



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 (EXCELLentSUStainableCONCcrete)

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BETÕES RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO

RELATÓRIO

Abril 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

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	1
3. MATERIAIS UTILIZADOS	9
4. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO	11
4.1. Abaixamento (cone de Abrams)	11
4.2. Massa volúmica	11
5. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	12
5.1. Propriedades em termos mecânicos	12
5.1.1. Resistência à compressão em cubos	12
5.1.2. Resistência à tracção por compressão diametral	17
5.1.3. Módulo de elasticidade	18
5.1.4. Velocidade de propagação dos ultra-sons	20
5.2. Propriedades em termos de durabilidade	21
5.2.1. Absorção de água por imersão	21
5.2.2. Absorção de água por capilaridade	23
5.2.3. Resistência à carbonatação	26
5.2.4. Resistência à penetração de cloretos	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7. BIBLIOGRAFIA	33

Índice de figuras

Figura 1 - Evolução das resistências à compressão do betão aos 28 dias	2
Figura 2 - Resultados do ensaio de massa volúmica.....	12
Figura 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	14
Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica.....	14
Figura 5 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 0% SF	15
Figura 6 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 5% SF	15
Figura 7 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 10% SF	15
Figura 8 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	18
Figura 9 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	19
Figura 10 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.....	20
Figura 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.....	20
Figura 12 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade	21
Figura 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.....	22
Figura 14 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão	23
Figura 15 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas.....	24
Figura 16 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 0% SF	24
Figura 17 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 5% SF	25
Figura 18 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 10% SF	25
Figura 19 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade	26
Figura 20 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão	26
Figura 21 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 e 91 dias	28
Figura 22 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão	29
Figura 23 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade.....	29
Figura 27 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias	30
Figura 28 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 91 dias e absorção de água por imersão	31

Índice de tabelas

Tabela 1 - Diferenciação de betões segundo a sua resistência à compressão	5
Tabela 2 - Diferenciação de betões.....	5
Tabela 3 - Propriedades dos agregados.....	10
Tabela 4 - Propriedades da sílica de fumo	10
Tabela 5 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	11
Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa volúmica	11
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.....	13
Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	13
Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias.....	13
Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias	17
Tabela 11 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias	18
Tabela 12 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	20
Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	22
Tabela 14 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas	23
Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade	25
Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 dias	27
Tabela 17 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias	27
Tabela 18 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 56 dias	27
Tabela 19 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 91 dias	27
Tabela 20 - Resultados dos coeficientes de carbonatação.....	28
Tabela 21 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias.....	29
Tabela 22 - Perdas de desempenho devidas à utilização de 100% de AR.....	32
Tabela 23 - Perdas de desempenho devidas à utilização de sílica de fumo	32

Abreviaturas

AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
ARB	Agregados reciclados de betão
BAR	Betões com agregados reciclados
BED	Betões de elevado desempenho
BER	Betões de elevada resistência
BR	Betões de referência
BUED	Betões de ultra elevado desempenho
RCD	Resíduos da construção e demolição
Relação a/l	Relação água / ligante
SF	Sílica de fumo

1. Introdução

O presente relatório tem como objectivo apresentar os resultados experimentais da tarefa 5.1 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUSustainableCONcrete)”.

A referida tarefa procurou avaliar o potencial de betões com agregados reciclados (BAR) atingirem desempenhos similares aos de betões de elevado desempenho (BED).

Apesar de existir bastante informação sobre BED convencional, o conhecimento sobre BED reciclado é ainda escasso. As investigações dedicam-se na sua maioria à caracterização mecânica, apresentando várias limitações, nomeadamente, em termos de taxas de substituição analisadas.

Assim, na campanha experimental realizada, foi estudado o desempenho, quer mecânico quer em termos de durabilidade, de BED incorporando diferentes quantidades de agregados reciclados (AR) e de sílica de fumo (SF).

Para isso, foram produzidas três famílias de betão com proporções de sílica de fumo de 0, 5 e 10% da massa de ligante (substituindo cimento). Cada família compreendeu um betão de referência e três 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.

Em todas as misturas, foram também incorporadas cinzas volantes e superplastificante, mantendo constante a quantidade de ligante em 400 kg/m^3 . As cinzas volantes foram utilizadas como um substituto do cimento, representando 10% da massa de ligante. Em relação ao superplastificante, este foi adicionado na proporção de 2% da massa de ligante.

Na avaliação realizada, foram considerados os seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; ultrasounds; resistência à carbonatação; resistência à penetração por cloretos; absorção de água por capilaridade; absorção de água por imersão.

2. Estado da arte

Actualmente, o betão é dos materiais mais comuns e úteis utilizados na indústria da construção. O seu desenvolvimento tem estado associado a tentativas de optimização de desempenho, conseguidas, regra geral, através de alterações das suas características.

Estas alterações, numa primeira fase, tiveram origem no ajuste das proporções dos materiais e, posteriormente, na incorporação de novos constituintes (cinzas volantes, sílica de fumo, superplastificantes, entre outros).

Na história de evolução dos betões, as primeiras preocupações de desempenho estiveram relacionadas com o aumento da capacidade resistente. Esta realidade surgiu nos anos 70, com a necessidade de se construir em altura, dada a falta de espaço nas grandes cidades. O aumento da resistência dos betões foi então conseguido através de avanços tecnológicos na mistura de químicos, aumento da disponibilidade de adições minerais e aumento do conhecimento sobre os betões de elevada resistência (BER) (Caldarone, 2009). Na Figura 1, pode-se observar o rápido crescimento da resistência à compressão a partir desta época.

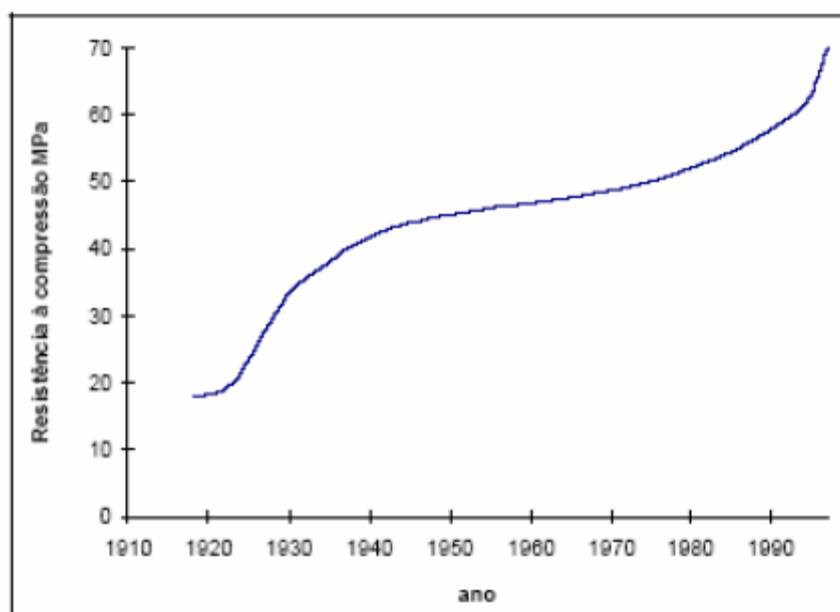


Figura 1 - Evolução das resistências à compressão do betão aos 28 dias (Coutinho e Gonçalves, 1997)

Com o acumular deste conhecimento, os interessados começaram a preocupar-se não só com o aumento da resistência mas também com outras propriedades associadas à durabilidade das estruturas de betão, levando ao surgimento dos betões de elevado desempenho. Os grandes impulsionadores desta realidade foram sem dúvida os redutores de água de alta gama (superplastificantes), capazes de reduzir significativamente a relação a/c dos betões, sem afectar a trabalhabilidade.

Deste modo, começaram a ser utilizados BED nas situações onde eram exigidos betões com melhores propriedades mecânicas, maiores trabalhabilidades e melhores resistências a ataques químicos relativamente aos betões convencionais (Tu et al., 2006).

Estes betões de elevado desempenho apresentam na sua constituição cimento, agregados finos, grossos, adjuvantes (superplastificantes) e/ou adições minerais (por exemplo, cinzas volantes, escória de alto forno, pó de sílica) e água (Bharatkumar et al., 2001; Lim et al., 2004). As quantidades de ligante são muito elevadas, estando compreendidas entre 400 e 550 kg/m³ (Neville e Aïtcin, 1998). As relações água / ligante situam-se entre 0,25 e 0,35, sendo os BED normalmente mais duráveis, não só porque são menos porosos, mas também porque as suas redes capilares e poros não se encontram ligados (Neville e Aïtcin, 1998; Aïtcin, 2003).

De forma geral, são utilizados cimentos do tipo CEM I (42,5R ou 52,5R) de endurecimento rápido, com baixo calor de hidratação e resistentes aos sulfatos.

Na sua escolha, são considerados os seguintes parâmetros: composição química, finura e uniformidade (Gonzalez-Isabel, 2001).

No que respeita à sua composição, os cimentos de elevada resistência devem apresentar elevados teores C₂S e C₃S e baixas quantidades de C₃A. Os valores C₃A necessitam de ser controlados, uma vez que valores elevados deste constituinte conduzem a uma redução da fluidez e perda rápida de trabalhabilidade. Segundo Hanna et al. (1989), a quantidade de C₃A deve ser inferior a 8%.

Relativamente à finura, propriedades como velocidade de hidratação, trabalhabilidade, consistência, segregação, resistência e fissuração devido à retracção podem ser afectadas. O uso de cimentos com maior finura e, por conseguinte, com maior superfície específica, permitem obter maiores resistências iniciais dos betões. Contudo, a maior finura leva ao aparecimento de alguns problemas reológicos.

Finalmente, garantir a uniformidade das características do cimento ao longo dos vários fornecimentos é outro dos factores essenciais para garantir o sucesso dos BED.

Existem ainda outros materiais cimentícios utilizados no fabrico de betões de elevado desempenho tais como as cinzas volantes, as escórias e a sílica de fumo. As cinzas volantes e escórias desenvolvem o calor de hidratação de forma mais lenta, uma vez que reagem muito pouco durante as primeiras horas. Isto significa que o aumento de temperatura inicial do betão é um pouco menor. Deste modo, é possível reduzir o gradiente de temperatura entre o centro e a superfície do elemento de betão que, segundo Bramforth (1980), não deve exceder 20 °C/metro para evitar a fissuração térmica resultante do diferencial de arrefecimento. Por outro lado, à custa deste fenómeno, as misturas que têm mais cinzas volantes ou mais escórias têm uma resistência inicial mais baixa do que as misturas que apenas utilizam cimento Portland. Contudo, isto pode ser compensado

diminuindo a relação água / ligante (Neville e Aïtcin, 1998).

Face ao exposto, conclui-se que o projectista, antes de decidir sobre a utilização destes materiais, deve estabelecer quais as resistências necessárias em determinadas idades; além disso, deve também estar familiarizado com a tecnologia do betão (Neville, 1998).

