



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 ENSAIOS DOS BETÕES

RELATÓRIO

Setembro 2015

Financiamento FCT/POCTI



União Europeia

FEDER



Governo da República Portuguesa

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO	2
3. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO	3
3.1. Ensaio de espalhamento	3
3.2. Ensaio de escoamento no funil V	4
3.3. Ensaio na caixa L	5
3.4. Ensaio de resistência à segregação	6
3.5. Ensaio de espalhamento no anel J	7
4. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	9
4.1. Propriedades em termos mecânicos	9
4.1.1. Massa volúmica	9
4.1.2. Resistência à compressão em cubos	10
4.1.3. Resistência à compressão em cilindros	12
4.1.4. Resistência à tracção por compressão diametral	16
4.1.5. Módulo de elasticidade	18
4.1.6. Velocidade de propagação de ultra-sons	20
4.1.7. Resistência à abrasão	22
4.1.8. Deformação por retracção	23
4.2. Propriedades em termos de durabilidade	27
4.2.1. Absorção de água por imersão	28
4.2.2. Absorção de água por capilaridade	29
4.2.3. Permeabilidade ao oxigénio	31
4.2.4. Resistência à penetração de cloretos	34
4.2.5. Resistividade eléctrica	36

4.2.6. Resistência à carbonatação	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
6. BIBLIOGRAFIA	45

Índice de figuras

Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 65)	3
Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 65) ...	3
Figura 3 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 65)	5
Figura 4 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 65)	6
Figura 5 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 65)	6
Figura 6 - Resultados do ensaio no anel J: tempo de espalhamento (PF 65)	7
Figura 7 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 65)	7
Figura 8 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 65)	8
Figura 9 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento em anel J	8
Figura 10 - Resultados do ensaio de massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	10
Figura 11 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	11
Figura 12 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 7 dias de idade	12
Figura 13 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade	12
Figura 14 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 91 dias de idade	12
Figura 15 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	13
Figura 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)	13
Figura 17 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade	14
Figura 18 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)	15
Figura 19 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)	16

Figura 20 - Superfície de rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade	17
Figura 21 - Superfície de rotura apresentada pelos diferentes betões aos 91 dias de idade	17
Figura 22 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)	18
Figura 23 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65)..	19
Figura 24 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65).....	20
Figura 25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cubos aos 28 e 91 dias (PF 65)	20
Figura 26 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65).....	21
Figura 27 - Relação entre a massa volúmica e a velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	22
Figura 28 - Relação entre o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 65)	22
Figura 29 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 65).....	23
Figura 30 - Resultados do ensaio de retracção - deformação devido a retracção ao longo de 91 dias (PF 65)	24
Figura 31 - Resultados de deformação por retracção obtidos experimentalmente e obtidos através do modelo de previsão do EC2, em função da resistência mecânica, durante 91 dias.....	26
Figura 32 - Relação entre a deformação por retracção e o módulo de elasticidade aos 91 dias (PF 65).....	27
Figura 33 - Relação entre a deformação por retracção e a resistência à compressão aos 91 dias (PF 65).....	27
Figura 35 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF	

65)	28
Figura 36 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias (PF 65).....	29
Figura 37 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)	30
Figura 38 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)	30
Figura 39 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade (72 horas) aos 28 e 91 dias (PF 65)	31
Figura 40 - Relação entre a absorção de água por capilaridade (72 horas) e a resistência à compressão aos 91 dias (PF 65).....	32
Figura 41 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 65)	32
Figura 42 - Relação entre permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 65)	34
Figura 43 - Relação entre a permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias (PF 65)	34
Figura 44 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65)	34
Figura 45 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por imersão aos 28 dias (PF 65)	35
Figura 46 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65).....	35
Figura 47 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão aos 28 dias (PF 65)	36
Figura 48 - Resultados do ensaio de resistividade eléctrica aos 28 e 91 dias (PF 65)....	36
Figura 49 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65).....	37
Figura 50 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias (PF 65)	38
Figura 51 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão aos	

91 dias (PF 65).....	39
Figura 52 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão aos 91 dias (PF 65)	40
Figura 53 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade aos 91 dias (PF 65).....	40

Índice de tabelas

Tabela 1 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	9
Tabela 2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65).....	11
Tabela 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65).....	13
Tabela 4 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 65)	14
Tabela 5 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206-1 (2005).....	15
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)	16
Tabela 7 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção, de acordo com o EC2 (2008), aos 28 e 91 dias	18
Tabela 8 - Resultados do módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65).....	19
Tabela 9 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, de acordo com o EC2 (2008), aos 28 e 91 dias	20
Tabela 10 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 65).....	21
Tabela 11 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 65)	23
Tabela 12 - Deformações por retracção aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	25
Tabela 13 - Resultados de deformação por retracção obtidos experimentalmente e obtidos através do modelo de previsão do EC2, em função da resistência mecânica, aos 7, 28 e 91 dias.	26
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 65)	28
Tabela 15 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72h (PF 65) aos 28 e 91 dias.....	30
Tabela 16 - Resultados dos coeficientes de capilaridade (PF 65) aos 28 e 91 dias	30

Tabela 17 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 65)	32
Tabela 18 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65).....	34
Tabela 19 - Resultados do ensaio de resistividade eléctrica aos 28 e 91 dias (PF 65) ...	36
Tabela 20 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28 e 91 dias (PF 65).....	38
Tabela 21 - Resultados dos coeficientes de carbonatação (PF 65).....	39
Tabela 22 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias.	41

Abreviaturas

AFN	Agregado fino natural
AGN	Agregado grosso natural
AR	Agregado reciclado
AFR	Agregado fino reciclado
AGR	Agregado grosso reciclado
BAC	Betão auto-compactável
BC	Betão convencional
BACED	Betão auto-compactável de elevado desempenho
BED	Betão de elevado desempenho
CV	Cinzas volantes
EC2	Eurocódigo 2
FC	Fíler calcário
f_{ad}	Percentagem de substituição do cimento pelas adições
f_{ck}	Resistência característica à compressão do betão
$f_{ck,cube}$	Resistência característica à compressão do betão em cubos
$f_{ck,cyl}$	Resistência característica à compressão do betão determinada em cilindros
f_{cm}	Resistência média à compressão do betão
$f_{cm,cube}$	Resistência média à compressão do betão em cubos
$f_{cm,cyl}$	Resistência média à compressão do betão em cilindros
f_{cm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ctm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à tracção
E_{cm}	Módulo de elasticidade do betão
NA	Agregado natural
PJ	Capacidade de passagem no anel
PL	Índice de capacidade de passagem na caixa L
SF	Diâmetro de espalhamento
SR	Resistência à segregação
T_{500}	Tempo de espalhamento
T_v	Tempo de funil

1. Introdução

O presente documento dá cumprimento ao estabelecido com a FCT, no âmbito de projectos de investigação científica e de desenvolvimento tecnológico, que requer a apresentação de relatórios periódicos.

Neste relatório, são apresentados os resultados da campanha experimental cujo objectivo final foi produzir betão autocompactável de elevado desempenho (BACED) usando agregados reciclados (AR). Este estudo corresponde à execução de parte da tarefa 5 no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “*Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)*”.

A referida tarefa procurou avaliar o potencial do betão auto-compactável (BAC) com agregados reciclados (BAR) atingirem desempenhos similares aos de betões de elevado desempenho (BED).

São apresentados os resultados dos ensaios realizados em seis betões (usando agregado reciclado), em que o primeiro corresponde a uma mistura apenas usando agregado natural (NA) (sigla: **100% NA**) e as restantes cinco misturas em que se varia a percentagem de agregado fino reciclado (AFR) e agregado grosso reciclado (AGR) na composição do betão: (1) AFR/AGR%: 25/25% (sigla: **25% AR**); (2) AFR/AGR%: 50/50% (sigla: **50% AR**); (3) AFR/AGR%: 100/100% (sigla: **100% AR**); (4) AFR/AGR%: 0/100% (sigla: **100% AGR**); (5) AFR/AGR%: 100/0% (sigla: **100% AFR**).

A percentagem de substituição do cimento pelas adições (f_{ad}) foi mantida constante em todas as amassaduras a estudar neste trabalho que contemplam a introdução de fíler calcário (FC) e cinzas volantes (CV) (em substituição do cimento): foi considerado um valor de f_{ad} de 35%, sendo que 5% corresponde a FC e 30% corresponde a CV. Foi também mantida constante, em todas as amassaduras, a quantidade de sílica de fumo e de cimento (determinado previamente na sub-tarefa 5.2): 10% de sílica de fumo e 450 kg/m³ de cimento. A relação a/c de todas as amassaduras produzidas foi de 0,44. Foi usado agregado reciclado de betão proveniente da indústria da pré-fabricação, com resistência à compressão de 65 MPa (PF 65)

Neste relatório, além da apresentação dos resultados dos ensaios realizados em BACED com AR, é feita a sua análise e discussão, assim como a comparação com estudos semelhantes. Nas análises às propriedades das amassaduras, será avaliada a influência da introdução de AR no BAC. Também é feita a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os modelos previstos no Eurocódigo 2 (EC2) (2008).

2. Enquadramento e contexto

As características mais relevantes do BAC no estado fresco estão relacionadas com o facto de este não necessitar de vibração e ter a capacidade de preencher as cofragens, envolvendo as armaduras (mesmo em zonas com grande densidade de armaduras), sem deixar vazios, nem ocorrer fenómenos de segregação tanto durante a colocação como em repouso. Enquanto num betão convencional (BC) é necessária a aplicação de uma energia adicional à fricção interna entre as partículas como modo de permitir que se distribuam e preencham correctamente os moldes, num BAC tal não pode ocorrer porque tem de ser o próprio betão a conseguir esse efeito. Este efeito reflecte-se nos ensaios no estado fresco e é conseguido através da optimização das quantidades da mistura e da incorporação de adições e adjuvantes.

Assim, as propriedades a avaliar no estado fresco podem-se caracterizar pelas seguintes características: fluidez; velocidade do escoamento quer na ausência, quer na presença de obstruções; capacidade de enchimento; capacidade de escoamento; capacidade de passagem; e resistência à segregação.

Os betões de elevado desempenho (BED) são, actualmente, empregues apenas em situações particulares, sobretudo em edifícios altos e em estruturas localizadas em ambientes agressivos. Em termos físicos, os BED possuem resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos BC.

Embora não exista uma linha definida de separação entre os BC dos BED, a *American Concrete Institute* (1993) caracteriza BED aos betões que apresentam resistência à compressão superior a 41 MPa. A NP EN 206-1 (2005) considera que, para ser classificado como BED, um betão deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60.

A temática de utilização de AR para a produção de betão é de grande relevância para a Sociedade, uma vez que esta cada vez mais exige que a indústria da construção adopte novos processos que minimizem os impactes negativos no meio ambiente. A utilização de AR para a produção de betão apresenta um grande benefício ambiental (poupança na extracção de agregado natural).

3. Ensaio ao betão no estado fresco

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios em BAC no estado fresco. Por conseguinte, são analisadas as seguintes propriedades: fluidez, velocidade do escoamento na ausência de obstruções, viscosidade, capacidade de enchimento, capacidade de escoamento através de espaços confinados, resistência à segregação e capacidade de passagem através de espaços estreitos

É muito importante avaliar as propriedades do BAC em estado fresco, uma vez que este tem de ter características específicas para que possa ser considerado como autocontacável, isto é, tem de possuir a capacidade de escoar e compactar apenas sob acção do seu próprio peso, encher a cofragem com as suas armaduras, tubos, negativos, etc., conservando a homogeneidade, não sendo necessário qualquer meio de vibração para ser colocado em obra.

3.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-8 (2010). Este ensaio permitiu avaliar a fluidez e a velocidade de escoamento na ausência de obstruções. Por conseguinte, os parâmetros a serem avaliados são o tempo que o BAC demora a atingir um círculo de 500mm, designado por tempo de espalhamento (T_{500}), e o diâmetro de espalhamento (SF). Na **Figura 1** e na **Figura 2**, são apresentados os resultados obtidos para o T_{500} e SF, respectivamente.

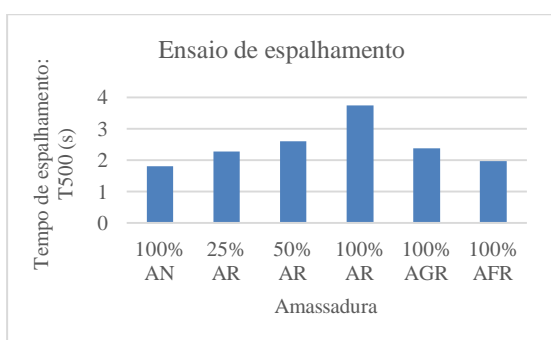


Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 65)

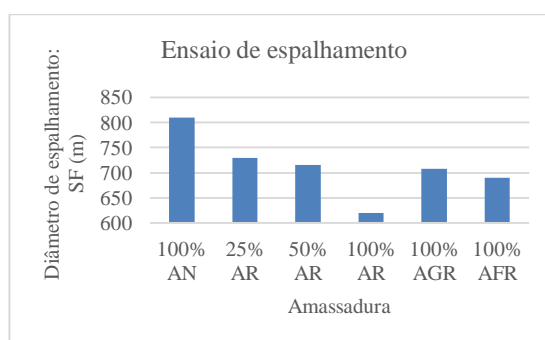


Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 65)

Através da observação conjunta das figuras, nas amassaduras com 100% NA, 25% AR,

50% AR e 100% AR, constata-se um aumento do tempo de espalhamento (**Figura 1**) e uma diminuição do diâmetro de espalhamento (**Figura 2**). Este facto é justificado pela maior absorção dos AR em relação aos NA, dado que, para maiores percentagens de substituição, maior quantidade de água de amassadura foi absorvida pelos agregados. Esta tendência é confirmada por Grdic et al. (2010) e Kebaïli et al. (2015).

É possível observar que, tanto em termos do tempo de espalhamento (t_{500}) como do diâmetro, os resultados obtidos por todas as misturas podem ser considerados satisfatórios. Em geral, é possível constatar uma boa distribuição do agregado grosso na pasta e a não ocorrência de exsudação nem de segregação. Pode-se ainda observar a presença de agregado grosso mesmo no limite de espalhamento.

De acordo com a classificação dada pela norma EN 206-9 (2010), todas as misturas se enquadram na classe VS2 ($VS \geq 2$ s) excepto a mistura com 100% AN, que apresenta menor tempo de espalhamento, pertencendo à classe VS1 ($VS \leq 2$ s).

Quanto ao diâmetro de espalhamento, verifica-se que as amassaduras com 25% AR, 50% AR, 100% AGR e 100% AFR pertencem à classe de espalhamento SF2 ($660 \text{ mm} \leq SF \leq 750 \text{ mm}$). A amassadura com 100% AN é a que apresenta maior espalhamento, pertencendo à classe de espalhamento SF3 ($760 \text{ mm} \leq SF \leq 850 \text{ mm}$). Por outro lado, a amassadura com 100% AR é a que apresenta menor espalhamento, pertencendo à classe de espalhamento SF1 ($550 \text{ mm} \leq SF \leq 650 \text{ mm}$).

