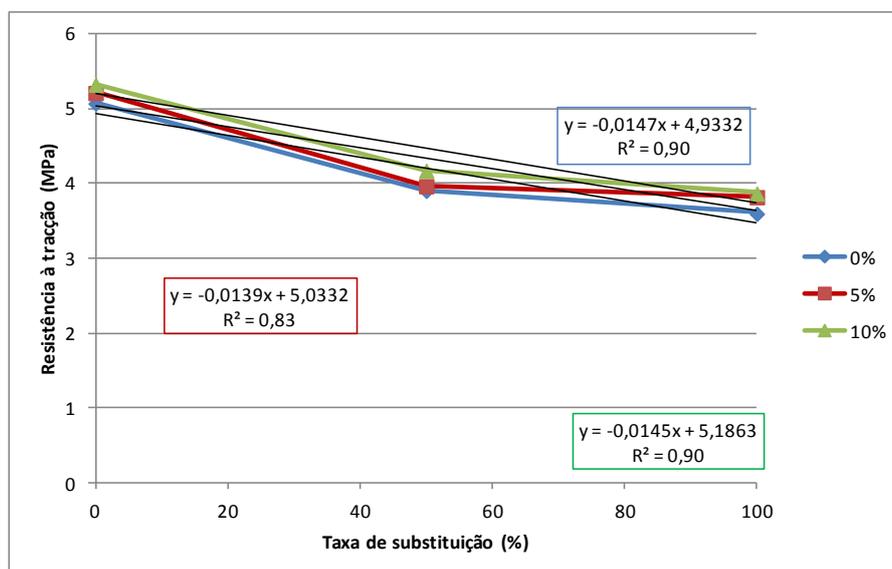


Figura 10 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Relativamente à incorporação de sílica de fumo, observou-se, nas famílias com 5 e 10% SF, aumentos máximos de resistência à tracção, relativamente à família com 0% SF, de cerca de 6 e 8%, respectivamente.

Esta situação poderá ser explicada pelo incremento de compacidade gerado nas amassaduras devido à incorporação de sílica de fumo. Verifica-se que o volume de macroporos é reduzido causando benefícios em termos de desempenho mecânico (Elhakkam et al., 2012; ACI 234R-06). Paralelamente, o reforço da zona de transição entre a pasta e os agregados causado pela SF poderá também contribuir para a melhoria de desempenho (Isaia et al. 2003).

### 6.1.3. Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-397 (1993) aos 28 dias. Na Tabela 11, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Tipo de betão	0%			5%			10%		
	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	48,7	0,0	0,1	51,1	0,0	0,9	56,7	0,0	0,9
B 50/50	43,9	-9,8	0,0	47,0	-8,0	0,1	48,6	-14,3	2,4
B 0/100	43,9	-9,8	1,1	49,0	-4,1	0,0	53,8	-5,0	2,2
B 100/100	39,5	-18,9	2,9	40,7	-20,3	0,1	41,9	-26,1	4,0

Através da observação da Tabela 11 e da Figura 11, constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da taxa da incorporação de agregados reciclados. Os betões de referência apresentaram valores de 48,7, 51,1 e 56,7 GPa, para as famílias de 0, 5 e 10% SF, respectivamente. Por seu turno, os valores dos BAR variaram entre 39,5-43,9, 40,7-49,0 e 41,9-53,8 GPa nos betões com 0, 5 e 10% de sílica de fumo. As perdas de desempenho para betões com 100% de AR atingiram 26%.

O pior desempenho dos BAR pode ser explicado pelo menor módulo de elasticidade dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais (Xiao et al., 2005). Por este motivo e pelo facto de o módulo de elasticidade do betão depender significativamente dos agregados (Neville, 1981), existe uma maior propensão para deformação dos BAR.

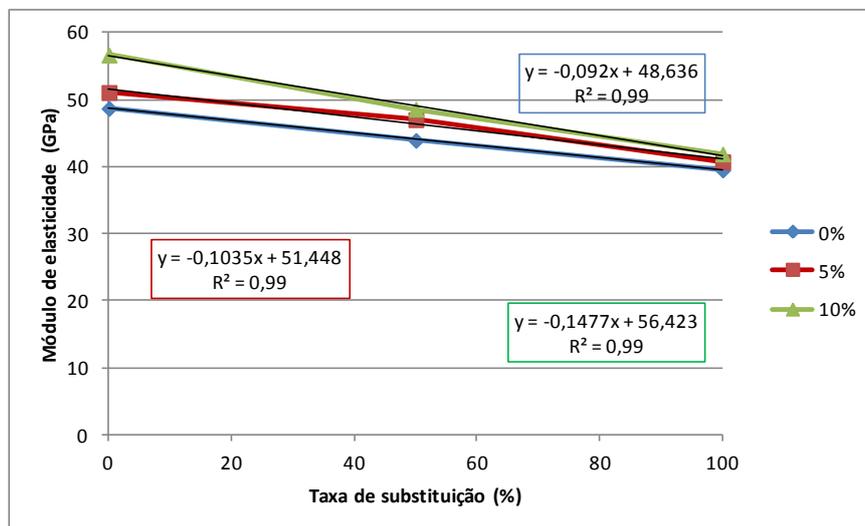


Figura 11 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Comparando os valores obtidos com os de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), verifica-se uma proximidade acentuada entre ambos. Por exemplo, para a taxa de substituição de 100%, os autores observaram diminuições de 20-30%, em relação ao BR.

Através da Figura 12, constata-se que a adição de sílica de fumo influencia o módulo de elasticidade, aumentando os seus valores. Verifica-se um aumento máximo de cerca de 23%. No entanto, esse efeito parece atenuar-se para as maiores incorporações de AFRB.

Deste modo, esta propriedade parece depender não só do tipo de agregado e da resistência mas também da presença de adições minerais (sílica de fumo).