No que concerne à sílica de fumo e dado o seu elevado custo, toda a discussão em torno da sua utilização é bastante importante. Em muitos países, 1 kg de sílica de fumo pode custar tanto como 10 kg de cimento Portland (Neville e Aïtcin, 1998). No entanto, a sílica de fumo é uma das pozolanas mais populares e a sua utilização é responsável por betões com menores valores de porosidade, permeabilidade e exsudação (Mazloom et al. 2002). Quando utilizada, a massa de sílica de fumo representa, habitualmente, 5 a 15% da massa total dos materiais cimentícios, sendo o valor de 10% considerado o ideal. Segundo Neville e Aïtcin (1998), caso seja incorporada pouca sílica, isto é, menos de 5%, a sua utilização não será eficaz. Pelo contrário, se houver demais, quantidades superiores a 15%, o espaço entre as partículas de cimento não será suficiente para acomodar toda a sílica, sendo uma parte dela desperdiçada. Por exemplo, a substituição de 15% da massa de cimento por sílica de fumo é responsável por adicionar aproximadamente 2,000,000 de partículas por cada grão do cimento substituído (Roy, 1992).

Assim, quando as partículas de sílica se encontram dispersas na pasta de cimento, em quantidades adequadas, são responsáveis por criar um grande número de locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação. Este mecanismo torna a pasta mais densa e homogénea, através das reacções pozolânicas entre a sílica amorfa da adição mineral e o hidróxido de cálcio produzido pelas reacções de hidratação do cimento. Além do efeito pozolânico (EP), existe um efeito físico ou efeito de fíler das partículas de menores dimensões da mistura que é responsável por reforçar a zona de transição entre a pasta e os agregados (Isaia et al. 2003).

Portanto, em consequência desta realidade, a adição de pozolanas ao cimento resulta num aumento da resistência mecânica e durabilidade.

Apesar do conhecimento adquirido sobre betões de elevado desempenho, a NP EN 206-1 (2005) ainda não contempla o termo BED, não fazendo qualquer referência a este tipo de designação. Considera apenas que um betão para ser classificado como BER deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60. Utilizando o mesmo parâmetro (Pliskin, 1992), distinguiu betões convencionais de betões de elevado desempenho (Tabela 1). No entanto, alertou que esta característica não descrevia completamente os BED.

Tabela 1 - Diferenciação de betões segundo a sua resistência à compressão (Pliskin, 1992)

Classe de betões	f_{ck} (MPa)
Betão convencional	20-50
Betão de elevado desempenho (BED)	50-100
Betão de ultra elevado desempenho (BUED)	100-150
Betão excepcional	> 150

Harris (2010), além dos patamares de resistência à compressão, indicam também valores de resistência à tracção e módulo de elasticidade dos diferentes betões (Tabela 2).

Tabela 2 - Diferenciação de betões (Harris, 2010)

Propriedade	Betão convencional (MPa)	BED (MPa)	BUED (MPa)
Resistência à compressão	25-55	76-124	138-228
Resistência à tracção	2-5	5-6	12
Módulo de elasticidade	25-34	33-44	55

Registe-se o grande aumento na resistência à compressão entre estes dois estudos (Tabelas 1 e 2). O que em 1992 era considerado um BUED é em 2010 praticamente um BED, devido à constante evolução das capacidades deste material. No entanto, estes autores não definem as exigências em termos de durabilidade. Aliás, a terminologia BED/BUED é muitas vezes criticada por ser demasiado vaga e até mesmo como não tendo qualquer significado. Questões como: o que é o desempenho de um betão e como pode ser medido são levantadas. Assim, o conceito BED de é frequentemente misturado com o de BER.

Apesar da dificuldade em definir os BED, a verdade é que eles são cada vez mais usados no mundo inteiro. Como referido, são betões que contêm elevadas quantidades de ligante, tendo, por isso, uma natureza mais intensiva em termos de consumo de recursos naturais e de impactes ambientais graves comparativamente aos betões convencionais. Assim, considerando o conceito de desenvolvimento sustentável, a indústria do betão terá que implementar um conjunto de estratégias em relação à sua utilização, de forma a permitir atender às necessidades actuais sem impedir as gerações futuras de satisfazer as suas.

A comunidade científica tem um papel importante a desempenhar nesta área, nomeadamente na pesquisa de materiais alternativos. No sentido de se minimizar o impacte ambiental e energia utilizada no fabrico de betão, a reutilização dos resíduos da construção e demolição (RCD) poderá ser uma forma benéfica para se alcançar abordagens sustentáveis na concepção de misturas de betão. Neste âmbito, um resíduo que poderá ser

utilizado na produção de betão é o agregado reciclado, obtido de RCD (Lovato et al., 2012; Ying et al., 2013). Realça-se que, em geral, os agregados ocupam 55-80% do volume do betão (Tu et al., 2006). No caso particular da indústria do cimento, são já utilizados subprodutos da produção de silício (sílica de fumo) e do aço (escória de alto forno).

Deste modo, a utilização de agregados reciclados em betão poderá ser a solução de dois problemas: gestão de resíduos e escassez de recursos naturais. No que respeita aos resíduos da construção e demolição, o seu elevado volume constitui um grave problema que terá de ser tratado rapidamente. O Eurostat menciona um total de 970 milhões de toneladas/ano de RCD, o que representa quase 2,0 ton *per capita*. A esta situação acresce o facto de a taxa média de reciclagem da EU-27 ser de apenas de 47% (Sonigo et al., 2010). De forma a resolver o problema, a União Europeia, através da Directiva Quadro “Resíduos” (European Parliament, 2008), estabeleceu que pelo menos 70%, em peso, dos RCD produzidos terão que ser reciclados até ao ano de 2020.

Relativamente ao tema da escassez de recursos naturais, constata-se que o consumo de agregados no mundo é de cerca de 20,000 milhões de toneladas/ano (Bleischwitz e Bahn-Walkowiak, 2007). Mais de um terço deste consumo está relacionado com a produção de betão que é o material de construção mais usado no Planeta, atingindo uma produção de cerca de 10 km³/ano (Gartner e Macphee, 2011).

Por último, já está demonstrada não ser correcta a ideia de que uma adequada gestão dos RCD apenas é responsável por benefícios ambientais (S.A.E.R.M.C.M, 2011). O mercado de materiais de construção reciclados gerou receitas de € 744.100.000 em 2010, e estima-se chegar a € 1,3 biliões em 2016.

Apesar de a investigação sobre agregados reciclados ter quase 50 anos (Pacheco-Torgal e Jalali, 2011), as estruturas de betão, em muitos Países, entre os quais Portugal, continuam a ser feitas apenas com agregados naturais. Esta realidade pode ser justificada com o seu baixo custo, baixos impostos de deposição de RCD e falta de discriminação positiva em relação à utilização de agregados reciclados (Pacheco-Torgal et al., 2012).

Como se constata, a promoção deste material reciclado como uma alternativa não é fácil na indústria. Além do referido, outra situação que tem contribuído para este panorama é a elevada variabilidade dos AR, causada pela presença de argamassa aderida que representa cerca de 25 a 60% do seu volume (Tu et al., 2006). A presença desta argamassa é de facto a origem das piores propriedades dos AR: menor densidade, maior absorção e maior desgaste à abrasão (Juan e Gutierrez, 2009). Deste modo, os agregados reciclados são materiais heterógenos, porosos e podendo conter um elevado número de

impurezas. Esta heterogeneidade influencia negativamente as características dos AR e, por conseguinte, as características dos betões com eles produzidos.

Contudo, através dos progressos registados, verifica-se que já é possível introduzir certos RCD, com sucesso, em betão convencional (Poon et al., 2004; Tam et al., 2005; Xiao et al., 2005; Tabsh e Abdelfatah, 2009). Devido à sua variabilidade, torna-se necessário um maior controlo de qualidade. Questões como a origem, condições de humidade e o processo de trituração dos agregados reciclados têm de ser consideradas (Pedro et al., 2014a; Pedro et al. 2014b; Poon et al., 2004; Ferreira et al., 2011; Nagataki and Lida, 2001; Nagataki et al., 2004; Matias et al. 2013).

Apesar dos muitos estudos existentes sobre a adequação de AR em betões convencionais, existem apenas algumas tentativas em usar agregados reciclados na produção de betões de elevado desempenho. Com a maior utilização dos BED, é provável a alteração deste paradigma.

No trabalho desenvolvido por Tu et al. (2006), onde foram estudadas as propriedades de BED incorporando AR, verifica-se que características básicas como a massa volúmica, a capacidade de absorção, a granulometria e a resistência ao desgaste de agregados reciclados são geralmente piores do que as dos de agregados naturais, devido, como referido, à argamassa residual e a impurezas. Relativamente às propriedades do betão no estado fresco, constata-se que misturas utilizando agregados reciclados cumprem os requisitos iniciais de abaixamento relativos a BED mas, após uma hora, têm uma perda de abaixamento, devido à alta absorção dos agregados reciclados.

Neste estudo, observa-se ainda que, qualquer que seja o agregado reciclado utilizado no fabrico de BED, a tendência de propriedades como resistividade, propagação de ultra-sons e penetração de cloretos é muito idêntica à de BED convencional.

Noutro estudo, Limbachiya et al. (2000) examinaram a influência de agregados grossos reciclados de betão (AGRB) em betão de alta resistência (de 50 MPa ou mais). Verifica-se que os AGRB apresentam uma diminuição entre 7 e 9% da massa volúmica saturada com a superfície seca e duas vezes mais absorção do que os agregados naturais, refletindo, deste modo, a porosidade da pasta de cimento aderida.

O método de composição adoptado exigiu apenas um ajuste simples da relação água / cimento. Os resultados obtidos mostram que o betão que contém até 30% de AGRB pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações da engenharia de alto desempenho e que as propriedades de durabilidade foram semelhantes às dos betões de referência (BR). No entanto, observa-se que a retração e a fluência aumentam com a quantidade

de agregados reciclados presentes na mistura. Os investigadores concluíram que AGRB provenientes de resíduos da pré-fabricação podem ser utilizados em betões de elevado desempenho. Contudo, salientam que a adequação de agregados reciclados com origens diferentes necessita de ser avaliada individualmente. Apesar disto, segundo os autores, é importante reconhecer que existe uma necessidade de introduzir novos padrões de agregados reciclados e os valores obtidos demonstram que estes materiais podem ser usados com êxito na prática numa gama de condições de exposição.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) estudaram os efeitos da incorporação de agregados reciclados de betão finos (AFRB) e grossos provenientes de betão demolido com média / alta resistência (35-70 MPa) no desempenho de BED.

Constataram que as propriedades do betão de origem condicionaram significativamente as propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados. O procedimento utilizado na composição do betão reciclado foi muito semelhante ao do betão de referência, tendo sido apenas feitas correcções na quantidade de água para obter uma trabalhabilidade adequada. No entanto, as variações na relação a/c foram pequenas.

Verificou-se que, não substituindo a fracção 0-2 mm, as propriedades do betão reciclado são sempre melhores e que estas também são melhoradas através da introdução de superplastificantes e de sílica de fumo.

Os resultados mostram que os betões com agregados reciclados apresentam maior resistência à compressão quando AR de alta resistência são utilizados. No que respeita à resistência à tracção, as misturas contendo apenas agregados naturais apresentam valores superiores, mas as diferenças não são maiores do que 10% aos 28 dias. A influência de adjuvantes na resistência à tracção é muito maior do que a influência da introdução de agregados reciclados.