3.2. Ensaio de escoamento no funil V

O ensaio de escoamento no funil V foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-9 (2010). Este ensaio permitiu avaliar a viscosidade e a capacidade de enchimento. Por conseguinte, o parâmetro a ser avaliado é o tempo que todo o betão leva a escoar pelo funil (T_v). Na **Figura 3**, são apresentados os resultados obtidos.

Através dos resultados obtidos, verifica-se que o tempo de escoamento aumenta com a percentagem de AR. Esta tendência é justificada pela maior absorção de água dos AR e também pela sua superfície mais rugosa em comparação com a dos NA (Tuyan et al., 2014).

É possível constatar que os valores obtidos no tempo de escoamento no funil V, para todas as misturas estudadas, se enquadram nos valores referidos na NP EN 206-9

(2010), variando, em geral, entre 9 e 20 segundos, ou seja, enquadram-se na classe VF2 ($9 \text{ s} \leq \text{VF} \leq 25 \text{ s}$). A amassadura com 100% NA é a que apresenta menor tempo de escoamento, sendo a única que pertence à classe de espalhamento VF1 ($\text{VF} < 9 \text{ s}$).

Da observação visual do ensaio, é possível verificar o não bloqueio de agregado grosso na passagem estreita do funil V. Não se observa a ocorrência do fenómeno de exsudação. Após a realização do ensaio, o betão continua a apresentar-se como uma massa uniformemente distribuída.

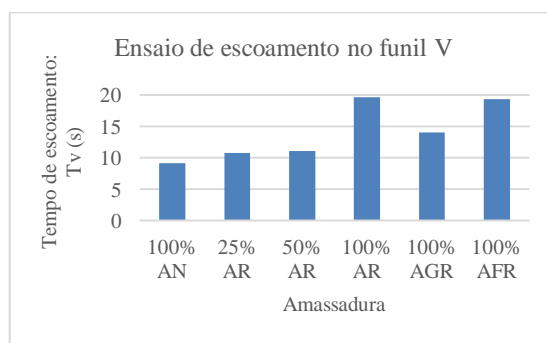


Figura 3 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 65)

3.3. Ensaio na caixa L

O ensaio na caixa L foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-10 (2010). Este ensaio permitiu avaliar a capacidade de passagem do BAC ao escoar através de espaços confinados, incluindo espaços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear. Por conseguinte, o parâmetro a ser avaliado é o índice de capacidade de passagem na caixa L (PL). Na **Figura 4**, são apresentados os resultados obtidos.

Quanto ao ensaio de escoamento na caixa L, verifica-se que o índice de capacidade de passagem diminui com a introdução de AR. Este facto deve-se à maior absorção de água dos AGR em relação aos NA. Esta tendência também foi verificada por Kebaïli et al. (2015).

É possível observar que os valores médios obtidos por todas as misturas analisadas estão próximos, não se observando, qualquer tipo de ocorrência de exsudação ou segregação. Para este ensaio, o valor de referência, para H2/H1, da NP EN 206-9 (2010) é superior a 80%. Por conseguinte, verifica-se que os resultados obtidos no presente estudo se enquadram na referida norma, variando entre 80% e 92%, pertencendo portanto à classe PL2.

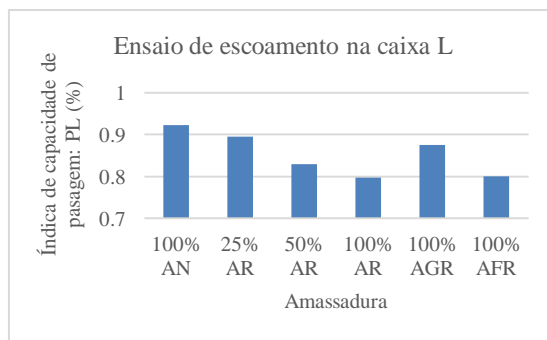


Figura 4 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 65)

3.4. Ensaio de resistência à segregação

O ensaio da resistência à segregação no peneiro foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-11 (2010). Este ensaio permitiu avaliar a resistência do BAC à segregação. Por conseguinte, o parâmetro a ser avaliado é a parcela segregada (SR), correspondente à proporção da amostra que passou através do peneiro, relativamente à quantidade vertida. Na **Figura 5**, são apresentados os resultados obtidos.

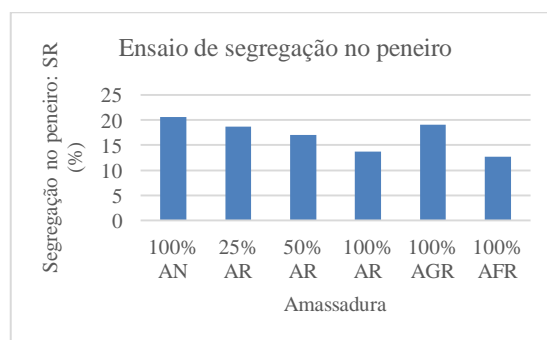


Figura 5 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 65)

Observando os resultados obtidos, verifica-se que o índice de segregação tende a diminuir com a introdução de AR. Tal deve-se à maior absorção de água dos AR em relação aos NA. Tendência semelhante é verificada no estudo de Grdic et al. (2010) sendo a justificação para esse facto idêntica.

Os resultados obtidos no ensaio de segregação encontram-se enquadrados pelos valores referidos na NP EN 206-9 (2010), isto é, sempre inferiores a 20%.

Verifica-se que as amassaduras com 100% AR e 100% AFR apresentam uma classe SR2 ($SR \leq 15\%$), a que corresponde uma menor tendência para a segregação. As restan-

tes misturas enquadram-se na classe SR1 ($SR \leq 20\%$), a que corresponde uma maior tendência para a ocorrência de fenómenos de segregação.

3.5. Ensaio de espalhamento no anel J

O ensaio de espalhamento no anel J foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-12 (2010). Este ensaio permitiu avaliar a capacidade de passagem do BAC através de espaços estreitos, incluindo os espaços entre os varões da armadura e outras obstruções, sem segregação ou bloqueio. Por conseguinte, os parâmetros a serem avaliados são o tempo que o BAC demora a atingir um círculo de 500 mm (T_{500}), o diâmetro de espalhamento (SF) e a capacidade de passagem no anel (PJ), que corresponde ao desnível por bloqueio. Na **Figura 6**, na **Figura 7** e na **Figura 8**, são apresentados os resultados obtidos para T_{500} , SF e PL, respectivamente.

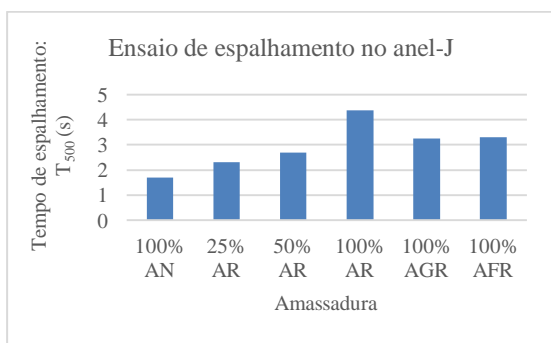


Figura 6 - Resultados do ensaio no anel J: tempo de espalhamento (PF 65)

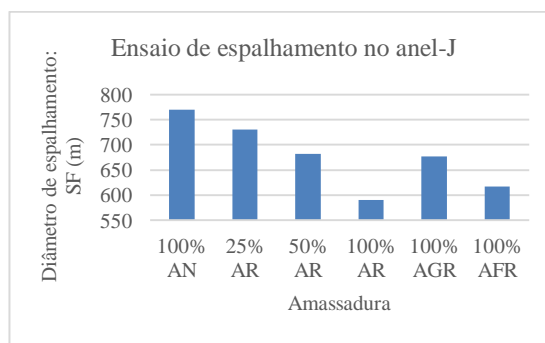


Figura 7 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 65)

Observando os resultados obtidos, com a introdução de AR nas amassaduras, verifica-se que o tempo de espalhamento aumenta (**Figura 6**), o espalhamento no anel J diminui (**Figura 7**) e a capacidade de passagem aumenta (**Figura 8**). Estas tendências são justificadas pela maior absorção de água dos AR em relação aos NA.

Os resultados do diâmetro de espalhamento no anel J (obtidos no ensaio de espalhamento no anel J) e os do diâmetro de espalhamento (obtidos no ensaio de espalhamento) estão fortemente correlacionados (coeficiente de relação de 0,88) com uma relação linear (**Figura 9**). Isto significa que os espalhamentos variam de forma semelhante com o conteúdo de AR, ou seja, a fluidez e a capacidade de passagem estão directamente interligadas. Safiuddin et al. (2011) verificaram tendência semelhante, obtendo 0,99 de

coeficiente de relação.

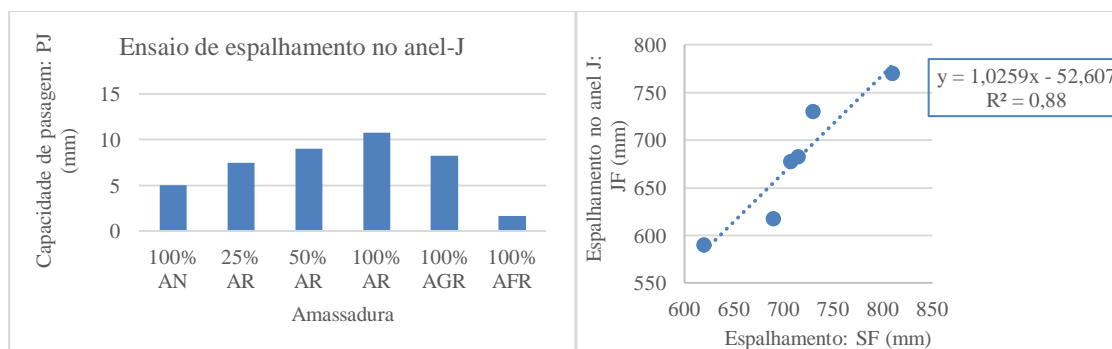


Figura 8 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 65)

Figura 9 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento em anel J

De acordo com a classificação da norma NP EN 206-9 (2010), as amassaduras com 100% NA, 25% AR e 50% AR pertencem à classe de espalhamento VJ1 ($VJ < 3$). As restantes amassaduras, 100% AR, 100% AGR e 100% AFR pertencem à classe de espalhamento VJ2 ($VJ \geq 3$).

Em relação ao diâmetro de espalhamento, verifica-se que as amassaduras com 100% NA e 25% AR pertencem à classe de espalhamento SF_J3. As amassaduras com 50% AR, 100% AGR e 100% AFR pertencem à classe SF_J2. Apenas a amassadura com 100% AR pertence à classe SF_J1.

Os valores de PJ encontram-se, em geral, para todas as misturas estudadas, na classe PJ2, com valores inferiores a 10 mm, a que corresponde uma boa capacidade de passagem

4. Ensaio ao betão no estado endurecido

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios em BAC no estado endurecido. Assim, são analisadas as propriedades em termos mecânicos e em termos de durabilidade.

4.1. Propriedades em termos mecânicos

Os ensaios de durabilidade ao betão permitem avaliar o seu comportamento físico. Neste subcapítulo, são analisadas as seguintes propriedades: massa volúmica, resistência mecânica (compressão e tracção), módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultra-sons, resistência à abrasão, deformação devido a retracção e **deformação devido à fluência**.

4.1.1. Massa volúmica

A determinação da massa volúmica do BAC foi determinada com base na norma NP EN 12390-7 (2000), aos 7, 28 e 91 dias de idade. Na **Tabela 1** e na **Figura 10**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 1 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)
100% NA	2308,5	4,9	0,0	2315,3	12,9	0,0	2319,4	14,1	0,0
25% AR	2285,8	9,1	-1,0	2289,0	14,7	-1,1	2289,7	11,4	-1,3
50% AR	2234,8	6,3	-3,2	2246,5	9,9	-3,0	2257,7	2,5	-2,7
100% AR	2196,0	2,5	-4,9	2208,0	8,8	-4,6	2212,3	11,3	-4,6
100% AGR	2256,1	3,6	-2,3	2258,3	7,5	-2,5	2261,5	5,6	-2,5
100% AFR	2223,9	14,5	-3,7	2238,0	7,7	-3,3	2245,7	6,4	-3,2

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a massa volúmica aumenta de forma pouco acentuada com a idade (aumento médio de 8% dos 28 dias aos 91 dias). Este facto é justificado pelo período de cura mais prolongado, o que introduz maior quantidade de água no provete, aumentando assim a sua massa.

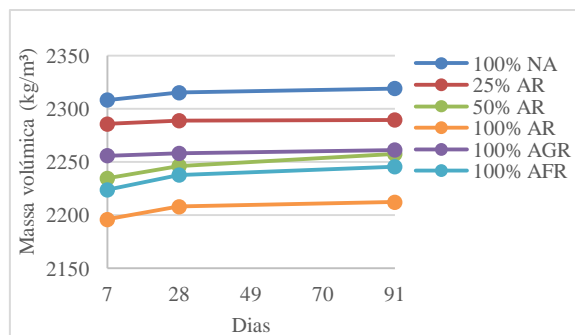


Figura 10 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Analisando a posição relativa das amassaduras apresentadas na **Figura 10**, verifica-se que a massa volúmica diminui com a introdução de AR no betão dada a menor massa volúmica dos AR relativamente aos NA. A maior perda de massa volúmica é verificada na amassadura com 100% AR (perda de 5% em relação ao BAC de referência). Tendência semelhante foi verificada no estudo de Pereira-de-Oliveira et al. (2014), em que os autores obtiveram uma perda de 3% de massa volúmica (betão com 100% de AR) em relação ao BAC de referência.

4.1.2. Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão em cubos foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 (2011), aos 7, 28 e 91 dias. Na **Tabela 2** e na **Figura 11**, são apresentados os resultados obtidos.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade (como expectável). Todas as composições desenvolvem resistências de forma rápida até aos 7 dias de idade, atingindo em média, cerca de 89% da resistência em relação aos 91 dias de idade. Tal é justificado pela presença de fíler calcário (Grdic et al., 2010) e pela presença de sílica de fumo (STA, 2005).

Analisando a **Figura 11**, verifica-se que a substituição de NA por AR provoca diminuições de resistência, em relação ao BAC de referência (100% NA) de 1-9%. As diferenças de resistência são semelhantes aos 7, 28 e 91 dias.

Esta situação é explicada pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida e que é responsável por aumentar a porosidade e fissuração dos agregados, tornando mais fraca as ligações na zona de transição entre o agregado reciclado e a nova

pastas (Tuyan et al., 2014).