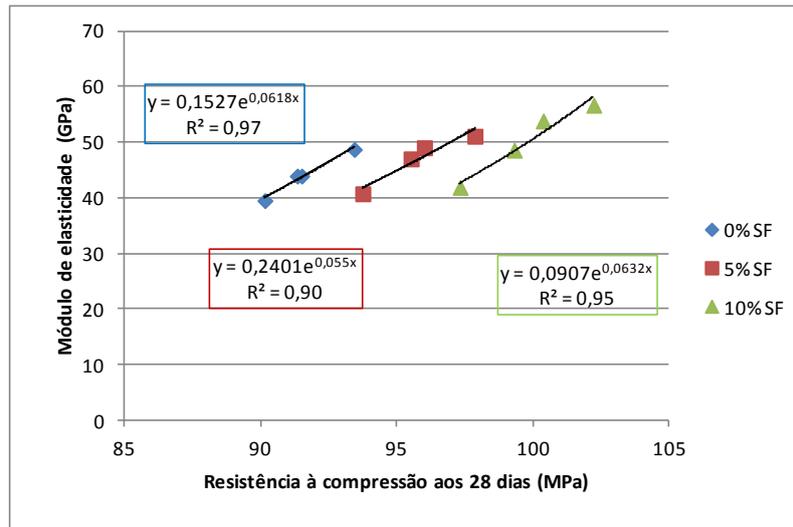


Figura 12 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão

#### 6.1.4. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A velocidade de propagação dos ultra-sons foi determinada de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007). Na Tabela 12 e na Figura 13, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Tipo de betão	0%			5%			10%		
	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	5049,5	0,0	25,3	5064,4	0,0	42,8	5091,9	0,0	40,2
B 50/50	4881,8	-3,3	20,0	4927,2	-2,4	59,7	4931,1	-2,6	30,5
B 0/100	4919,2	-2,6	29,1	4974,2	-1,5	64,6	5012,3	-1,0	18,7
B 100/100	4778,2	-5,4	29,0	4815,0	-4,6	29,2	4828,4	-4,7	25,9

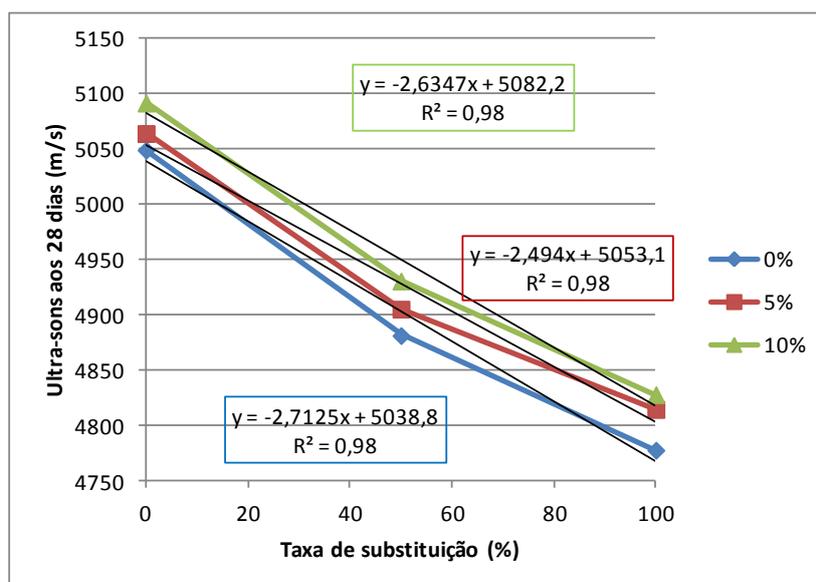


Figura 13 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Através da observação da Tabela 12 e da Figura 13, constata-se uma diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons (VPUS) com o aumento da taxa da incorporação de agregados reciclados. Deste modo, os betões de referência registaram a maior velocidade de propagação, apresentando valores entre 5050 e 5100 m/s. No que respeita aos BAR, os valores variaram entre 4700 e 5000 m/s. As perdas de desempenho que não ultrapassaram os 6% são explicadas pela maior porosidade dos BAR.

Através da análise da Tabela 12, constata-se ainda que os valores da velocidade de propagação de ultra-sons das amassaduras com agregados naturais contendo 5 e 10% de sílica de fumo, foram ligeiramente aumentados, em relação ao betão homólogo da família com 0%, em cerca de 1%. Situação idêntica foi registada para os betões reciclados.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976) todas os betões podem ser classificados com “bons” uma vez que até os valores mais baixos de VPUS caem na gama de 3660-4580 m/s. Isto significa que os betões não contêm espaços vazios ou fissuras que possam afectar a integridade estrutural. Assim, conclui-se que é possível substituir na íntegra agregados naturais por agregados reciclados.

Na Figura 14, é apresentada a relação aproximadamente linear entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade ( $R^2 = 0,98$ ;  $R^2 = 0,95$ ;  $R^2 = 0,99$ ). Esta tendência é confirmada por Bogas (2011) que afirma que as principais propriedades físicas que influenciam a velocidade de propagação de ultra-sons são o módulo de elasticidade e a massa volúmica.

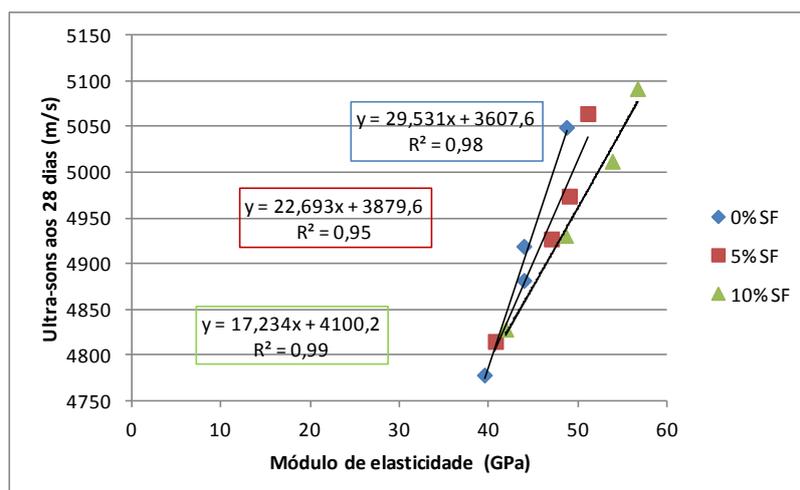


Figura 14 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade

## 6.2. Propriedades em termos de durabilidade

No subcapítulo 6.2, pretende-se estudar a influência da incorporação de agregados reciclados (finos e grossos) e da incorporação de sílica de fumo no desempenho, em termos de durabilidade, de betões.

### 6.2.1. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi feito aos 28 dias segundo a especificação LNEC E394-1993. Na Tabela 13, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	9,2	0,0	0,2	8,6	0,0	0,2	7,4	0,0	0,2
B 50/50	12,6	37,9	0,4	11,7	36,5	0,2	10,7	43,5	0,2
B 0/100	11,6	26,7	0,1	10,6	24,0	0,2	8,9	20,3	0,1
B 100/100	16,3	78,1	0,2	15,2	78,0	0,1	13,3	79,7	0,4

Os resultados mostram que os BR das famílias com 0, 5 e 10% SF obtiveram valores de 9,2, 8,6 e 7,4%, respectivamente.