Quanto à resistência gelo / degelo, concluiu-se que BED feito a partir de agregados reciclados, quando submetido a acção de gelo / degelo, apresentam idêntica ou melhor durabilidade do que o betão de referência. Esta conclusão é apoiada por testes padrão constituídos por 50 ciclos de 24 horas (ar-congelamento e água-descongelamento).

Os ensaios de longo prazo mostraram maior retracção e menor fluência no betão reciclado, em relação ao betão constituído apenas por agregados naturais de resistência similar.

No trabalho de Gonzalez e Etxeberria (2014), foram utilizados AGRB obtidos a partir de trituração de três betões de origem distintos, com resistências à compressão de 40, 60 e 100MPa. Nesse estudo, foram fixadas taxas de substituição de 20, 50 e 100% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados de betão (ARB). Foram

avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade de BED e os resultados obtidos foram comparados com os de um betão de referência.

Relativamente às propriedades físicas, os betões incorporando 100% de ARB conseguiram alcançar propriedades semelhantes à do betão de referência, quando os AR eram provenientes do betão com resistência de 100 MPa. Verificou-se que, quanto mais baixa a qualidade dos ARB, maior a capacidade de absorção e o volume de vazios, afetando, deste modo, as propriedades finais do betão.

Nas propriedades mecânicas, constata-se que todos os betões utilizando agregados reciclados provenientes dos BO de 60 e 100 MPa atingiram, para a máxima taxa de substituição, resistências idênticas às do betão de referência. Contudo, para os AR com origem no betão de 40 MPa, esta situação ocorreu apenas para as taxas de 20 e 50%. O comportamento semelhante dos BARB relativamente ao betão de referência foi justificado pela baixa relação a/c e por uma força de ligação mais adequada dos agregados reciclados. Verificou-se que a quantidade e a qualidade de agregados reciclados de betão tinham pouca influência na resistência à tracção e resistência à flexão do betão, comparativamente ao BED de referência. O maior impacte negativo do uso de ARB, devido à sua maior porosidade, ocorreu no módulo de elasticidade.

No que respeita à durabilidade, os BED com agregados reciclados apresentaram novamente valores muito idênticos aos do BED de referência, devido à baixa relação a/c usada nas diferentes misturas. Na resistência à penetração de cloretos, o betão incorporando 50% de AGRB (obtidos a partir da trituração do betão mínimo 40 MPa) conseguiu valores semelhantes ao do betão de referência. No entanto, para a taxa de substituição de 100%, registou-se uma redução no desempenho. Deste modo, o estudo conclui que agregados reciclados provenientes de betões de origem com uma gama de resistência média / alta podem ser utilizados com sucesso em BED.

3. Materiais utilizados

Na presente campanha experimental, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados reciclados (finos e grossos) de betão, cimento, cinzas volantes, sílica de fumo e água. Foi adicionado ainda superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 2% da massa de ligante. 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 (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 ₂	94,31	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Al ₂ O ₃	-	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Fe ₂ O ₃	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 ₂ O	0,24	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Ensaio físicos			
Propriedade	Resultado	Unidades	Norma
Massa volúmica	2,01	g/cm ³	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 (SiO₂), cerca de 94%. No entanto, apenas 4% das partículas têm dimensões inferiores a 45 µm, o que poderá afectar o seu desempenho nas misturas de betão.

4. 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 pretendem avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S4) e a massa volúmica dos betões produzidos.

4.1. 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	0,37	205	0,37	206	0,38	207
B 50/50	0,38	201	0,38	192	0,40	208
B 0/100	0,38	208	0,38	209	0,40	205
B 100/100	0,41	195	0,42	202	0,44	198

Através da observação da tabela, constata-se que todos os betões produzidos respeitam o intervalo 190 ± 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.

4.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Na Tabela 6 e Figura 2, são apresentados os resultados.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa volúmica

	0% SF		5% SF		10% SF	
	Massa volúmica (kg/m^3)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m^3)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m^3)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	2416,5	0,0	2406,8	0,0	2395,5	0,0
B 50/50	2377,0	-1,6	2347,0	-2,5	2310,2	-3,6
B 0/100	2397,2	-0,8	2380,5	-1,1	2322,8	-3,0
B 100/100	2320,4	-4,0	2284,8	-5,1	2248,7	-6,1

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 2).

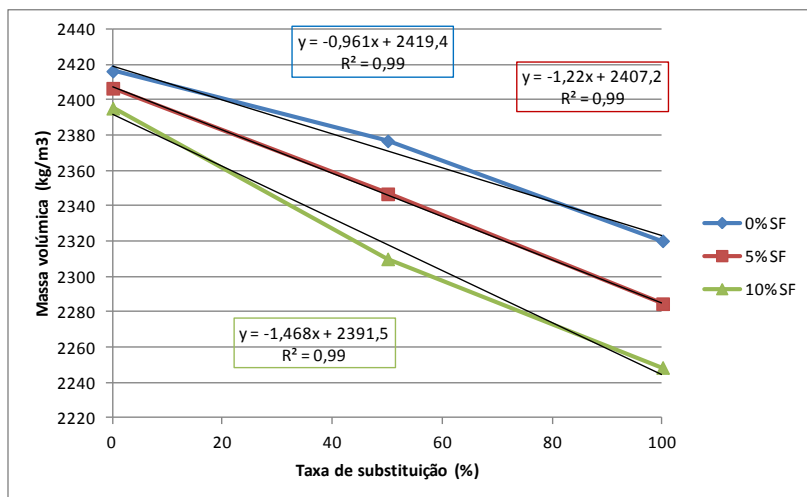


Figura 2 - Resultados do ensaio de massa volúmica

Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

5. Ensaio ao betão no estado endurecido

No capítulo 5, 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.

5.1. 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.

5.1.1. 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.

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	70,0	0,0	0,7	66,6	0,0	0,9	58,9	0,0	1,4
B 50/50	66,1	-5,5	1,1	62,5	-6,2	0,2	57,2	-2,9	1,5
B 0/100	67,2	-4,0	0,6	63,9	-4,1	0,4	58,3	-1,0	0,9
B 100/100	65,9	-5,8	1,1	60,9	-8,5	2,2	48,6	-17,5	0,4

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	82,9	0,0	1,9	75,2	0,0	2,5	68,6	0,0	1,9
B 50/50	79,6	-3,9	3,0	70,2	-6,7	1,9	65,3	-4,9	1,3
B 0/100	80,6	-2,7	3,6	71,7	-4,6	2,7	66,2	-3,6	1,9
B 100/100	77,6	-6,4	1,4	66,7	-11,3	3,1	61,3	-10,7	1,6

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	84,8	0,0	2,7	82,8	0,0	2,3	79,1	0,0	2,4
B 50/50	80,9	-4,6	1,9	78,1	-5,6	1,2	76,3	-3,5	4,3
B 0/100	81,9	-3,5	2,0	78,4	-5,3	3,7	77,2	-2,4	3,1
B 100/100	79,9	-5,8	1,6	71,2	-13,9	3,7	70,2	-11,2	1,0

Aos 28 dias, os BR das famílias de 0, 5 e 10% SF atingiram valores de 82,9, 75,2 e 68,6 MPa, respectivamente. Na família de 0% SF, os resultados dos BAR variaram entre 80,6 e 77,6 MPa. Na família de 5% SF, os BAR registaram variações entre 71,7 e 66,7 MPa. Por fim, na família com maior incorporação de sílica de fumo, os valores dos betões reciclados oscilaram entre 66,2 e 61,3 MPa.

Analisando estes valores, verifica-se que a substituição de AN por AR provoca diminuições de resistência em relação ao BR de 2,7-6,4, 4,6-11,3 e 3,6-10,7% nos betões com 0, 5 e 10% de sílica de fumo, respectivamente (Figura 3). As diferenças de resistência são semelhantes aos 7, 28 e 91 dias.

Esta situação poderá ser explicada pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida e que é responsável por aumentar a porosidade nos betões e a tornar as ligações interfaciais matriz/agregados mais fracas (Zaharieva et al., 2003; Tam et al., 2005; Lee e Choi, 2013).

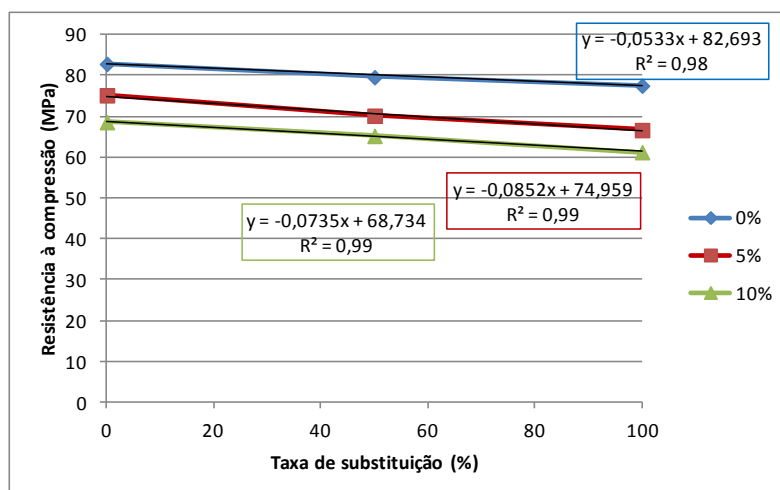


Figura 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Os BAR, relativamente aos betões convencionais, tendem a apresentar menores massas volúmicas e relações a/l superiores, o que prejudica o seu desempenho (Çakır e Sofyanlı, 2014). Na Figura 4, é possível verificar a diminuição da resistência do betão com a da sua massa volúmica.

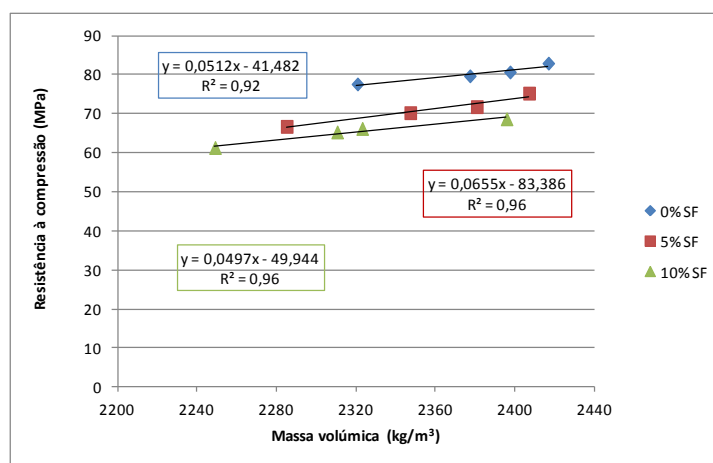


Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica

Ajdkiewicz e Kliszczewicz (2002), para elevadas gamas de resistências, chegaram a resultados semelhantes. Os autores obtiveram, para uma família de betão composta por 10% de sílica de fumo (em substituição do cimento) e 3% de superplastificante, um valor de 80,7 MPa, para o betão de referência e de 74,7 MPa para o betão com 100% de agregados reciclados, ou seja, registaram uma diminuição de cerca de 10% devida à incorporação de AR.