Tabela 2 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Resistência à compressão em cubos (MPa)	D.P. (MPa)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)	Resistência à compressão em cubos (MPa)	D.P. (MPa)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)	Resistência à compressão em cubos (MPa)	D.P. (MPa)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)
100% NA	78,4	0,3	0,0	81,9	2,5	0,0	87,5	0,5	0,0
25% AR	76,8	2,8	-2,0	80,7	0,4	-1,4	86,7	1,3	-0,9
50% AR	74,5	0,6	-5,0	79,5	2,5	-2,9	84,3	2,1	-3,7
100% AR	70,8	1,4	-9,7	75,0	0,5	-8,4	79,9	1,9	-8,7
100% AGR	75,9	1,2	-3,1	80,3	5,9	-1,9	84,7	1,0	-3,2
100% AFR	72,6	0,2	-7,4	78,0	2,2	-4,8	83,6	3,1	-4,5

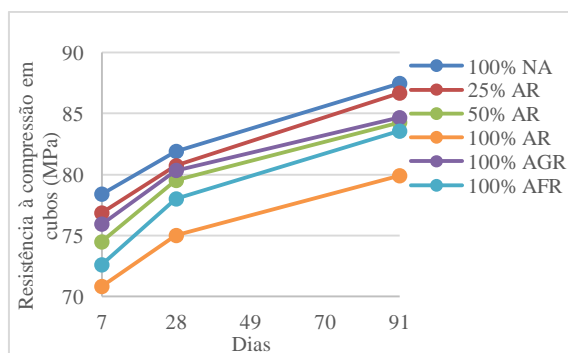


Figura 11 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

As mesmas tendências foram verificadas por Grdic et al. (2010), Panda e Bal (2013), Pereira-de-Oliveira et al. (2014) e Modani e Mohitkar (2014). Grdic et al. (2010) e Pereira-de-Oliveira et al. (2014) obtiveram redução de 8 e 5%, respectivamente, comparando o BAC apenas com NA e o BAC com 100% de AR (aos 28 dias).

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) concluíram que os AR não influenciam significativamente o comportamento mecânico dado o elevado volume de pasta que envolvem os mesmos.

Analisando as roturas obtidas nos provetes cúbicos, devido à compressão uniaxial, verifica-se que apresentam roturas satisfatórias (**Figura 12** à **Figura 14**), de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). O tipo de rotura obtido (rotura explosiva) é normal nos BED, de acordo com Parande (2013). Observando as roturas, verifica-se que estas ocorrem preferencialmente pelo agregado.

Os resultados da resistência à compressão obtidos mostram que o BAC de referência em que não foram usados AR apresenta maior resistência à compressão, atingindo 82 e 87 MPa aos 28 e 91 dias, respectivamente. O BAC com 100% AR é o que apresenta menor resistên-

cia mecânica: 75 e 80 MPa aos 28 e 91 dias, respectivamente (redução de 8% da sua resistência em relação ao BAC de referência).



Figura 12 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 7 dias de idade



Figura 13 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade



Figura 14 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 91 dias de idade

Assim, de acordo com os resultados obtidos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, os critérios que definem os betões de elevado desempenho foram conseguidos (de acordo com ACI (1993), que define BED como tendo resistência à compressão superior a 41 MPa).

Através da análise da **Figura 15**, é possível observar a existência de uma estreita relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica (relação linear com $R^2 = 0,96$, $R^2 = 0,85$ e $R^2 = 0,94$)

4.1.1. Resistência à compressão em cilindros

O ensaio de resistência à compressão em cilindros foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 (2011), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 3** e na **Figura 16**, são apresentados os resultados obtidos.

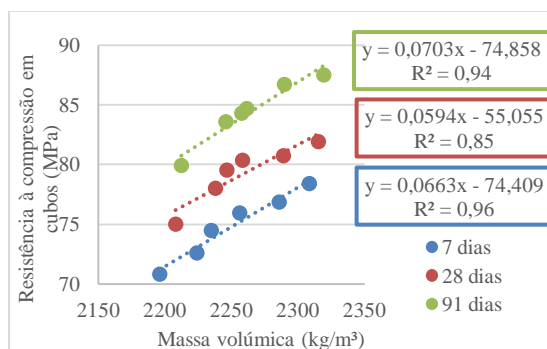


Figura 15 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Tabela 3 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistência à compressão em cilindros	D.P	$\Delta_{100\% NA}$	Resistência à compressão em cilindros	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% NA	78,9	1,1	0,0	85,9	1,4	0,0
25% AR	75,2	1,1	-4,7	82,3	2,8	-4,2
50% AR	69,9	2,0	-11,4	79,3	3,0	-7,7
100% AR	61,0	1,8	-22,6	65,8	1,0	-23,4
100% AGR	71,1	2,1	-9,9	80,7	1,1	-6,1
100% AFR	65,9	1,2	-16,5	73,3	1,3	-14,7

Através da análise da **Figura 16**, observa-se uma redução da resistência à compressão com a substituição de AR por NA (tal como na resistência à compressão em cubos, sendo a justificação para esse facto idêntica). As variações ocorridas situam-se entre 4% e 23%. Como seria expectável, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade.

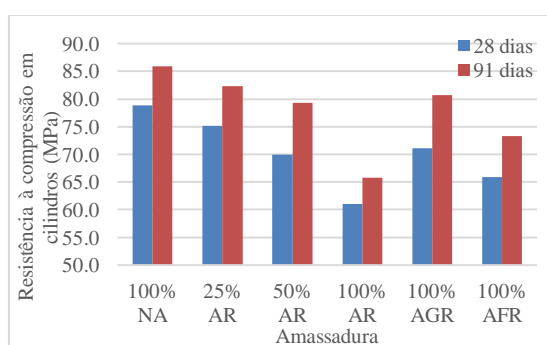


Figura 16 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

Analisando as roturas obtidas nos provetes cilíndricos, devido à compressão uniaxial, verifica-se que apresentam roturas satisfatórias (**Figura 17**), de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). O tipo de rotura obtido foi explosivo (tal como ocorreu nos prove-

tes cúbicos). De acordo com Parande (2013), este tipo de rotura é normal nos BED.



Figura 17 - Rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade

Determinada a resistência à compressão em provetes cúbicos e cilíndricos, é possível determinar a relação entre os valores obtidos. Na **Tabela 4**, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise da **Tabela 4**, verifica-se que aos 28 e 91 dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 0.89 e 0.92 da tensão de rotura dos cubos, respectivamente. Ou seja, o factor de conversão da resistência à compressão de cubos com 150 mm de aresta para cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura é de aproximadamente 0.89 e 0.92 aos 28 e 91 dias. É possível observar a correlação elevada nos valores obtidos: $R^2=0,94$ e $R^2=0,93$ (**Figura 18**). O referido factor de conversão está próximo dos valores apresentados no quadro 7 da NP EN 206-1 (2007) que variam entre 0,80 (classe C8/10) e 0,87 (classe C100/115).

Na **Tabela 5**, são apresentados os valores de resistência característica obtida e especificada nos cubos e nos cilindros. Os valores da resistência característica à compressão do betão (f_{ck}) foram obtidos através da seguinte fórmula, presente no Quadro 3.1 do EC2 (2008):

$$f_{ck} = f_{cm} - 8$$

Tabela 4 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistências médias obtidas (MPa)		Relação da resistência cilindro / cubo	Resistências médias obtidas (MPa)		Relação da resistência cilindro / cubo
	Cubo	Cilindro		Cubo	Cilindro	
100% NA	81,9	78,9	0,96	87,5	85,9	0,98
25% AR	80,7	75,2	0,93	86,7	82,3	0,95
50% AR	79,5	69,9	0,88	84,3	79,3	0,94
100% AR	75,0	61,0	0,81	79,9	65,8	0,82
100% AGR	80,3	71,1	0,89	84,7	80,7	0,95
100% AFR	78,0	65,9	0,84	83,6	73,3	0,88

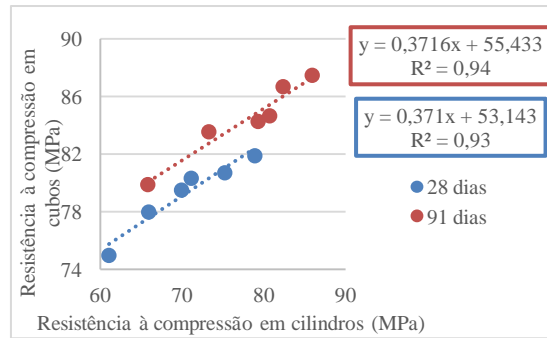


Figura 18 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

Desta forma, pretende-se atribuir a classe de acordo com os critérios de controlo de qualidade e segurança especificados na NP EN 206-1 (2005).

Analisando a **Tabela 5**, verifica-se que apenas a amassadura com 100% AR pertence à classe de resistência C50/60, pertencendo as restantes à classe acima desta: C65/67. De acordo com a norma NP EN 206-1 (2005), todos os betões produzidos são classificados como de elevado desempenho (BED). A referida norma considera que um betão, para ser classificado como BED, deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60.

Tabela 5 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206-1 (2005)

Amassadura	Valores obtidos experimentalmente				Valores da Norma NP EN 206-1		
	Resistência média à compressão do betão em cilindros	Resistência média à compressão do betão em cubos	Resistência característica à compressão do betão determinada em cilindros	Resistência característica à compressão do betão em cubos	Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima à compressão do betão determinada em cilindros	Resistência característica mínima à compressão do betão em cubos
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cube}$	$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$		$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$
	(MPa)				(MPa)		
100% NA	78,9	81,9	70,9	73,9	C55/67	55	67
25% AR	75,2	80,7	67,2	72,7	C55/67	55	67
50% AR	69,9	79,5	61,9	71,5	C55/67	55	67
100% AR	61,0	75,0	53,0	67,0	C50/60	50	60
100% AGR	71,1	80,3	63,1	72,3	C55/67	55	67
100% AFR	65,9	78,0	57,9	70,0	C55/67	55	67

Os resultados da **Tabela 5** mostram que, em todos os tipos de betão, a tensão de rotura característica nos cubos e cilindros é igual ou superior à classe de resistência esperada, significando que todos os betões produzidos estão dentro dos critérios de controlo e qualidade estabelecidos na NP EN 206-1 (2005).

4.1.2. Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi realizado segundo a norma EN 12390-6 (2011), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 6** e na **Figura 19**, são apresentados os resultados obtidos.

Através da observação da **Figura 19**, verifica-se que a substituição de NA por AR é responsável por uma diminuição na resistência à tracção por compressão diametral. Sendo que a resistência mais baixa corresponde à amassadura com 100% AR: 3,78MPa e 4.33MPa aos 28 e 91 dias, respectivamente. A perda de resistência ocorrida nos betões com AR variam de 7 a 32%. Tal é explicado pela argamassa aderida aos agregados naturais originais (Panda e Bal, 2013). Comparando o BAC com NA e o BAC com 100% de AR (aos 28 dias), Kou e Poon (2009) e Modani e Mohitkar (2014) obtiveram perdas de resistência de 36% e 37%, respectivamente.

Tabela 6 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistência à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Resistência à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% NA	5,6	0,5	0,0	6,2	0,1	0,0
25% AR	5,0	0,4	-10,1	5,8	0,3	-6,7
50% AR	4,3	0,5	-23,4	5,3	0,4	-15,1
100% AR	3,8	0,7	-32,0	4,3	0,1	-30,5
100% AGR	4,5	0,1	-19,2	5,5	0,1	-11,0
100% AFR	4,0	0,4	-28,4	5,0	0,4	-20,2

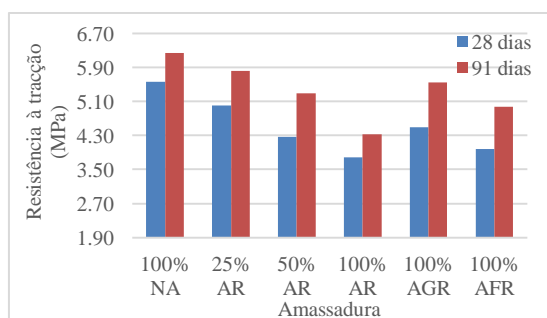


Figura 19 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)

A **Figura 19** mostra que a resistência aumenta com a idade (como previsto), sendo que aos 28 dias os betões atingem, em média, 78% da resistência (em relação aos 91 dias). Panda e Bal (2013), no seu estudo, obtiveram resultados semelhantes, isto é, aos 28 dias, a resistência atingiu 85% em relação aos 90 dias.

A realização deste ensaio permite observar a superfície de rotura dos provetes. Assim, são apresentadas, na **Figura 20** e na **Figura 21**, as secções típicas dos BAC produzidos (aos 28 e 91 dias). É possível observar uma distribuição uniforme do agregado grosso na mistura ao longo de todo o provete sem aglomeração de partículas nem ocorrência de qualquer fenómeno de segregação ou exsudação. Observa-se ainda que a superfície de rotura atravessa sempre o agregado natural. Ao longo da superfície de rotura, é possível observar pequenas bolhas de ar, no entanto, estas não se encontram interligadas entre si. As bolhas de ar correspondem ao ar aprisionado no BAC, uma vez que este não sofreu processo de vibração.

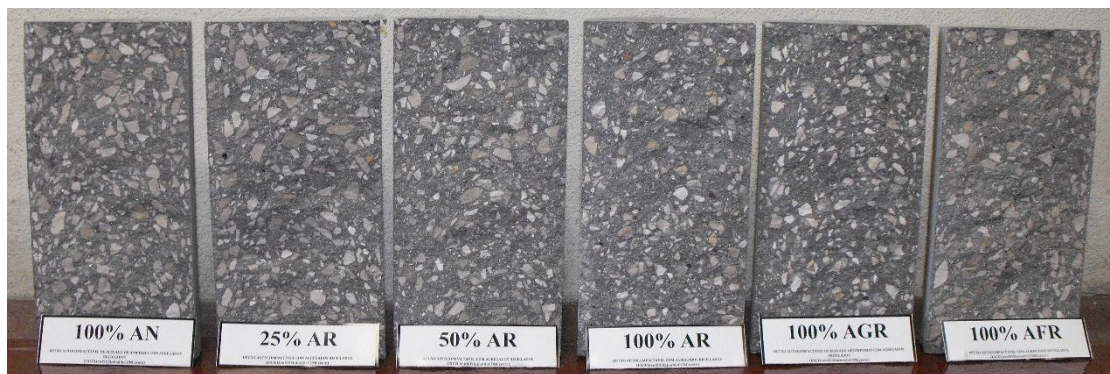


Figura 20 - Superfície de rotura apresentada pelos diferentes betões aos 28 dias de idade

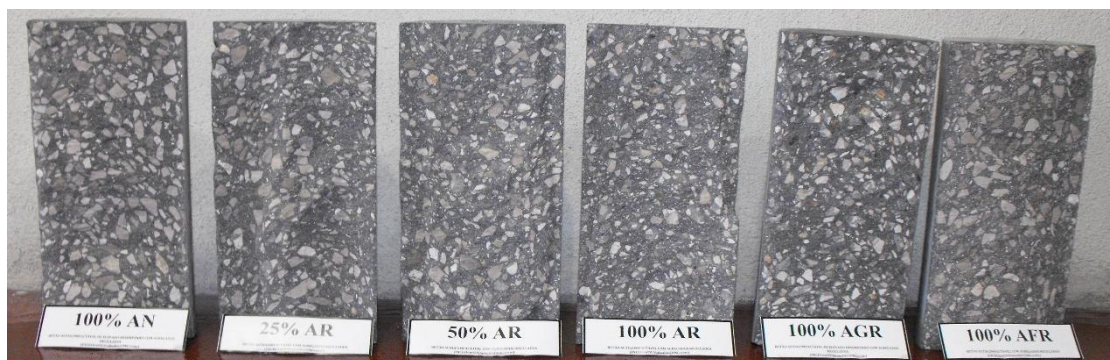


Figura 21 - Superfície de rotura apresentada pelos diferentes betões aos 91 dias de idade

O EC2 (2008) apresenta uma fórmula que relaciona a resistência à tracção com a resistência à compressão obtida em cilindros. Assim, para o cálculo da resistência à tracção (f_{ctm}) a partir dos valores da resistência à compressão obtidos experimentalmente em cilindros (f_{cm}), foi usada a seguinte fórmula presente no Quadro 3.1 do EC2:

$$f_{ctm} = 2,12 \ln[1 + (f_{cm}/10)]$$

Na **Tabela 7**, são comparados os resultados de resistência à tracção obtidos experimentalmente com os valores obtidos através da relação definida no EC2 (2008).