Na família com 0% SF, os resultados dos BAR situaram-se entre 11,6 e 16,3%. Na família com 5% SF, os BAR apresentaram variações entre 10,6 e 15,2%, enquanto na família com maior incorporação de sílica de fumo os valores dos betões reciclados variaram entre 8,9 e 13,3%. Apesar de se verificar aumentos de absorção entre 20 e 80% para as diferentes famílias, todas as amassaduras com 10% SF apresentaram, em termos absolutos, valores bastante razoáveis (Figura 15).

Os piores desempenhos dos betões reciclados poderão ser justificados pela argamassa aderida dos AR. A presença desta argamassa é responsável pela maior porosidade e absorção dos agregados reciclados que condiciona significativamente a porosidade aberta dos BAR (Gómez-Soberón, 2002).

No que respeita à influência de SF, verifica-se que a sua incorporação conduz a amassaduras com menores valores de absorção, registando-se aumentos de desempenho de 6-19%.

Estes resultados podem ser justificados pelo facto de este material conseguir ocupar os espaços vazios entre as partículas, incrementando a compacidade da mistura.

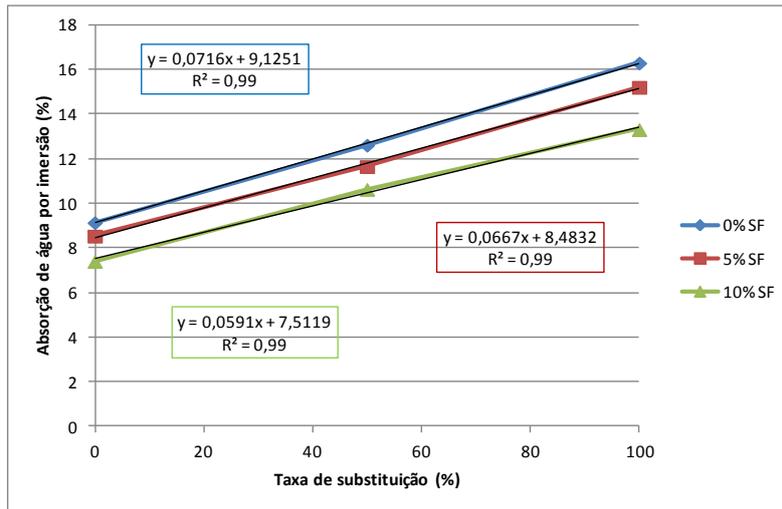


Figura 15 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Além disso, segundo Isaia et al. (2003), este tipo de adições é também capaz de melhorar as condições de preenchimento da interface agregado / pasta, reduzindo o “efeito de parede” e melhorando a qualidade da ligação. No caso dos BAR, o procedimento de mistura adotado, poderá ainda ter contribuído para o preenchimento de fissuras e poros existentes nos agregados reciclados, resultantes do processo de trituração.

Com base nos pressupostos assumidos, através da Figura 16, é mostrada a relação existente entre a resistência à compressão dos betões e a sua absorção de água por imersão. Foram obtidas correlações satisfatórias, nas diferentes famílias ( $R^2 = 0,96$ ;  $R^2 = 0,97$ ;  $R^2 = 0,98$ ), o que demonstra a ligação entre estas propriedades.

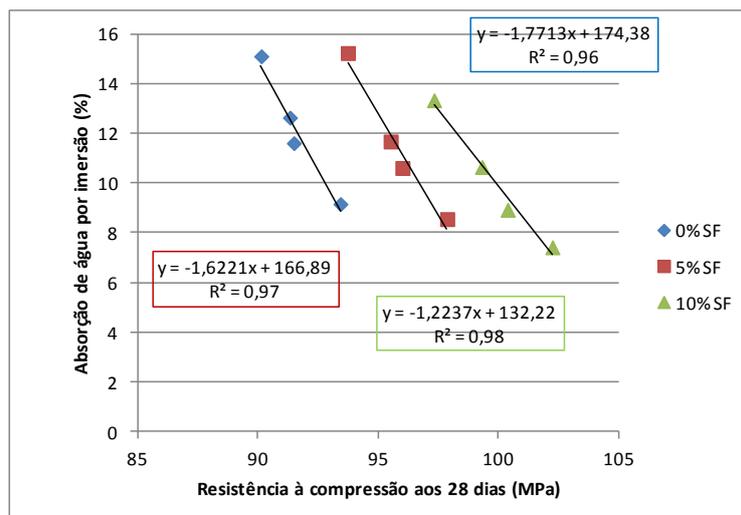


Figura 16 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão

## 6.2.2. Absorção de água por capilaridade

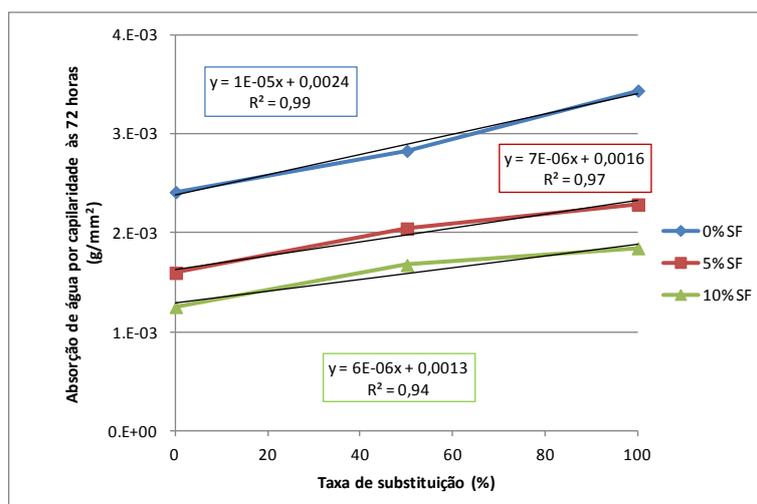
Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E393-1993, 42 dias após a amassadura dos betões. Na Tabela 14, são apresentados os resultados obtidos.

**Tabela 14 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Absorção de água por capilaridade (g/mm <sup>2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por capilaridade (g/mm <sup>2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por capilaridade (g/mm <sup>2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	2,41E-03	0,0	4,0E-05	1,60E-03	0,0	2,0E-04	1,25E-03	0,0	6,2E-05
B 50/50	2,83E-03	17,3	1,2E-04	2,04E-03	28,0	9,1E-05	1,68E-03	33,8	4,6E-05
B 0/100	2,65E-03	10,0	2,8E-05	1,88E-03	18,0	3,8E-05	1,50E-03	20,0	3,4E-05
B 100/100	3,43E-03	42,5	1,6E-04	2,29E-03	43,3	9,8E-06	1,84E-03	47,4	1,1E-04

Os betões de referência apresentaram valores de absorção de água às 72 horas de 2,41, 1,60 e 1,25 x 10<sup>-3</sup> g/ mm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>, para as famílias de 0, 5 e 10%, respectivamente. Para as mesmas famílias, os BAR tiveram valores de 2,65-3,43, 1,88-2,29 e 1,50-1,84 10<sup>-3</sup> g/ mm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>. Os resultados mostram desempenhos aceitáveis, não obstante, os aumentos de absorção com o aumento da quantidade de agregados reciclados. Os betões correspondentes à taxa de substituição de 100% tiveram os piores resultados, com perdas de desempenho, relativamente aos BR, de cerca de 42,5-47,4%.

Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade e pelas maiores quantidades de água empregues nos BAR. Através da Figura 17, observa-se um aumento linear da absorção de água por capilaridade com o aumento da taxa de substituição.



**Figura 17 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas**

Analisando as Figuras 18 a 20, constata-se ainda que a absorção de água por capila-

ridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas.

Estes resultados são explicados pela presença de AR (sobretudo os AFRB) que é responsável pela formação de mais e maiores capilares (Wirquin et al., 2000).

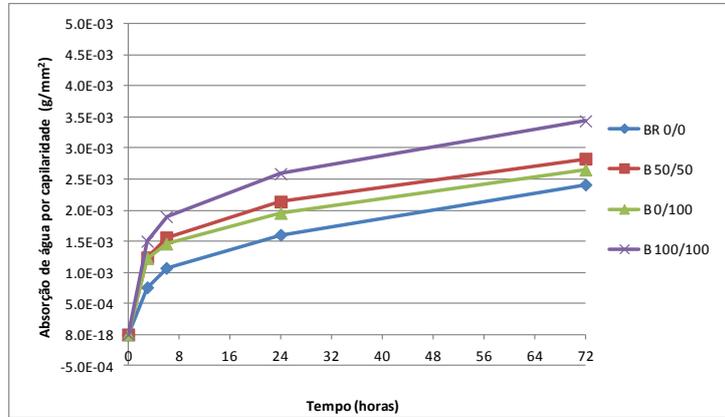


Figura 18 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 0% SF

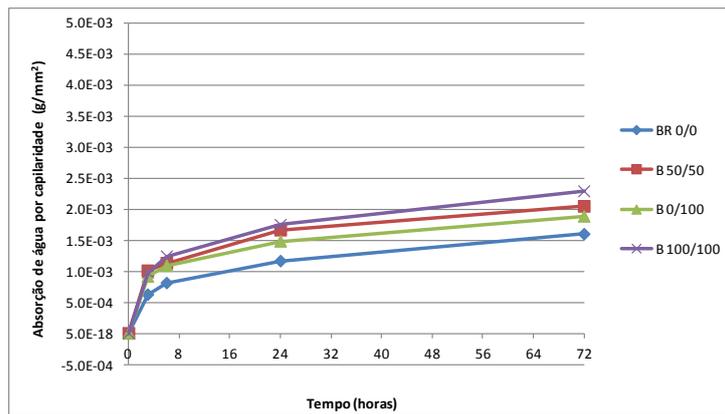


Figura 19 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 5% SF

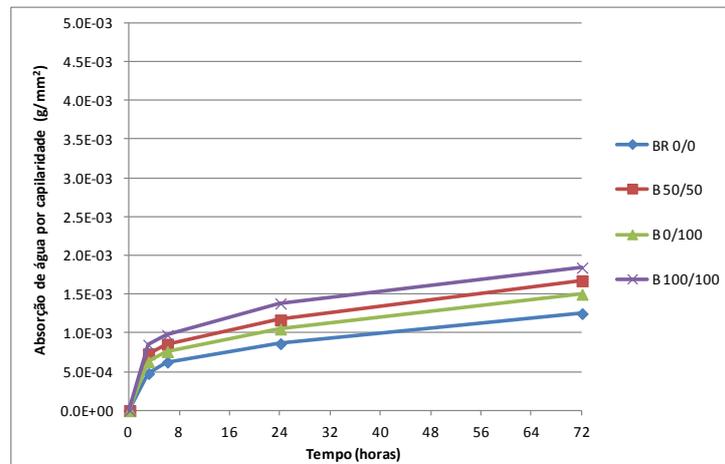


Figura 20 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões com 10% SF

Tal como nas propriedades anteriores, observa-se que a incorporação de sílica de fumo

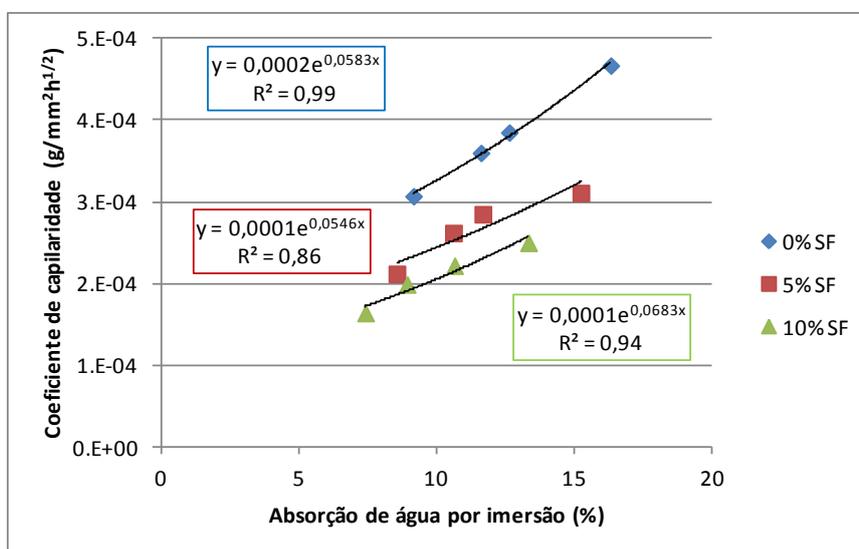
conduz a melhores resultados. Esta situação é justificada pelas características pozolânicas e físicas associadas à SF, das quais resultam um incremento de resistência e um decréscimo de porosidade e permeabilidade.

Como era expectável, os coeficientes de capilaridade traduzem também os benefícios da adição de sílica de fumo. Observa-se, igualmente, as perdas de desempenhos ocorridas com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados (Tabela 15).

**Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade**

Tipo de betão	0%		5%		10%	
	Coefficiente de capilaridade (g/mm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	Δ <sub>betão</sub> (%)	Coefficiente de capilaridade (g/mm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	Δ <sub>betão</sub> (%)	Coefficiente de capilaridade (g/mm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	Δ <sub>betão</sub> (%)
BR 0/0	3,07E-04	0,0	2,12E-04	0,0	1,64E-04	0,0
B 50/50	3,85E-04	25,4	2,85E-04	34,4	2,22E-04	35,4
B 0/100	3,60E-04	17,3	2,62E-04	23,6	1,99E-04	21,3
B 100/100	4,67E-04	52,1	3,11E-04	46,7	2,50E-04	52,4

A Figura 21 identifica uma relação entre as absorções de água por capilaridade e por imersão. Os coeficientes de determinação elevados ( $R^2 = 0,99$ ;  $R^2 = 0,86$ ;  $R^2 = 0,94$ ) mostram que o coeficiente de capilaridade varia exponencialmente com a absorção de água por imersão.



**Figura 21 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade**

Por último, de forma a relacionar as propriedades em termos de durabilidade dos betões com o seu desempenho mecânico, são apresentadas, na Figura 22, as correlações obtidas entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade nas diversas famílias. A regressão utilizada foi a não-linear potencial uma vez que é a que se melhor ajusta aos valores obtidos. Esta situação é explicada pela forte ligação entre esta

propriedade e o desempenho mecânico dos betões e pelo facto de o número de capilares não crescer linearmente com a porosidade dos mesmos.

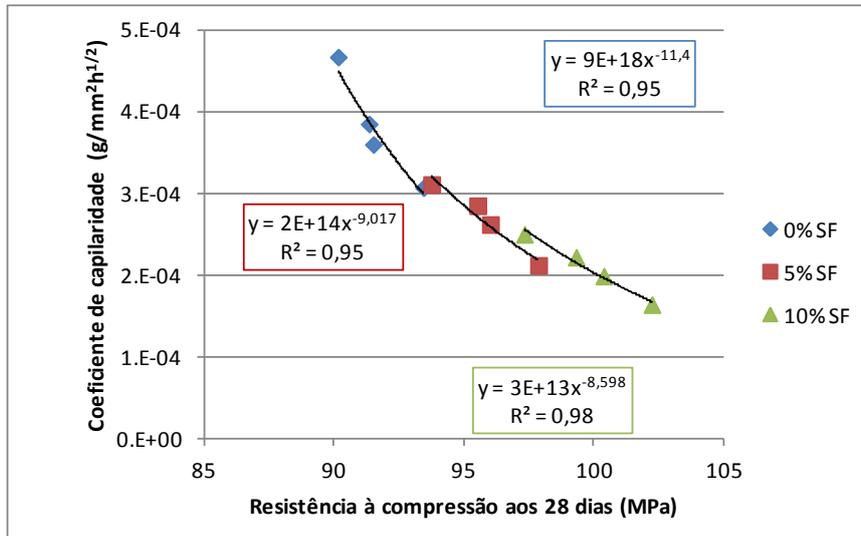


Figura 22 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão

### 6.2.3. Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi efectuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E391-1993. Nas Tabelas 16 a 19, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 dias

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B 50/50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B 0/100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B 100/100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 17 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	0,2	0	0,1	0,1	0	0,0	0,1	0	0,1
B 50/50	0,3	50	0,1	0,3	200	0,1	0,2	100	0,1
B 0/100	0,2	0	0,1	0,1	0	0,1	0,2	100	0,1
B 100/100	0,3	50	0,1	0,3	200	0,1	0,3	200	0,1

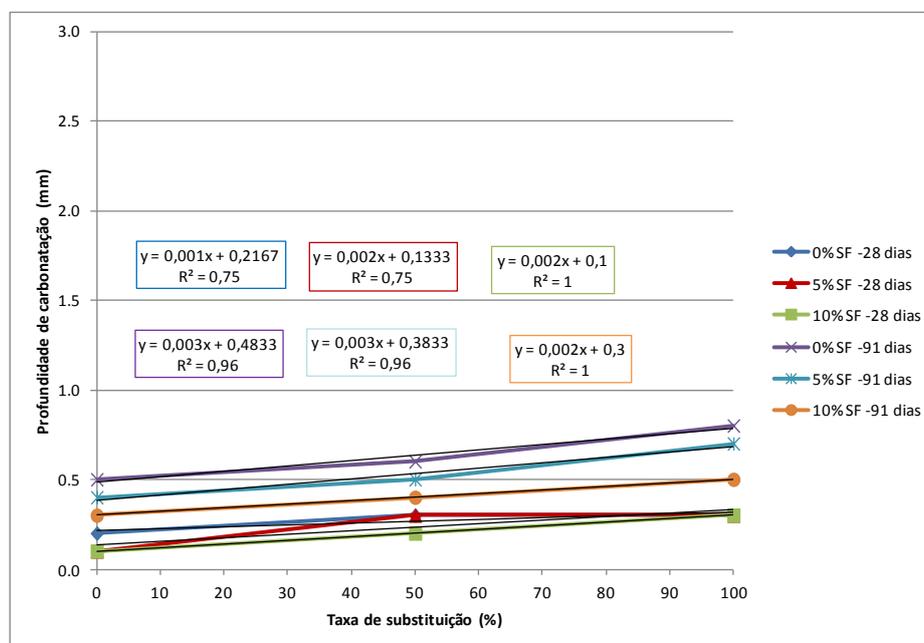
**Tabela 18 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 56 dias**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	0,3	0	0,1	0,2	0	0,0	0,2	0	0,1
B 50/50	0,4	33	0,1	0,4	100	0,1	0,3	50	0,1
B 0/100	0,3	0	0,1	0,3	50	0,1	0,2	0	0,0
B 100/100	0,5	67	0,1	0,4	100	0,1	0,3	50	0,1

**Tabela 19 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 91 dias**

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	0,5	0	0,1	0,4	0	0,1	0,3	0	0,1
B 50/50	0,6	20	0,1	0,5	25	0,1	0,4	33	0,1
B 0/100	0,5	0	0,1	0,5	25	0,1	0,4	33	0,1
B 100/100	0,8	60	0,1	0,7	75	0,1	0,5	67	0,1

Através da sua observação, constata-se que a carbonatação, nas diversas idades, é praticamente inexistente. No entanto, os valores tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição e com a diminuição da quantidade de sílica de fumo presente nas amassaduras (Figura 23). Esta situação está de acordo com o que era expectável, uma vez que a absorção de água apresentou uma tendência idêntica.



**Figura 23 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 e 91 dias**

Uma justificação para as perdas ligeiras dos BAR poderá estar relacionada com a maior porosidade destes betões, onde se verifica que o volume total e o diâmetro médio

dos poros aumentam com a incorporação de AR (Kou e Poon, 2006). Por outro lado, a proximidade registada entre BR e BAR poderá dever-se à qualidade dos agregados reciclados utilizados e ao facto de se estar trabalhar com betões de elevado desempenho. Esta realidade poderá contribuir para um reforço das zonas de transição, contribuindo para um melhor desempenho dos betões. No que respeita à influência da sílica de fumo, este material parece ser responsável por diminuir a porosidade e a permeabilidade das amassaduras, consequência da sua reduzida dimensão e da sua capacidade em criar um grande número de locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação.