No trabalho de Poon et al. (2002), foram encontradas reduções dentro da mesma gama de valores, cerca de 14%, para as misturas de blocos de betão.

A evolução da resistência com o tempo é apresentada nas Figuras 5, 6 e 7.

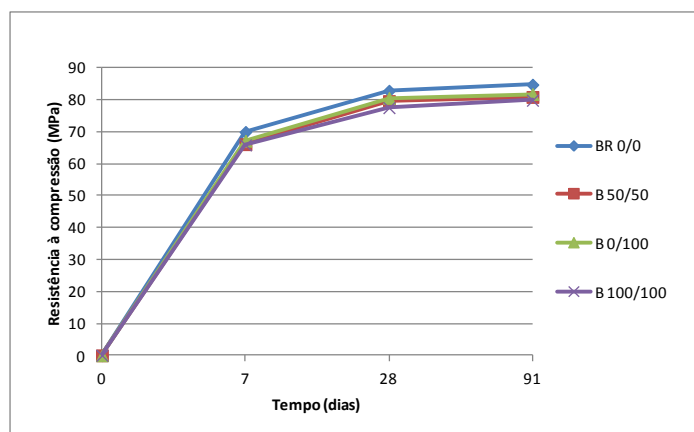


Figura 5 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 0% SF

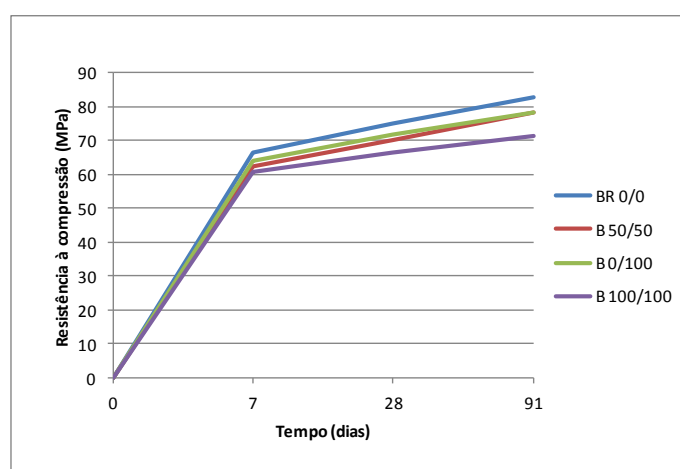


Figura 6 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 5% SF

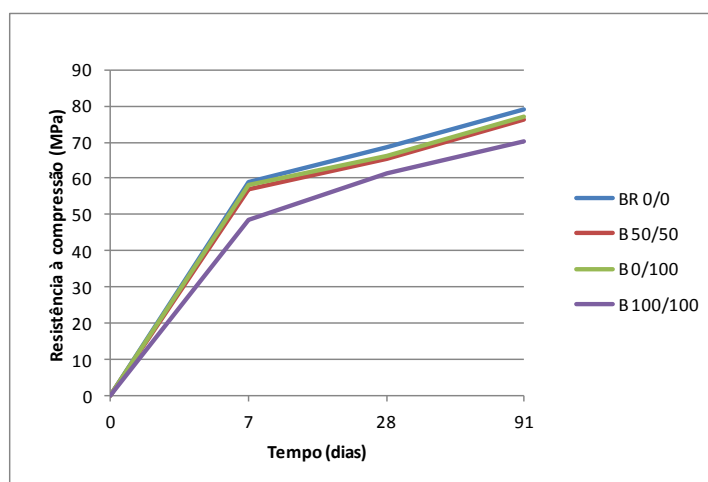


Figura 7 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões 10% SF

Verifica-se que, à medida que a quantidade de sílica de fumo aumenta, a resistência dos betões diminui. Aos 7 dias, os betões de referência das famílias de 5 e 10% SF, registaram diminuições de resistência, relativamente ao BR da família de 0% SF, de cerca de 5 e 16%, respectivamente. Os BAR registaram perdas de desempenho seme-

lhantes.

Conclusões idênticas foram obtidas por Çakır e Sofyanlı (2014), ou seja, observou-se diminuições de resistência (tanto em BR como em BAR) em idades precoces, causadas pela incorporação de sílica de fumo. Os autores desse estudo constataram que, aos 7 dias, a resistência à compressão das misturas com agregados naturais e incorporando 5 e 10% de SF foi reduzida em cerca de 6 e 12%, respectivamente, em comparação com a resistência do betão sem sílica de fumo. No entanto, aos 28 dias, os betões com SF já evidenciavam ganhos ligeiros. No que respeita aos betões com agregados reciclados observaram, em certas misturas com 10% SF, aumentos, em relação a misturas homólogas sem sílica de fumo, de aproximadamente 20%.

Contrariamente, no presente trabalho, regista-se ainda, aos 28 dias, diminuições de cerca de 20%, devidas à incorporação de sílica de fumo, tanto em betões com AN como em betões com AR.

Desta forma, as reacções da sílica de fumo com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e que conduzem à formação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) parecem ocorrer um pouco mais tarde. Observa-se aumentos máximos, dos 28 para os 91 dias, de cerca de 10 e 17% nas famílias com 5 e 10% SF, respectivamente. Nas misturas sem sílica de fumo, as variações, dos 28 para os 91 dias, não ultrapassaram 3% (Figuras 6, 7 e 8).

De facto, de forma não expectável, a sílica de fumo parece ter impacte sobre a resistência à compressão apenas a longo prazo, apresentando um comportamento semelhante aos das cinzas volantes.

O efeito químico (efeito pozolânico) poderá ter sido retardado, devido a menores taxas de hidratação. Esta situação poderá estar relacionada com a granulometria da sílica utilizada, onde só 4% das partículas têm dimensões inferiores a 45 μm . Em contraponto, nota-se que, em Çakır e Sofyanlı (2014), cerca de 40% das partículas passam na malha de 45 μm . Devido a esta situação, as partículas de maiores dimensões poderão desenvolver produtos de hidratação apenas ao redor da sua superfície, isolando o núcleo e não permitindo que este reaja com água circundante.

Uma outra explicação para as reduzidas taxas de hidratação (sobretudo nas primeiras idades) poderá estar relacionada com o método de mistura utilizado, tendo sido observado, durante o processo de fabrico dos betões, dificuldades de dispersão da sílica.

Deste modo, em consequência das maiores dimensões das partículas, não se formou ligante adicional (originado pela reacção da sílica com o hidróxido de cálcio) suficiente para compensar a quantidade de cimento substituída, conduzindo a misturas com meno-

res teores de C-S-H.

Assim, também o efeito físico da sílica de fumo nas misturas, dadas as suas dimensões, poderá ter sido pouco significativo, não contribuindo para a redução dos vazios existentes e, dessa forma, para aumentar a coesão e a compacidade dos betões.

5.1.2. 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	5,3	0,0	0,3	4,5	0,0	0,2	4,1	0,0	0,0
B 50/50	4,2	-20,7	0,2	3,5	-21,5	0,1	3,3	-19,5	0,2
B 0/100	4,4	-16,1	0,0	3,7	-16,4	0,0	3,5	-15,5	0,0
B 100/100	3,8	-28,7	0,3	3,2	-27,5	0,1	3,0	-27,9	0,1

Através da observação da tabela, verifica-se que os BR apresentam nas famílias de 0, 5 e 10% SF valores de 5,3, 4,5 e 4,1 MPa, respectivamente. Relativamente aos BAR, observa-se, na família sem sílica de fumo, valores entre 3,8 e 4,4 MPa. Na família de 5% SF, os valores foram entre 3,2 e 3,7 MPa. Por fim, na família 10% SF, as variações ocorridas nos betões reciclados situaram-se entre 3,0 e 3,5 MPa.

De acordo com os resultados, constata-se que as reduções de desempenho devidas à incorporação de AR são semelhantes nas diversas famílias (entre 15 e 30%), sendo visível que, quanto maior a quantidade de agregados reciclados, maior a diminuição da resistência (Figura 8).

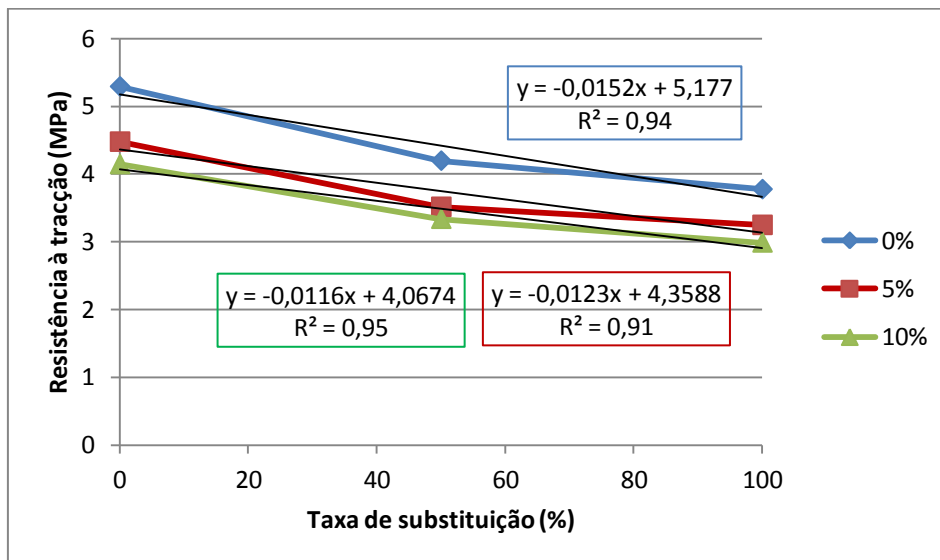


Figura 8 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Segundo Coutinho e Gonçalves (1997), esta propriedade não é tão afectada pela quantidade de cimento, como a resistência à compressão.

Deste modo, a resistência à tracção não beneficia particularmente do cimento adicional que é incorporado juntamente com os AR, sobretudo com os agregados finos reciclados de betão (AFRB). Portanto, 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.

Relativamente à incorporação de sílica de fumo, observou-se, nas famílias de 5 e 10% SF, diminuições máximas de resistência à tracção, relativamente à família de 0% SF, de cerca de 15 e 22%, respectivamente.

Esta situação poderá ser explicada pelo facto de a sílica de fumo, aos 28 dias, apresentar uma baixa reactividade, não sendo capaz de formar silicatos de cálcio hidratados, que preenchem os espaços capilares. Deste modo, é expectável que as misturas com SF apresentem um maior volume de vazios, responsável pelas perdas de desempenho registadas. Também nesta propriedade o efeito físico da sílica de fumo afigura-se pouco significativo, não parecendo contribuir para a diminuição da porosidade.

5.1.3. 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	51,7	0,0	3,0	48,1	0,0	0,6	45,2	0,0	n.d
B 50/50	41,8	-19,1	n.d	41,5	-13,6	1,0	40,6	-10,2	0,5
B 0/100	44,9	-13,1	0,1	45,2	-6,0	1,0	42,2	-6,6	0,4
B 100/100	40,6	-21,4	0,8	37,5	-22,0	2,0	33,3	-26,4	n.d

Os BAR das famílias 0, 5 e 10% SF apresentaram valores de 40,6-44,9, 37,5-45,2 e 33,3-42,2 GPa. Nos betões de referência, para as mesmas famílias, os valores foram de

51,7, 48,1 e 45,2 MPa.