Através da análise da **Tabela 7**, verifica-se a proximidade dos valores de resistência à tracção obtidos experimentalmente e os valores obtidos através da expressão proposta no EC2. Constata-se também que parte dos betões apresentam valores resistência à tracção ligeiramente superiores aos definidos no EC2 (2008).

Tabela 7 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção, de acordo com o EC2 (2008), aos 28 e 91 dias

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistência média obtida experimentalmente em cilindros	Resistência à tracção por compressão diametral		Resistência média obtida experimentalmente em cilindros	Resistência à tracção por compressão diametral	
		Valor calculado através da expressão do Eurocódigo 2	Valor obtido experimentalmente		Valor calculado através da expressão do Eurocódigo 2	Valor obtido experimentalmente
	(MPa)			(MPa)		
100% NA	78,9	4,6	5,6	85,9	4,8	6,2
25% AR	75,2	4,5	5,0	82,3	4,7	5,8
50% AR	69,9	4,4	4,3	79,3	4,6	5,3
100% AR	61,0	4,2	3,8	65,8	4,3	4,3
100% AGR	71,1	4,4	4,5	80,7	4,7	5,5
100% AFR	65,9	4,3	4,0	73,3	4,5	5,0

Na **Figura 22**, é apresentada a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a resistência à compressão diametral. Verifica-se existir uma forte ligação entre estas duas propriedades, dados os elevados valores de coeficiente de variação ($R^2 = 0.94$ e $R^2 = 0.97$).

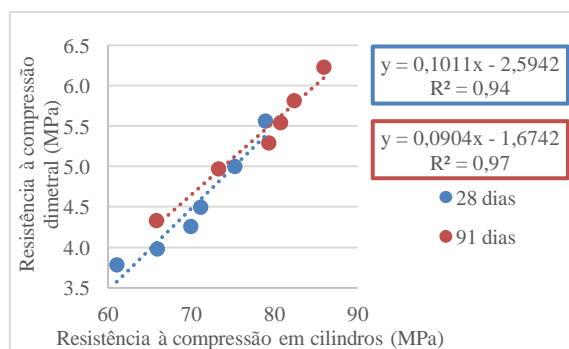


Figura 22 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

4.1.3. Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi realizado segundo a especificação LNEC E-397 (1993), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 8** e na **Figura 23**, são apresentados os resultados obtidos.

Analisando os resultados, constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o

aumento da incorporação de agregados reciclados, registando-se variações máximas de 26% e 20% aos 28 e 91 dias, respectivamente (para a amassadura com 100% AR). Pereira-de-Oliveira et al. (2014) obtiveram uma redução de 5% para 100% AR, aos 28 dias.

Tabela 8 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% NA	41,7	2,2	0,0	42,8	1,4	0,0
25% AR	39,6	1,5	-4,9	41,2	1,9	-3,8
50% AR	36,6	0,7	-12,3	38,3	0,2	-10,5
100% AR	30,8	6,3	-26,1	34,2	0,2	-20,1
100% AGR	37,0	0,6	-11,2	39,5	0,8	-7,8
100% AFR	32,8	0,1	-21,4	36,8	1,0	-13,9

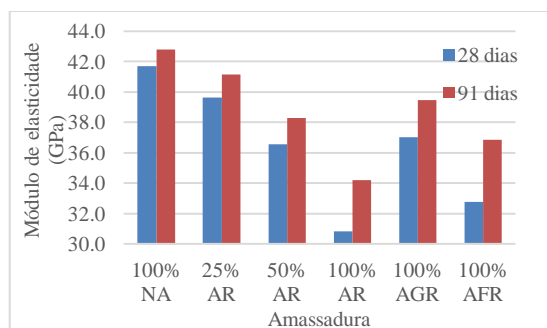


Figura 23 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65)

A redução do módulo de elasticidade é explicada pela menor rigidez dos AR (em comparação com os NA), dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e também a menor deformabilidade da referida pasta de cimento (Pereira-de-Oliveira et al., 2014).

Comparando a amassadura com 100% NA com 100% AGR, verifica-se uma redução de 11% e 8% aos 28 e 91 dias, respectivamente. Uygunoğlu et al. (2014) obtiveram uma redução de cerca de 14% aos 28 dias. Os autores justificam esse facto pela forma mais alongada dos agregados (em comparação com os AGN) e pela ligação mais fraca entre a matriz de cimento e os AGR.

Para o cálculo do módulo de elasticidade (E_{cm}), a partir dos valores da resistência à compressão obtidos experimentalmente em cilindros (f_{cm}), foi usada a fórmula proposta no Quadro 3.1 do EC2 (2008):

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3}$$

Na **Tabela 9**, são comparados os resultados do módulo de elasticidade obtidos experi-

mentalmente com os resultados obtidos através da relação definida no EC2 (2008).

Tabela 9 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, de acordo com o EC2 (2008), aos 28 e 91 dias

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistência média obtida experimentalmente em cilindros	Módulo de elasticidade		Resistência média obtida experimentalmente em cilindros	Módulo de elasticidade	
		Valor calculado através da expressão do EC2	Valor obtido experimentalmente		Valor calculado através da expressão do EC2	Valor obtido experimentalmente
	(MPa)	(GPa)		(MPa)	(GPa)	
100% NA	78,9	40,9	41,7	85,9	41,9	42,8
25% AR	75,2	40,3	39,6	82,3	41,4	41,2
50% AR	69,9	39,4	36,6	79,3	40,9	38,3
100% AR	61,0	37,9	30,8	65,8	38,7	34,2
100% AGR	71,1	39,6	37,0	80,7	41,2	39,5
100% AFR	65,9	38,7	32,8	73,3	40,0	36,8

Observando a **Tabela 9**, constata-se a proximidade dos valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através da relação definida no EC2 (2008). Constata-se ainda que a maioria dos betões apresenta valores de módulo de elasticidade inferiores aos definidos no EC2 (2008).

Na **Figura 24** e na **Figura 25**, são mostradas as correlações obtidas entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. Foram obtidos valores de R^2 de 0,99 e 0,95 (para a resistência à compressão em cilindros) e 0,91 e 0,96 (para a resistência à compressão em cubos).

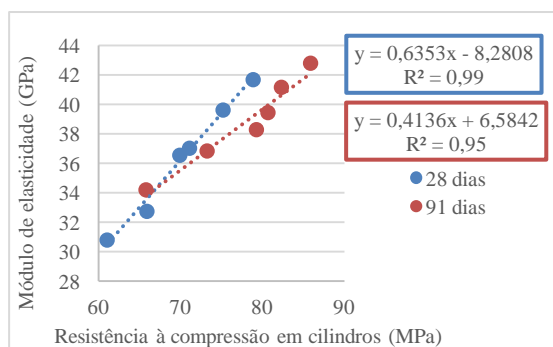


Figura 24 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

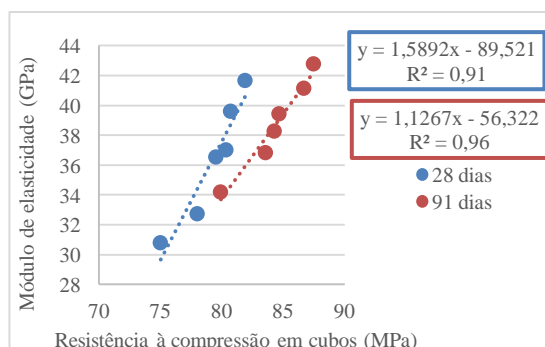


Figura 25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cubos aos 28 e 91 dias (PF 65)

4.1.4. Velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio para a determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no BAC foi realizado de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007), aos 7, 28 e 91 dias de idade.

Na **Tabela 10** e na **Figura 26**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 10 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	V _{usm,c}	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	V _{usm,c}	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	V _{usm,c}	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(m/s)	(%)	(%)	(m/s)	(%)	(%)	(m/s)	(%)	(%)
100% NA	4907,6	53,0	0,0	5030,7	4,0	0,0	5123,8	58,6	0,0
25% AR	4843,0	74,7	-1,3	4961,9	69,6	-1,4	5037,6	46,2	-1,7
50% AR	4623,3	19,7	-5,8	4819,8	29,9	-4,2	4937,8	12,5	-3,6
100% AR	4474,7	18,0	-8,4	4624,9	17,2	-8,1	4702,3	30,6	-8,2
100% AGR	4779,3	59,5	-2,6	4932,4	11,3	-2,0	4972,4	26,2	-3,0
100% AFR	4587,2	16,2	-6,5	4755,2	5,8	-5,5	4851,5	64,9	-5,3

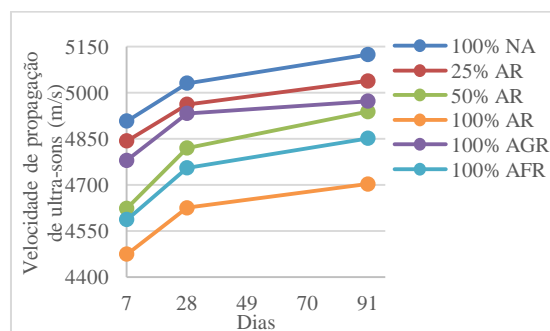


Figura 26 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Através da observação dos resultados obtidos, constata-se uma diminuição da velocidade de propagação de propagação de ultra-sons com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados. Assim, o BAC de referência (100% NA) apresenta maior velocidade de propagação atingindo 5124 m/s aos 91 dias de idade. Por outro lado, o BAC com 100% AR apresenta menor velocidade de propagação, com 8% de perda (em relação ao BAC com 100% NA).

A redução da velocidade de propagação com a introdução de AR no betão é explicada pela natureza dos agregados em causa, isto é, maior porosidade em relação aos NA (devido à argamassa antiga aderida aos mesmos).

Tuyan et al. (2014) obtiveram resultados com as mesmas tendências, com 4% de perda na velocidade de propagação, para as amassaduras com 60% de substituição de NA por AR.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976), todas os betões são classificados com “bons” uma vez que os valores mais baixos da velocidade de propagação de ultra-sons estão incluídos na gama 3660-4580 m/s. Por conseguinte, nenhum dos betões em estudo contém espaços vazios ou fissuras que possam afectar a integridade estrutural.

Na **Figura 27**, é apresentada a relação linear entre a velocidade de propagação de ultra-

sons e a massa volúmica ($R^2 = 0,97$; $R^2 = 0,91$; $R^2 = 0,96$). Assim, quanto mais denso for o meio (maior massa volúmica), mais rápido as ondas se propagam (maior velocidade de propagação de ultra-sons).

Na **Figura 28**, é apresentada a relação linear entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade ($R^2 = 0,94$; $R^2 = 0,99$).

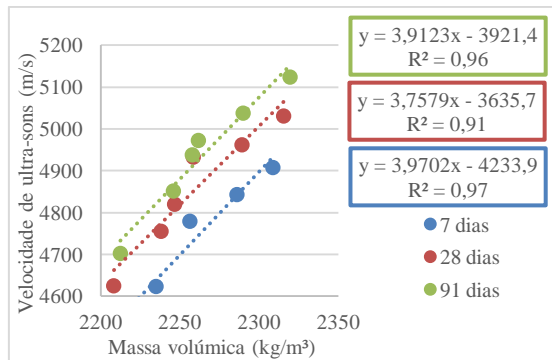


Figura 27 - Relação entre a massa volúmica e a velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

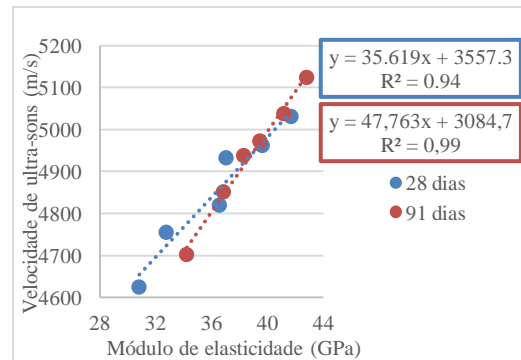


Figura 28 - Relação entre o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 65)

As referidas tendências são confirmadas por Bogas (2011) que afirma que as principais propriedades físicas que influenciam a velocidade de propagação de ultra-sons são a massa volúmica e o módulo de elasticidade.

4.1.5. Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado segundo a norma DIN 52108 (2010), aos 91 dias. Na **Tabela 11** e na **Figura 29**, são apresentados os resultados obtidos.

Observando a **Figura 29**, é visível a tendência para a maior sensibilidade ao desgaste, à medida que a taxa de substituição aumenta, o que está de acordo com as tendências registadas nos outros parâmetros mecânicos estudados (resistência mecânica e módulo de elasticidade). A maior perda de espessura ocorre na amassadura com 100% AR com redução de 39%. No caso de betão convencional com 100% AR, Barbudo et al. (2013) e Lotfi et al. (2015) obtiveram perda de espessura de 17% e 40%, respectivamente. Este facto é explicado pela natureza mais porosa dos AR e devido à argamassa antiga que se encontra aderida aos mesmos.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 65)

Amassadura	Redução de espessura	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(mm)		(%)
100% NA	3,0	0,1	0,0
25% AR	3,1	0,2	4,5
50% AR	3,3	0,1	12,8
100% AR	4,1	0,1	38,6
100% AGR	3,3	0,1	10,2
100% AFR	4,0	0,3	36,2

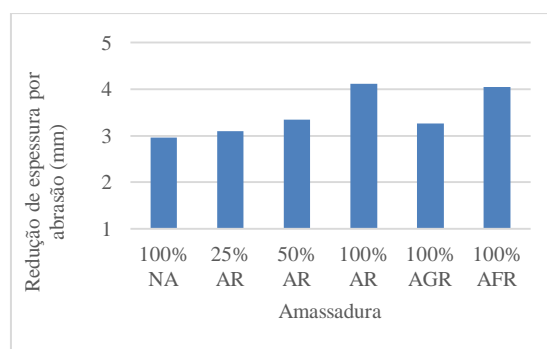


Figura 29 - Resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 65)

Comparando a amassadura de referência (100% NA) e a amassadura com 100% AFR, verifica-se que ocorre uma redução de espessura de 36%. Pereira et al. (2012) obtiveram reduções de espessura da mesma ordem de grandeza (para betão convencional): 21, 37 e 50% para betão sem superplastificante, com superplastificante convencional e com superplastificante de elevado desempenho, respectivamente. Esta perda de resistência é explicada pelo aumento de relação a/c efectiva, observados nos betões com AFR, bem como a maior porosidade destes agregados.