Na Tabela 20, são apresentados os valores dos coeficientes de carbonatação. Como era expectável, para a taxa de substituição de 100/100% das diferentes famílias, registou-se as maiores variações, em relação aos BR (67-100%). Os coeficientes de carbonatação foram calculados através da expressão:

$$x = k \sqrt{t} \quad (1)$$

em que  $x$  é a profundidade de carbonatação (mm),  $k$  é o coeficiente de carbonatação e  $t$  é o tempo (dias).

**Tabela 20 - Resultados dos coeficientes de carbonatação**

Tipo de betão	0%		5%		10%	
	Coeficiente de carbonatação (mm/dia <sup>1/2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coeficiente de carbonatação (mm/dia <sup>1/2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coeficiente de carbonatação (mm/dia <sup>1/2</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	0,04	0,0	0,03	0,0	0,03	0,0
B 50/50	0,06	50,0	0,05	66,7	0,04	33,3
B 0/100	0,05	25,0	0,04	33,3	0,04	33,3
B 100/100	0,07	75,0	0,06	100,0	0,05	66,7

Nas Figuras 24 e 25, dados os elevados valores dos coeficientes de determinação, é possível constatar uma relação linear entre a carbonatação e as propriedades de absorção de água por imersão e por capilaridade.

#### **6.2.4. Resistência à penetração de cloretos**

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E463-2004, aos 91 dias. Na Tabela 21, são apresentados os resultados obtidos.

Através da observação da tabela, verifica-se que os betões de referência apresentam nas famílias com 0, 5 e 10% SF valores de 4,1, 3,8 e  $3,3 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, respectivamente. No que respeita aos BAR, ocorreram, para as mesmas famílias, coeficientes de 4,7-5,8, 4,3- 5,2 e  $4,1-4,8 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. Verifica-se, assim, um aumento dos coeficientes com o

aumento da incorporação de AR, apesar de as variações não ultrapassarem  $1,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 26).

Mais uma vez, a qualidade tanto dos AR como dos betões produzidos poderá contribuir para a diminuição dos efeitos interfaciais pasta / agregado que prejudicam o desempenho dos BAR.

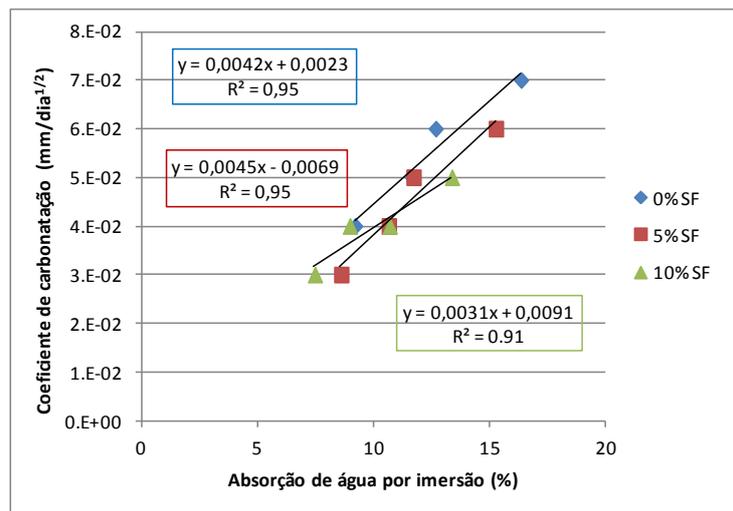


Figura 24 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão

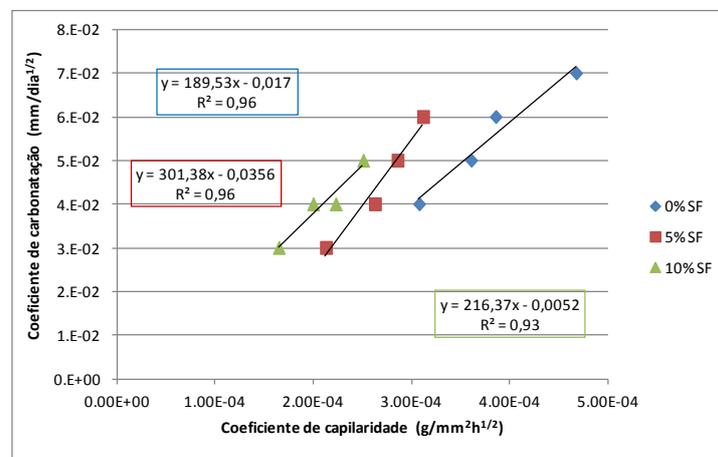
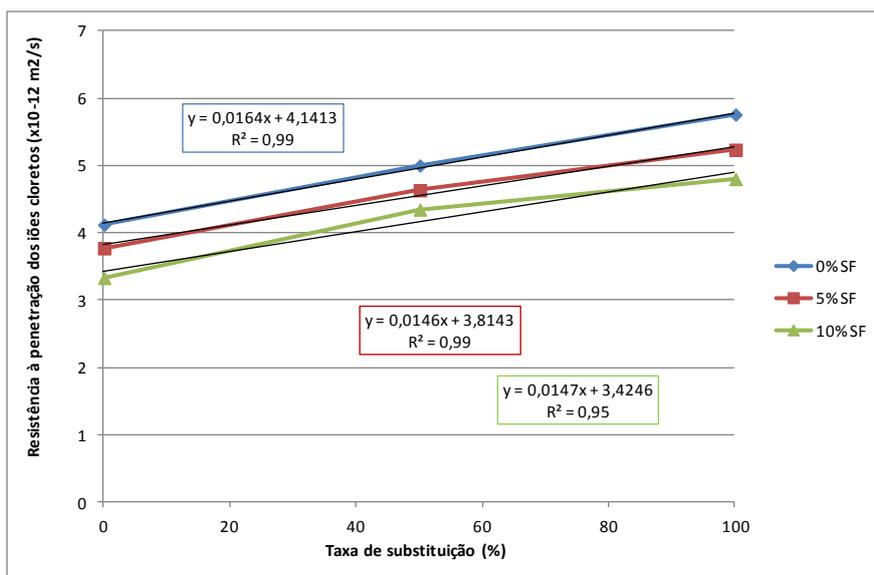


Figura 25 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade

Tabela 21 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	$D_{0\text{méd}}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	$D_{0\text{méd}}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	$D_{0\text{méd}}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	4,1	0,0	0,5	3,8	0,0	0,2	3,3	0,0	0,2
B 50/50	5,0	21,3	0,1	4,6	22,8	0,2	4,3	30,5	0,2
B 0/100	4,7	14,1	0,1	4,3	13,8	0,2	4,1	22,9	0,1
B 100/100	5,8	39,7	0,4	5,2	38,8	0,4	4,8	44,1	0,2



**Figura 26 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias**

Um outro factor que poderá explicar esta situação é a dimensão das fissuras dos agregados reciclados. De facto, no estudo de Xiao et al. (2012), concluiu-se que a largura de fissuras existentes na antiga argamassa aderida está correlacionada com o coeficiente de difusão de cloretos, verificando-se maior difusividade para maiores larguras de fissuras.

Na investigação de Sim e Park (2011), são também analisados os efeitos da incorporação de agregados finos e grossos reciclados. Contudo, nesse estudo, não é visível uma tendência clara da penetração dos íons cloretos com o aumento dos níveis de substituição.

Quanto à incorporação de sílica de fumo, verifica-se que a sua presença é responsável por melhores resultados. Esta realidade poderá ser justificada pelo facto de este material conseguir tornar a pasta mais densa e homogénea, através de reacções pozolánicas com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. Paralelamente, as amassaduras poderão beneficiar da reduzida dimensão da sílica de fumo que permitirá ocupar os espaços vazios que surgem entre as partículas, originando um aumento da compacidade da mistura.

Através da análise da Figura 27, é possível observar a existência de uma estreita relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por imersão, nas diversas famílias.

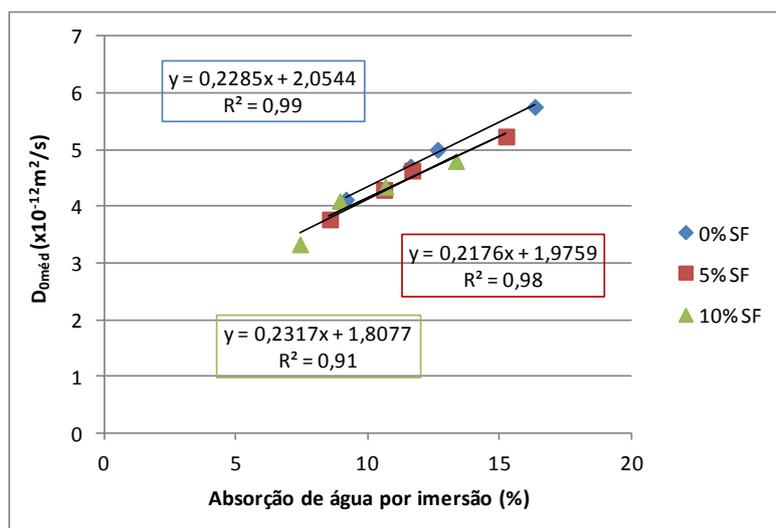


Figura 27 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 91 dias e absorção de água por imersão

## 7. Considerações finais

Neste relatório, procurou-se analisar os resultados experimentais, decorrentes da realização da segunda fase da Tarefa 5.

Esta tarefa consistiu em produzir três tipos de betão de referência e nove tipos de betão com agregados reciclados (finos e grossos) obtidos através do método de trituração primário mais secundário, semelhante ao usado em agregados naturais pétreos. Este processo foi efectuado em produtos rejeitados da pré-fabricação com resistências-alvo de 65 MPa.

Na produção das amassaduras, considerou-se três teores de sílica de fumo (0, 5 e 10% SF, em adição ao cimento) e três taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados (50/50; 0/100 e 100/100%). No total, produziu-se aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de betão.

Os resultados obtidos na propriedade de abaixamento, mostram que foi necessário aumentar a relação a/l dos BAR, para se atingir trabalhabilidades idênticas. Esta situação deveu-se à maior absorção de água dos AR, afectada pela presença de argamassa aderida. Os AFRB foram os mais afectados, evidenciando valores de absorção de 6,1% enquanto os AGRB obtiveram valores de 3,9%.

Relativamente à massa volúmica, observou-se uma ligeira redução desta propriedade com a incorporação de AR. As variações máximas obtidas não atingiram 4%, para os betões com 100% de agregados reciclados. Os resultados estão de acordo com os valores de massa volúmica dos AR.

No que respeita ao estado endurecido, constatou-se uma diminuição de desempenho

dos BAR, em relação aos BR, em todas as propriedades. Em contraponto, a incorporação de sílica de fumo foi responsável por aumentar os valores obtidos.

Na propriedade de resistência à compressão, constata-se que, aos 28 dias, todas as amassaduras conseguiram alcançar resistências médias superiores a 90 MPa, verificando-se uma classe de resistência mínima de C60/75.

No que respeita ao módulo de elasticidade e de acordo com o Eurocódigo 2, todas as amassaduras podem também ser enquadradas em classes de resistência iguais ou superiores à C60/75. Na propriedade de tracção por compressão diametral, o valor mais baixo foi de 3,6 MPa (C40/50).

Em termos de durabilidade, os valores obtidos mostram tendências semelhantes, continuando as amassaduras a apresentar, em termos absolutos, valores aceitáveis.

Nas Tabelas 22 e 23, é apresentado um resumo dos resultados obtidos, em que um sinal negativo corresponde a uma perda de desempenho.

**Tabela 22 - Perdas de desempenho devidas à utilização de 100% de AR**

Ensaio	Perda de desempenho dos BAR em relação ao BR		
	0% SF	5% SF	10% SF
	100% AR	100% AR	100% AR
Resistência à compressão cubos (aos 28 dias)	-3,5 %	-4,2 %	-4,8 %
Resistência à tracção	- 29,0 %	- 26,6 %	-27,3 %
Módulo de elasticidade	-18,9 %	-20,3 %	-26,1 %
Velocidade de propagação dos ultra-sons	-5,4 %	-4,6 %	-4,7 %
Absorção de água por imersão	-78,1 %	-78,0 %	-79,7 %
Coefficiente de capilaridade	-52,1 %	-46,7 %	-52,4 %
Coefficiente de carbonatação	-75,0 %	-100,0 %	-66,7 %
Coefficiente de difusão dos iões cloreto (aos 91 dias)	-39,7 %	-38,8 %	-44,1 %

**Tabela 23 - Perdas de desempenho devidas à utilização de sílica de fumo**

Ensaio	Perda de desempenho das famílias 5 e 10% SF em relação à de 0%			
	5% SF		10% SF	
	BR	100% AR	BR	100% AR
Resistência à compressão cubos (aos 28 dias)	+4,7 %	+4,0 %	+9,4 %	+8,0 %
Resistência à tracção	+2,7 %	+6,1 %	+4,9 %	+7,5 %
Módulo de elasticidade	+4,9 %	+3,1 %	+16,3 %	+6,1 %
Velocidade de propagação dos ultra-sons	+0,3 %	+0,8 %	+0,8 %	+1,1 %
Absorção de água por imersão	+6,6 %	+6,7 %	+19,0 %	+18,3 %
Coefficiente de capilaridade	+33,8 %	+33,4 %	+48,1 %	+46,3 %
Coefficiente de difusão dos iões cloreto (aos 91 dias)	+8,5 % <sup>*</sup>	+9,1 %	+19,2 %	+16,6 %

Os resultados da Tabela 22 mostram que, para as diferentes famílias (0, 5 e 10% SF), os betões incorporando AR apresentam variações semelhantes. Constata-se que, para a máxima taxa de substituição, apenas as propriedades de durabilidade (absorção

de água por capilaridade/imersão, carbonatação e penetração de cloretos) registaram diminuições de desempenho superiores a 50%. Nas restantes propriedades, as variações não atingiram 30%.

No que respeita à Tabela 23, verifica-se que a incorporação de sílica de fumo é responsável, para as propriedades mecânicas e de durabilidade, por aumentos de desempenho que atingem cerca de 16 e 48%, respectivamente. A utilização deste material parece originar aumentos de compacidade e de resistência e decréscimos de porosidade e permeabilidade nas amassaduras. Estes resultados foram justificados pelo efeito de fíler e pelo efeito pozolânico associados à SF.

A utilização de uma betoneira de eixo vertical e a adopção do procedimento de mistura adaptado do *Silica Fume User's Manual* (Holland, 2005) parece ter resolvido as dificuldades de dispersão da sílica, ocorridas na fase anterior. No entanto, é provável que o máximo potencial inerente à utilização de SF não tenha sido conseguido devido à granulometria da sílica de fumo utilizada, onde só 4% das partículas têm dimensões inferiores a 45 µm.

## 8. Bibliografia

**ACI 234R-06** - Guide for the use of silica fume in concrete.

**Aïtcin, P.C.** - The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25. N.º 4-5. 2003. pp. 409-420.

**Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A.** - Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24. 2002. pp. 269-79.

**Bickley, J.; Fung, R.** - Optimizing the economics of high-performance concrete. A Concrete Canada and Canadian Cement Industry Joint Research Project. Cement Association of Canada. Ottawa. 2001. pp. 21.

**Bogas, J.** - Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa 2011. 1596 p.

**BS 1881** - Testing concrete. Part 120: Method for determination of the compressive strength of concrete cores. British Standards Institution. London. 1983.

**BS 6089** - Guide to: Assessment of concrete strength in existing structures. British Standards Institution. London. 1981.

**Building Contractors Society of Japan** - Committee on disposal and reuse of con-

struction waste. 1981.

**Çakır, Ö.; Sofyanlı, Ö.** - Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal*. 2014.

**Concrete Society** - Concrete core testing for strength. Technical Report N°1. Londres. 1976.

**Coutinho, A.; Gonçalves, A.** - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II, III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1997.

**Elhakam, A.; Mohamed, A.; Awad, E.** - Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 35. 2012. pp. 421-427.

**Gómez-Soberón J.** - Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and Concrete Research*. Vol. 32. N.º 8. 2002. pp. 1301–11.

**Guedes, M.; Evangelista, L.; de Brito, J.; Ferro, A.** - Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates. *Microscopy and Microanalysis*. Vol. 19. 2013. pp. 1222-1230.

**Holland, T** - Silica fume user's manual. Technical Report N° FHWA-IF-05-016. Silica Fume Association. 2005. pp. 193.

**Isaia, G.; Gastaldini, A.; Moraes, R.** - Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25. N.º 1. 2003. pp. 69-76.

**Khoshkenari, A.G.; Shafigh, P.; Moghimi, M.; Mahmud, H.B.** - The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Design*. Vol. 64. 2014. pp. 345-354.

**Kou, S.; Poon, C.** - Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Editions*. Vol. 21. N.º 4. 2006. pp. 130-136.

**LNEC E-391** - Betões: Determinação da resistência à carbonatação. LNEC. Lisboa 1993.

**LNEC E-393** - Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade. LNEC. Lisboa 1993.

**LNEC E-394** - Betões: Determinação da absorção da água por imersão. Ensaio pressão atmosférica. LNEC. Lisboa 1993.

**LNEC E-397** - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC. Lisboa 1993.

**LNEC E-463** - Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC. Lisboa 2004.

**Malhotra, V.** - Testing hardened concrete: nondestructive methods. American Concrete Institute. 1976.

**Mazloom, M.; Ramezani pour, A.; Brooks, J.** - Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. Cement and Concrete Composites. Vol. 26. N.º 4. 2004. pp. 347-357.

**Neville, A.; Aïtcin, P.** - High performance concrete - An overview. Materials and Structures. Vol. 31. 1998. pp. 111-117.

**Neville, A.M.** - Properties of concrete. Pitman, London. 1981. 844p.

**NP EN 12350-2** - Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento. IPQ. Lisboa 2009.

**NP EN 12350-6** - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica. IPQ. Lisboa 2009.

**NP EN 12390-1** - Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. IPQ. Lisboa. 2003.

**NP EN 12390-3** - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ. Lisboa 2011.

**NP EN 12390-6** - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. IPQ. Lisboa 2011.

**NP EN 12504-1** - Ensaio do betão nas estruturas: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão. IPQ. Lisboa. 2003.

**NP EN 12504-4** - Ensaio do betão nas estruturas: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. IPQ. Lisboa 2007.

**Silva, R.V.; de Brito, J.; Dhir, R.K.** - Properties and composition of recycled aggregates. Construction and Building Materials, Vol. 65. 2014. pp. 201-217.

**Sim, J.; Park, C.** - Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. Waste Management. Vol. 31. 2011. pp. 2352-60.

**Wirquin, E.; Hadjieva-Zaharieva, R.; Buyle-Bodin, F.** - Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - Application to recycled aggregate concrete. Materials and Structures. Vol.33. N.º 6. 2000. pp. 403-408.

**Xiao, J.; Li, J.; Zhang, C.** - Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research. Vol. 35. 2005. Pp. 1187-1194.

**Xiao, J.; Ying, J.; Shen, L.** - FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. Vol.29. 2012. pp. 12-23.

Lisboa, Setembro de 2015

Autores

Diogo Pedro  
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito  
Professor Catedrático

Luís Evangelista  
Professor Adjunto

Pedro Silva  
Professor Adjunto