Analisando os resultados, constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados (Figura 9). Nos diversos betões, para taxas de substituição de 50 e 100%, observa-se reduções, em relação ao BR, de aproximadamente 10-19 e 21-26%, respectivamente.

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.

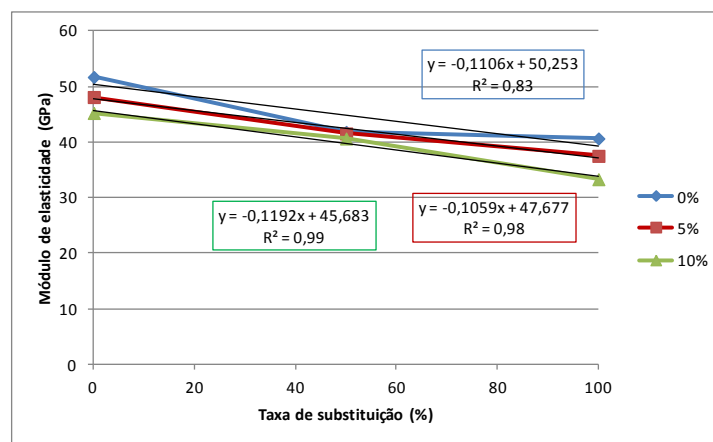


Figura 9 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

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 10, constata-se que a substituição de cimento por sílica de fumo influencia o módulo de elasticidade, reduzindo os seus valores. Verifica-se uma diminuição máxima de cerca de 20%.

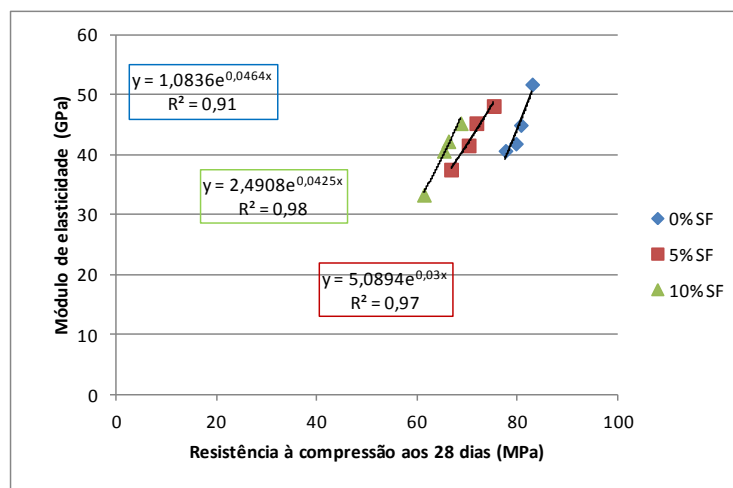


Figura 10 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão

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).

5.1.4. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons realizou-se de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007). Na Tabela 12 e na Figura 11, 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	5135,9	0,0	88,0	5023,0	0,0	66,8	4986,0	0,0	47,8
B 50/50	4789,8	-6,7	58,0	4743,1	-7,6	39,4	4616,0	-8,1	59,0
B 0/100	4991,5	-2,8	93,8	4859,7	-5,4	95,0	4769,6	-5,0	61,6
B 100/100	4704,5	-8,4	43,1	4618,4	-10,1	33,7	4556,8	-9,3	44,0

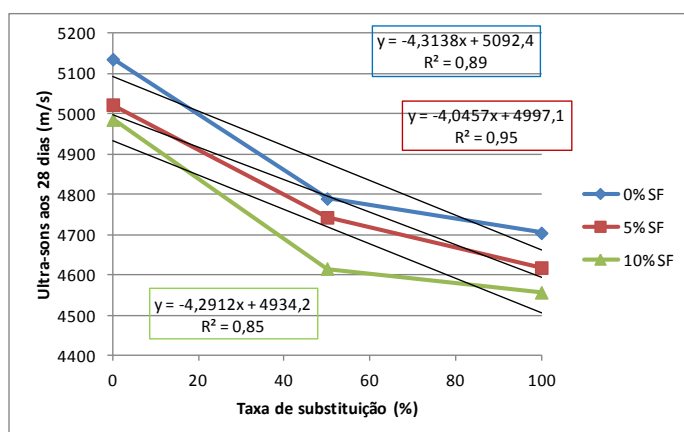


Figura 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Através da observação da Tabela 12 e da Figura 11, 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 de 5136, 5023 e 4986 m/s, para as famílias de 0, 5 e 10% SF, respectivamente. Por seu turno, os valores dos BAR variaram entre 4705-4992, 4618-4860 e 4557-4770 m/s nos betões com 0, 5 e 10% de sílica de fumo. As perdas de desempenho que não ultrapassaram 10% são explicadas pela maior porosidade dos BAR.

Através da análise da Tabela 12, constata-se que os valores da velocidade de propagação de ultra-sons das misturas com agregados naturais contendo 5 e 10% de sílica de

fumo, foram reduzidos, em relação ao betão homogêneo da família de 0%, em cerca de 2 e 3%, respectivamente. Situação idêntica foi registada para os betões reciclados, onde as perdas de desempenho não ultrapassaram 4%.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976) todos 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 12, é apresentada a relação aproximadamente linear entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade ($R^2 = 0,92$; $R^2 = 0,98$; $R^2 = 0,75$). 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.

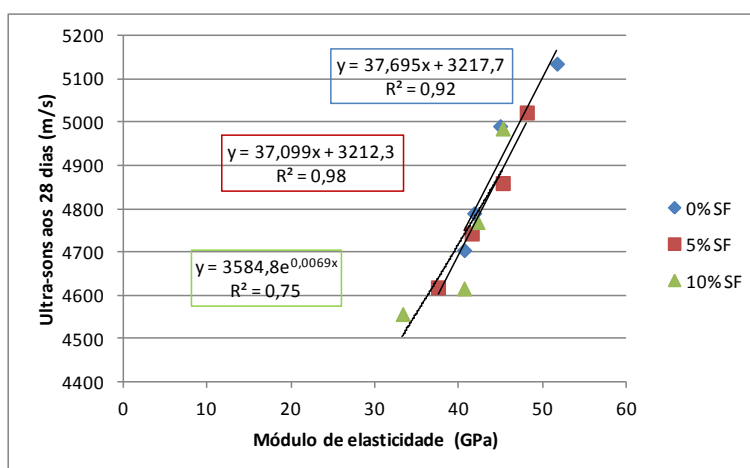


Figura 12 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade

5.2. Propriedades em termos de durabilidade

No subcapítulo 5.2, 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.

5.2.1. 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	9,3	0,0	0,1	10,6	0,0	0,2	11,9	0,0	0,2
B 50/50	12,9	38,9	0,1	13,9	30,3	0,5	15,0	25,9	0,3
B 0/100	12,1	30,8	0,3	13,5	27,0	0,2	14,2	18,8	0,3
B 100/100	16,6	78,8	0,1	17,8	67,0	0,4	18,0	51,1	0,2

Através da sua observação, verifica-se que os betões de referência registaram, para as famílias de 0, 5 e 10% SF, valores de 9,3, 10,6 e 11,9%, respectivamente. Os BAR, para as mesmas famílias, apresentaram valores de 12,1-16,6, 13,5-17,8 e 14,2-18,0%. Assim, constata-se que a incorporação de AR é responsável por piores desempenhos em relação ao BR, verificando-se aumentos de absorção entre 18 e 79% para as diferentes percentagens de incorporação de SF (Figura 13).

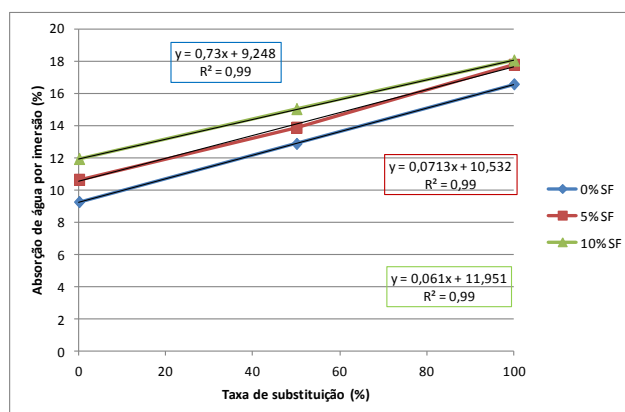


Figura 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Os resultados 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).

Relativamente à influência da sílica de fumo, verifica-se que a sua presença conduz a misturas com maiores valores de absorção, registando-se perdas de desempenho de 7-29%. Tal como observado nas propriedades mecânicas, a incorporação de SF parece não contribuir para o preenchimento dos poros das misturas nem para formar silicatos de cálcio hidratados, em quantidades suficientes, para compensar o cimento substituído. Deste modo, a introdução deste material parece ser responsável pelo aumento dos vazios existentes e, por conseguinte, por aumentar a porosidade das misturas.

Finalmente, através da Figura 14, é mostrada a relação que existe entre a resistência à compressão dos betões e a sua absorção de água por imersão. Foram obtidas correlações satisfatórias, nas diferentes famílias ($R^2 = 0,98$; $R^2 = 0,97$; $R^2 = 0,99$), o que demonstra a ligação entre estas propriedades.

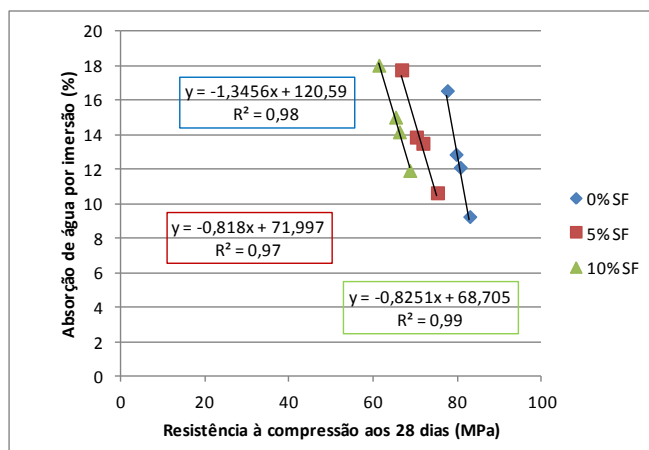


Figura 14 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão

5.2.2. 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^2)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por capilaridade (g/mm^2)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Absorção de água por capilaridade (g/mm^2)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	2,30E-03	0,0	5,9E-05	2,98E-03	0,0	4,1E-05	3,01E-03	0,0	4,0E-04
B 50/50	2,97E-03	28,9	1,8E-04	3,61E-03	21,2	1,2E-04	3,81E-03	26,5	1,8E-04
B 0/100	2,70E-03	17,5	1,0E-04	3,12E-03	4,7	1,3E-04	3,45E-03	14,6	3,9E-05
B 100/100	3,65E-03	58,7	2,1E-04	4,58E-03	53,7	2,8E-04	4,71E-03	56,5	1,8E-04

Os valores dos coeficientes às 72 horas dos BAR situaram-se entre $2,70$ e $3,65 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^2\text{h}^{1/2}$, para a família 0% SF, entre $3,12$ e $4,58 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^2\text{h}^{1/2}$, para a família 5% SF, e entre $3,45$ e $4,71 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^2\text{h}^{1/2}$, para a família 10 % SF.