4.1.6. Deformação por retracção

Para a realização do ensaio de determinação da deformação por retracção, foi seguida a especificação LNEC 398 (1993), durante 91 dias. Na **Figura 30**, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise da **Figura 30**, verifica-se para todos os betões que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Observa-se um rápido crescimento durante os primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. A utilização de regressões logarítmicas permitiu obter coeficientes de correlação (R^2) bastante elevados (entre 0,97 e 0,99). O fenómeno de retracção desenvolve-se essencialmente nas primeiras idades, passadas as

quais os valores de deformação tendem a estagnar. Cartuxo (2013), também verificou que a deformação por retracção aumenta com o tempo seguindo uma curva logarítmica, tendo obtido coeficientes de correlação maiores que 0,95.

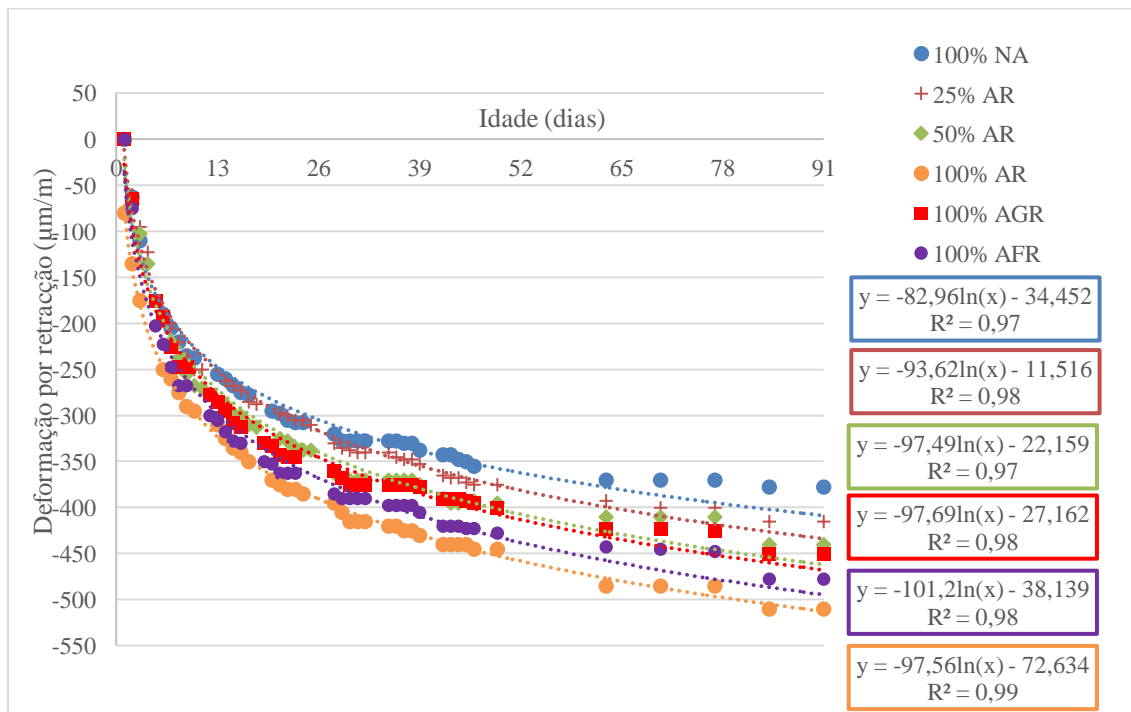


Figura 30 - Resultados do ensaio de retracção - deformação devido a retracção ao longo de 91 dias (PF 65)

Constata-se que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão leva a uma diminuição no desempenho dos betões. Assim, a amassadura com 100% AR é a que apresenta maior deformação por retracção, apresentando aumentos de deformação, em relação ao BAC de referência de 35% aos 91 dias.

Kou e Poon (2009) registaram aumentos da retracção de 166% ($a/c = 0.53$) e 103% ($a/c = 0.44$) para 100% de substituição de AR, aos 91 dias. Os autores justificaram este facto pela maior porosidade dos AR e conseqüente menor massa volúmica (devida à pasta endurecida aderida aos AFR) que diminuem a sua rigidez e a capacidade de restringir a deformação.

Na **Tabela 12**, é apresentada as deformações por retracção aos 7, 28 e 91 dias. Assim, é possível analisar o comportamento do BAC à retracção em idades jovens e em idades mais adultas. Os resultados mostram comportamentos distintos, ao longo do tempo.

Observando a **Tabela 12**, verifica-se que a deformação por retracção tende a aumentar com a idade (comparando as amassaduras com AR com a amassadura de referência). Por

exemplo, na amassadura 50% AR constata-se aumentos de deformação, de 7, 13 e 15%, aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Este fenómeno é explicado pela cura interna desencadeado pelos agregados reciclados que permite a compensação da água de evaporação através da água existente nos AR. Assim, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são reduzidas (Evangelista, 2014).

Tabela 12 - Deformações por retracção aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias		28 dias		91 dias	
	Retracção	$\Delta_{100\% \text{ NA}}$	Retracção	$\Delta_{100\% \text{ NA}}$	Retracção	$\Delta_{100\% \text{ NA}}$
	($\mu\text{m/m}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	(%)	($\mu\text{m/m}$)	(%)
100% NA	-205,0	0,0	-320,0	0,0	-377,5	0,0
25% AR	-205,0	0,0	-330,0	3,1	-415,0	9,9
50% AR	-220,0	7,3	-362,5	13,3	-440,0	16,6
100% AR	-260,0	26,8	-395,0	23,4	-510,0	35,1
100% AGR	-225,0	9,8	-360,0	12,5	-450,0	19,2
100% AFR	-247,5	20,7	-385,0	20,3	-477,5	26,5

Para o cálculo da deformação por retracção (ε_{cs}) a partir dos valores da resistência à compressão obtidos experimentalmente em cilindros (f_{cm}), foi usada a fórmula proposta no EC2 (2008):

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca},$$

em que:

- ε_{cd} corresponde à extensão devido à retracção por secagem;
- ε_{ca} corresponde à extensão devido à retracção autogénea.

A extensão de retracção por secagem calculou-se através da seguinte expressão do EC2:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}} k_h 0,85 \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \right] 10^{-6} \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \right] 1,55$$

A extensão de retracção autogénea calculou-se através da seguinte expressão do EC2:

$$\varepsilon_{ca}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6}$$

em que:

- t_s corresponde á idade no início da medição (dias);
- t corresponde à idade na data considerada (dias);
- α_{ds1} corresponde a um coeficiente que depende do tipo de cimento (neste caso, usou-se o valor de 6 para cimento da classe R);

- α_{ds2} corresponde a um coeficiente que depende de tipo de cimento (neste caso, usou-se o valor de 0,11 para cimento da classe R);

- f_{cmo} corresponde a 10 MPa.

Na **Tabela 13** e na **Figura 31**, são comparados os resultados da deformação por retracção obtidos experimentalmente com os obtidos através da relação definida no EC2 (2008).

Tabela 13 - Deformação por retracção obtidos experimentalmente e obtidos através do modelo de previsão do EC2, em função da resistência mecânica, aos 7, 28 e 91 dias.

Amassadura	7 dias		28 dias		91 dias	
	Retracção		Retracção		Retracção	
	Valor calculado através da expressão do Eurocódigo 2	Valor obtido experimentalmente	Valor calculado através da expressão do Eurocódigo 2	Valor obtido experimentalmente	Valor calculado através da expressão do Eurocódigo 2	Valor obtido experimentalmente
	$(\mu\text{m/m})$		$(\mu\text{m/m})$		$(\mu\text{m/m})$	
100% NA	-142,5	-205,0	-316,5	-320,0	-460,2	-377,5
25% AR	-142,0	-205,0	-319,4	-330,0	-466,0	-415,0
50% AR	-141,5	-220,0	-324,3	-362,5	-475,4	-440,0
100% AR	-141,5	-260,0	-334,4	-395,0	-493,9	-510,0
100% AGR	-141,6	-225,0	-323,2	-360,0	-473,2	-450,0
100% AFR	-141,4	-247,5	-328,6	-385,0	-483,3	-477,5

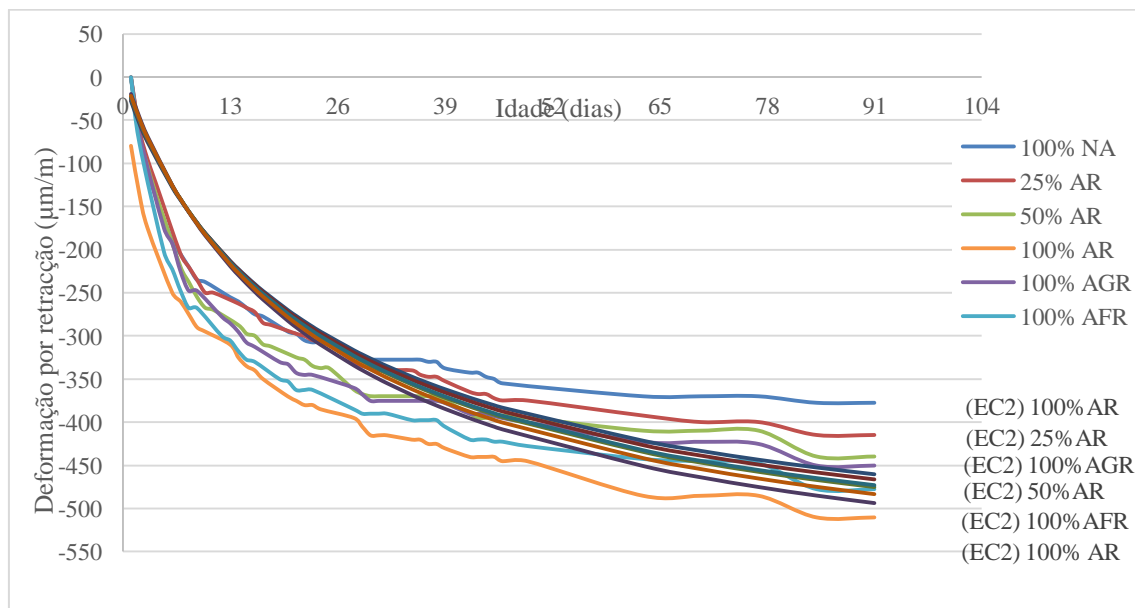


Figura 31 - Deformação por retracção obtidos experimentalmente e obtidos através do modelo de previsão do EC2, em função da resistência mecânica, durante 91 dias.

Analisando a **Figura 31**, verifica-se que o modelo de previsão proposto pelo EC2 apresenta deformações por retracção inferiores às deformações obtidas experimentalmente (por exemplo, aos 7 dias, a diferença entre a deformação obtida experimentalmente e a deformação prevista no EC2 é em média 85 $\mu\text{m/m}$). Pelo contrário, em idades mais avançadas (91

dias), em geral, o modelo de previsão do EC2 tende a aproximar-se dos resultados obtidos experimentalmente (por exemplo, aos 91 dias, a diferença entre a deformação obtida experimentalmente e a deformação prevista no EC2 é em média 30 $\mu\text{m/m}$). Verifica-se ainda, para idades mais avançadas, que o modelo de previsão proposto pelo EC2 tende a subestimar a extensão por retracção (excepção feita para a mistura com 100% AR).

Assim, verifica-se que o modelo de previsão proposto pelo EC2 não consegue prever a deformação por retracção nas primeiras idades, no entanto, a longo prazo, as deformações tendem a ser semelhantes. Este facto foi também verificado por Silva (2013).

Os resultados de deformação por retracção estão de acordo com os resultados do ensaio do módulo de elasticidade. As amassaduras com AR apresentam menor módulo de elasticidade comparativamente com a amassadura de referência (apenas NA). A menor rigidez dos AR, em comparação com os AN, faz diminuir a rigidez global do betão e, deste modo, aumentar a deformação por retracção.

Na **Figura 32**, é apresentada a correlação entre o módulo de elasticidade e a retracção ($R^2 = 0.85$).

Na **Figura 33**, apresenta-se a correlação obtida entre a deformação por retracção e a resistência à compressão aos 91 dias. Os resultados permitem concluir a existência de uma tendência linear de diminuição da retracção com o aumento da resistência à compressão ($R^2 = 0.94$).

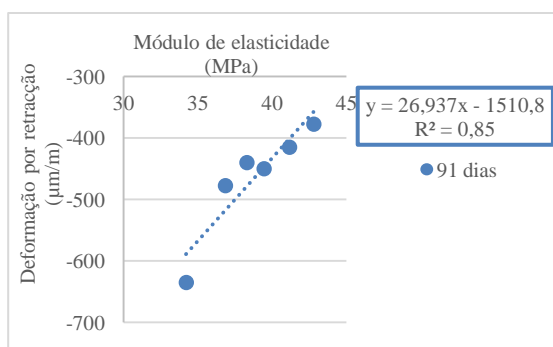


Figura 32 - Relação entre a deformação por retracção e o módulo de elasticidade aos 91 dias (PF 65)

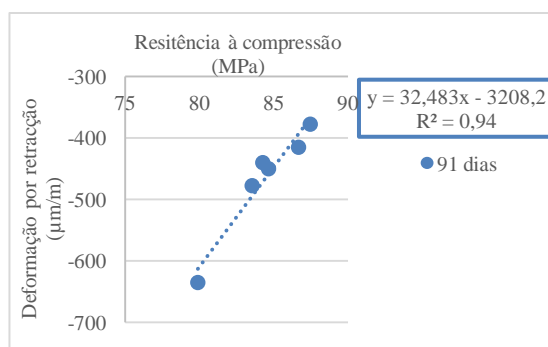


Figura 33 - Relação entre a deformação por retracção e a resistência à compressão aos 91 dias (PF 65)

4.2. Propriedades em termos de durabilidade

Os ensaios de durabilidade ao betão permitem avaliar o seu comportamento do betão

face aos agentes externos (água, oxigénio, dióxido de carbono e cloretos). Neste subcapítulo são analisados as seguintes propriedades: absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos, resistividade eléctrica e resistência à penetração de dióxido de carbono.

Os ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao oxigénio permitem avaliar mecanismos de transporte no interior do betão. Os ensaios de resistência à penetração de cloretos, resistividade eléctrica e resistência à penetração de dióxido de carbono permitem avaliar os mecanismos de degradação do betão.

4.2.1. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado de acordo com a especificação LNEC 394 (1993), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 14** e na **Figura 34**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 14 - Absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(%)		(%)	(%)		(%)
100% NA	13,07	0,16	0,0	11,85	0,14	0,0
25% AR	14,60	0,32	11,8	13,70	0,07	15,6
50% AR	16,34	0,06	25,0	14,70	0,04	24,1
100% AR	16,75	0,11	28,2	15,26	0,30	28,8
100% AGR	15,65	0,16	19,8	14,32	0,34	20,9
100% AFR	18,45	0,18	41,2	17,65	0,27	49,0

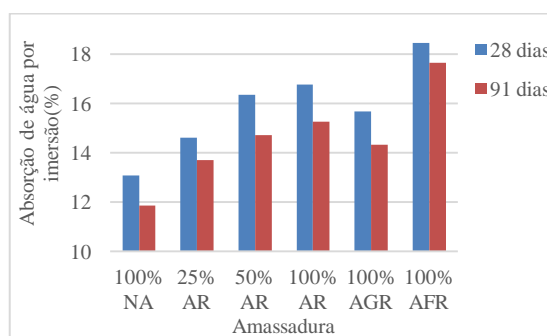


Figura 34 - Absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 65)

Através dos resultados, verifica-se que o BAC com 100% AFR registou maior absorção de água por imersão, com variações em relação à amassadura de referência de 41 e

49%, aos 28 e 91 dias, respectivamente. O BAC com 100% AR é a segunda amassadura a apresentar pior desempenho relativamente à propriedade em análise, registou aumentos de 28 e 29%, aos 28 e 91 dias.

Grdic et al. (2010) verificaram um aumento de cerca de 67% na amassadura com 100% de AR. Os autores justificaram esta tendência pela maior absorção do agregado reciclado relativamente ao agregado natural e pelo aumento gradual da relação a/c das amassaduras produzidas (0.41 para o BAC com 100% NA e 0.45 para o BAC com 100% AR).

Gómez-Soberón (2002) refere que a presença de argamassa antiga aderida aos AR é responsável pela maior porosidade e absorção dos agregados reciclados o que condiciona significativamente a porosidade aberta dos BAR.

Através da **Figura 35**, 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, ($R^2 = 0.98$), o que demonstra a ligação entre estas duas propriedades.

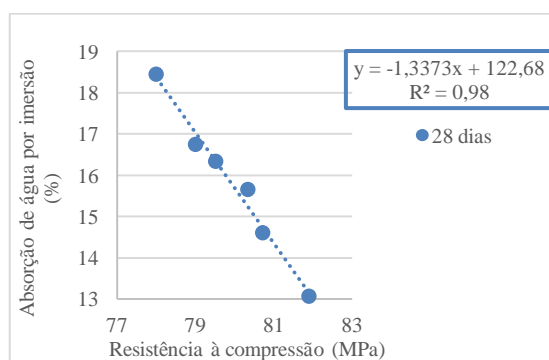


Figura 35 - Absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias (PF 65)

4.2.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a especificação LNEC 393 (1993), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 15**, na **Figura 36**, na **Figura 37** e na **Tabela 16**, são apresentados os resultados obtidos.

Analisando a **Figura 36** e a **Figura 37**, verifica-se que a absorção de água por capilaridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas. Comparando as duas figuras, verifica-se que ocorre uma diminuição da absorção de água por capilaridade com a idade (dos 28 para os 91 dias de idade). Este facto é explicado pela diminuição dos poros capilares. A presença de cinzas volantes faz com que ocorra um aumento da dimensão

média dos poros nas idades mais jovens; no entanto, para idades mais avançadas, existe uma tendência de diminuição do volume dos poros, fazendo diminuir a possibilidade de penetração (RILEM, 1991).

Tabela 15 - Absorção de água por capilaridade às 72 h (PF 65) aos 28 e 91 dias

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Absorção de água por capilaridade	D.P. (kg/m ²)	$\Delta_{100\% NA}$	Absorção de água por capilaridade	D.P. (kg/m ²)	$\Delta_{100\% NA}$
	(kg/m ²)		(%)	(kg/m ²)		(%)
100% NA	0,54	0,05	0,0	0,35	0,02	0,0
25% AR	0,58	0,02	8,8	0,36	0,01	2,4
50% AR	0,67	0,02	25,3	0,38	0,02	8,4
100% AR	0,83	0,02	55,3	0,39	0,01	11,7
100% AGR	0,64	0,04	18,9	0,37	0,01	7,3
100% AFR	0,91	0,04	69,1	0,40	0,02	13,8

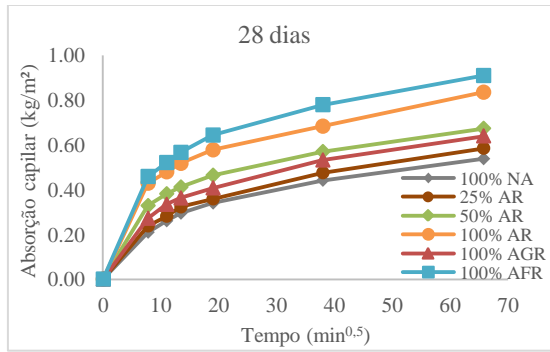


Figura 36 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)

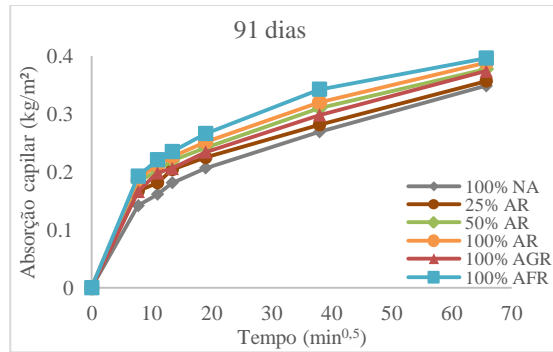


Figura 37 - Absorção de água por capilaridade aos 91 dias (PF 65)

Tabela 16 - Coeficientes de capilaridade (PF 65) aos 28 e 91 dias

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Coefficiente de capilaridade	R ²	$\Delta_{100\% NA}$	Coefficiente de capilaridade	R ²	$\Delta_{100\% NA}$
	(10 ⁻² kg/[m ² .min ^{0,5}])		(%)	(10 ⁻² kg/[m ² .min ^{0,5}])		(%)
100% NA	3,12	0,98	0,0	1,13	0,99	0,0
25% AR	3,52	0,98	12,8	1,17	0,97	3,5
50% AR	3,88	0,98	24,4	1,24	0,98	9,7
100% AR	3,99	0,88	27,9	1,28	0,85	13,3
100% AGR	3,75	0,98	20,2	1,23	0,97	8,8
100% AFR	4,89	0,99	56,7	1,32	0,98	16,8

Comparando a amassadura de referência (100% NA) com a amassadura com 100% AR, verifica-se que ocorre um aumento de 55% (aos 28 dias). Estes resultados apresentam as mesmas tendências do que Tuyan et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014) e Pereira-de-Oliveira et al. (2014). Modani e Mohitkar (2014) obtiveram aumento de 41% para a amassadura com 100% AR (28 dias).

Os valores dos coeficientes de capilaridade às 6 horas do BAC com AR situaram-se entre

3,12 e $4,89 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ aos 28 dias e entre 1,32 e $1,13 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ aos 91 dias (**Tabela 16**). Assim, ocorrem aumentos de absorção com o aumento da quantidade de agregados reciclados. Os betões correspondentes à taxa de substituição de 100% AFR apresentam os piores resultados, com perdas de desempenho, relativamente ao BAC de referência (100% NA), de cerca de 57 e 17% aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade dos AR em comparação com os NA devido à argamassa antiga aderida aos primeiros. Wirquin et al. (2000) referem que a presença de AR no betão é responsável pela formação de mais e maiores poros capilares.

A **Figura 38** estabelece uma relação entre as absorções de água por capilaridade e por imersão. Os coeficientes de determinação elevados ($R^2 = 0,91$; $R^2 = 0,88$) mostram que a absorção de água por capilaridade às 72 horas varia linearmente com a absorção de água por imersão. Esta situação está de acordo com a constatada por Ferreira (2000).

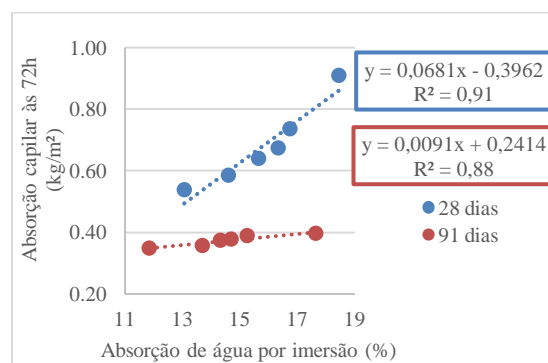


Figura 38 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade (72 horas) aos 28 e 91 dias (PF 65)

Por último, de forma a relacionar as propriedades em termos de durabilidade dos betões com o seu desempenho mecânico, é apresentada, na **Figura 39**, a correlação obtida entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade. A regressão utilizada foi a não-linear potencial uma vez que é a que melhor se ajusta aos valores obtidos ($R^2 = 0,68$). Esta situação é explicada pelo facto de o número de capilares não crescer linearmente com a porosidade dos mesmos.

4.2.1. Permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de permeabilidade ao oxigénio foi realizado de acordo com a especificação LNEC 392 (1993), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 17** e na **Figura 40**, são apresentados os

resultados obtidos.

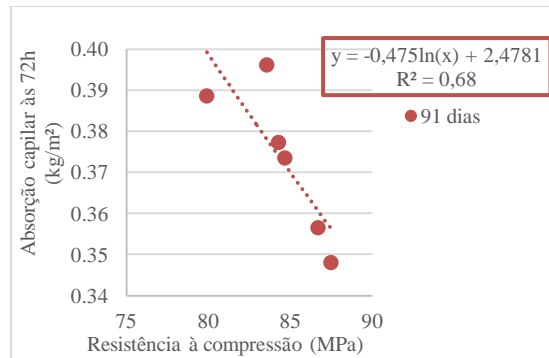


Figura 39 - Relação entre a absorção de água por capilaridade (72 horas) e a resistência à compressão aos 91 dias (PF 65)

Tabela 17 - Permeabilidade ao oxigênio aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Permeabilidade ao oxigênio (10^{-16}m^2)	D.P. (10^{-16}m^2)	Δ (%)	Permeabilidade ao oxigênio (10^{-16}m^2)	D.P. (10^{-16}m^2)	Δ (%)
100% NA	0,89	0,10	0,0	0,06	0,02	0,0
25% AR	1,43	0,09	0,5	0,25	0,04	0,2
50% AR	2,84	0,17	2,0	0,63	0,02	0,6
100% AR	4,12	0,79	3,2	0,84	0,14	0,8
100% AGR	2,09	0,58	1,2	0,60	0,06	0,5
100% AFR	5,29	0,36	4,4	2,04	0,84	2,0

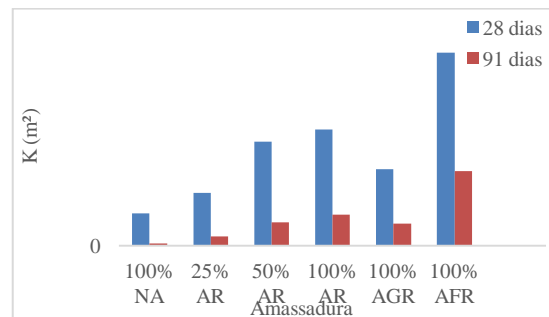


Figura 40 - Permeabilidade ao oxigênio aos 28 e 91 dias (PF 65)

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a substituição de NA por AR aumenta a permeabilidade ao oxigênio. A amassadura com maior permeabilidade ao oxigênio é a que foi produzida com 100% AFR. A substituição de NA por AR faz aumentar a porosidade no betão devido à natureza mais porosa dos primeiros agregados. A natureza porosa dos AR é justificada pela argamassa antiga que faz parte destes agregados.

Aos 28 dias, Zong et al. (2014) obtiveram aumentos de 225% (comparando o betão de referência com o betão produzido com 50% AR) e Lotfi et al. (2015) obtiveram aumen-

tos de 200% (comparando o betão de referência com o betão produzido com 100% AR). Resultados semelhantes foram obtidos no presente estudo, ou seja, verificou-se um aumento de 221% (comparando o BAC com 100% NA com o 50% AR) e de 365% (comparando o BAC com 100% NA com o 100% AR).

Por outro lado, Pereira-de-Oliveira et al. (2014) não conseguiram obter valores de permeabilidade ao oxigénio (mesmo submetendo o provete até a uma pressão de 3,5 bar). Por conseguinte, os autores referem que, relativamente a esta propriedade, o BAC é considerado hermético. Este facto foi confirmado com o ensaio de absorção de água sob pressão (realizado aos mesmos provetes após o ensaio de permeabilidade ao oxigénio). Os autores obtiveram valores de permeabilidade à água sob pressão relativamente baixos: variando de $2,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ a $6,0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$.

Observando a **Tabela 17**, e de acordo com a classificação feita pela RILEM (1999), aos 28 dias de idade, a amassadura 100% NA e 25% AR apresenta resistência moderada à penetração de oxigénio (resultados incluídos no intervalo de 0,5 a $2,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$), as restantes amassaduras apresentam baixa resistência à penetração de oxigénio (resultados incluídos no intervalo de 2,5 a $12,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$). Aos 91 dias de idade, as amassaduras 100% NA e 25% AR apresentam boa resistência à penetração de oxigénio e as restantes amassaduras apresentam resistência moderada à penetração de oxigénio.

A diminuição da permeabilidade ao oxigénio com a idade é explicada pela presença de cinzas volantes no betão que só começam a reagir a idades mais avançadas (Camões, 2002). Assim, nas primeiras idades, o efeito dos AR no betão é relevante e, com o aumento da idade, esse efeito é substituído pelo efeito das cinzas volantes. A reacção pozolânica das cinzas volantes com o cimento é responsável pelo preenchimento dos poros do betão, dificultando a penetração de oxigénio. Esse facto é também confirmado pelo ensaio de absorção de água por capilaridade.

A penetração de oxigénio no betão está fortemente relacionada com os restantes mecanismos de transporte, nomeadamente a absorção de água por imersão e por capilaridade. Assim, relacionando a penetração de oxigénio com a penetração de água por imersão, obteve-se coeficientes de variação de 0,93% e 0,91% aos 28 e 91 dias, respectivamente (**Figura 41**). Relacionando a penetração de oxigénio com a penetração de água por capilaridade, obteve-se coeficientes de variação de 0,97% e 0,80% aos 28 e 91 dias, respectivamente (**Figura 42**).