Para as mesmas famílias, os betões de referência registaram valores de $2,30$, $2,98$ e $3,01 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^2\text{h}^{1/2}$. Ocorrem aumentos de absorção com o aumento da quantidade de agregados reciclados. Os betões correspondentes à taxa de substituição de 100% apresentam os piores resultados, com perdas de desempenho, relativamente aos BR, de cerca de 53,7-58,7%.

Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade e pelas maiores quantidades de água empregues nos BAR. Através da Figura 15, observa-se um aumento linear da absorção de água por capilaridade com o aumento da taxa de substituição.

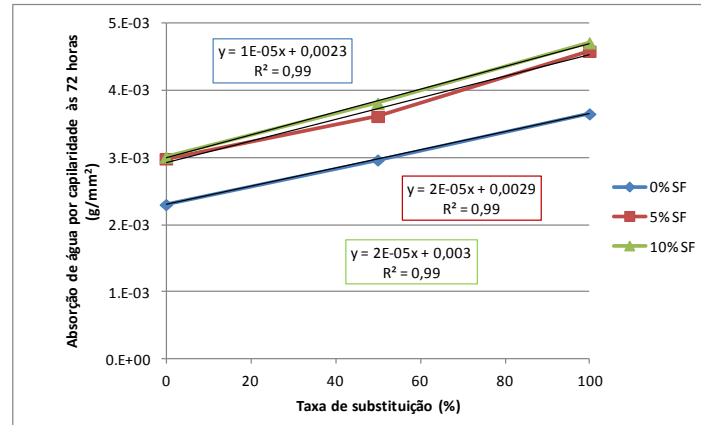


Figura 15 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas

Analisando as Figuras 16 a 18, constata-se ainda que a absorção de água por capilaridade 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).

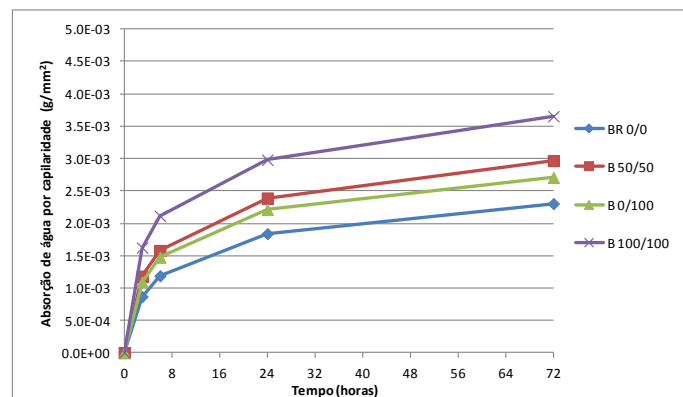


Figura 16 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 0% SF

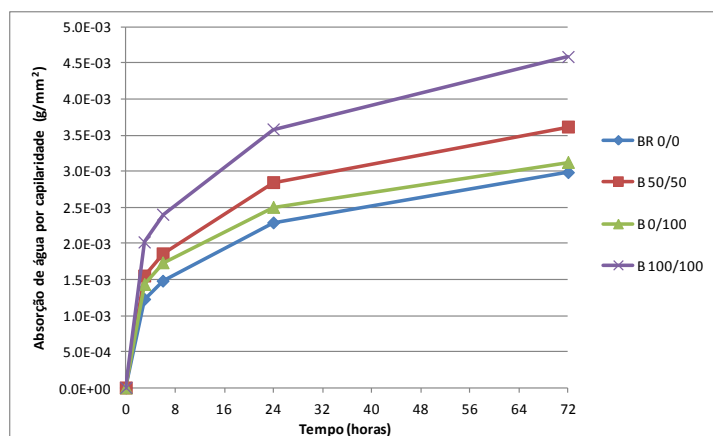


Figura 17 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 5% SF

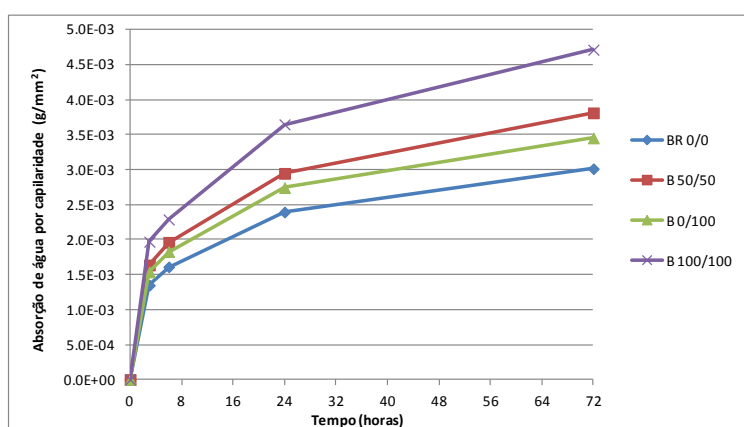


Figura 18 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões 10% SF

Mais uma vez, observa-se que a incorporação de sílica de fumo conduz a piores resultados. Esta situação é justificada pelo facto de a sílica utilizada apresentar uma baixa reactividade e não ser capaz de preencher os espaços capilares, de forma a densificar a matriz cimentícia. No que respeita aos coeficientes de capilaridade (Tabela 15), verifica-se igualmente que os betões com agregados reciclados e com SF conduzem a piores resultados.

Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade

Tipo de betão	0%		5%		10%	
	Coefficiente de capilaridade (g/mm ² h ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de capilaridade (g/mm ² h ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de capilaridade (g/mm ² h ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	3,14E-04	0,0	4,02E-04	0,0	4,15E-04	0,0
B 50/50	4,07E-04	29,6	4,94E-04	22,9	5,18E-04	24,8
B 0/100	3,74E-04	19,1	4,33E-04	7,7	4,75E-04	14,5
B 100/100	5,10E-04	62,4	6,27E-04	56,0	6,36E-04	53,3

A Figura 19 estabelece uma relação entre as absorções de água por capilaridade e por imersão. Os coeficientes de determinação elevados ($R^2=0,99$; $R^2=0,90$; $R^2=0,99$) mostram que a absorção de água por capilaridade às 72 horas varia exponencialmente com a absorção de água por imersão. Esta situação está de acordo com a constatada por Ferreira (2000).

Por último, de forma a relacionar as propriedades em termos de durabilidade dos betões com o seu desempenho mecânico, são apresentadas, na Figura 20, 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.

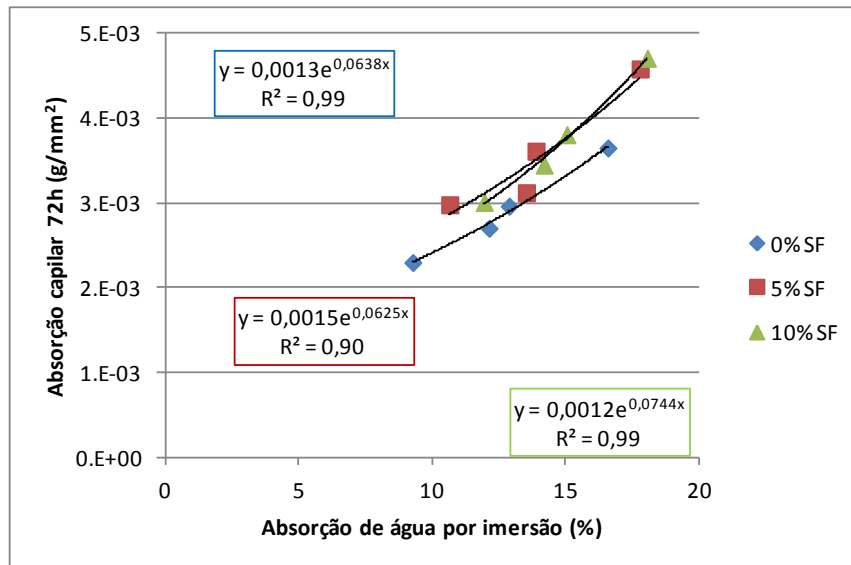


Figura 19 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade

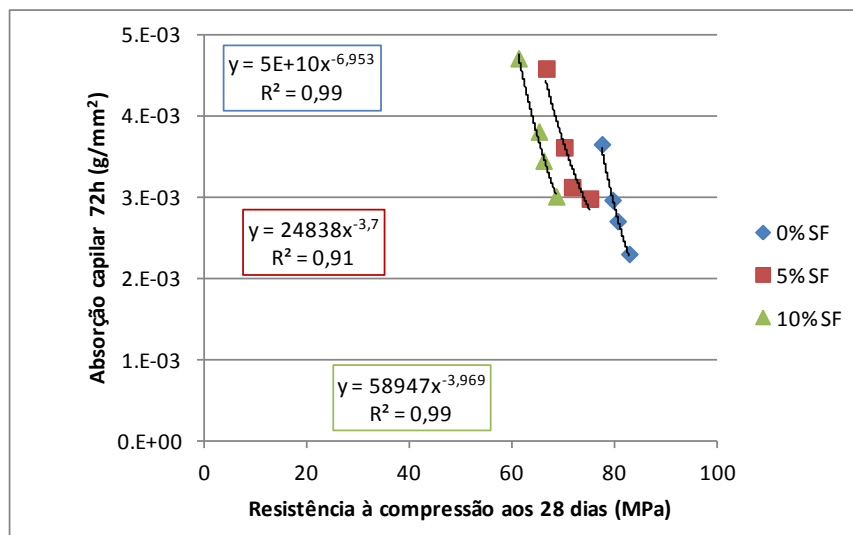


Figura 20 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão

5.2.3. Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi efectuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E-391-1993.

As médias dos resultados obtidos para a resistência à carbonatação são apresentadas nas Tabelas 16 a 19.

Analisando as Tabelas 16 a 19 e a Figura 21, observa-se que, tanto para idades jovens como para mais avançadas, a carbonatação tende a aumentar com o aumento da taxa de substituição e com a quantidade de sílica de fumo, embora as diferenças registadas sejam pouco significativas. Os valores obtidos estão de acordo com o que era expectável, uma vez que a absorção de água apresentou uma tendência idêntica.

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	0,2	0	0,1	0,5	0	0,1	0,7	0	0,2
B 50/50	0,3	50	0,1	0,5	0	0,2	1,0	43	0,2
B 0/100	0,2	0	0,1	0,5	0	0,1	1,0	43	0,2
B 100/100	0,4	100	0,1	0,8	60	0,1	1,5	114	0,1

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	0,3	0	0,1	0,5	0	0,1	2,4	0	0,2
B 50/50	0,3	0	0,1	0,8	60	0,2	2,9	21	0,3
B 0/100	0,3	0	0,1	0,6	20	0,1	2,8	17	0,1
B 100/100	0,5	67	0,1	1,0	100	0,2	3,5	46	0,2

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	0,5	0	0,2	1,6	0	0,1	3,7	0	0,1
B 50/50	0,6	20	0,1	1,8	13	0,1	3,9	5	0,2
B 0/100	0,6	20	0,1	1,8	13	0,2	3,8	3	0,2
B 100/100	0,7	40	0,3	1,9	19	0,2	4,9	32	0,3

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	0,9	0	0,1	1,7	0	0,1	5,1	0	0,1
B 50/50	0,9	0	0,2	2,6	53	0,2	5,4	6	0,3
B 0/100	0,8	-11	0,1	2,0	18	0,2	5,3	4	0,3
B 100/100	1,3	44	0,2	3,4	100	0,2	6,0	18	0,1

As perdas de desempenho dos BAR devem-se à maior porosidade destes betões. Segundo Kou e Poon (2006), o volume total e o diâmetro médio dos poros aumentam com a incorporação de AR. Por seu turno, a substituição de cimento por sílica de fumo parece também contribuir para o aumento da porosidade e da permeabilidade do betão, contribuindo, assim, para o aumento da carbonatação.

No trabalho de Sim e Park (2011), não existiu nenhuma relação com o nível de substituição. Verificou-se que as profundidades de carbonatação globais, para as incorporações de 60 e 100% de AFRB (e 100 AGRB%), foram inferiores às de 0 e 30%.

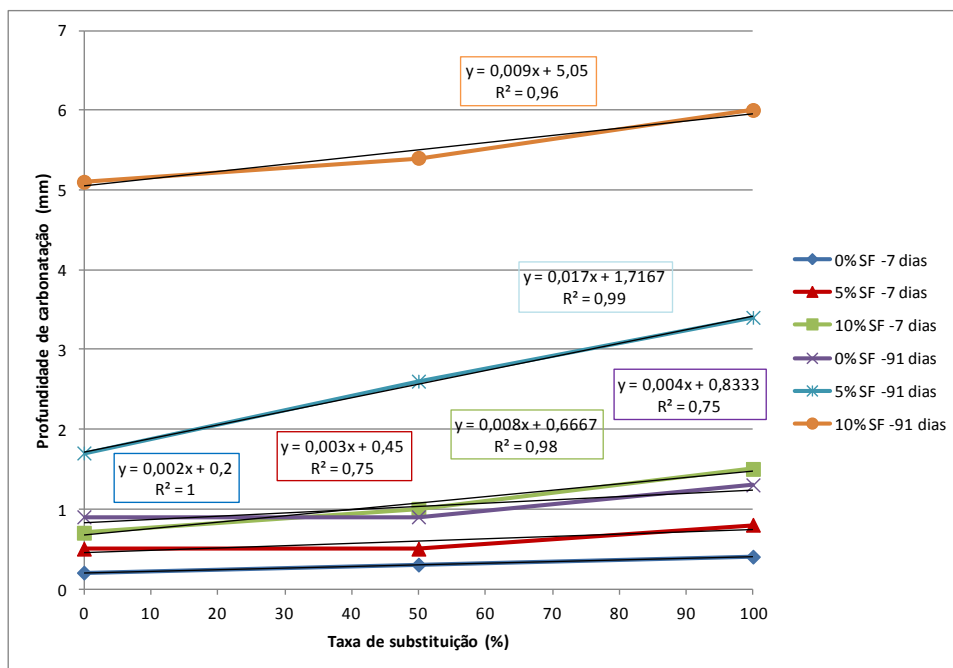


Figura 21 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 e 91 dias

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 (28-67%). 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%	
	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	0,08	0,0	0,18	0,0	0,50	0,0
B 50/50	0,08	0,0	0,24	33,3	0,54	8,0

B 0/100	0,08	0,0	0,20	11,1	0,53	6,0
B 100/100	0,12	50,0	0,30	66,7	0,64	28,0

Nas Figuras 22 e 23, 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.

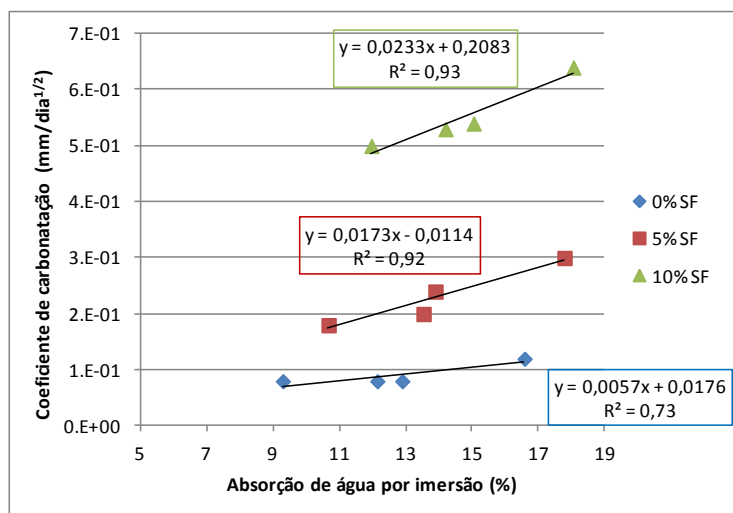


Figura 22 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão

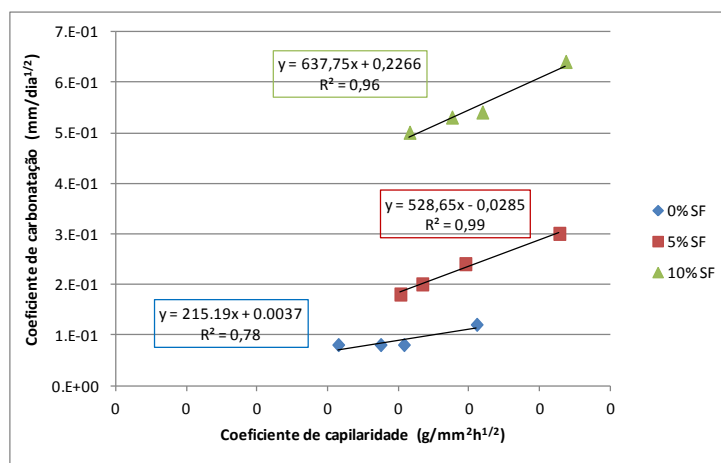


Figura 23 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade

5.2.4. 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.

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

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	D _{0méd}	Δ _{betão}	D.P	D _{0méd}	Δ _{betão}	D.P	D _{0méd}	Δ _{betão}	D.P

	(x10 ⁻¹² m ² /s)	(%)		(x10 ⁻¹² m ² /s)	(%)		(x10 ⁻¹² m ² /s)	(%)	
BR 0/0	3,3	0,0	0,5	5,4	0,0	0,2	7,5	0,0	0,5
B 50/50	5,0	50,5	0,2	7,2	31,4	0,2	9,1	21,5	1,3
B 0/100	4,4	33,3	0,8	6,4	17,5	0,3	8,1	9,2	0,5
B 100/100	5,7	71,4	0,3	8,9	63,9	0,6	10,2	36,5	0,7

Analisando a Tabela 21, observa-se que os valores dos coeficientes dos BAR, aos 91 dias, foram de 4,4-5,7, 6,4-8,9 e 8,1-10,2x10⁻¹² m²/s, para as famílias de 0, 5 e 10% SF, respectivamente. No que respeita aos BR, observa-se valores entre 3,3 e 7,5 x10⁻¹² m²/s. Embora se verifique uma variação percentual elevada entre BR e BAR as diferenças em termos absolutos são reduzidas.

Na Figura 27, é possível observar o aumento linear dos coeficientes com o aumento da incorporação de AR.

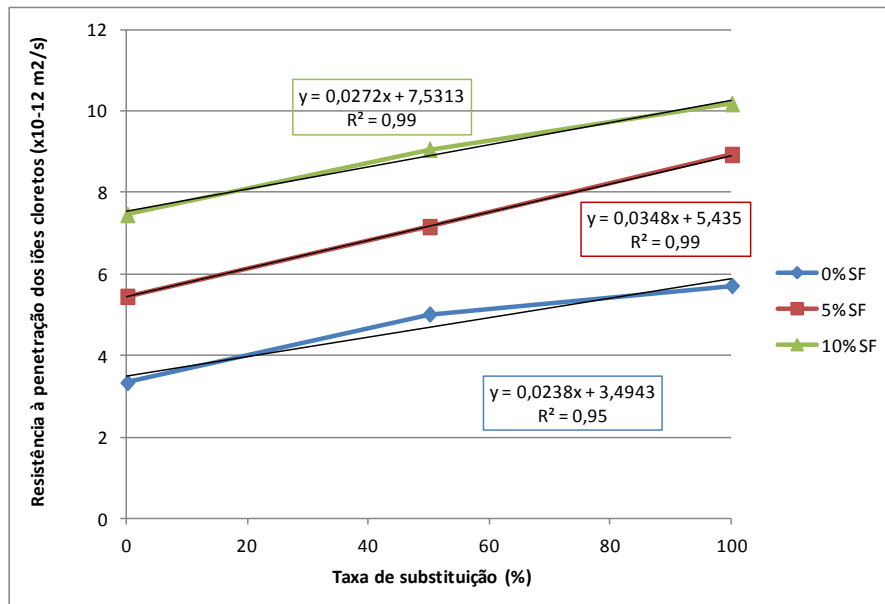


Figura 24 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias

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.

Relativamente à incorporação de sílica de fumo, verifica-se que a sua presença é responsável por piores resultados. Tal como observado anteriormente, este material não consegue apresentar o desempenho que seria expectável (aumento da resistência e diminuição da porosidade). Esta situação poderá ser explicada pela dimensão das suas partículas e/ou pela dificuldade que apresenta em se dispersar, durante o processo de mistura, originando baixas taxas de hidratação.

Através da análise da Figura 25, 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.

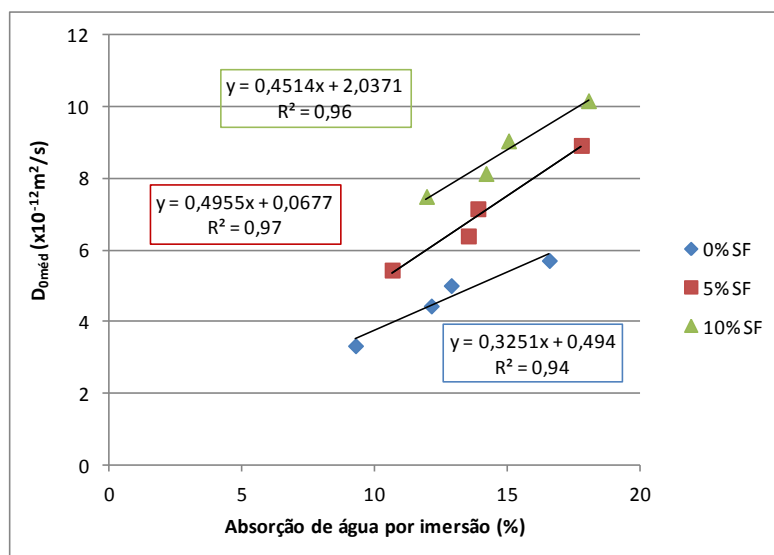


Figura 25 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 91 dias e absorção de água por imersão

6. Considerações finais

Com o presente relatório, pretendeu-se analisar os resultados experimentais obtidos durante a realização da Tarefa 5. Nesta tarefa, foram produzidos 12 tipos de betões incorporando diferentes quantidades de AR e de SF. Considerou-se três proporções de sílica de fumo (0, 5 e 10% SF, em substituição do cimento) e três taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados (50/50; 0/100 e 100/100%). No total, foi produzido aproximadamente 1 m³ de betão.