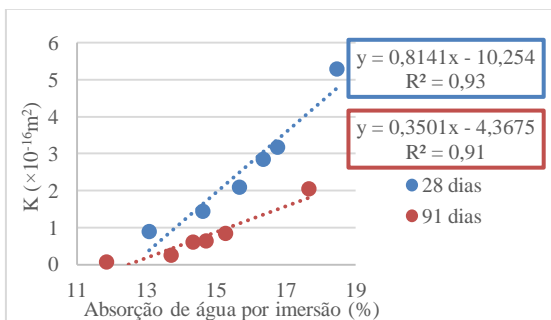


Figura 41 - Relação entre permeabilidade ao oxigênio e a absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 65)

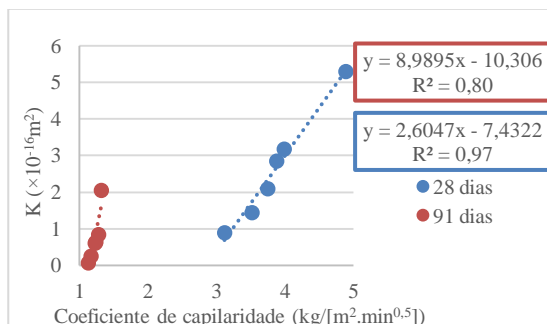


Figura 42 - Relação entre a permeabilidade ao oxigênio e a absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias (PF 65)

4.2.2. Resistência à penetração de cloretos

O ensaio de resistência à penetração de cloretos foi realizado de acordo com a especificação LNEC 463 (2004), aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 18** e na **Figura 43**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	($\times 10^{-12} m^2/s$)		(%)	($\times 10^{-12} m^2/s$)		(%)
100% NA	3,2	0,5	0,0	2,7	0,1	0,0
25% AR	3,5	0,8	8,7	2,9	0,6	9,2
50% AR	4,2	0,5	30,1	3,6	0,5	33,2
100% AR	4,5	0,5	40,8	3,8	0,2	41,0
100% AGR	3,9	0,4	21,1	3,3	0,2	22,2
100% AFR	4,8	0,7	49,2	4,2	0,4	58,0

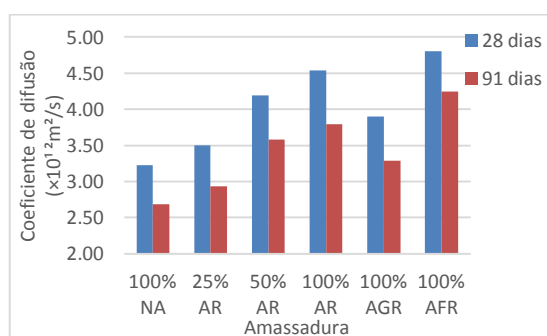


Figura 43 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65)

Observando a **Figura 43**, verifica-se que a presença de AR faz aumentar a penetração de íons cloreto. Aos 28 dias, a amassadura com 100% AR apresenta um aumento de

penetração de 41% em comparação com o BAC de referência (100% NA). Modani e Mohitkar (2014) obtiveram resultados na mesma ordem de grandeza: 62%.

O aumento verificado é explicado pela maior porosidade dos AR em comparação com os NA, devido à argamassa antiga que faz parte dos AR (Modani e Mohitkar, 2014). Um outro factor que poderá explicar esta tendência é a dimensão das fissuras dos agregados reciclados. Xiao et al. (2012) concluíram que a largura de fissuras existentes na antiga argamassa aderida está correlacionada com o coeficiente de difusão de cloretos, verificando-se maior difusão para maiores larguras de fissuras.

A maior penetração de iões cloreto é verificada na amassadura com 100% AFR, com aumento da penetração de 49% e 58% aos 28 e 91 dias (**Tabela 18**). Este facto é explicado pela pior qualidade da pasta do BAC (devido à substituição de areia por AFR), uma vez que o transporte de iões é feito preferencialmente nessa zona.

Fazendo a comparação da propriedade em análise com outras propriedades também responsáveis pelos mecanismos de transporte no interior do betão, é possível estabelecer correlação. Assim, através da **Figura 44** e da **Figura 45**, é possível observar a existência de uma relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por imersão ($R^2 = 0.61$) e entre coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por capilaridade ($R^2 = 0.80$).

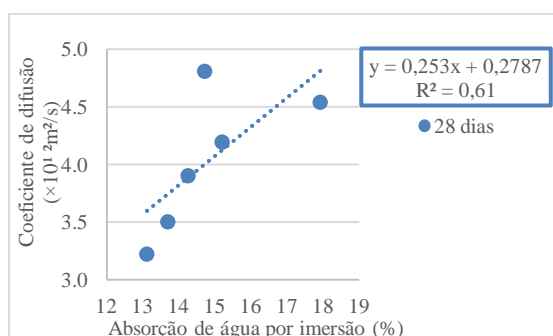


Figura 44 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por imersão aos 28 dias (PF 65)

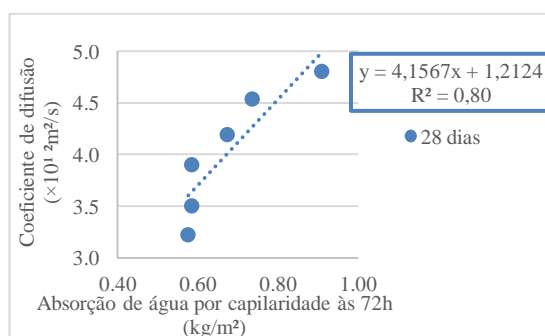


Figura 45 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)

De forma a relacionar a propriedade em análise com a resistência mecânica dos betões, é apresentada a **Figura 46**, que relaciona a resistência à compressão com o coeficiente de difusão de cloretos.

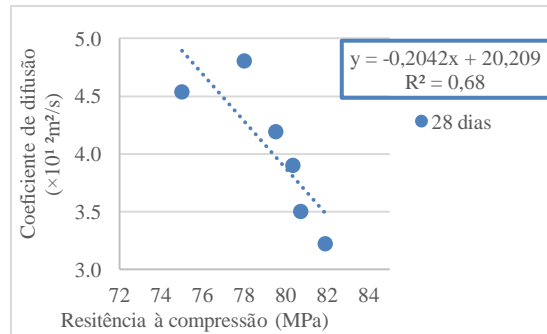


Figura 46 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão aos 28 dias (PF 65)

4.2.3. Resistividade eléctrica

O ensaio da resistividade eléctrica foi realizado com base nas seguintes referências: Rilem TC 154-EMC (2000), Chlortest (2005) e DURAR (2000). Este ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias. Na **Tabela 19** e na **Figura 47**, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de resistividade eléctrica aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resistividade eléctrica	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Resistividade eléctrica	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	($\Omega.m$)		(%)	($\Omega.m$)		(%)
100% NA	247,0	11,4	0,0	556,2	18,0	0,0
25% AR	238,5	9,9	-3,4	530,1	31,9	-4,7
50% AR	185,4	10,3	-24,9	407,9	14,4	-26,7
100% AR	180,2	6,0	-27,0	391,4	34,3	-29,6
100% AGR	198,6	1,3	-19,6	441,0	22,8	-20,7
100% AFR	166,7	22,8	-32,5	320,2	11,1	-42,4

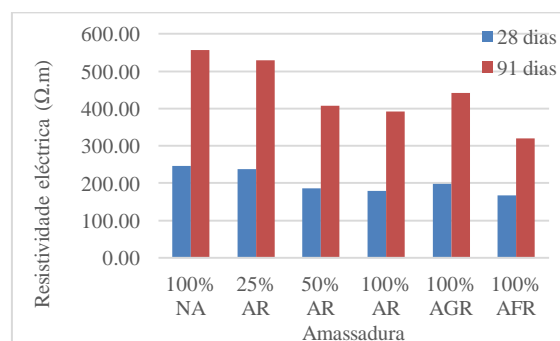


Figura 47 - Resistividade eléctrica aos 28 e 91 dias (PF 65)

Analisando os resultados obtidos (**Figura 47**), verifica-se que a resistividade eléctrica diminui com a substituição de NA por AR. Para a amassadura com 100% AR ocorre reduções de 27% e 30% aos 28 e 91 dias de idade, respectivamente. Andreu e Miren

(2014) e Surya *et al.* (2013) obtiveram reduções de 36 e 33%, respectivamente (comparando o betão de referência com o betão em que foi usado apenas AR). Este facto é justificado pela maior porosidade dos AR em comparação com os NA, devido à argamassa antiga que faz parte dos AR.

A **Figura 48** estabelece uma relação entre a resistividade eléctrica e o coeficiente de difusão de cloretos. Os coeficientes de determinação ($R^2 = 0,88$; $R^2 = 0,99$) mostram que estas duas propriedades estão fortemente correlacionadas.

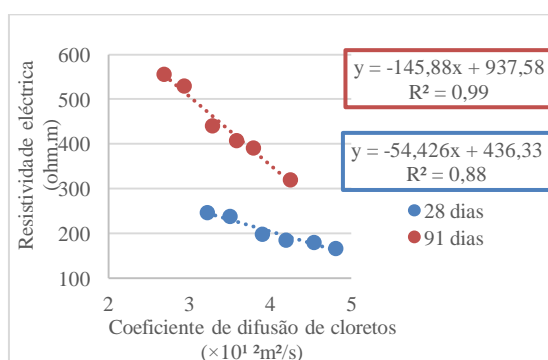


Figura 48 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 e 91 dias (PF 65)

Relativamente aos dois parâmetros de avaliação do mecanismo de difusão, verifica-se que a resistividade eléctrica é inversamente proporcional ao processo de difusão dos iões cloretos. A resistividade eléctrica avalia a capacidade de um elemento resistir à passagem da corrente, sendo que neste ensaio é avaliada a migração de todos os iões. Por outro lado, o coeficiente de difusão avalia a capacidade do elemento se deixar atravessar apenas pelos iões cloreto.

4.2.4. Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi realizado de acordo com a especificação LNEC 391 (1993), 7, 28, 56 e 91 dias (a idade começa a contar aos 28 dias, altura em que é colocado na câmara de dióxido de carbono). Na **Tabela 20** e na **Figura 49**, são apresentados os resultados obtidos.

Através da sua observação, constata-se que a carbonatação, nas primeiras idades (7 e 28 dias), é inexistente. Esta só começa a surgir a partir dos 56 dias, embora inferior a 2 mm

(valores consideravelmente baixos). As reduzidas profundidades de carbonatação são justificadas pela reduzida relação a/c (0,44). Siddique (2011) apresenta profundidades de carbonatação inferiores a 2 mm, para 90 dias de exposição ao dióxido de carbono, em misturas de BAC com uma relação a/c de 0,44. Bogas (2011) refere profundidades de carbonatação desprezáveis em betões com uma razão a/c abaixo de 0,35. O autor afirma que, independentemente do tipo de betão analisado, obteve apenas carbonatação na camada superficial, em espessuras entre 1 e 2 mm, ao fim de um ano de exposição na câmara de carbonatação.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			56 dias			91 dias		
	Profundidade de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Profundidade de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Profundidade de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$	Profundidade de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(mm)		(%)	(mm)		(%)	(mm)		(%)	(mm)		(%)
100% NA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,1	0,0	0,8	0,2	0,0
25% AR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,2	83,4	1,2	0,3	50,7
50% AR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,6	155,8	1,6	0,4	93,4
100% AR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,4	206,8	2,1	0,4	162,9
100% AGR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,1	121,6	1,5	0,4	85,0
100% AFR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,9	347,4	2,2	0,2	172,2

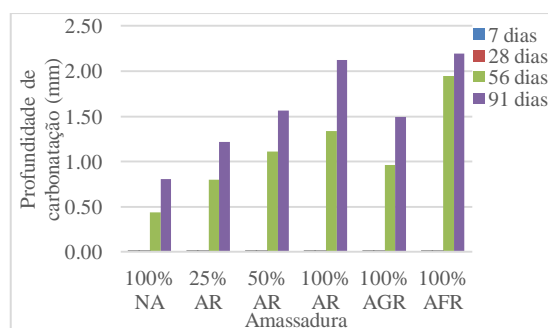


Figura 49 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias (PF 65)

A ausência da profundidade de carbonatação nas primeiras idades é também explicada pelo facto de se estar trabalhar com BED. Esta realidade contribui para um reforço das zonas de transição, contribuindo para um melhor desempenho dos betões. Neste contexto, a sílica de fumo é um dos componentes de maior relevância para os betões em estudo. A sílica de fumo é responsável por diminuir a porosidade e a permeabilidade dos betões, consequência da sua reduzida dimensão e da sua capacidade em criar um grande número de locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação. Por conse-

guinte, a sílica contribui para o aumento da durabilidade do BED (Parande, 2013; Ramezianipour et al., 2014).

Os valores da profundidade de carbonatação tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição. Para o BAC com 100% AR, a profundidade de carbonatação aumentou 207% e 163% aos 56 e 91 dias, respectivamente. Esta situação está de acordo com o que era expectável, uma vez que a absorção de água (por imersão e por capilaridade) apresentou uma tendência idêntica.

Uma justificação para a maior profundidade de carbonatação nos BAC com AR está 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).

Na **Tabela 21**, são apresentados os valores dos coeficientes de carbonatação. Como é expectável, para a taxa de substituição de 100% AFR, registou-se a maior variação, em relação ao BR (232%).

Dado o elevado valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,87$), é possível constatar uma relação linear entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão (**Figura 50**).

Tabela 21 - Coeficientes de carbonatação (PF 65)

Amassadura	Coeficiente de carbonatação	$\Delta_{100\% NA}$
	(mm/dia ^{0,5})	
100% NA	0,06	0,0
25% AR	0,10	61
50% AR	0,13	113
100% AR	0,15	151
100% AGR	0,12	97
100% AFR	0,20	232

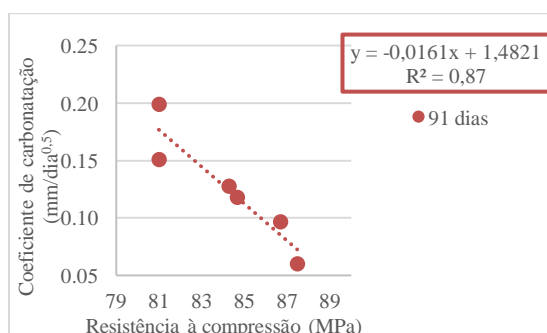


Figura 50 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão aos 91 dias (PF 65)

Também é possível constatar uma relação linear entre a carbonatação e as propriedades

de absorção de água por imersão (**Figura 51**) e por capilaridade (**Figura 52**), dados os valores dos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,99$ e $R^2 = 0,96$, respectivamente).

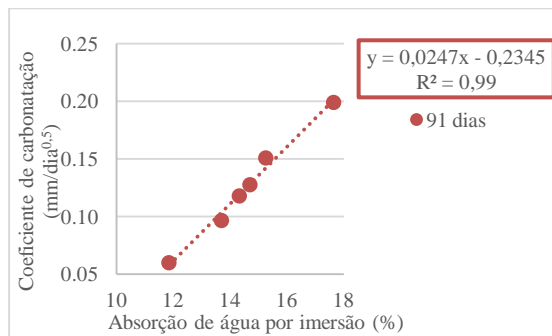


Figura 51 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão aos 91 dias (PF 65)

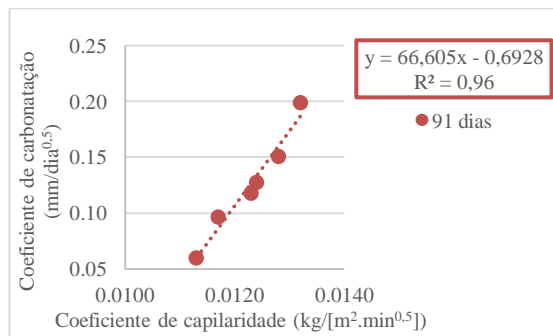


Figura 52 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade aos 91 dias (PF 65)

5. Considerações finais

Com o presente relatório, pretendeu-se analisar os resultados experimentais obtidos durante a realização de parte da Tarefa 5: produção de BACED com AR. Nesta tarefa, foram produzidos seis tipos de betões incorporando diferentes quantidades de AR. Considerou-se cinco taxas de substituição de agregados finos reciclados (AFR) e agregados grossos reciclados (AGR): 25/25; 50/50; 100/100; 0/100 e 100/0%. No total, produziu-se aproximadamente 1 m³ de betão.

Os resultados obtidos nas propriedades do estado fresco permitiram constatar que a totalidade das amassaduras executadas cumpriu os parâmetros de trabalhabilidade requeridos pela NP EN 206-9 (2010). Assim sendo, as amassaduras produzidas possuem as características que são exigidas aos betões auto-compactáveis: fluidez; velocidade do escoamento quer na ausência, quer na presença de obstruções; capacidade de enchimento; capacidade de escoamento; capacidade de passagem; e resistência à segregação.

Na

Tabela 22, é apresentado um resumo dos resultados obtidos, em BAC no estado endurecido, em que um sinal negativo corresponde a uma diminuição e o sinal positivo corresponde a um aumento do valor da propriedade em análise. As comparações realizadas são feitas entre BAC de referência (BAC com 100% NA) e a amassadura que apresenta o máximo aumento ou diminuição.

Tabela 22 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias.

Ensaio		Amassadura e respectivo aumento/ diminuição em relação ao BAC de referência				
		25% AR	50% AR	100% AR	100% AGR	100% AFR
Ensaio Mecânicos	Massa volúmica	-1%	-3%	-5%	-2%	-3%
	Resistência à compressão em cubos	-1%	-3%	-8%	-2%	-5%
	Resistência à compressão em cilindros	-5%	-11%	-23%	-10%	-17%
	Resistência à tracção por compressão diametral	-10%	-23%	-32%	-19%	-28%
	Módulo de elasticidade	-5%	-12%	-26%	-11%	-21%
	Velocidade de propagação de ultra-sons	-1%	-4%	-8%	-2%	-6%
	Perda da espessura por abrasão	+6%	+13%	+39%	+10%	+36%
Ensaio de durabilidade	Deformação por retracção	+3%	+13%	+23%	+13%	+20%
	Absorção de água por imersão	+12%	+25%	+28%	+20%	+41%
	Absorção de água por capilaridade	+9%	+25%	+55%	+19%	+69%
	Permeabilidade ao oxigénio	+63%	+221%	+365%	+136%	+497%
	Profundidade de penetração de cloretos	+9%	+30%	+41%	+21%	+49%
	Resistividade eléctrica	-3%	-25%	-27%	-20%	-33%
Profundidade de carbonatação (aos 91 dias)		+51%	+93%	+163%	+85%	+172%

Legenda: Amassadura com melhor resultado

Os resultados da

Tabela 22 mostram que as diferentes amassaduras incorporando AR apresentam variações coerentes. Constata-se que, para a máxima taxa de substituição (amassadura 100% AR), as propriedades mecânicas do BAC (resistência mecânica e módulo de elasticidade) apresentam perdas de desempenho não superiores a 26%.

A amassadura com 25% AR apresenta o melhor desempenho, com perdas inferiores a 10% em termos das suas propriedades mecânicas e inferiores a 12% em termos de durabilidade (excepto na penetração de oxigénio, em que apresenta uma perda de 63%, e na resistência à carbonatação, em que apresenta uma perda de 51%).

Para todas as propriedades em análise, a amassadura com 50% AR e a amassadura com 100% AGR apresentam desempenhos semelhantes, quer em termos mecânicos quer em termos de durabilidade. Adicionalmente, a primeira tende a ter piores resultados do que a segunda.

Verifica-se que as amassaduras 100% AR e 100% AFR apresentam desempenhos semelhantes (

Tabela 22). Analisando os ensaios mecânicos, a amassadura com 100% AR apresenta as maiores perdas. Analisando os ensaios de durabilidade, a amassadura com 100% AFR apresenta perdas ligeiramente superiores às da amassadura com 100% AR, contrariamente ao expectável, embora os seus valores absolutos se encontrem dentro da mesma ordem de grandeza. Em termos de durabilidade do BAC, os AG apresentam muito menor influência do que os AF. A durabilidade do BAC é controlada pela pasta, onde ocorrem preferencialmente os mecanismos de transporte e de degradação. Ao enfraquecer a pasta (com a incorporação de AFR), favorece-se a penetração dos agentes (água, oxigénio, dióxido de carbono e cloretos).

A substituição de NA por AR provoca diminuição da resistência mecânica (compressão e tracção). Este facto é explicado pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida e que é responsável por aumentar a porosidade e fissuração dos agregados, tornando mais fracas as ligações na zona de transição entre o agregado reciclado e a nova pasta. Aos 28 dias, registam-se diminuições de 1% a 8% na resistência à compres-

são em cubos; de 5% a 23% na resistência à compressão em cilindros e de 10% a 32% na resistência à tracção.

De acordo com a classificação da norma NP EN 206-1 (2005), a amassadura com 100% AR pertence à classe de resistência C50/60 e as restantes amassaduras à classe acima desta: C65/67. Assim, de acordo com a referida norma, todos os betões produzidos podem ser classificado como de elevado desempenho (BED).

Constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados, que é explicada pela menor rigidez dos AR (em comparação com os NA) dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e também a menor deformabilidade da referida pasta de cimento. Aos 28 dias, verifica-se reduções de 5% a 26%.

A menor rigidez dos AR, em comparação com os NA, faz diminuir a rigidez global do betão e, deste modo, aumentar a deformação por retracção. Verificam-se ainda aumentos de retracção aos 91 dias superiores aos registados aos 7 dias, devido ao fenómeno de cura interna desencadeado pelos agregados reciclados. Aos 28 dias, ocorrem reduções de inferiores a 23%.

No que respeita à velocidade de propagação de ultra-sons, verifica-se que esta diminui com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados. Essa diminuição é pouco acentuada (1% a 8%, aos 28 dias). A referida diminuição é explicada pela natureza dos agregados em causa, isto é, maior porosidade em relação aos NA (devido à argamassa antiga aderida aos mesmos).

Em relação ao desgaste devido à abrasão, verifica-se maior desgaste à medida que a taxa de substituição aumenta (aos 28 dias ocorrem perdas até 39%). A natureza mais porosa dos AR, devido à argamassa antiga que se encontra aderida aos mesmos, é responsável pelo maior desgaste do betão por abrasão.

No que respeita à permeabilidade ao oxigénio, absorção de água por imersão e capilaridade, existe uma diminuição de desempenho nestas propriedades devido à introdução de AR no betão. A presença de argamassa antiga aderida aos AR é responsável pela maior porosidade do betão.

Nas referidas três propriedades, ocorre uma diminuição da penetração dos agentes (oxigénio e água) com a idade. Este facto é explicado pela diminuição dos poros capilares. A

presença de cinzas volantes faz com que ocorra um aumento da dimensão média dos poros nas idades mais jovens; no entanto, para idades mais avançadas, existe uma tendência de diminuição do volume dos poros, fazendo diminuir a taxa de penetração.

O aumento da substituição de NA por AR no BAC faz aumentar a penetração de iões cloreto (aumentos de 9% a 49%, aos 28 dias). Este facto é explicado pela degradação da qualidade da pasta do BAC (devido à substituição de areia por AFR), uma vez que o transporte de iões é feito preferencialmente nessa zona.

Quando se analisa o transporte de todos os tipos de iões no BAC (através do ensaio da resistividade eléctrica), verifica-se que aquele diminui com a substituição de NA por AR, o que está de acordo com o ensaio de penetração de iões cloreto. Ocorrem aumentos de 3% a 33%, aos 28 dias.

Nas primeiras idades, a carbonatação dos betões é imperceptível e só começa a ser visível a partir dos 56 dias de idade, embora muito baixa (inferior a 2 mm). Este facto é explicado pela baixa relação a/c usada nas misturas (0,44). Os valores da profundidade de carbonatação tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição. Esta situação está de acordo com o expectável, uma vez que a absorção de água (por imersão e por capilaridade) apresenta uma tendência idêntica.

O EC2 apresenta fórmulas para estimar as propriedades do betão convencional (em termos do tipo de agregado e da necessidade de compactação) a partir dos resultados experimentais de resistência à compressão obtida em cilindros, aos 28 dias de idade. Assim, recorreu-se a essas fórmulas para estimar as outras propriedades (resistência à tracção, módulo de elasticidade e deformação por retracção) para poder comparar com os resultados experimentais obtidos.

Fazendo a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos através das fórmulas propostas pelo EC2, verifica-se que os modelos de previsão propostos pelo EC 2 tendem a fornecer valores razoavelmente próximos dos obtidos experimentalmente. Por exemplo, aos 91 dias e para a amassadura 100% AR, verificam-se diferenças de 0% e 13%, para os ensaios de resistência à tracção e módulo de elasticidade, respectivamente.

6. Bibliografia

Andreu, G., Miren, E. - Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 52, 2014, pp.227–235.

APEB (Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto) - Betão autocompactável: guia para a especificação, produção e utilização, Lisboa, Portugal, APEB, 2007, 91 p.

Barbudo, A.; de Brito, J.; Evangelista, L.; Bravo, M.; Agrela, F. - Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 59, 2013, pp.93–98.

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.

Cartuxo, P. - Betões com agregados finos provenientes da trituração do betão: Influência dos plastificantes no desempenho em termos de durabilidade, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013, 232 p.

Camões, A. - “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2002, 456 p.

Chlortest - Guideline for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress, EU-Project CHLORTEST, G6RD-CT-2002-00855, EU funded research Project under 5FP. GROWTH programme, document prepared by Tang Luping, SP Swedish National, Testing and Research Institute, Boras, Sweden, 2005, 271 p.

DIN 52108 - Testing of inorganic non-metallic materials - Wear test using the grinding wheel according to Böhme - Grinding wheel method, German, Deutsches Institut für Normung (DIN) the German Institute for Standardization, 2010.

DURAR – Thematic network XV. B durability of rebars, Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures, CYTED, Ibero-American Program Science and Technology for Development, Subprogram XV, Corrosion/Environmental Impact on Materials, ISBN: 980-296-541-3, 2000, 204 p.

Evangelista, L. - “Comportamento de betões com agregados finos reciclados de betão”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2014, 485 p.

Ferreira, R. - Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2000, 248 p.

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.

Grdic, Z. J.; Toplicic-Curcic, G. a.; Despotovic, I. M.; Ristic, N. S. - Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 1129–1133.

Kebaïli, O.; Mouret, M.; Arabi, N.; & Cassagnabere, F. - Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 87, 2015, pp.752–761.

Kou, S. C.; Poon, C. S. - 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.

Kou, S. C.; Poon, C. S. - Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, 2009, pp. 622–627.

LNEC E 463 - Betões, Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004, 8 p.

LNEC E 398 - Betões, determinação da retracção e da expansão, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

LNEC E 399 - Betões, Determinação da fluência em compressão, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

LNEC E 391 - Betões, determinação da resistência à carbonatação, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

LNEC E 397 - Betões, determinação do módulo de elasticidade em compressão, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

LNEC E 392 - “Betões - Determinação da permeabilidade ao oxigénio, Lisboa, Portu-

gal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 3 p.

LNEC E 393 - Betões, determinação da absorção de água por capilaridade, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

LNEC E 394 - Betões, determinação da absorção de água por imersão, ensaio à pressão atmosférica, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993, 2 p.

Lotfi, S.; Eggimann, M.; Wagner, E.; Mróz, R.; Deja, J. - Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 2015, pp. 243–256

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

NP EN 12390-3 - Ensaio do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão de provetes, Lisboa, Portugal, IPQ, 2011, 21 p

NP EN 12390-6 (Ed. 2) - Ensaio do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes, Lisboa, Portugal, IPQ, 2011, 14 p.

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

NP EN 1992-1 - Eurocódigo 2, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2008.

NP EN 206-9 - Betão, Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC), Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 35 p.

NP EN 12350-8 - Ensaio do betão no estado fresco, Parte 8: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-9 - Ensaio do betão no estado fresco, Parte 9: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento no funil V, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 11 p.

NP EN 12350-10 - Ensaio do betão no estado fresco, Parte 10: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento na caixa L, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-11 - Ensaio do betão no estado fresco, Parte 11: Betão autocompactável, Ensaio de segregação no peneiro, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-12 - Ensaio do betão no estado fresco, Parte 12: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento no anel J, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 14 p.

NP EN 12504-4 - Ensaio do Betão nas Estruturas, Parte 4: Determinação da Velocidade de Propagação dos Ultra-sons, Lisboa, IPQ, 2007, 18 p.

NP EN 12390-7 (2000) - Ensaio do betão endurecido, Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido.

Parande A. K. - Role of ingredients for high strength and high performance concrete – A review, CSIR-Central Electrochemical Research Institute Karaikudi, Tamil Nadu, India, 2013, 12 p.

Pereira-de-Oliveira, L. a.; Nepomuceno, M. C. S.; Castro-Gomes, J. P.; Vila, M. F. C. - Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 51, 2014, pp. 113–120.

Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. - The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, 2012, pp.1044–1052.

Polder R. B. – Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete, a RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, technical recommendation, *Materials and Structures*, Vol. 33, 2000, pp. 603-611.

Ramezani pour A. A., Rezaei H. R., Savoj H. R. - “Influence of silica fume on chloride diffusion and corrosion resistance of concrete - A review”, Department of Civil and Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran, 2014, 21 p.

RILEM Recommendation of TC 116-PCD - Tests for gas permeability of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 32, 1999, pp.1359-5997

Siddique R. - Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, pp. 1501-1507.

Silva, P. - Avaliação da durabilidade de betões auto-compactáveis (BAC), Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2013, 579 p.

STA - Silica Fume Association - “Silica fume: User’s manual”, U.S. - Department of Transportation, Federal Highway Administration, Lovettsville, EUA, 2005, 183 p.

Surya, M.; Vvl, K. R.; Lakshmy, P. - Recycled Aggregate Concrete for Transportation Infrastructure; *Procedia - Social and Behavioral Sciences*; Vol.104, 2013, pp.1158–1167.

Tu, T.-Y.; Chen; Y.-Y.; Hwang, C.-L. - Properties of HPC with recycled aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 943–950.

Tuyan, M.; Mardani-Aghabaglou, A.; Ramyar, K. - Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate, *Materials & Design*, Vol. 53, 2014, pp. 983–991.

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.

Zong, L.; Fei, Z.; Zhang, S. - Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 70, 2014, pp. 175–182.

Lisboa, 17 de Setembro de 2015

Autores

Tiago Barroqueiro
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Pedro Silva
Professor Adjunto