Os resultados obtidos nas propriedades do estado fresco, nomeadamente no abaixamento, mostram que foi necessário aumentar a relação a/c dos BAR, para se atingir trabalhabilidades idênticas. Esta situação deveu-se à maior absorção dos agregados reciclados, afectada pela presença de argamassa aderida. Os finos reciclados foram os mais afectados com valores 13 vezes superiores aos dos AFN. Relativamente aos AGRB, foram registados valores de absorção de água cerca de 6 vezes superiores aos dos AGN.

No que respeita à massa volúmica, verificou-se uma diminuição desta propriedade com a incorporação de AR. Foram obtidas variações máximas ente 4 e 6%, para os betões com 100% de agregados reciclados. Os resultados estão de acordo com os valores de massa volúmica dos agregados reciclados.

No que respeita ao estado endurecido, constatou-se uma diminuição de desempenho dos BAR, em relação aos BR, em todas as propriedades. A incorporação de sílica de fumo foi também responsável por reduzir os valores obtidos.

No entanto, aos 91 dias, constata-se que todos os betões conseguiram alcançar resistências médias à compressão superiores a 70 MPa.

No que respeita ao módulo de elasticidade e de acordo com o Eurocódigo 2, à excepção do betão com 100% de agregados reciclados e 10 % de sílica de fumo, todos os outros podem ser enquadrados em classes de resistência superiores à C50/60. Na propriedade de tracção por compressão diametral, o valor mais baixo foi registado para o mesmo betão, cerca de 3MPa (C30/37).

Em termos de durabilidade, os valores obtidos mostram novamente que a utilização de AR e SF conduz a reduções de desempenho. Apesar disto, as misturas incorporando estes materiais continuam a apresentar, em termos absolutos, valores aceitáveis. De notar que a quantidade de agregados reciclados poderá ser ajustada, em função das exigências de cada situação.

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)	-6,4 %	-11,3 %	-10,7 %
Resistência à tracção	- 28,7 %	- 27,5 %	-27,9 %
Módulo de elasticidade	-21,4 %	-22,0 %	-26,4 %
Velocidade de propagação dos ultra-sons	-8,4 %	-10,1 %	-9,3 %
Absorção de água por imersão	-78,8 %	-67,0 %	-51,1 %
Coefficiente de capilaridade	-62,4 %	-56,0 %	-53,3 %
Coefficiente de carbonatação	-50,0 %	-66,7 %	-28,0 %
Coefficiente de difusão dos iões cloreto (aos 91 dias)	-71,4 %	-63,6 %	-36,5 %

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)	-9,3 %	-14,0 %	-17,2 %	-21,0 %
Resistência à tracção	-15,4 %	- 14,0 %	-21,7 %	-20,8 %
Módulo de elasticidade	-7,0 %	-7,7 %	-12,5 %	-18,0 %
Velocidade de propagação dos ultra-sons	-2,2 %	-1,8 %	-2,9 %	-3,1 %
Absorção de água por imersão	-15 %	-7 %	-29 %	-9 %
Coefficiente de capilaridade	-28 %	-23 %	-32 %	-25%

Coefficiente de difusão dos íons cloreto (aos 91 dias)	-63,5 %*	-56,3 %*	-123 %*	-78,1%*
--	----------	----------	---------	---------

* Nesta propriedade, em termos absolutos, as diferenças máximas não ultrapassaram os $4,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Os resultados da Tabela 22 mostram que, para as diferentes famílias (0, 5 e 10% SF), os betões incorporando AR apresentam variações semelhantes. Consta-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 (excluindo a penetração de cloretos), por perdas que atingem cerca de 20 e 30%, respectivamente. Estes resultados foram justificados pela maior dimensão das partículas. De notar que a sílica de fumo para adquirir propriedades hidráulicas na presença da água necessita de consumir Ca(OH)_2 para produzir C-S-H, sendo a velocidade destas reacções influenciada pelo tamanho das suas partículas. Para partículas de maiores dimensões, os produtos de hidratação podem começar a desenvolver-se à volta da parte externa da partícula, separando o núcleo da partícula (que não reagiu) da água circundante. Devido a este fenómeno, a taxa de hidratação tende a diminuir e, por conseguinte, partículas pequenas reagem muito mais rapidamente do que partículas grandes. Também devido às suas dimensões, o efeito físico da sílica que contribui para preencher a curva granulométrica e, assim, reduzir os vazios existentes, poderá ter sido reduzido.

Uma outra explicação para as reduzidas taxas de hidratação poderá estar relacionada com o método de mistura utilizado (a sílica foi introduzida juntamente com o cimento e cinzas volantes). Foi observado, durante o processo de mistura, dificuldades de dispersão da sílica, podendo ter sido originados alguns aglomerados deste material.

Assim, na próxima fase desta tarefa, serão modificados alguns dos princípios adoptados, a fim de concluir sobre a utilidade de utilização de sílica de fumo.

Deste modo, a sílica não será utilizada como um substituto do cimento mas sim como um material adicional presente na mistura de betão. Além do mais, pretende-se utilizar um novo equipamento de mistura (betoneira eixo vertical) e adoptar um procedimento diferente, no fabrico das misturas de betão.

7. Bibliografia

- 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.
- Ajdkiewicz, A.; Kliszczewicz, A.** - Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24. 2002. pp. 269-79.
- Bharatkumar, B.H.; Narayanan, R.; Raghuprasad, B.K.; Ramachandramurthy, D.S.** - Mix proportioning of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 23. N.º 1. 2001. pp. 71-80.
- Bleischwitz, R.; Bahn-Walkowiak, B.** - Aggregates and construction markets in Europe: towards a sectorial action plan on sustainable resource management. *Minerals and Energy*. Vol. 22. 2007. pp. 159-176.
- 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.
- Bramforth, P.B.** - In situ measurement of effect of partial Portland cement replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete. *Proceedings - Institution of Civil Engineers*. Vol. 69. 1980. pp. 777-800.
- Building Contractors Society of Japan** - Committee on disposal and reuse of construction waste. 1981.
- Çakır, Ö.; Sofyanlı, Ö.** - Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal*. 2014
- Caldarone, M. A.** - High-strength concrete - A practical guide. Taylor & Francis. Nova Iorque 2009.
- 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.
- European Parliament** - Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. 2008.
- Ferreira, L.; de Brito, J.; Barra, M.** - Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 63. N.º 8. 2011. pp. 617-27.
- Ferreira, R.** - Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães 2000. 248 p.

- Gartner, E.; Macphee, D.** - A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. Vol. 41. N.º 7. 2011. pp. 736-749.
- 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.
- Gonzalez, A.; Etxeberria, M.** - Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 52. 2014. pp. 227-235.
- González-Isabel, G.** - Hormigón de alta resistencia. Instituto Técnico de Materiales y Construcciones. Madrid 2001.
- Hanna, E.; Luke, K. Perraton, D.; Aïtcin, P.C.** - Rheological behaviour of Portland cement pastes in the presence of a superplasticizer. *ACI Materials Journal*. Vol. 119. 1989. pp. 171-188.
- Harris, D. K.** - Application of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for sustainable building components. US-Israel Workshop on: Sustainable Buildings - Materials and Energy. Haifa 2010.
- 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.
- Juan, M.S.; Gutierrez, P.A.** - Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. 2009. pp. 872-877.
- 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.
- Lee, G.; Choi, H.** - Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. *Construction and Building Materials*. Vol. 40. 2013. pp. 455-460.
- Lim, C.H.; Yoon, Y.S.; Kim, J.H.** - Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. N.º 3. 2004. pp. 409-420.
- Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; Dhir, R.K.** - Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*. Vol. 33. 2000. pp. 574-80.

- 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.
- Lovato, P.; Possan, E; Molin, D.; Masuero, A.; Ribeiro, J.** - Modelling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 26. N.º 1. 2012. pp. 437-447.
- Malhotra, V.** - Testing hardened concrete: nondestructive methods. American Concrete Institute. 1976.
- Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A.; Pedro, D.** - Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*. Vol. 44. 2013. pp. 101-109.
- 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. 2002. pp. 347-357.
- Nagataki, S.; Gokceb, A.; Saekic, T.; Hisada, M.** - Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. N.º 6. 2004. pp. 965-971.
- Nagataki, S.; Lida, K.** - Recycling of demolished concrete, In V.M. Malhotra (ed.), *Recent Advances in Concrete Technology*, Proc. fifth CANMET/ACI intern. conf., Singapore, Publication SP-200: 1-20, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2001.
- Neville, A.** - Concrete technology - an essential element of structural design. American Concrete Institute. Vol. 20. N.º 7. 1998. pp. 39-41.
- Neville, A.; Aitcin, 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 12390-3 - 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 12504-4 - Ensaio do betão nas estruturas: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. IPQ. Lisboa 2007.

NP EN 206-1 - Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ. Lisboa 2005.

Pacheco-Torgal, F.; Ding, Y.; Miraldo, S.; Abdollahnejad, Z.; Labrincha, J. - Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC? *Construction and Building Materials*. Vol. 36. 2012. pp. 1048-1052.

Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. - *Eco-efficient construction and building materials*. Springer Verlag. London 2011.

Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. - Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 71. 2014a. pp. 141-151.

Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. - Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste - Influence of the crushing process. *Materials and Structures*. 2014b.

Pliskin, L. - High performances concretes - Engineering properties and code aspects. *High Performance Concrete - From material to structure*. E & FN Spon. London 1992.

Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. - Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 18. N.º 6. 2004. pp. 461-8.

Roy, D. - Advanced cement systems including CBC, DSP, MDF. 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi 1992. pp. 357-380.

S.A.E.R.M.C.M - Strategic analysis of the European recycled materials and chemicals market. Frost & Sullivan. 2011. <<http://www.frost.com/prod/servlet/report-toc.pag?repid=M579-01-00-00-00>>

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.

- Sonigo, P.; Hestin, M.; Mimid, S.** - Management of construction and demolition waste in Europe. Stakeholders Workshop. Brussels 2010.
- Tabsh, S.W.; Abdelfatah, A.S.** - Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. 2009. pp. 1163-7.
- Tam, V.; Gao, X.; Tam, C.** - Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35. N.º 6. 2005. pp. 1195-1203.
- Tu, T.Y.; Chen, Y.Y.; Hwang, C.L.** - Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 36. N.º 5. 2006. pp. 943-950.
- 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.
- Ying, J.; Xiao, J; Tam, V.** - On the variability of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 41. 2013. pp. 732-741.
- Zaharieva, R.; Bodin, F.; Skoczylas, F.; Wirquin, E.** - Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25. N.º2. 2003. pp. 223-232.

Lisboa, Abril de 2015

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto