



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 4

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 AUTO-COMPACTÁVEIS

RELATÓRIO

Setembro de 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. PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO	3
3.1. Ensaio de espalhamento	3
3.2. Ensaio de escoamento no funil V	4
3.3. Ensaio de escoamento na caixa L	5
3.4. Ensaio de segregação no peneiro	5
3.5. Ensaio de espalhamento no anel J	6
4. PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	7
4.1. Propriedades em termos mecânicos	8
4.1.1. Massa volúmica	8
4.1.2. Resistência à compressão em cubos	9
4.1.3. Resistência à compressão em cilindros	11
4.1.4. Resistência à tracção por compressão diametral	15
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
4.1.9. Deformação por fluência	25
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	33
4.2.5.	Resistividade eléctrica	35
4.2.6.	Resistência à carbonatação	36
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
6.	BIBLIOGRAFIA	44

Índice de figuras

Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 65)	3
Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 45)	3
Figura 3 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 65) ...	3
Figura 4 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 45) ...	3
Figura 5 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 65)	4
Figura 6 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 45)	4
Figura 7 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 65)	5
Figura 8 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 45)	5
Figura 9 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 65)	6
Figura 10 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 45)	6
Figura 11 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 65)	6
Figura 12 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 45)	6
Figura 13 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 65)	7
Figura 14 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 45)	7
Figura 15 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento no anel J (PF 65)	7
Figura 16 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento no anel J (PF 45)	7
Figura 17 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	9
Figura 18 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)	9

Figura 19 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	10
Figura 20 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)	10
Figura 21 - Rotura apresentada pelos betões PF 45 aos 91 dias de idade	11
Figura 22 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7 e 28 dias (PF 65).....	11
Figura 23 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7 e 28 dias (PF 45).....	11
Figura 24 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65).....	12
Figura 25 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45).....	12
Figura 26 - Rotura apresentada pelos betões PF 65 aos 91 dias de idade	13
Figura 27 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65).....	14
Figura 28 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45).....	14
Figura 29 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65) ..	16
Figura 30 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 45) ..	16
Figura 31 - Superfícies de rotura apresentadas pelos betões PF 45 aos 91 dias de idade	16
Figura 32 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65).....	17
Figura 33 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45).....	17
Figura 34 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65)	18
Figura 35 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45)	18
Figura 36 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cubos aos 28 e 91 dias (PF 45)	20
Figura 37 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45).....	20

Figura 38 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65).....	21
Figura 39 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 45).....	21
Figura 40 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)	22
Figura 41 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45)	22
Figura 42 - Resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 65)	23
Figura 43 - Resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 45)	23
Figura 44 - Deformação por retracção ao longo de 182 dias (PF 65).....	25
Figura 45 - Deformação por retracção ao longo de 182 dias (PF 45).....	25
Figura 46 - Deformação total (sem retracção) ao longo de 91 dias (PF 65)	26
Figura 47 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 65).....	29
Figura 48 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45).....	29
Figura 49 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)	30
Figura 50 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 45)	30
Figura 51 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade (72 horas) aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)	31
Figura 52 - Relação entre a absorção de água por capilaridade (72 horas) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias (PF 45)	31
Figura 53 - Permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 65)	32
Figura 54 - Permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 45)	32
Figura 55 - Relação entre permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 45)	33
Figura 56 - Relação entre a permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias (PF 45)	33
Figura 57 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)	34
Figura 58 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)	34

Figura 59 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)	35
Figura 60 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade aos 28, 91 e 182 dias (PF 45).....	35
Figura 61 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 65).....	36
Figura 62 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 45).....	36
Figura 63 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias (PF 65)	36
Figura 64 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias (PF 45)	36
Figura 65 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 65)	38
Figura 66 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 45)	38
Figura 67 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão aos 91 dias (PF 45)	39
Figura 68 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade aos 91 dias (PF 45).....	39

Índice de tabelas

Tabela 1 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65).....	8
Tabela 2 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45).....	8
Tabela 3 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)	10
Tabela 4 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)	10
Tabela 5 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)	12
Tabela 6 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)	12
Tabela 7 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 65).....	13
Tabela 8 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 45).....	13
Tabela 9 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206- 1:2005 (PF 65).....	14
Tabela 10 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206- 1:2005 (PF 45).....	14
Tabela 11 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)..	15
Tabela 12 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 45)..	15
Tabela 13 - Relação entre a resistência à compressão e à tracção, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 65).....	17
Tabela 14 - Relação entre a resistência à compressão e à tracção, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 45).....	17
Tabela 15 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65).....	18
Tabela 16 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45).....	18
Tabela 17- Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 65).....	19
Tabela 18- Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 65)	20
Tabela 19 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 45)	20
Tabela 20 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 65)	22

Tabela 21 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 45)	22
Tabela 22 - Deformações por retracção aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)	23
Tabela 23 - Deformações por retracção aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)	23
Tabela 24 - Resultados do ensaio da fluência aos 91 dias (PF 65).....	26
Tabela 25 - Coeficiente de fluência aos 91 dias (PF 65).....	26
Tabela 26 - Absorção de água por imersão (PF 65)	28
Tabela 27 - Absorção de água por imersão (PF 45)	28
Tabela 28 - Absorção de água por capilaridade às 72 h (PF 65).....	29
Tabela 29 - Absorção de água por capilaridade às 72 h (PF 45).....	30
Tabela 30 - Permeabilidade ao oxigénio (PF 65)	31
Tabela 31 - Permeabilidade ao oxigénio (PF 45)	32
Tabela 32 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos (PF 65).....	34
Tabela 33 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos (PF 45).....	34
Tabela 34 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)	35
Tabela 35 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)	35
Tabela 36 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28, 91 e 182 dias (PF 65)	37
Tabela 37 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28, 91 e 182 dias (PF 45)	38
Tabela 38 - Coeficientes de carbonatação (PF 65)	39
Tabela 39 - Coeficientes de carbonatação (PF 45)	39
Tabela 40 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias (PF 65).....	40
Tabela 41 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias (PF 45).....	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
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
AN	Agregado natural
PF	Peças pré-fabricadas
PF 45	AR proveniente de PF com 45 MPa de resistência à compressão
PF 65	AR proveniente de PF com 65 MPa de resistência à compressão
PJ	Capacidade de passagem no anel
PL	Índice de capacidade de passagem na caixa L
RCD	Resíduos de construção e demolição
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 usando dois tipos de agregados reciclados (AR). Este estudo corresponde à execução de parte da tarefa 4 no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “*Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)*”.

Para a produção de betão auto-compactável (BAC), foram usados agregados reciclados (AR) provenientes da trituração de peças pré-fabricadas (PF), cujas classes de resistência à compressão foram de 45 e 65 MPa. Assim, foram produzidas duas famílias de betões: uma em que foram usados AR de 45 MPa (amassaduras PF 45) e outra em que foram usados AR de 65 MPa (amassaduras PF 65). São apresentados os resultados dos ensaios realizados em dez tipos de betões (cinco betões usando agregados reciclados de 45 MPa e cinco betões usando agregados reciclados de 65 MPa), em que o primeiro corresponde a uma mistura apenas usando agregado natural (NA) (sigla: **100% NA**) e as restantes quatro 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**); (4) AFR/AGR%: 0/100% (sigla: **100% AGR**); (5) AFR/AGR%: 100/0% (sigla: **100% AFR**).

Todas as argamassas e betões contemplaram a substituição do cimento pelas adições (f_{ad}). Assim, para as amassaduras PF 45, foi considerado um valor de f_{ad} de 60%, correspondendo 50% a CV e 10% a FC, e, para as amassaduras PF 65, um valor de f_{ad} de 35%, sendo que 30% correspondem a CV e 5% a FC. Foi mantida constante, em todas as amassaduras, a quantidade de cimento (CEM I 42,5) e a relação a/c: as amassaduras PF 45 foram produzidas com 270 kg/m³ de cimento e com uma relação a/c de 0,69; as amassaduras PF 65 foram produzidas com 437 kg/m³ de cimento e com uma relação a/c de 0,43.

Neste relatório, além da apresentação dos resultados dos ensaios realizados em BAC 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.

2. Enquadramento e contexto

O consumo de recursos naturais, principalmente de agregados naturais, bem como a produção de resíduos de construção e demolição (RCD), têm vindo a crescer nas últimas décadas. Em Portugal, a reciclagem de RCD está ainda pouco desenvolvida, tendo sido publicada a primeira legislação para regular a produção e gestão de RCD apenas em 2008. Segundo a *QUERCUS*, estima-se que cerca de 95% dos RCD gerados tenham como destino final o depósito em aterro ou sejam recolhidos por empresas não licenciadas (Pacheco e Jalali, 2010) com destino final em depósitos ilegais, que dão origem a vazadouros de outro tipo de resíduos (orgânicos, plásticos, vidro, madeira, etc.), constituindo um problema de saúde pública, degradação da paisagem e contaminação.

Actualmente, face à crise económica e às exigências de desenvolvimento sustentável, a tecnologia do betão requer uma nova abordagem, assente essencialmente em três vectores: métodos de produção e colocação com menor consumo de energia, melhoria da durabilidade das estruturas e maior taxa de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), nomeadamente através da sua reintrodução (reutilização) no processo construtivo.

A utilização de betões auto-compactáveis e a incorporação de agregados reciclados na produção de argamassas e betões são soluções com grande potencial, em particular para a indústria da pré-fabricação, onde os requisitos gerais exigidos ao produto final são superiores. Por esse motivo, os resíduos provenientes desta indústria são também aqueles com maior potencial para serem usados como AR de elevada qualidade na produção de novos elementos de betão.

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.

3. Propriedades do betão no estado fresco

Neste subcapítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao BAC no estado fresco. 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.

3.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com a NP EN 12350-8:2010. Na **Figura 1** e na **Figura 2**, apresenta-se os resultados obtidos para o tempo de espalhamento (T_{500}) em ambas as famílias (PF 45 e PF 65), e, na **Figura 3** e na **Figura 4**, o seu diâmetro médio (SF).

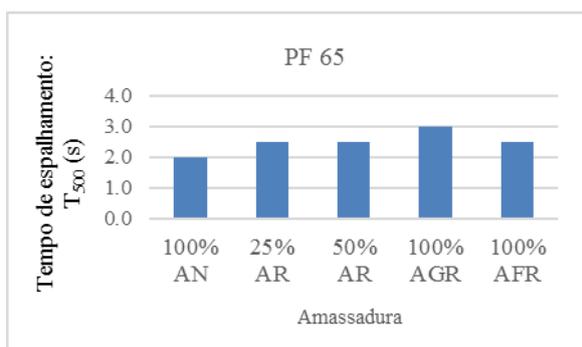


Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 65)

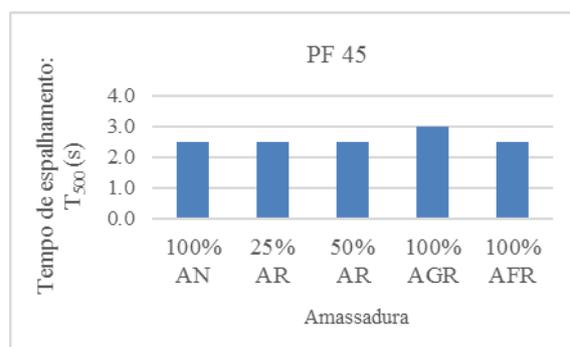


Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (PF 45)

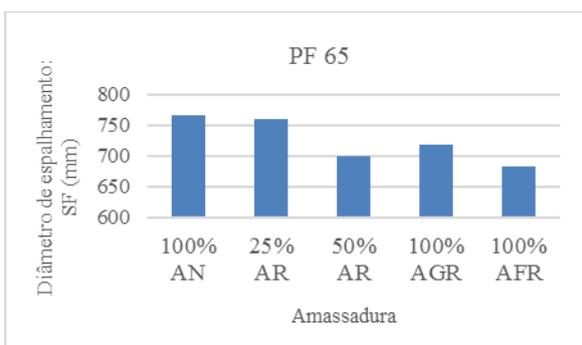


Figura 3 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 65)

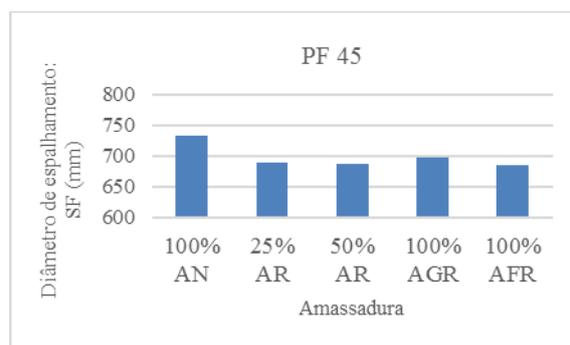


Figura 4 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (PF 45)

Verifica-se que, em geral, o diâmetro de espalhamento diminui (e, de forma consonante, o tempo de espalhamento aumenta, embora a variação seja muito reduzida) à medida

que aumenta a percentagem de incorporação de AR. Este facto deve-se à maior absorção dos AR em relação aos AN. Apesar de ter sido contemplada uma compensação de água de amassadura devido à sua maior absorção, quanto maior a percentagem de AR na mistura, maior a quantidade de água absorvida pelos agregados (a maior rugosidade dos AR também contribui para a diminuição do espalhamento). Esta tendência foi confirmada por Grdic *et al.* (2010) e Kebaïli *et al.* (2015).

No decorrer do ensaio, foi possível observar que o agregado grosso se distribuiu de forma homogênea pela pasta, até à periferia, sem ocorrência de fenómenos de exsudação. Os valores de SF situam-se dentro do intervalo $660 \leq SF \leq 750$ (mm), à excepção das amassaduras 100% AN e 25% AR da família PF 65. No entanto, o desvio máximo foi de 15 mm, o que se pode considerar desprezável. Conclui-se, portanto, que o BAC tem fluidez e velocidade de escoamento na ausência de obstruções adequadas.

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. Na **Figura 5** e na **Figura 6**, apresenta-se os resultados obtidos para o tempo de escoamento pelo funil (T_v).

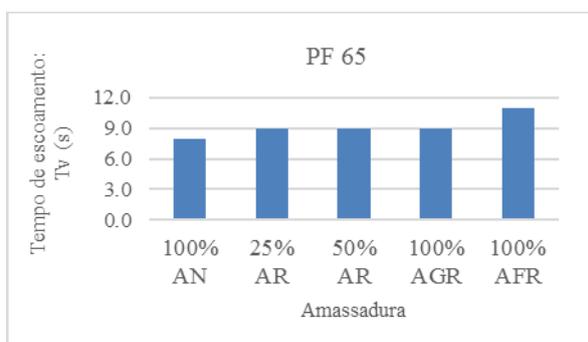


Figura 5 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 65)

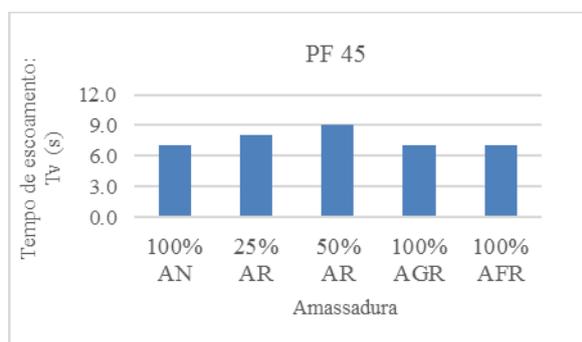


Figura 6 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de escoamento (PF 45)

Verifica-se que, para a família PF 65, o tempo de escoamento aumenta com a percentagem de AR (embora a variação seja muito reduzida), consequência da sua maior absorção de água e superfície mais rugosa, relativamente aos AN, o que também foi verificado por Tuyan *et al.* (2014).

Na família PF 45, esta tendência só se verifica até 50% de substituição de AR, diminuindo

para percentagens superiores, possivelmente devido à adição de uma quantidade de água um pouco superior à estritamente necessária para compensar a absorção dos agregados. No entanto, todos os resultados verificam o limite $T_v \geq 7$ s, não se tendo verificado qualquer bloqueio de agregado grosso na passagem estreita do funil ou fenómenos de exsudação, pelo que se conclui que o BAC tem viscosidade e capacidade de passagem adequadas.

3.3. Ensaio de escoamento na caixa L

O ensaio de escoamento na caixa L foi realizado de acordo com a NP EN 12350-10:2010. Na **Figura 7** e na **Figura 8**, apresenta-se os resultados obtidos para o índice de capacidade de passagem na caixa L (PL).

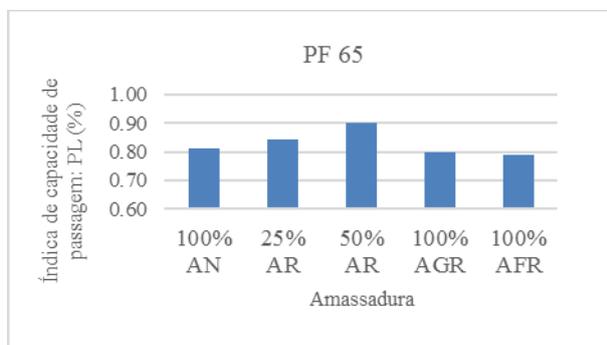


Figura 7 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 65)

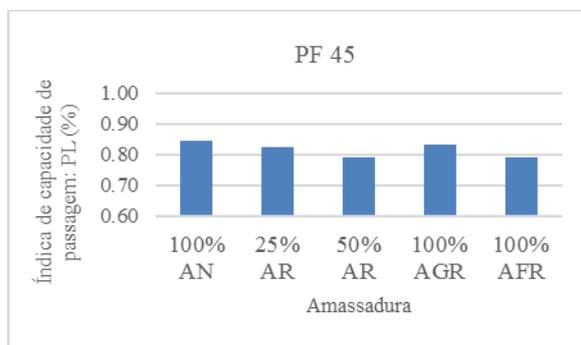


Figura 8 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de capacidade de passagem (PF 45)

Observa-se tendências diferentes para cada família. Na família PF 65, o índice de capacidade de passagem aumenta com a introdução de AR, o que também foi verificado nas campanhas de Kou e Poon (2009) e Grdic *et al.* (2010), enquanto na família PF 45 diminui, o que também foi verificado por Kebaïli *et al.* (2015). Este facto deve-se à maior absorção de água dos AGR em relação aos AN.

Apesar das diferenças, os betões respeitam o limite $PL \geq 0,80$ (algumas amassaduras divergem em apenas 1%), não se tendo verificado ocorrência de exsudação, pelo que se conclui que os BAC têm capacidade de escoamento adequada através de espaços confinados.

3.4. Ensaio de segregação no peneiro

O ensaio de resistência à segregação no peneiro foi realizado de acordo com a NP EN 12350-11:2010. Na Figura 9 e na Figura 10, apresenta-se os resultados obtidos para o índice

de segregação (SR), correspondente à proporção da amostra que passou através do peneiro.

Verifica-se que o índice de segregação tende a diminuir com a introdução de AFR, devido à maior absorção de água dos AR em relação aos AN. Esta tendência foi também verificada por Grdic *et al.* (2010), sendo a justificativa apresentada idêntica.

Todas as amassaduras verificam o disposto na norma, ou seja, $SR \leq 20\%$, pelo que se conclui que os BAC estudados têm adequada resistência à segregação.

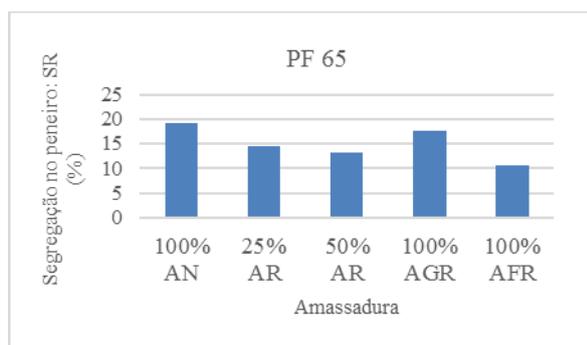


Figura 9 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 65)

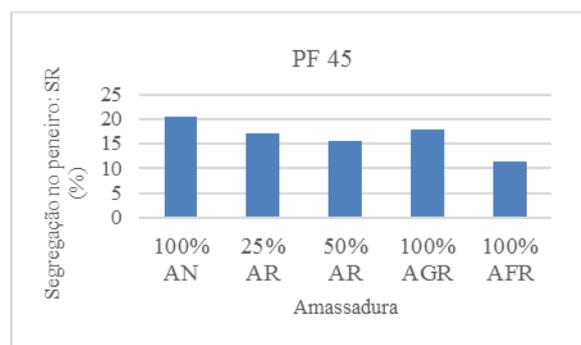


Figura 10 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (PF 45)

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. Na **Figura 11** à **Figura 14**, apresenta-se os resultados obtidos para o espalhamento (SFJ) e a capacidade de passagem no anel J (PJ), para ambas as famílias de BAC.

Verifica-se que o espalhamento no anel J diminui com a introdução de AR (e o tempo de espalhamento aumenta) e a capacidade de passagem aumenta, devido à maior absorção de água dos AR em relação aos AN.

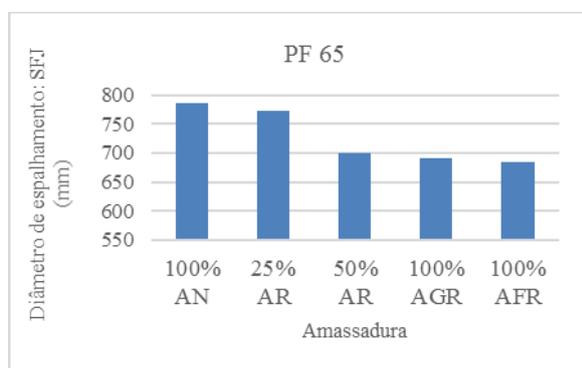


Figura 11 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 65)

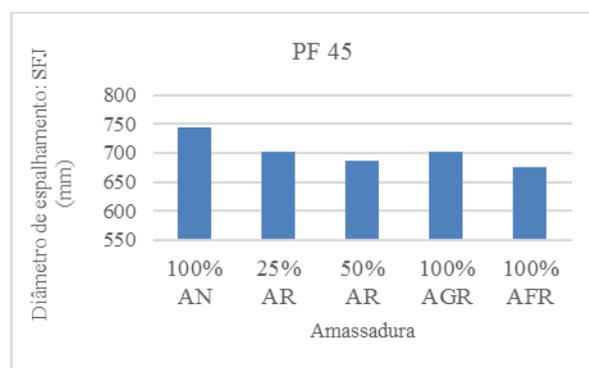


Figura 12 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (PF 45)

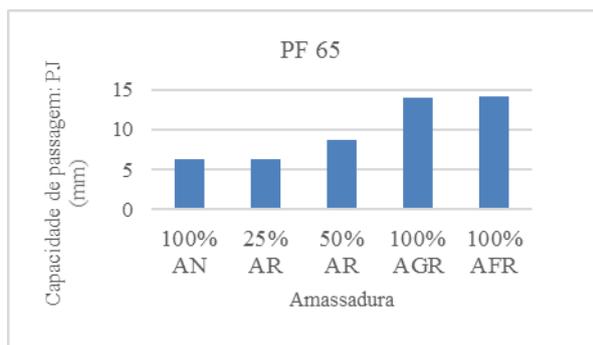


Figura 13 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 65)

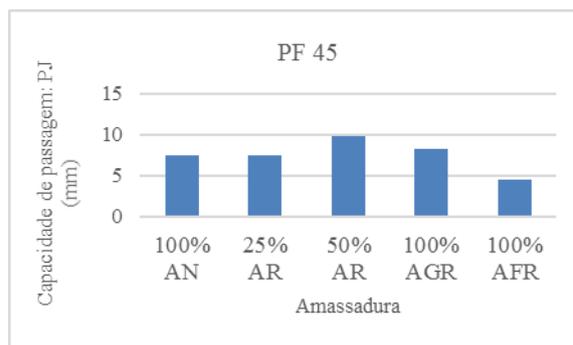


Figura 14 - Resultados do ensaio no anel J: capacidade de passagem (PF 45)

Como se pode observar na **Figura 15** e na **Figura 16**, os resultados do diâmetro de espalhamento no anel J e do diâmetro de espalhamento (obtidos no ensaio de espalhamento) estão fortemente correlacionados, com coeficientes de relação linear de 0,90 e 0,92, para as famílias PF 65 e PF 45, respectivamente.

Safiuddin *et al.* (2011) verificaram tendência semelhante, obtendo 0,99 de coeficiente de relação. Isto significa que os espalhamentos variam de forma semelhante com o conteúdo de AR, ou seja, a fluidez e capacidade de passagem estão diretamente interligadas.

Para todas as amassaduras, verifica-se que $SFJ \geq 480$ mm e, à exceção das amassaduras 100% AGR e 100% AFR da família PF 65, $SPJ \leq 10$ mm (divergindo apenas em 4 mm), pelo que se conclui que os BAC possuem capacidade de passagem adequada através de espaços estreitos.

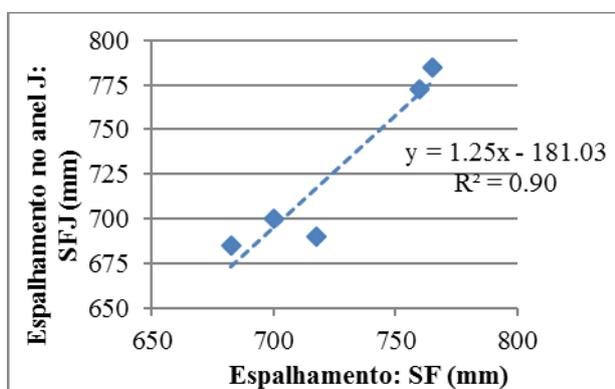


Figura 15 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento no anel J (PF 65)

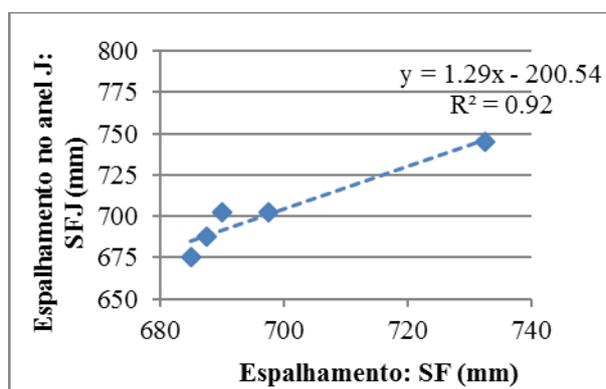


Figura 16 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento no anel J (PF 45)

4. Propriedades do betão no estado endurecido

Terminada a produção das duas famílias de BAC e alcançada a idade definida no procedimento experimental de cada uma das normas, realizou-se os ensaios ao betão no estado endurecido, fornecendo, pela primeira vez, informações reais e específicas sobre o desempenho do betão em termos mecânicos e de durabilidade. Assim, neste subcapítulo, vai-se proceder à análise dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e de durabilidade realizados ao longo da campanha experimental.

4.1. Propriedades em termos mecânicos

Os ensaios mecânicos permitem avaliar o comportamento físico do betão. Foram realizados os seguintes ensaios: massa volúmica e velocidade de propagação de ultra-sons, resistência à compressão em cubos e em cilindros, resistência à tracção por compressão diame-tral, módulo de elasticidade, resistência à abrasão, deformação por retracção e fluência.

4.1.1. Massa volúmica

O ensaio para a determinação da massa volúmica do BAC foi realizado de acordo com a NP EN 12390-7:2000, aos 7, 28 e 91 dias de idade. Na **Tabela 1** e na **Tabela 2**, são apresentados os resultados relativos às duas famílias.

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

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)
100% AN	2362,8	6,4	0,0	2362,8	12,2	0,0	2378,0	18,0	0,0
25% AR	2308,5	7,9	-2,3	2317,8	1,7	-1,9	2336,8	19,5	-1,7
50% AR	2282,4	14,1	-3,4	2293,0	10,8	-3,0	2296,3	7,4	-3,4
100% AGR	2258,8	4,9	-4,4	2281,3	9,3	-3,4	2286,3	3,7	-3,9
100% AFR	2246,0	17,7	-4,9	2254,0	6,8	-4,6	2270,2	9,7	-4,5

Tabela 2 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Massa volúmica	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)		(%)
100% AN	2200,2	20,9	0,0	2214,2	15,0	0,0	2224,3	13,7	0,0
25% AR	2176,2	22,8	-1,1	2181,0	4,4	-1,5	2198,3	32,6	-1,2
50% AR	2165,3	35,6	-1,6	2174,2	17,4	-1,8	2182,6	16,1	-1,9
100% AGR	2156,8	17,8	-2,0	2170,0	2,8	-2,0	2181,5	19,7	-1,9
100% AFR	2145,4	20,1	-2,5	2153,6	15,6	-2,7	2155,5	15,8	-3,1

Verifica-se que, para cada amassadura, a massa volúmica aumenta com a idade, embora de forma muito pouco acentuada (aumento inferior a 2%, dos 7 aos 91 dias). Quanto mais avançada é a idade do betão, maior o período de cura a que esteve submetido, o que introduz maior quantidade de água no betão, aumentando a sua massa.

Através da análise da **Figura 17** e da **Figura 18**, verifica-se que a massa volúmica diminui com a introdução de AR, dada a sua menor massa volúmica relativamente aos AN. As amassaduras 100% AFR são as que apresentam maiores perdas de massa volúmica, com uma perda de 5% para a família PF 65 e 3% para a família PF 45. A mesma tendência foi verificada no estudo de Pereira-de-Oliveira *et al.* (2014), em que se registou uma perda de 3% de massa volúmica em relação ao BAC de referência, no betão com 100% de AR).

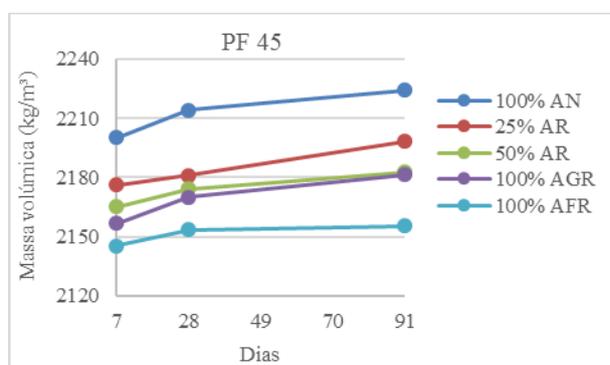
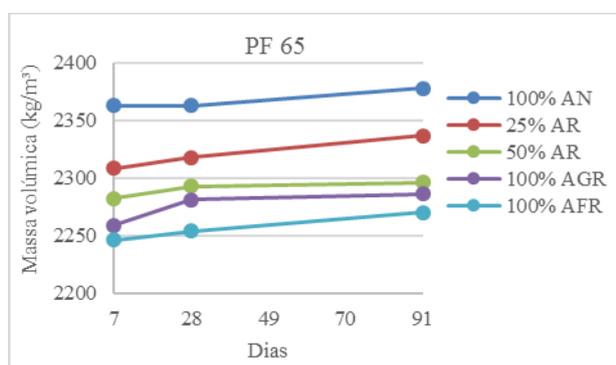


Figura 17 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Figura 18 - Massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

4.1.2. Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão em cubos foi realizado segundo a NP EN 12390-3:2011, aos 7, 28 e 91 dias de idade. Os resultados obtidos para ambas as famílias de BAC são apresentados na **Tabela 3**, **Tabela 4**, **Figura 19** e na **Figura 20**.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade (como expectável). Todos os BAC desenvolvem resistências de forma rápida até aos 7 dias de idade, atingindo em média, 71% da resistência em relação aos 91 dias de idade para a família PF 65 e 57% para a família PF 45, o que é justificado pela presença de fíler calcário (Grdic et al., 2010).

Analisando a **Figura 19** e a **Figura 20**, verifica-se que a substituição de AN por AR provoca uma redução da resistência, em relação ao BAC de referência (100% AN) de 2-14%

para a família PF 65 e de 4-32% para a família PF 45. As perdas são semelhantes aos 7, 28 e 91 dias.

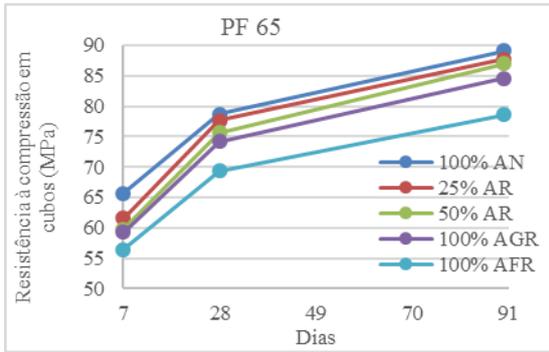


Figura 19 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

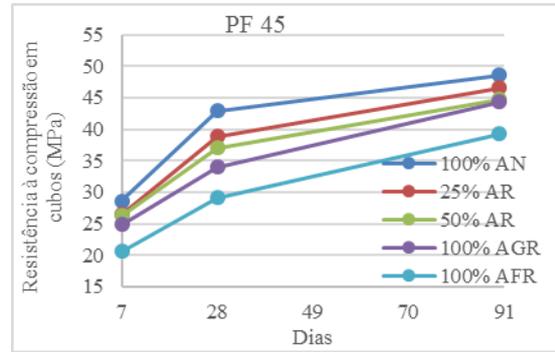


Figura 20 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

A redução de desempenho desta propriedade deve-se ao aumento da relação a/c, causado pela elevada absorção do material reciclado e pela sua forma achatada e angulosa. A argamassa aderida aos AR provoca ainda um aumento da porosidade e fissuração dos agregados, tornando mais fracas as ligações na zona de transição entre o agregado reciclado e a nova pasta (2014).

Tabela 3 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	65,7	0,4	0,0	78,7	0,7	0,0	89,1	1,4	0,0
25% AR	61,6	0,3	-6,2	77,6	0,9	-1,4	87,7	0,7	-1,5
50% AR	59,8	1,1	-8,9	75,6	0,5	-3,9	87,0	0,3	-2,4
100% AGR	59,2	0,5	-9,8	74,2	1,0	-5,7	84,6	0,5	-5,0
100% AFR	56,4	0,4	-14,1	69,3	0,5	-11,9	78,6	0,8	-11,8

Tabela 4 - Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cubos	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	28,6	0,6	0,0	42,9	2,5	0,0	48,5	3,5	0,0
25% AR	26,5	1,6	-7,5	38,9	1,5	-9,5	46,6	1,0	-4,0
50% AR	26,3	0,4	-8,1	37,0	0,3	-13,8	44,7	3,0	-7,9
100% AGR	24,8	2,7	-13,2	34,0	3,5	-20,8	44,3	0,5	-8,8
100% AFR	20,6	1,8	-28,0	29,1	1,5	-32,3	39,3	1,0	-19,1

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 reduções de 8 e 5%, respectivamente, compa-

rando o BAC com 100% AN e o BAC com 100% 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 envolve os mesmos.

Os resultados obtidos mostram que os BAC de referência (100% AN) apresentam a resistência à compressão mais elevada, atingindo 78 e 43 MPa aos 28 dias de idade, para as famílias PF 65 e PF 45, respectivamente. Os BAC com 100% AFR são os que apresentam menor resistência: 69 e 29 MPa, respectivamente para a família PF 65 e PF 45 (com reduções de 12 e 32% em relação ao BAC de referência). Conclui-se, portanto, que o objectivo de reproduzir a mesma resistência do betão de origem apenas foi atingido na família PF 65.

Na **Figura 21**, apresenta-se, como exemplo, as roturas obtidas nos provetes cúbicos PF 45 no final do ensaio, aos 91 dias, verificando-se que são satisfatórias, de acordo com a NP EN 12390-3:2011.

Através da análise da **Figura 22** e da **Figura 23**, é possível observar a existência de relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica (relação linear com R^2 entre 0,81 e 0,96).



Figura 21 - Rotura apresentada pelos betões PF 45 aos 91 dias de idade

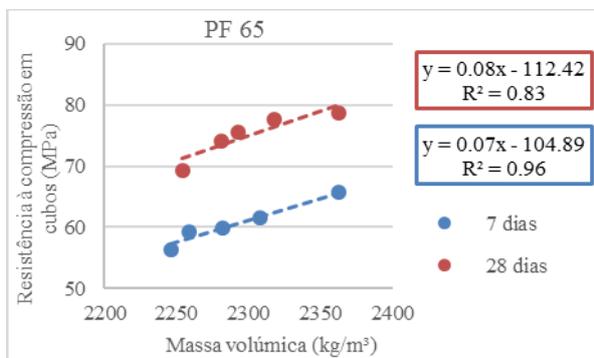


Figura 22 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7 e 28 dias (PF 65)

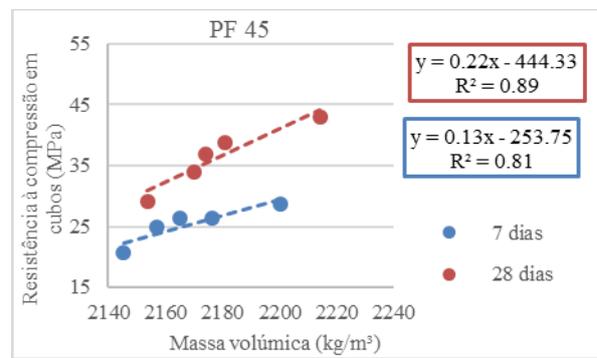


Figura 23 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aos 7 e 28 dias (PF 45)

4.1.3. Resistência à compressão em cilindros

O ensaio de resistência à compressão em cilindros foi realizado segundo a NP EN 12390-3:2011, aos 28 e 91 dias de idade. Os resultados obtidos para ambas as famílias de BAC são apresentados na **Tabela 5**, **Tabela 6**, **Figura 24** e na **Figura 25**.

É possível observar uma redução da resistência à compressão com a crescente substituição de AN por AR, tal como na resistência à compressão em cubos, sendo a justificação para esse facto idêntica. As variações ocorridas situam-se entre 3 e 12% para a família PF 65 e entre 3 e 24% para a família PF 45. Como seria expectável, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade.

Tabela 5 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. à compressão em cilindros	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cilindros	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	74,1	2,4	0,0	80,5	4,4	0,0
25% AR	72,0	3,5	-2,8	78,5	5,0	-2,5
50% AR	68,4	1,6	-7,7	76,8	0,9	-4,5
100% AGR	66,5	1,8	-10,2	74,6	1,4	-7,3
100% AFR	64,94	5,64	-12,4	70,93	0,60	-11,85

Tabela 6 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. à compressão em cilindros	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à compressão em cilindros	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	37,0	1,3	0,0	48,9	2,9	0,0
25% AR	36,1	2,8	-2,5	46,8	0,3	-4,2
50% AR	33,5	1,6	-9,6	45,5	1,9	-6,9
100% AGR	32,0	2,3	-13,7	43,9	1,0	-10,2
100% AFR	28,3	5,5	-23,7	41,9	3,7	-14,2

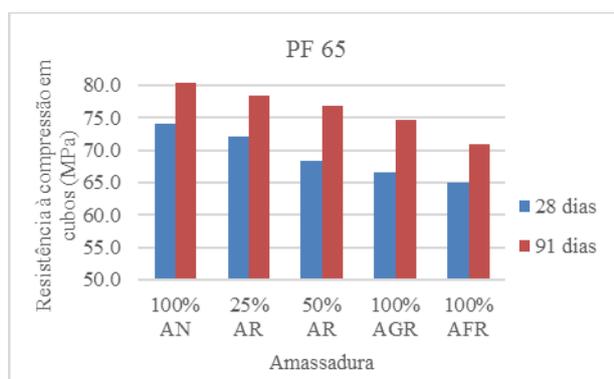


Figura 24 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

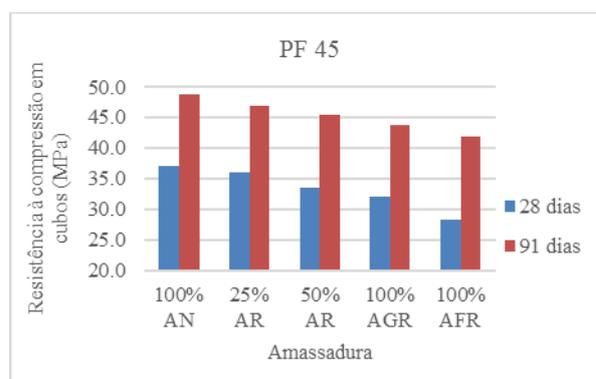


Figura 25 - Resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)

Na **Figura 26**, apresenta-se, como exemplo, as roturas obtidas nos provetes cilíndricos PF 65 no final do ensaio, aos 91 dias, verificando-se que são satisfatórias, de acordo com a NP EN 12390-3:2011.

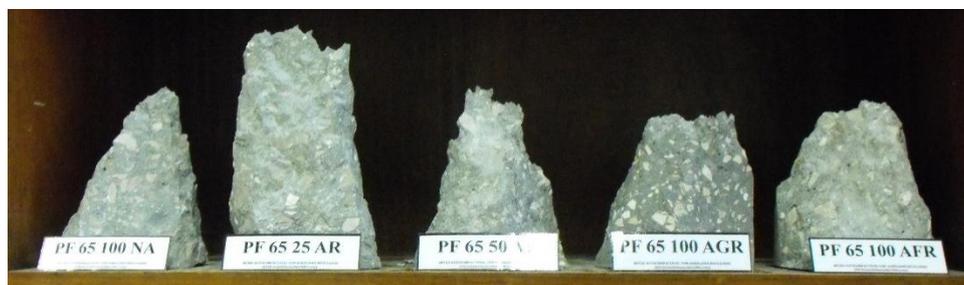


Figura 26 - Rotura apresentada pelos betões PF 65 aos 91 dias de idade

Na **Tabela 7** e na **Tabela 8**, apresenta-se o cálculo da relação entre a resistência à compressão em provetes cúbicos e cilíndricos, ou seja, o factor de conversão de cubos de 150 mm de aresta para cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Tabela 7 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. médias obtidas (MPa)		Relação da resist. cilindro / cubo	Resist. médias obtidas (MPa)		Relação da resist. cilindros / cubos
	Cubos	Cilindros		Cubos	Cilindros	
100% AN	78,7	74,1	0,94	89,1	80,5	0,90
25% AR	77,6	72,0	0,93	87,7	78,5	0,89
50% AR	75,6	68,4	0,90	87,0	76,8	0,88
100% AGR	74,2	66,5	0,90	84,6	74,6	0,88
100% AFR	69,3	64,9	0,94	78,6	70,9	0,90

Tabela 8 - Relações das resistências obtidas aos 28 e 91 dias em cubos e cilindros (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. médias obtidas (MPa)		Relação da resist. cilindros / cubos	Resist. médias obtidas (MPa)		Relação da resist. cilindros / cubos
	Cubos	Cilindros		Cubos	Cilindros	
100% AN	42,9	37,0	0,86	48,5	48,9	0,99
25% AR	38,9	36,1	0,93	46,6	46,8	1,00
50% AR	37,0	33,5	0,90	44,7	45,5	0,98
100% AGR	34,0	32,0	0,94	44,3	43,9	0,99
100% AFR	29,1	28,3	0,97	39,3	41,9	0,94

Verifica-se que a tensão de rotura nos cilindros é, em média, 0,91 e 0,95 (para a família PF 65 e PF 45, respectivamente) da tensão de rotura dos cubos.

Na **Figura 27** e na **Figura 28**, é possível observar a correlação elevada nos valores obtidos: $R^2 = 0,85$ e $R^2 = 0,94$ (PF 65) e $R^2 = 0,96$ e $R^2 = 0,92$ (PF 45). 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).

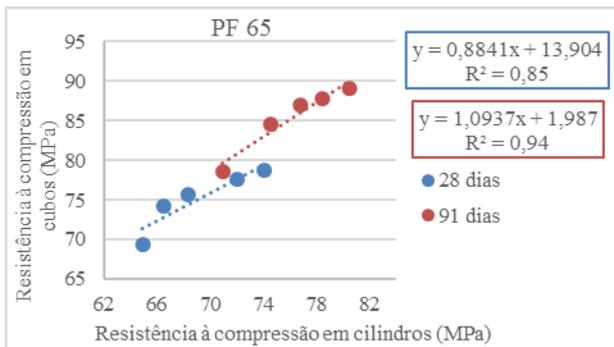


Figura 27 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

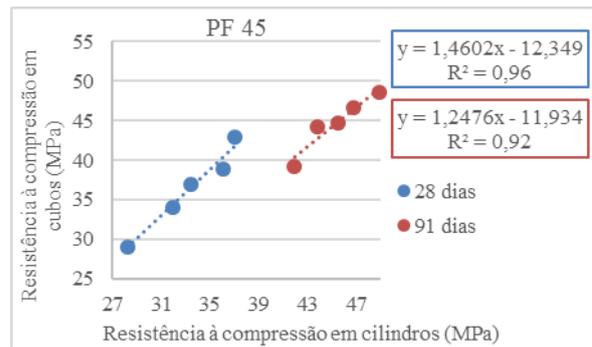


Figura 28 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)

Na **Tabela 9** e na **Tabela 10**, apresenta-se a comparação entre os valores de resistência característica obtidos em cubos e cilindros aos 28 dias e os especificados na NP EN 206-1:2005. 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, em que f_{cm} é a resistência média à compressão do betão:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ [MPa]}$$

Tabela 9 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206-1:2005 (PF 65)

Amassadura	Valores obtidos experimentalmente				Valores da NP EN 206-1		
	Resist. média à comp. em cilindros	Resist. média à comp. em cubos	Resist. caract. à comp. em cilindros	Resist. caract. à comp. em cubos	Classe de resist. à comp.	Resist. caract. mínima à comp. em cilindros	Resist. caract. mínima à comp. em cubos
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cube}$	$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$		$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$
(MPa)				(MPa)			
100% AN	74,1	78,7	66,1	70,7	C55/67	55	67
25% AR	72,0	77,6	64,0	69,6	C55/67	55	67
50% AR	68,4	75,6	60,4	67,6	C55/67	55	67
100% AGR	66,5	74,2	58,5	66,2	C50/60	50	60
100% AFR	64,9	69,3	56,9	61,3	C50/60	50	60

Tabela 10 - Classes de resistência à compressão de acordo com a norma NP EN 206-1:2005 (PF 45)

Amassadura	Valores obtidos experimentalmente				Valores da NP EN 206-1		
	Resist. média à comp. em cilindros	Resist. média à comp. em cubos	Resist. caract. à comp. em cilindros	Resist. caract. à comp. em cubos	Classe de resist. à comp.	Resist. caract. mínima à comp. em cilindros	Resist. caract. mínima à comp. em cubos
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cube}$	$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$		$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$
(MPa)				(MPa)			
100% AN	37,0	42,9	29,0	34,9	C25/30	25	30
25% AR	36,1	38,9	28,1	30,9	C25/30	25	30
50% AR	33,5	37,0	25,5	29,0	C20/25	20	25
100% AGR	32,0	34,0	24,0	26,0	C20/25	20	25
100% AFR	28,3	29,1	20,3	21,1	C16/20	16	20

Analisando as tabelas, verifica-se que, para a família PF 65, os betões 100% AGR e 100% AFR pertencem à classe de resistência C50/60, pertencendo os restantes à classe C55/67. Para a família PF 45, o betão 100% AFR pertence à classe C16/20 (betão com pior desempenho), o betão 100% AGR pertence à classe C20/25 e os restantes à classe C25/30. Esta classificação vem reforçar o que já se havia concluído do ensaio de resistência à compressão em cubos: apenas para a família PF 65 se conseguiu reproduzir a mesma resistência do betão de origem dos AR.

4.1.4. Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi realizado segundo a NP EN 12390-6:2011, aos 28 e 91 dias de idade. Os resultados obtidos para ambas as famílias de BAC são apresentados na **Tabela 11**, **Tabela 12**, **Figura 29** e na **Figura 30**.

Tabela 11 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	5,5	0,6	0,0	6,7	0,1	0,0
25% AR	4,9	0,5	-10,2	6,1	0,2	-9,4
50% AR	4,8	0,5	-12,3	5,7	0,9	-14,3
100% AGR	4,5	0,3	-18,6	5,6	0,4	-16,9
100% AFR	4,2	0,3	-22,8	4,9	0,0	-26,7

Tabela 12 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Resist. à tracção	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	3,9	0,1	0,0	4,7	0,0	0,0
25% AR	3,5	0,3	-11,8	4,0	0,4	-14,0
50% AR	2,9	0,1	-26,1	3,7	0,3	-21,1
100% AGR	2,6	0,4	-33,5	3,5	0,1	-26,6
100% AFR	2,4	0,1	-38,7	3,3	0,4	-29,0

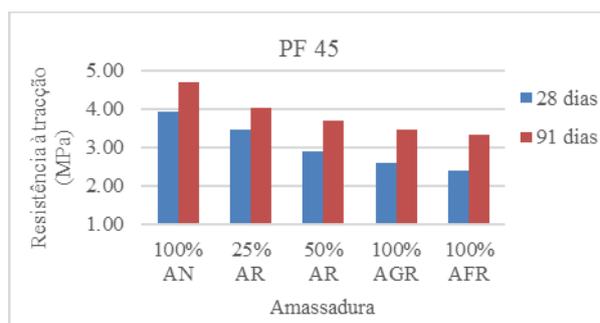
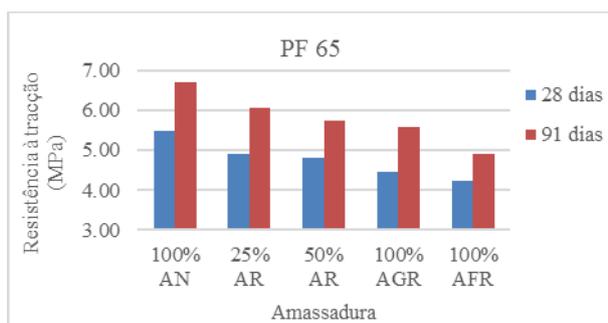


Figura 29 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 65)

Verifica-se que a resistência aumenta com a idade do betão, como expectável, sendo que aos 28 dias os betões atingem, em média, 83% da resistência aos 91 dias de idade para a família PF 65 e 79% para a família PF 45. Panda e Bal (2013), no seu estudo, obtiveram resultados semelhantes: aos 28 dias, a resistência atingiu 85% em relação aos 90 dias.

Figura 30 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 91 dias (PF 45)

A **Figura 29** e **Figura 30** mostram ainda que a substituição de AN por AR provoca uma redução da resistência à tracção, em relação ao BAC de referência (100% AN) de 9-27% para a família PF 65 e de 12-39% para a família PF 45, sendo que a resistência mais baixa corresponde ao betão com 100% AFR. Esta redução é explicada pela argamassa aderida aos agregados naturais originais (Panda e Bal, 2013). Comparando o BAC com 100% AN e o BAC com 100% AR (aos 28 dias), Kou e Poon (2009) e Modani e Mohitkar (2014) obtiveram perdas de resistência de 36% e 37%, respectivamente.

Na **Figura 31**, apresenta-se, como exemplo, as superfícies de rotura obtidas nos provetes cilíndricos PF 45 no final do ensaio, aos 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. Observa-se a ocorrência de algumas bolhas de ar devido ao ar aprisionado, uma vez que o BAC não sofre processo de vibração. No entanto, estas não constituem um problema, pois não se encontram interligadas entre si.



Figura 31 - Superfícies de rotura apresentadas pelos betões PF 45 aos 91 dias de idade

Na **Figura 32** e na **Figura 33**, é possível observar uma correlação elevada entre a resistência à compressão uniaxial e a resistência à compressão diametral: $R^2 = 0,91$ e $R^2 = 0,95$ (PF 65) e $R^2 = 0,89$ e $R^2 = 0,92$ (PF 45), pelo que se conclui que há uma forte ligação entre estas duas propriedades.

O Quadro 3.1 do EC2:2008 apresenta uma fórmula para o cálculo da resistência média à tracção (f_{ctm}) a partir de valores médios de resistência à compressão obtidos experimentalmente (f_{cm}):

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

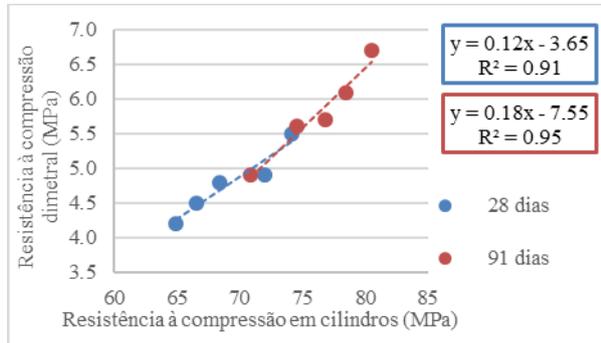


Figura 32 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 65)

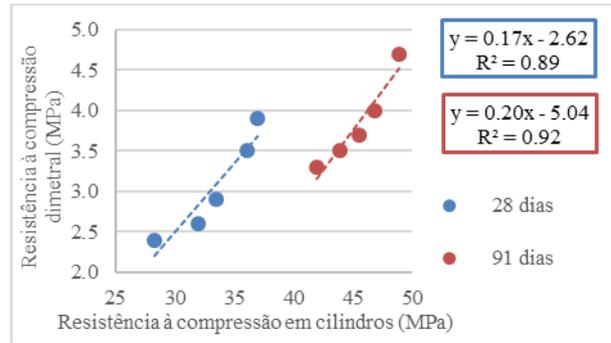


Figura 33 - Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)

Comparando os resultados da resistência à tracção obtidos experimentalmente com os valores obtidos através desta expressão (Tabela 13 e Tabela 14), verifica-se que estes são próximos. No geral, em ambas as famílias, as resistências obtidas experimentalmente são ligeiramente superiores às calculadas pelo EC2.

Tabela 13 - Relação entre a resistência à compressão e à tracção, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Resist. à tracção por comp. diametral		Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Resist. à tracção por comp. diametral	
		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente
	(MPa)			(MPa)		
100% AN	74,1	4,5	5,5	80,5	4,7	6,7
25% AR	72,0	4,5	4,9	78,5	4,6	6,1
50% AR	68,4	4,4	4,8	76,8	4,6	5,7
100% AGR	66,5	4,3	4,5	74,6	4,5	5,6
100% AFR	64,9	4,3	4,2	70,9	4,4	4,9

Tabela 14 - Relação entre a resistência à compressão e à tracção, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Resist. à tracção por comp. diametral		Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Resist. à tracção por comp. diametral	
		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente
	(MPa)			(MPa)		
100% AN	37,0	3,3	3,9	48,9	3,8	4,7
25% AR	36,1	3,2	3,5	46,8	3,7	4,0

50% AR	33,5	3,1	2,9	45,5	3,6	3,7
100% AGR	32,0	3,0	2,6	43,9	3,6	3,5
100% AFR	28,3	2,8	2,4	41,9	3,5	3,3

4.1.5. Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi realizado segundo a especificação LNEC 397:1993, aos 28 e 91 dias de idade. Os resultados obtidos para ambas as famílias de BAC são apresentados na **Tabela 16**, **Tabela 15**, **Figura 34** e **Figura 35**.

Tabela 16 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	45,8	0,5	0,0	46,0	0,3	0,0
25% AR	40,9	0,8	-10,6	41,1	0,6	-10,6
50% AR	37,3	0,1	-18,6	37,8	0,7	-17,9
100% AGR	38,1	0,6	-16,8	39,2	0,4	-14,8
100% AFR	34,0	1,3	-25,7	35,3	0,4	-23,3

Tabela 17 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Módulo de elasticidade	D.P.	$\Delta_{100\% NA}$
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
100% AN	30,2	0,2	0,0	33,1	0,2	0,0
25% AR	29,6	1,2	-2,0	32,2	0,1	-2,7
50% AR	28,1	0,4	-7,1	30,0	0,1	-9,3
100% AGR	28,2	0,1	-6,9	30,5	0,3	-7,8
100% AFR	26,5	0,2	-12,3	28,6	0,2	-13,5

Analisando os resultados, verifica-se uma redução do módulo de elasticidade com o aumento da taxa de incorporação de AR, registrando-se variações máximas de 26%/23%, respectivamente aos 28 e 91 dias, para a família PF 65 e de 12%/14% para a família PF 45. Pereira-Oliveira *et al.* (2014) obtiveram uma redução de 5% para 100% AR, aos 28 dias.

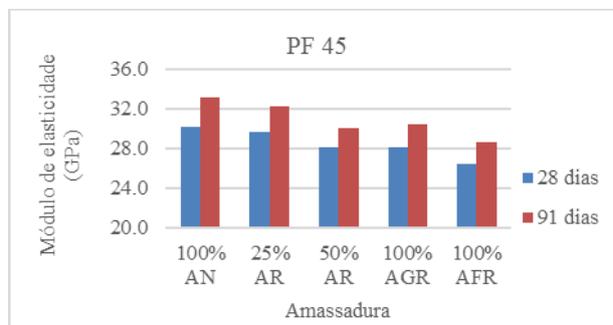
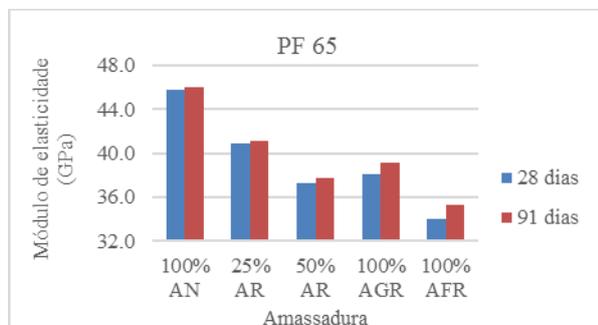


Figura 34 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 65) **Figura 35 - Módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45)**

A redução do módulo de elasticidade é explicada pela menor rigidez dos AR (em comparação com os AN), dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e com maior deformabilidade do que estes (2014).

O Quadro 3.1 do EC2:2008 apresenta uma fórmula para o cálculo do módulo de elasticidade médio (E_{cm}) a partir de valores médios de resistência à compressão obtidos experimentalmente em cilindros (f_{cm}):

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

Comparando os resultados do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente para a família PF 65 com os valores obtidos através desta expressão (**Tabela 18**), verifica-se que estes são próximos. Os betões 100% AN e 25% AR apresentam valores de módulo de elasticidade superiores aos definidos pelo EC2, enquanto os restantes betões apresentam valores ligeiramente inferiores.

Tabela 18- Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, de acordo com o EC2:2008, aos 28 e 91 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Módulo de elasticidade		Resist. média à comp. obtida experimentalmente	Módulo de elasticidade	
		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente		Valor calculado pelo EC2	Valor obtido experimentalmente
	(MPa)	(GPa)		(MPa)	(GPa)	
100% AN	74,1	40,1	45,8	80,5	41,1	46,0
25% AR	72,0	39,8	40,9	78,5	40,8	41,1
50% AR	68,4	39,2	37,3	76,8	40,6	37,8
100% AGR	66,5	38,8	38,1	74,6	40,2	39,2
100% AFR	64,9	38,6	34,0	70,9	39,6	35,3

Na **Figura 36** e na **Figura 37**, é possível observar uma correlação elevada entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica: $R^2 = 0,93$ e $R^2 = 0,90$ (28 e 91 dias) para a resistência à compressão em cubos e $R^2 = 0,96$ e $R^2 = 0,89$ para a resistência à compressão em cilindros, pelo que se conclui que há uma forte ligação entre estas duas propriedades.

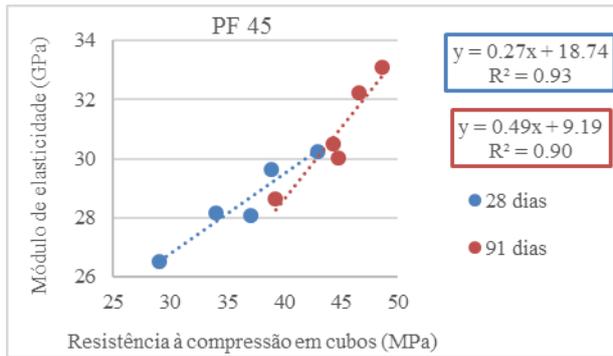


Figura 36 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cubos aos 28 e 91 dias (PF 45)

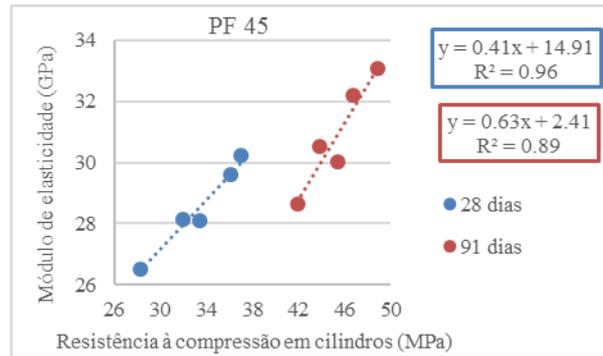


Figura 37 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros aos 28 e 91 dias (PF 45)

4.1.6. 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 NP EN 12504-4:2007, aos 7, 28 e 91 dias de idade. Na **Tabela 19**, **Tabela 20**, **Figura 38** e na **Figura 39**, são apresentados os resultados obtidos para ambas as famílias de BAC.

Tabela 19- 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.	$\Delta_{100\% AN}$	$V_{usm,c}$	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	$V_{usm,c}$	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(m/s)		(%)	(m/s)		(%)	(m/s)		(%)
100% AN	4948,3	23,2	0,0	5146,7	42,9	0,0	5152,4	23,0	0,0
25% AR	4837,1	42,9	-2,2	5065,0	65,9	-1,6	5130,4	20,3	-0,4
50% AR	4786,9	72,9	-3,3	4961,8	27,1	-3,6	5051,5	47,5	-2,0
100% AGR	4759,2	7,3	-3,8	4875,1	79,8	-5,3	4913,3	70,5	-4,6
100% AFR	4712,2	20,5	-4,8	4743,5	37,3	-7,8	4847,5	30,5	-5,9

Tabela 20 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	7 dias			28 dias			91 dias		
	E_{dm}	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	E_{dm}	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	E_{dm}	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(GPa)		(%)	(GPa)		(%)	(GPa)		(%)
100% AN	4526,8	108,4	0,0	4708,6	21,3	0,0	4795,4	31,4	0,0
25% AR	4488,4	120,2	-0,8	4684,1	59,4	-0,5	4779,0	71,6	-0,3
50% AR	4439,9	26,0	-1,9	4662,8	38,3	-1,0	4753,2	42,8	-0,9
100% AGR	4387,2	9,4	-3,1	4647,8	51,0	-1,3	4740,4	9,4	-1,1
100% AFR	4372,5	67,3	-3,4	4601,3	82,3	-2,3	4710,0	106,6	-1,8

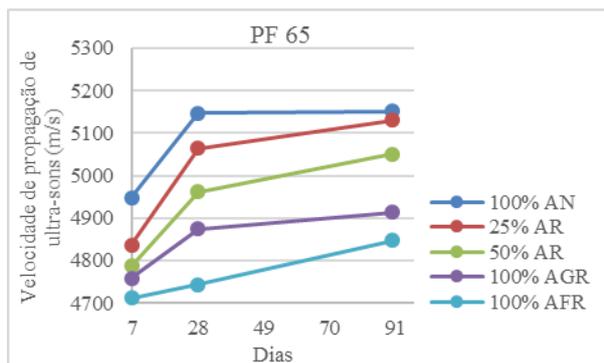


Figura 38 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 65)

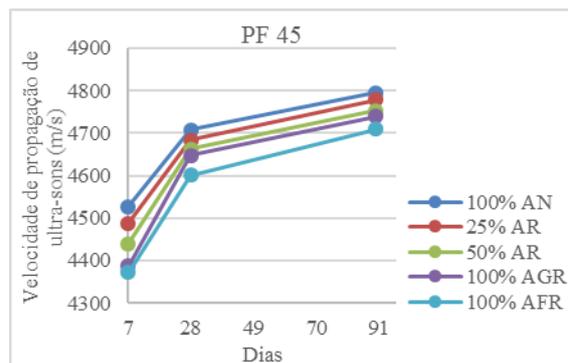


Figura 39 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

Verifica-se uma diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons com o aumento da taxa de incorporação de AR, sendo que o BAC de referência (100% AN) apresenta maior velocidade de propagação, atingindo 5152 m/s (PF 65) e 4795 m/s (PF 45), aos 91 dias. Por outro lado, o BAC com 100% AFR apresenta menor velocidade de propagação, com 6% (PF 65) e 3% (PF 45) de perda em relação ao BAC de referência. A redução da velocidade de propagação com a introdução de AR no betão é explicada pela natureza dos agregados em causa, uma vez que, devido à argamassa aderida, a sua porosidade aumenta (relativamente aos AN).

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 AN por AR.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976), todos os betões são classificados como “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 sua integridade estrutural.

Na **Figura 40** e na **Figura 41**, apresenta-se a relação linear entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a massa volúmica e o módulo de elasticidade, para a família PF 45. Para a relação com a massa volúmica, obteve-se $R^2 = 0,94/0,86/0,95$, para 7/28/91 dias, pelo que se conclui que quanto mais denso é o meio (maior massa volúmica), mais rápido se propagam as ondas (maior velocidade de propagação de ultra-sons). Para a relação com o módulo de elasticidade, obteve-se $R^2 = 0,96/0,94$, para 28/91 dias. Estas 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.

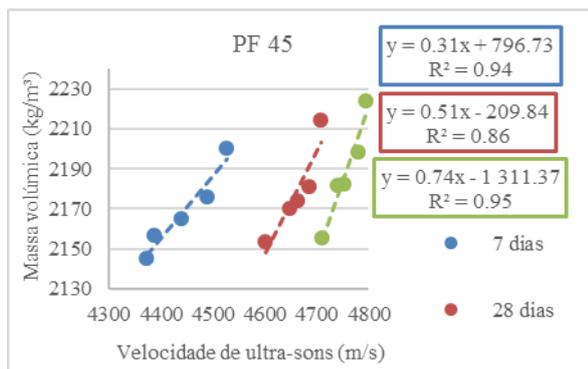


Figura 40 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a massa volúmica aos 7, 28 e 91 dias (PF 45)

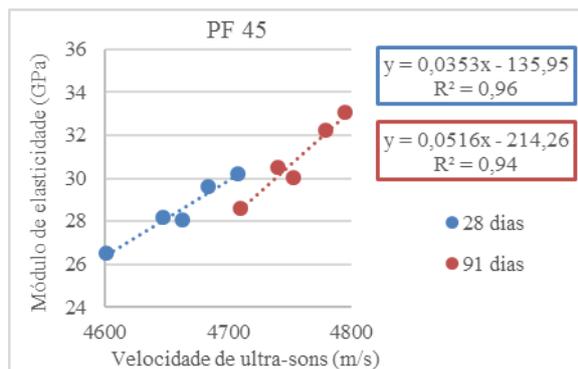


Figura 41 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias (PF 45)

4.1.7. Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado segundo a norma DIN 52108:2010, aos 91 dias de idade. Na **Tabela 21**, **Tabela 22**, **Figura 42** e na **Figura 43**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Através da observação das figuras, verifica-se um aumento do desgaste com a crescente taxa de substituição de AN por AR, à exceção da amassadura 100% AGR, que apresenta um desgaste inferior à mistura com 50% AR.

A maior perda de espessura ocorre no BAC com 100% AFR, registrando-se uma redução de 105% na família PF 65 e de 75% na família PF 45. Para betão convencional, Pereira *et al.* (2012) obtiveram reduções de 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 efetiva, observados nos betões com AFR, bem como a maior porosidade destes agregados.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 65)

Amassadura	Redução de espessura (mm)	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$ (%)
100% AN	2,6	0,1	0,0
25% AR	3,3	0,4	27,2
50% AR	3,8	0,6	47,4
100% AGR	3,6	0,1	38,2
100% AFR	5,3	1,0	104,6

Tabela 22 - Resultados do ensaio de abrasão aos 91 dias (PF 45)

Amassadura	Redução de espessura (mm)	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$ (%)
100% AN	3,1	0,0	0,0
25% AR	4,1	0,0	32,5
50% AR	5,1	0,8	62,1

100% AGR	4,2	0,1	34,6
100% AFR	5,5	0,1	74,6

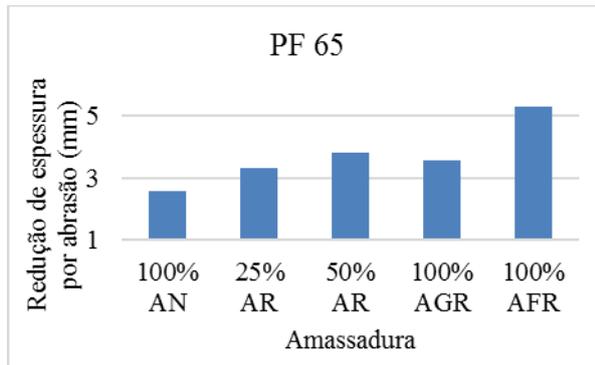


Figura 42 - Resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 65)

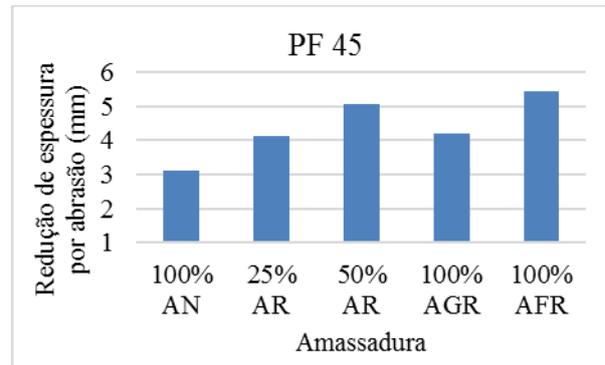


Figura 43 - Resistência à abrasão aos 91 dias - profundidade de desgaste (PF 45)

4.1.8. Deformação por retracção

O ensaio de determinação da deformação por retracção foi realizado segundo a especificação LNEC 398:1993, durante 182 dias. Na **Tabela 23**, **Tabela 24**, **Figura 44** e na **Figura 45**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Tabela 23 - Deformações por retracção aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias		91 dias		182 dias	
	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% AN}$ (%)	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% AN}$ (%)	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% AN}$ (%)
100% AN	-393,8	0,0	-568,8	0,0	-577,5	0,0
25% AR	-412,5	4,8	-577,5	1,5	-580,0	0,4
50% AR	-478,8	21,6	-707,5	24,4	-710,0	22,9
100% AGR	-471,3	19,7	-660,0	16,0	-652,5	13,0
100% AFR	-490,0	24,4	-713,8	25,5	-725,0	25,5

Tabela 24 - Deformações por retracção aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias		91 dias		182 dias	
	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)	Retracção (µm/m)	$\Delta_{100\% NA}$ (%)
100% AN	-291,3	0,0	-463,8	0,0	-491,3	0,0
25% AR	-357,5	22,7	-491,3	5,9	-513,8	4,6
50% AR	-337,5	15,9	-538,8	16,2	-561,3	14,2
100% AGR	-327,5	12,4	-541,3	16,7	-492,5	0,3
100% AFR	-327,5	12,4	-541,3	16,7	-586,3	19,3

Analisando as tabelas, verifica-se que, para ambas as famílias, a deformação por retracção tende a aumentar com a idade (à excepção das misturas 100% AGR, em que se verifica uma ligeira redução entre os 91 e os 182 dias). Este fenómeno é explicado pela cura interna desencadeada pelos agregados reciclados que permite a compensação da água de eva-

poração através da água existente nos AR. Assim, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são reduzidas (Evangelista, 2014).

Comparando os BAC com AR com o BAC de referência, observa-se a mesma tendência: a deformação por retracção aumenta com a taxa de substituição de AN por AR (à excepção das misturas 100% AGR), levando a uma redução no desempenho dos betões.

A título de exemplo, na amassadura 50% AR a deformação por retracção aumenta cerca de 23% (em relação ao BAC 100% AN) na família PF 65 e cerca de 16% na família PF 45.

Verifica-se que, para ambas as famílias, a amassadura 100% AGR (substituição apenas ao nível do agregado grosso) apresenta valores de retracção inferiores à amassadura 50% AR (na família PF 65) e 25% AR (na família PF 45), concluindo-se que a pasta é a principal responsável pela variação desta propriedade.

A amassadura 100% AFR é a que apresenta maior deformação por retracção, com incrementos de deformação de 26% (PF 65) e 19% (PF 45), em relação ao BAC de referência, aos 182 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.

Observando a **Figura 44** e na **Figura 45**, constata-se que, para todos os betões, a deformação aumenta ao longo do tempo de forma não-linear. O fenómeno de retracção desenvolve-se essencialmente nas primeiras idades, o que se traduz num rápido crescimento da deformação nos primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. A utilização de regressões logarítmicas permitiu obter coeficientes de correlação (R^2) bastante elevados (entre 0,96 e 0,98) para todos os BAC estudados. Cartuxo (2013) também verificou que a deformação por retracção aumenta com o tempo seguindo uma curva logarítmica, tendo obtido coeficientes de correlação superiores a 0,95.

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.

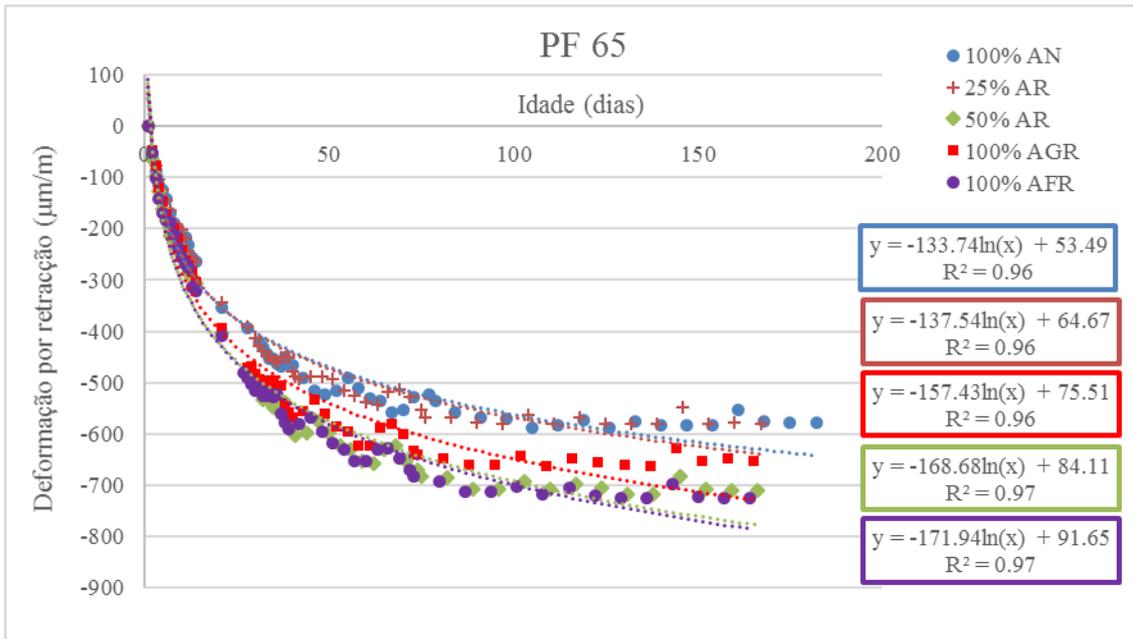


Figura 44 - Deformação por retracção ao longo de 182 dias (PF 65)

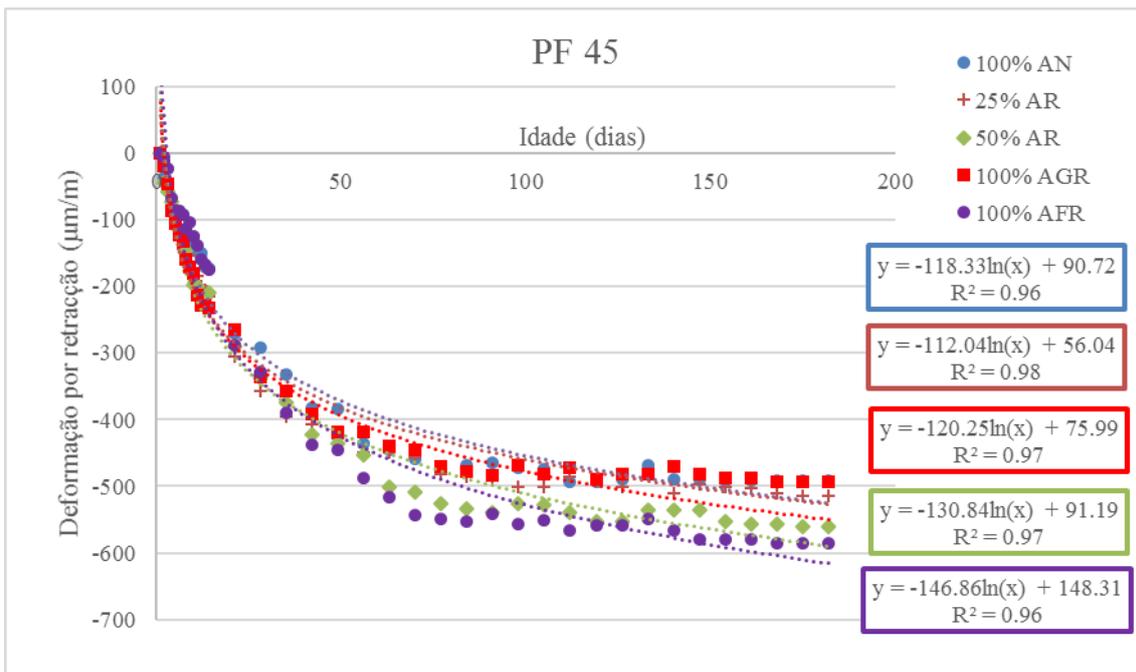


Figura 45 - Deformação por retracção ao longo de 182 dias (PF 45)

4.1.9. Deformação por fluência

O ensaio de determinação da deformação por retracção foi realizado segundo a especificação LNEC 399:1993, durante 182 dias. Na **Tabela 25**, **Tabela 26** e na **Figura 46**, são apresentados os resultados obtidos. Devido à limitação de tempo para a utilização do equipa-

mento, e atendendo ao número máximo de provetes que o mesmo pode acomodar em simultâneo, este ensaio foi realizado apenas para a família de BAC com agregados PF 65.

Tabela 25 - Resultados do ensaio da fluência aos 91 dias (PF 65)

Amassadura	Retração dos 28 aos 91 dias	Fluência aos 91 dias (com retração)	$\Delta_{100\% AN}$
	($\mu\text{m/m}$)	($\mu\text{m/m}$)	(%)
100% AN	-157,5	-798,8	0,0
25% AR	-152,5	-883,8	10,6
50% AR	-210,0	-947,5	18,6
100% AGR	-193,8	-906,3	13,5
100% AFR	-228,8	-958,8	20,0

Tabela 26 - Coeficiente de fluência aos 91 dias (PF 65)

Amassadura	Fluência aos 91 dias (sem retração)	$\Delta_{100\% AN}$	Módulo de elasticidade secante aos 28 dias	Fluência instantânea	Fluência final	$\Delta_{100\% AN}$	Coef. de fluência
	($\mu\text{m/m}$)	(%)	(MPa)	($\mu\text{m/m}$)	($\mu\text{m/m}$)	(%)	
100% AN	-641,3	0,0	45769	218,5	422,8	0,0	1,9
25% AR	-731,3	14,0	40924	244,4	486,9	15,2	2,0
50% AR	-737,5	15,0	37250	268,5	469,0	10,9	1,7
100% AGR	-712,5	11,1	38075	262,6	449,9	6,4	1,7
100% AFR	-730,0	13,8	34005	294,1	435,9	3,1	1,5

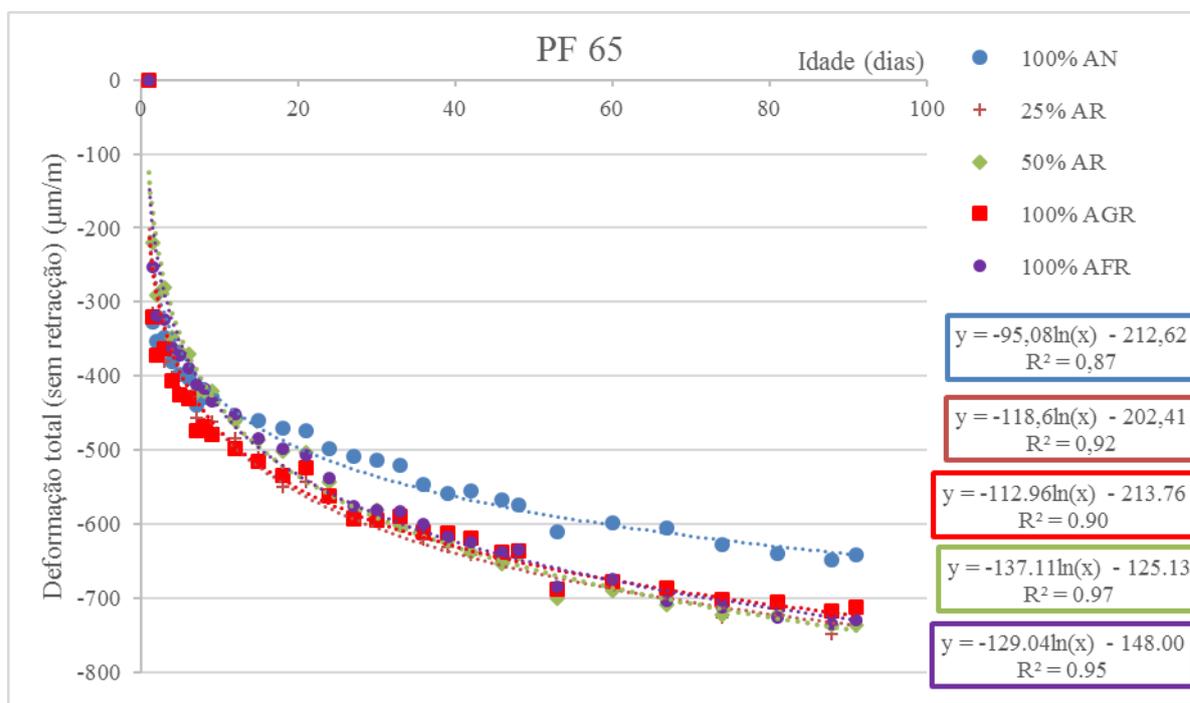


Figura 46 - Deformação total (sem retração) ao longo de 91 dias (PF 65)

Observando a **Figura 46**, constata-se que, para todos os betões, a deformação aumenta ao longo do tempo de forma não-linear, tal como verificado no ensaio de retração. O fenómeno de fluência desenvolve-se essencialmente nas primeiras idades, o que se tra-

duz num rápido crescimento da deformação nos primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. A utilização de regressões logarítmicas permitiu obter coeficientes de correlação (R^2) bastante elevados (entre 0,87 e 0,97) para todos os BAC estudados. Os resultados obtidos mostram que a deformação por fluência aumenta com a taxa de substituição de AN por AR (à excepção das misturas 100% AGR), levando a uma redução no desempenho dos betões. Este facto deve-se à menor rigidez dos betões com AR, devido à incorporação de agregados menos rígidos.

Verifica-se que apenas a amassadura 25% AR apresenta um coeficiente de fluência superior ao do betão de referência. No entanto, os coeficientes de fluência de todos os BAC são muito próximos entre si (aproximadamente 2,0 aos 91 dias).

Observa-se que a amassadura 100% AGR apresenta valores de fluência inferiores ao da amassadura com 50% AR, concluindo-se que, mais uma vez, a pasta é a principal responsável pela variação desta propriedade.

A amassadura 100% AFR é a que apresenta maior deformação por fluência, com incrementos de deformação de 20%, em relação ao BAC de referência, aos 91 dias.

A mesma tendência foi verificada por diversos autores, nos seus estudos com betão convencional. Domingo-Cabo *et al.* (2009) ensaiaram betões com AGR de centrais de reciclagem de RCD e observaram um aumento até 51% da fluência, para betões com 100% AGR. Manzi *et al.* (2013) obtiveram aumentos de 15%, aos 400 dias de idade, para betões com incorporação de 50% AFR e AGR. Os autores justificam este comportamento com o menor módulo de elasticidade dos AR, comparativamente aos AN. Os AR possuem uma menor rigidez devido à maior quantidade de pasta cimentícia (antiga e nova) e, consequentemente, uma menor capacidade de oposição ao fenómeno de fluência.

4.2. Propriedades em termos de durabilidade

Os ensaios de durabilidade permitem avaliar o seu comportamento do betão face aos agentes externos. Foram realizados os seguintes ensaios: absorção de água por imersão e capilaridade, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e à carbonatação e resistividade eléctrica.

Os ensaios de absorção de água (por imersão e capilaridade) e permeabilidade ao oxigénio permitem avaliar mecanismos de transporte no interior do betão. Os ensaios de

resistividade eléctrica e resistência à penetração de cloretos e 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, 91 e 182 dias. Na **Tabela 27**, **Tabela 28**, **Figura 47** e na **Figura 48**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Verifica-se que o BAC com 100% AFR registou maior absorção de água por imersão. Na família PF 65, a variação, em relação ao BAC de referência, foi aproximadamente igual a 42%, em todas as idades. Na família PF 45, registou-se variações de 18, 25 e 28%, aos 28, 91 e 182 dias, respectivamente.

A reduzida variação desta propriedade leva a concluir que os poros abertos, acessíveis ao exterior e responsáveis pela absorção de água por imersão, não sofrem grande alteração com a idade do betão.

Constata-se ainda que os BAC com 100% AGR (substituição por AR apenas ao nível dos grossos) apresentam menores valores de absorção do que os BAC com 50% AR (substituição ao nível dos finos e grossos), o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos AFR, que são condicionantes nesta propriedade.

Tabela 27 - Absorção de água por imersão (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(%)		(%)	(%)		(%)	(%)		(%)
100% AN	12,5	0,1	0,0	12,2	0,4	0,0	11,8	0,3	0,0
25% AR	15,2	0,1	21,3	15,0	0,1	22,5	14,9	0,1	26,4
50% AR	17,1	0,0	36,3	16,6	0,3	36,0	16,1	0,2	37,3
100% AGR	15,6	0,1	24,6	15,6	0,0	27,5	14,9	0,4	27,0
100% AFR	17,7	0,9	41,4	17,3	0,1	41,7	16,8	0,1	42,5

Tabela 28 - Absorção de água por imersão (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por imersão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(%)		(%)	(%)		(%)	(%)		(%)
100% AN	15,5	0,2	0,0	14,6	0,2	0,0	14,2	0,2	0,0
25% AR	16,1	0,6	3,9	15,7	0,6	7,5	15,2	0,6	7,3

50% AR	17,1	0,6	10,7	16,5	0,5	13,1	16,4	0,3	16,1
100% AGR	16,2	0,5	4,7	15,8	0,4	8,5	15,6	0,2	10,4
100% AFR	18,3	0,1	18,4	18,2	0,5	24,8	18,1	0,3	27,8

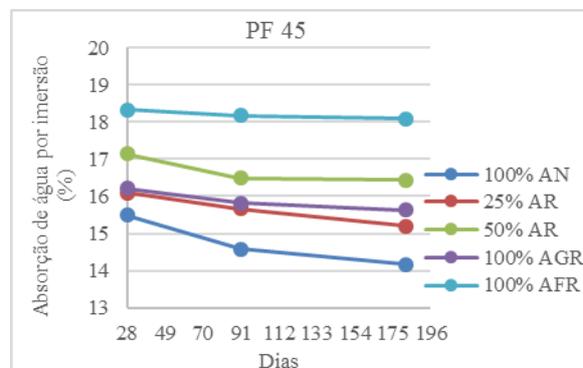
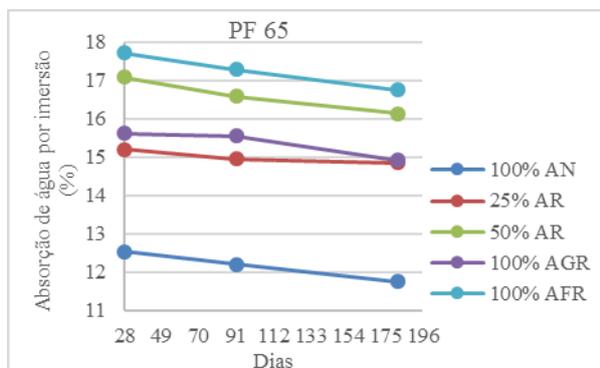


Figura 47 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

Figura 48 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Grdic *et al.* (2010) verificaram um aumento de cerca de 67% na amassadura com 100% de AGR. 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% AN e 0,45 para o BAC com 100% AGR). 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 betões com AR.

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, 91 e 182 dias. Na **Tabela 29**, **Tabela 30**, **Figura 49** e na **Figura 50**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Optou-se por apresentar graficamente apenas os resultados obtidos aos 28 dias, uma vez que as tendências observadas aos 28, 91 e 182 dias foram as mesmas.

Analisando a **Figura 49** e a **Figura 50**, verifica-se que a absorção de água por capilaridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas (maior declive do primeiro troço dos gráficos).

Tabela 31 - Absorção de água por capilaridade às 72 h (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Absorção de água por capilaridade	D.P	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por capilaridade	D.P	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por capilaridade	D.P	$\Delta_{100\% AN}$
100% AN	12,5	0,2	0,1	12,2	0,1	0,3	11,8	0,1	0,4
25% AR	15,2	0,1	0,1	15,0	0,1	0,2	14,9	0,1	0,3
50% AR	17,1	0,1	0,1	16,7	0,1	0,4	16,1	0,1	0,6
100% AGR	15,7	0,1	0,1	15,6	0,1	0,1	15,5	0,1	0,2
100% AFR	17,8	0,1	0,1	17,4	0,1	0,4	17,1	0,1	0,7

	(kg/m ²)		(%)	(kg/m ²)		(%)	(kg/m ²)		(%)
100% AN	0,98	0,13	0,0	0,37	0,04	0,0	0,22	0,02	0,0
25% AR	1,09	0,08	11,2	0,40	0,02	8,0	0,23	0,03	7,4
50% AR	1,30	0,04	33,2	0,46	0,06	26,4	0,31	0,07	45,5
100% AGR	1,25	0,09	28,0	0,41	0,02	11,2	0,28	0,01	29,7
100% AFR	1,38	0,14	41,1	0,49	0,02	33,0	0,32	0,02	47,8

Tabela 32 - Absorção de água por capilaridade às 72 h (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Absorção de água por capilaridade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por capilaridade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Absorção de água por capilaridade	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(kg/m ²)		(%)	(kg/m ²)		(%)	(kg/m ²)		(%)
100% AN	2,28	0,10	0,0	1,00	0,15	0,0	0,64	0,06	0,0
25% AR	2,59	0,16	13,3	1,08	0,08	8,1	0,66	0,04	2,5
50% AR	2,90	0,48	26,8	1,14	0,22	14,2	0,72	0,08	12,2
100% AGR	2,85	0,28	24,7	1,11	0,25	11,1	0,71	0,03	10,2
100% AFR	3,03	0,35	32,7	1,19	0,10	19,5	0,77	0,12	19,8

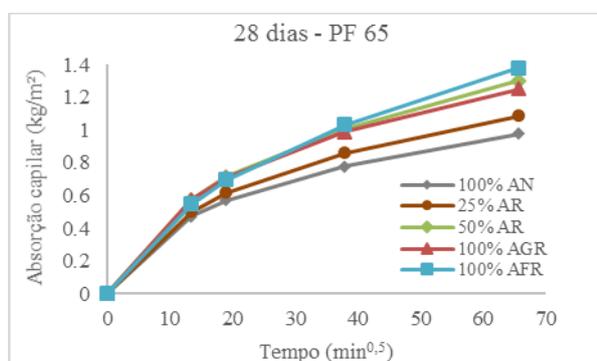


Figura 49 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)

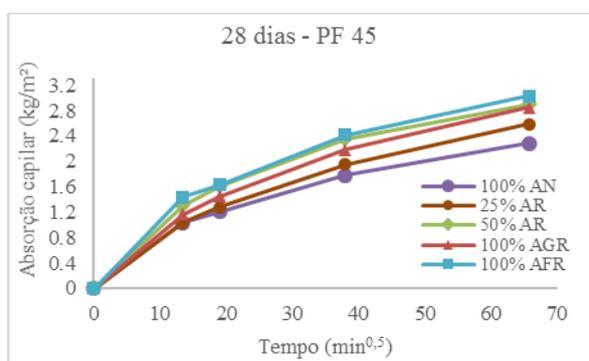


Figura 50 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 45)

A **Tabela 33** e a **Tabela 34** mostram que ocorre uma diminuição da absorção de água por capilaridade com a idade do betão, o que é explicado pela diminuição dos poros capilares. A introdução de cinzas volantes do betão provoca 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, reduzindo a possibilidade de penetração (RILEM, 1999).

Verifica-se que o BAC com 100% AFR registou maior absorção de água por capilaridade. A variação em relação ao BAC de referência, aos 28 dias, foi de 41% na família PF 65 e 33% na família PF 45.

Modani e Mohitkar (2014) verificaram a mesma tendência, obtendo um aumento de 41% para a amassadura com 100% AGR (28 dias).

Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade dos AR em comparação com os AN, 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.

Constata-se ainda que, à semelhança do que ocorreu no ensaio de absorção de água por imersão, o BAC com 100% AGR apresenta menores valores de absorção do que o BAC com 50% AR, o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos AFR, que são condicionantes nesta propriedade.

A **Figura 51** e a **Figura 52** mostram a relação entre a absorção de água por capilaridade e a absorção por imersão e resistência à compressão, respectivamente. Optou-se por apresentar graficamente apenas os resultados obtidos para a família PF 45.

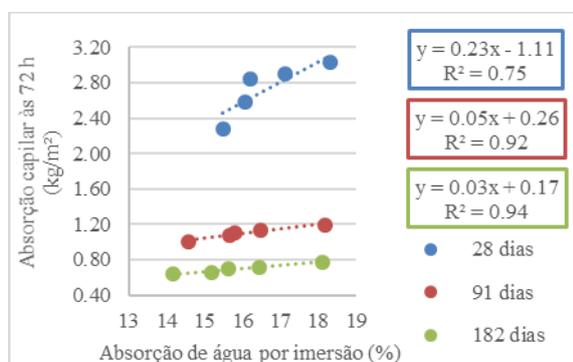


Figura 51 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade (72 horas) aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

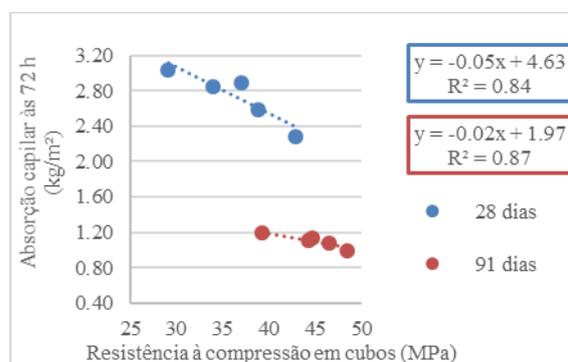


Figura 52 - Relação entre a absorção de água por capilaridade (72 horas) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias (PF 45)

4.2.3. Permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de permeabilidade ao oxigénio foi realizado de acordo com a especificação LNEC 392:1993, aos 28, 91 e 182 dias. Na **Tabela 36**, **Tabela 35**, **Figura 53** e na **Figura 54**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Não foi possível obter resultados para este ensaio aos 182 dias de idade (os provetes permaneceram no interior da câmara de ensaio, não se tendo verificado passagem de oxigénio), pelo que os resultados não são apresentados.

Tabela 36 - Permeabilidade ao oxigénio (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Permeabilidade ao oxigénio	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$	Permeabilidade ao oxigénio	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$
	(10^{-16} m^2)		(%)	(10^{-16} m^2)		(%)
100% AN	0,42	0,23	0,0	0,035	0,003	0,0
25% AR	0,59	0,21	42,4	0,072	0,032	107,7

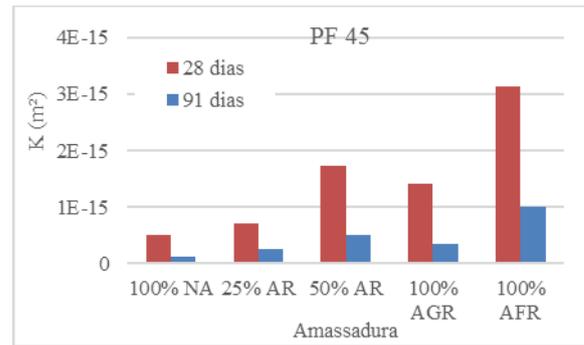
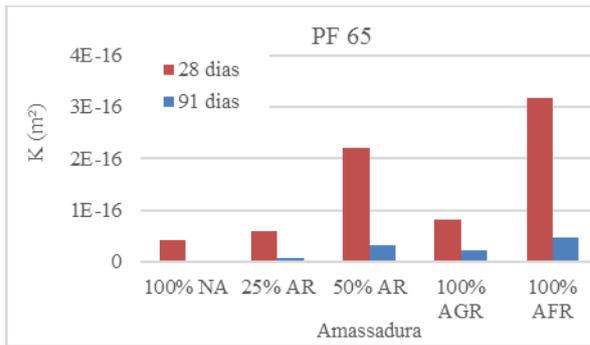


Figura 53 - Permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 65)

Figura 54 - Permeabilidade ao oxigénio aos 28 e 91 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	91 dias	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
50% AR	2,21	0,37	432,5	0,33	0,16	849,1
100% AGR	0,83	0,17	98,5	0,22	0,082	536,5
100% AFR	3,20	0,38	668,8	0,48	0,086	1280,8

Tabela 37 - Permeabilidade ao oxigénio (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias		
	Permeabilidade ao oxigénio	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Permeabilidade ao oxigénio	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	($10^{-16} m^2$)		(%)	($10^{-16} m^2$)		(%)
100% AN	5,10	4,19	0,0	1,26	0,076	0,0
25% AR	7,16	12,10	40,5	2,62	1,00	107,5
50% AR	17,3	22,20	240,3	5,04	2,31	299,1
100% AGR	14,2	9,76	178,0	3,35	1,33	165,2
100% AFR	31,5	28,70	518,0	9,96	0,59	688,7

Através da análise dos resultados, verifica-se que a permeabilidade ao oxigénio aumenta com a substituição de AN por AR devido à argamassa antiga aderida aos agregados, que faz aumentar a sua porosidade e, conseqüentemente, a do betão.

As amassaduras com maior permeabilidade ao oxigénio são as com 100% AFR, com variações muito elevadas em relação ao BAC de referência: cerca de 670% na família PF 65 e 520% na família PF 45, aos 28 dias. Relativamente às amassaduras com 50% AR, no presente estudo obteve-se aumentos de 433% (PF 65) e 240% (PF 45), aos 28 dias, enquanto Zong *et al.* (2014) obtiveram aumentos de 225% para betão convencional com a mesma taxa de incorporação de AR. Por sua vez, Pereira-de-Oliveira *et al.* (2014) não conseguiram obter valores de permeabilidade ao oxigénio, pelo que consideraram que o BAC é hermético, relativamente a esta propriedade.

Observa-se ainda uma redução muito acentuada da permeabilidade do oxigénio com a idade do betão, devida à presença das cinzas volantes. Nas primeiras idades, o efeito dos AR no betão é relevante mas, com o aumento da idade, as cinzas volantes começam a

reagir e o seu efeito sobrepõe-se (2002). A reacção pozolânica das cinzas 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.

De acordo com a classificação feita pela RILEM:1999, aos 91 dias de idade, para a família PF 65, todos os betões apresentam boa resistência à penetração de oxigénio (todos os resultados são inferiores a $0,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$). Para a família PF 45, aos 91 dias, apenas o betão 100% AN apresenta resistência moderada (resultados incluídos no intervalo de $0,5$ a $2,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$), sendo que os restantes apresentam baixa resistência (resultados incluídos no intervalo de $2,5$ a $12,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$).

A **Figura 55** e a **Figura 56** mostram a forte relação existente entre a penetração de oxigénio e os restantes mecanismos de transporte, nomeadamente a absorção de água por imersão e por capilaridade.

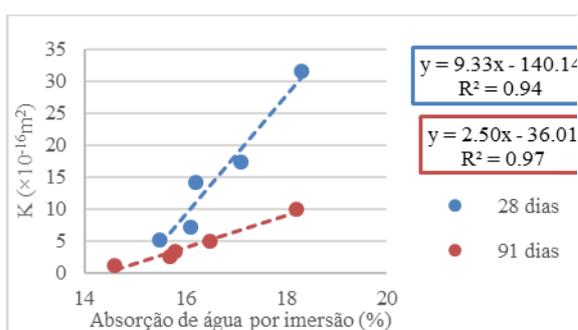


Figura 55 - Relação entre permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias (PF 45)

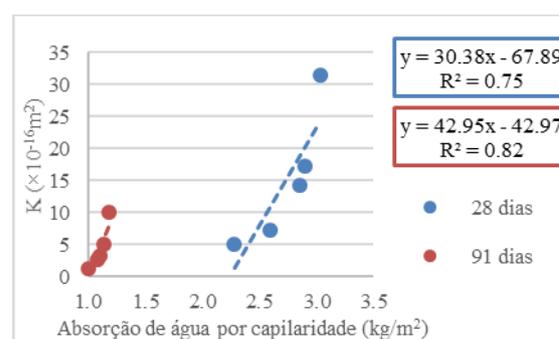


Figura 56 - Relação entre a permeabilidade ao oxigénio e a absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias (PF 45)

Assim, relacionando a penetração de oxigénio com a penetração de água por imersão, obtve-se coeficientes de variação de 0,94 e 0,97 aos 28 e 91 dias, respectivamente (**Figura 55**). Relacionando a penetração de oxigénio com a penetração de água por capilaridade, obtve-se coeficientes de variação de 0,75 e 0,82 aos 28 e 91 dias, respectivamente (**Figura 56**).

4.2.4. 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, 91 e 182 dias. Na **Tabela 38**, **Tabela 39**, **Figura 57** e na **Figura 58**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Através da análise da **Figura 57** e da **Figura 58**, verifica-se que a resistência à penetração de cloretos aumenta com a idade do betão e diminui com a incorporação de AR. A

maior penetração de íões cloreto ocorre nas amassaduras com 100% AFR, com um aumento de 69% (PF 65) e 42% (PF 45) em relação ao BAC de referência, aos 28 dias. Este facto é explicado pela pior qualidade da pasta do BAC (devido à substituição de areia por AFR), uma vez que o transporte de íões é feito preferencialmente nesse meio.

Kou e Poon (2009) verificaram a mesma tendência no seu estudo, tendo obtido reduções da carga passada de cerca de 50% (aos 28 dias), para 100% de substituição de areia por AFR. Este facto é explicado pelos autores pelo maior efeito de enchimento dos poros causado pelos AFR, uma vez que possuem maior percentagem de partículas pequenas em relação à areia de rio.

Tabela 38 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)
100% AN	5,5	0,38	0,0	2,7	0,37	0,0	2,4	0,69	0,0
25% AR	6,3	0,01	15,7	3,5	0,14	29,7	3,1	0,12	31,7
50% AR	8,0	1,22	46,6	4,3	0,36	60,4	3,8	0,03	58,3
100% AGR	5,7	0,19	5,0	3,2	0,33	20,5	2,9	0,03	22,6
100% AFR	9,2	0,17	68,9	4,8	0,68	78,6	4,1	0,15	70,0

Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de cloretos (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Coefficiente de difusão	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)	($\times 10^{-12} m^2/s$)	(%)	(%)
100% AN	11,3	0,15	0,0	6,1	0,55	0,0	3,7	0,09	0,0
25% AR	13,2	0,32	16,8	7,0	0,46	13,9	4,7	0,28	27,8
50% AR	14,7	0,93	30,5	7,5	0,21	22,8	5,8	0,37	57,1
100% AGR	11,9	1,37	5,7	6,6	1,41	6,9	4,0	0,29	6,7
100% AFR	16,1	0,46	42,4	8,7	0,96	41,7	5,8	0,52	57,1

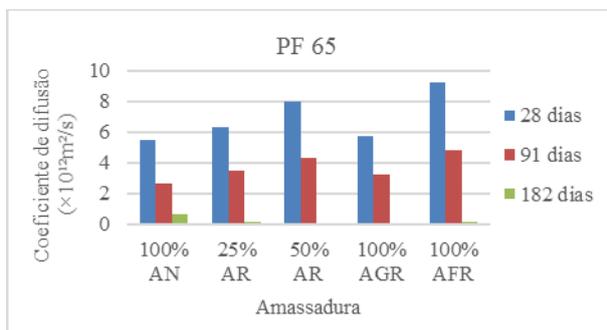


Figura 57 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

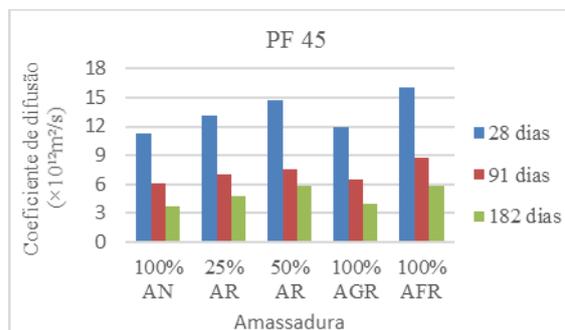


Figura 58 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Através da **Figura 59** e da **Figura 60**, é possível observar a existência de correlação entre a penetração de cloretos e a absorção de água por imersão e por capilaridade (apresenta-se as relações apenas para a família PF 45).

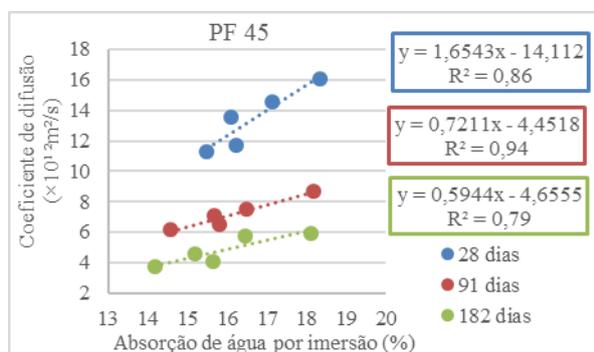


Figura 59 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

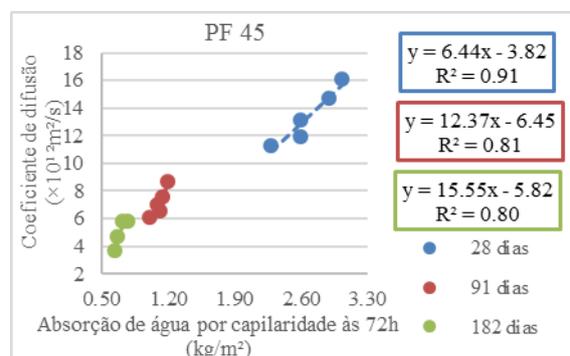


Figura 60 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

4.2.5. 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, 91 e 182 dias. Na **Tabela 40**, **Tabela 41**, **Figura 61** e na **Figura 62**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a resistividade eléctrica diminui com a substituição de AN por AR. As amassaduras 100% AFR apresentam o pior desempenho em ambas as famílias, com reduções de 46% (PF 65) e 66% (PF 45), em relação ao BAC de referência, aos 28 dias. Surya *et al.* (2013) obtiveram reduções de 33%, 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 AN, devido à argamassa antiga aderida aos AR.

Tabela 40 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Resistividade eléctrica	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$	Resistividade eléctrica	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$	Resistividade eléctrica	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$
	($\Omega \cdot \text{m}$)		(%)	($\Omega \cdot \text{m}$)		(%)	($\Omega \cdot \text{m}$)		(%)
100% AN	220,4	3,6	0,0	661,0	15,9	0,0	796,9	10,6	0,0
25% AR	203,1	18,2	-7,9	374,3	28,3	-43,4	400,3	0,4	-49,8
50% AR	136,3	3,4	-38,2	252,0	1,2	-61,9	295,1	15,2	-63,0
100% AGR	178,3	0,3	-19,1	295,9	9,2	-55,2	390,1	18,3	-51,1
100% AFR	119,3	0,2	-45,9	243,1	11,2	-63,2	253,1	16,1	-68,2

Tabela 41 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Amassadura	28 dias			91 dias			182 dias		
	Resistividade	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$	Resistividade	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$	Resistividade	D.P.	$\Delta_{100\% \text{ AN}}$

	elétrica		%	elétrica		%	elétrica		%
	($\Omega.m$)	(%)		($\Omega.m$)	(%)		($\Omega.m$)	(%)	
100% AN	218,2	50,6	0,0	467,1	26,6	0,0	522,5	28,0	0,0
25% AR	169,9	1,6	-22,2	364,0	10,8	-22,1	400,1	37,8	-23,4
50% AR	110,2	6,1	-49,5	274,7	22,6	-41,2	368,1	19,2	-29,6
100% AGR	152,7	1,5	-30,0	292,3	10,8	-37,4	385,2	16,6	-26,3
100% AFR	75,2	56,1	-65,5	247,0	3,4	-47,1	326,3	19,0	-37,6

A **Figura 63** e a **Figura 64** estabelecem uma relação entre a resistividade eléctrica e o coeficiente de difusão de cloretos, para ambas as famílias de BAC. Os coeficientes de determinação ($R^2 = 0,86$; $R^2 = 0,87$) mostram que estas duas propriedades estão fortemente correlacionadas, verificando-se que são inversamente proporcionais. 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 de o elemento se deixar atravessar apenas pelos iões cloreto.

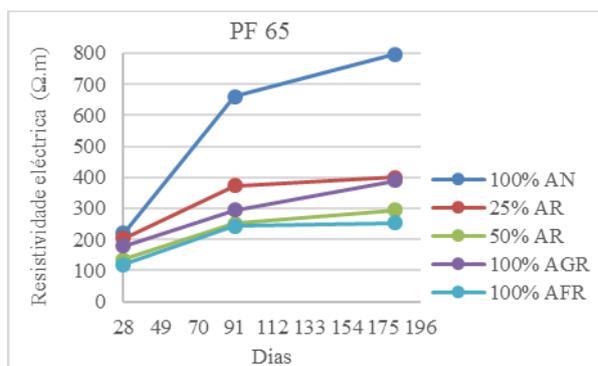


Figura 61 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

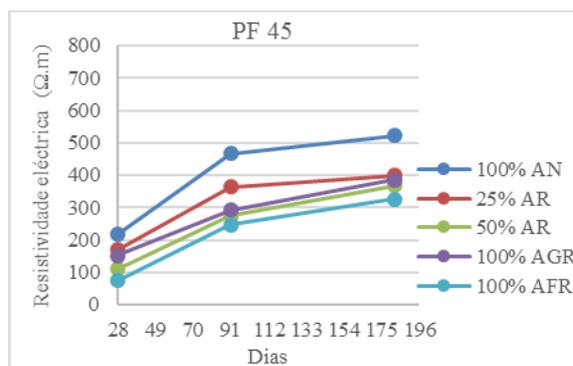


Figura 62 - Resistividade eléctrica aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

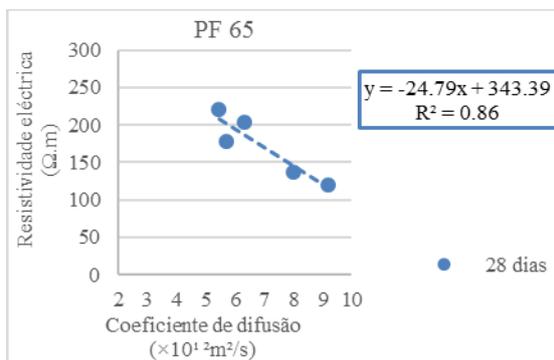


Figura 63 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias (PF 65)

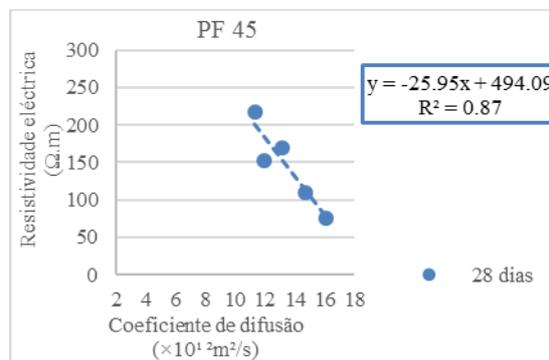


Figura 64 - Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias (PF 45)

4.2.6. Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi realizado de acordo com a especificação LNEC 391:1993, aos 7, 28, 56, 91, 182 dias (a idade começa a contar aos 28 dias, altura em que é colocado na câmara de dióxido de carbono). Na **Tabela 43**, **Tabela 42**, **Figura 65** e na **Figura 66**, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC.

Tabela 43 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28, 91 e 182 dias (PF 65)

Amassadura	7 dias			28 dias			56 dias			91 dias			182 dias		
	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(mm)		(%)												
100% AN	0,0	0,0	0	0,2	0,0	0	0,3	-	0	0,4	-	0	1,1	0,0	0,
25% AR	0,0	0,0	0	0,7	0,1	294	0,9	-	164	2,3	-	413	5,0	0,5	347
50% AR	0,0	0,0	0	0,8	0,2	297	2,6	-	673	2,8	-	518	6,1	0,3	444
100% AGR	0,0	0,0	0	0,6	0,1	198	0,7	-	93	0,8	-	79	1,1	0,4	3
100% AFR	1,2	0,3	0	1,2	0,3	539	2,9	-	755	2,9	-	560	8,6	1,0	670

Tabela 44 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 56, 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Amassadura	7 dias			28 dias			56 dias			91 dias			182 dias		
	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$	Prof. de penetração	D.P.	$\Delta_{100\% AN}$
	(mm)		(%)												
100% AN	3,6	0,1	0	9,4	0,5	0	11,8	-	0	15,1	-	0	23,2	0,6	0
25% AR	5,3	0,2	50	12,6	0,8	34	14,2	-	21	20,8	-	38	30,7	0,1	32
50% AR	5,8	0,4	63	13,5	0,8	44	17,4	-	48	22,7	-	50	31,3	0,5	35
100% AGR	5,0	1,3	40	11,8	0,6	25	12,5	-	7	20,6	-	36	25,4	0,5	10
100% AFR	6,1	0,1	70	14,0	0,4	49	18,8	-	60	23,4	-	55	36,4	0,5	57

Verifica-se que, nos BAC da família PF 65 (**Figura 65**), a carbonatação nas primeiras idades (7 e 28 dias) é praticamente inexistente (valores até 1 mm) em todas as amassaduras. Aos 91 dias, a máxima profundidade de carbonatação, correspondente à amassadura 100% AFR, é inferior a 3 mm, não ultrapassando 9 mm aos 182 dias. As reduzidas profundidades de carbonatação são justificadas pela reduzida relação a/c (0,43). Siddique (2011) apresenta profundidades de carbonatação inferiores a 2 mm, para 90 dias de exposição ao dióxido de carbono, em misturas de BAC (sem AR) com uma relação a/c de 0,44. Na família PF 45 (**Figura 66**), verificam-se profundidades de carbonatação mais elevadas dada a sua maior relação a/c (0,69).

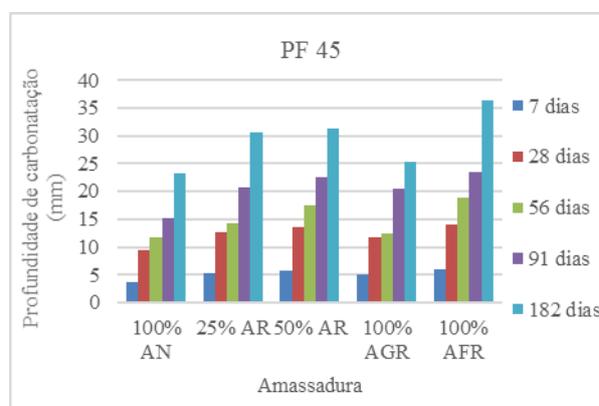
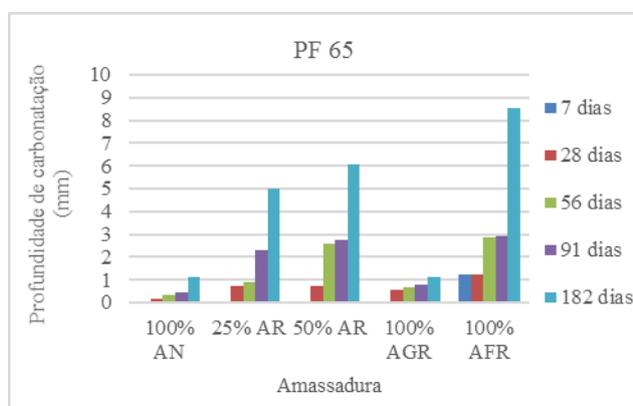


Figura 65 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 65)

Figura 66 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 45)

Os valores da profundidade de carbonatação tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição de AN por AR ao nível dos finos. As amassaduras com 100% AGR (substituição apenas ao nível dos grossos) apresentam profundidades de carbonatação inferiores às das amassaduras com 25% AR (substituição ao nível dos finos e grossos), pelo que se conclui que a alteração da pasta é mais relevante para a propagação da carbonatação no interior do betão do que a alteração do agregado. Esta situação era expectável, uma vez que a absorção de água (por imersão e por capilaridade) apresentou uma tendência idêntica.

Para os BAC com 100% AFR, a profundidade de carbonatação aumentou 560% (PF 65) e 55% (PF 45) aos 91 dias. 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 (2006).

Na **Tabela 45** e na **Tabela 46**, apresenta-se os valores dos coeficientes de carbonatação. Como seria expectável, a maior variação em relação ao BAC de referência foi verificada nas amassaduras 100% AFR (667% para a família PF 65 e 56% para a família PF 45).

Tabela 45 - Coeficientes de carbonatação (PF 65)

Amassadura	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{0,5})	R ²	Δ _{100% AN}
100% AN	0,063	0,78	0
25% AR	0,273	0,73	337
50% AR	0,361	0,81	477
100% AGR	0,085	0,91	36
100% AFR	0,480	0,75	667

Tabela 46 - Coeficientes de carbonatação (PF 45)

Amassadura	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{0,5})	R ²	Δ _{100% AN}
100% AN	1,659	0,99	0
25% AR	2,196	0,98	32
50% AR	2,351	0,99	42
100% AGR	1,946	0,96	17
100% AFR	2,595	0,99	56

É possível constatar uma relação linear entre a carbonatação e as propriedades de absorção de água por imersão (**Figura 67**) e por capilaridade (**Figura 68**), dados os valores dos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,87$ e $R^2 = 0,90$, respectivamente). São apresentados os resultados apenas para a família PF 45.

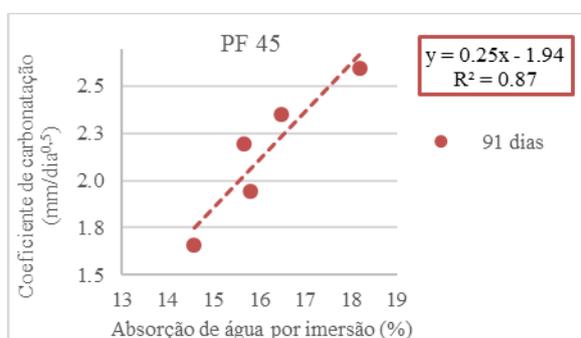


Figura 67 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão aos 91 dias (PF 45)

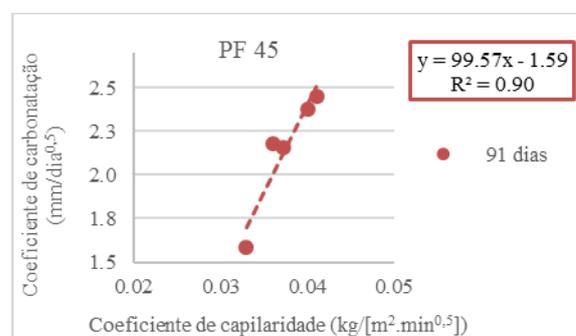


Figura 68 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade aos 91 dias (PF 45)

5. Considerações finais

O desenvolvimento desta campanha experimental permitiu estudar a influência da substituição de AN por AR nas propriedades dos betões auto-compactáveis, relativamente ao seu desempenho mecânico e de durabilidade. Foram produzidos, no total, 10 tipos de betões (5 para cada família de AR) incorporando diferentes quantidades de AR (100% AN, 25% AR, 50% AR, 100% AGR e 100% AFR). Apresenta-se, de forma sucinta, as conclusões conseguidas da análise dos resultados obtidos.

Os ensaios ao BAC no estado fresco foram executados de modo a verificar a sua conformidade com os parâmetros de trabalhabilidade requeridos pela NP EN 206-9:2010.

Verifica-se que, em geral, as variações registadas nos BAC com AR se devem à maior absorção de água dos agregados reciclados, afectada pela presença de argamassa aderida, bem como à sua superfície mais rugosa, comparativamente aos AN.

Concluiu-se que a totalidade das amassaduras cumpriu os parâmetros de trabalhabilidade, pelo que 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.

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos nos diversos ensaios ao BAC no estado endurecido, apresenta-se, na **Tabela 47** e na **Tabela 48**, um resumo dos resultados obtidos para as famílias PF 65 e PF 45, respectivamente, em que um sinal negativo corresponde a uma diminuição e o sinal positivo corresponde a um aumento do valor da propriedade em análise.

Analisando os resultados, observa-se que as diferentes amassaduras com incorporação de AR apresentam variações coerentes. Constata-se que, para a amassadura que apresenta pior desempenho em ambas as famílias (BAC 100% AFR), as perdas de resistência mecânica e módulo de elasticidade não excedem 26% e 39%, na família PF 65 e PF 45, respectivamente.

As amassaduras com 25% AR apresentam o melhor desempenho em ambas as famílias, com perdas inferiores a 12% em termos de propriedades mecânicas (excepto na resistência à abrasão, que regista perdas até 33%) e inferiores a 22% em termos de durabilidade (excepto na penetração de oxigénio e na resistência à carbonatação).

Tabela 49 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias (PF 65)

Ensaio		Amassadura e respectivo aumento/diminuição em relação ao BAC de referência			
		25% AR	50% AR	100% AGR	100% AFR
Ensaio mecânico	Massa volúmica	-2%	-3%	-3%	-5%
	Resistência à compressão em cubos	-1%	-4%	-6%	-12%
	Resistência à compressão em cilindros	-3%	-8%	-10%	-12%
	Resistência à tracção por compressão diametral	-10%	-12%	-19%	-23%
	Módulo de elasticidade	-11%	-19%	-17%	-26%
	Velocidade de propagação de ultra-sons	-2%	-4%	-5%	-8%
	Perda da espessura por abrasão (91 dias)	+27%	+47%	+38%	+105%
	Deformação por retracção	+2%	+24%	+16%	+26%
	Deformação por fluência	+11%	+19%	+14%	+20%
Ensaio de durabilidade	Absorção de água por imersão	+21%	+36%	+25%	+41%
	Absorção de água por capilaridade	+11%	+33%	+28%	+41%
	Permeabilidade ao oxigénio	+42%	+433%	+99%	+669%
	Profundidade de penetração de cloretos	+16%	+47%	+5%	+69%
	Resistividade eléctrica	-8%	-38%	-19%	-46%
	Profundidade de carbonatação (91 dias)	+413%	+518%	+79%	+560%
		Legenda:			Melhor resultado
					Pior resultado

Tabela 50 - Resumo dos resultados dos ensaios ao BAC em estado endurecido, aos 28 dias (PF 45)

Ensaio		Amassadura e respectivo aumento/diminuição em relação ao BAC de referência			
		25% AR	50% AR	100% AGR	100% AFR
Ensaio mecânico	Massa volúmica	-2%	-2%	-2%	-3%
	Resistência à compressão em cubos	-10%	-14%	-21%	-32%
	Resistência à compressão em cilindros	-3%	-10%	-14%	-24%
	Resistência à tracção por compressão diametral	-12%	-26%	-34%	-39%
	Módulo de elasticidade	-2%	-7%	-7%	-12%
	Velocidade de propagação de ultra-sons	-1%	-1%	-1%	-2%
	Perda da espessura por abrasão (91 dias)	+33%	+62%	+35%	+75%
	Deformação por retracção	+6%	+16%	+17%	+17%
	Deformação por fluência	-	-	-	-
Ensaio de durabilidade	Absorção de água por imersão	+5%	+11%	+5%	+18%
	Absorção de água por capilaridade	+13%	+27%	+25%	+33%
	Permeabilidade ao oxigénio	+41%	+240%	+178%	+518%
	Profundidade de penetração de cloretos	+17%	+31%	+6%	+42%
	Resistividade eléctrica	-22%	-50%	-30%	-66%
	Profundidade de carbonatação (aos 91 dias)	+38%	+50%	+36%	+55%
		Legenda:			Melhor resultado
					Pior resultado

Verifica-se que, nas propriedades mecânicas (excepto na resistência à abrasão), as amassaduras com 100% AGR apresentam desempenhos muito semelhantes, ou ligeiramente superiores, aos registados nas amassaduras com 50% AR. No entanto, nas propriedades de durabilidade, os AGR têm muito menor influência no desempenho dos

BAC, comparativamente aos AFR. 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).

Quanto à resistência mecânica dos BAC (compressão e tracção), a substituição de AN por AR provoca uma redução de desempenho. Tal é explicado pela pior qualidade dos AR devido à argamassa aderida, 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, regista-se diminuições de 1-12% (PF 65) e 3-32% (PF 45) na resistência à compressão e de 10-23% (PF 65) e 12-39% (PF 45) na resistência à tracção.

De acordo com a classificação da norma NP EN 206-1:2005, verifica-se que, para a família PF 65, os betões com 100% AGR e 100% AFR pertencem à classe de resistência C50/60, pertencendo os restantes à classe acima desta: C55/67. Para a família PF 45, o betão com 100% AFR pertence à classe C16/20 (betão com pior desempenho), o betão com 100% AGR pertence à classe C20/25 e os restantes à classe C25/30. Conclui-se, portanto, que apenas para a família PF 65 se conseguiu atingir o objectivo de reproduzir a mesma resistência dos betões de origem dos AR. Além da menor resistência dos AR da família PF 45, provenientes de BO com menor resistência mecânica, também a relação a/c superior (relação a/c de 0,69, enquanto que na família PF 65 é de 0,43), poderá ter contribuído para um pior desempenho dos betões. No decorrer da campanha experimental, foi necessário encomendar novas cinzas para as betonagens da família PF 45, de proveniência e constituição química diferentes das utilizadas para as betonagens da família PF 65. A pior qualidade das cinzas poderá ter tido influência significativa nos resultados insatisfatórios obtidos para a resistência mecânica.

Verifica-se uma redução do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados, que é explicada pela menor rigidez dos AR (em comparação com os AN), dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e também a menor deformabilidade da referida pasta de cimento. Aos 28 dias, registou-se reduções de 11-26% para a família PF 65 e de 2-12% para a família PF 45.

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 acen-

tuada (2-8% para a família PF 65 e 1-2% para a família PF 45, aos 28 dias). A referida redução é explicada pela natureza dos agregados em causa, uma vez que, devido à argamassa aderida, a sua porosidade aumenta (relativamente aos AN).

Em relação ao desgaste devido à abrasão, verifica-se maior desgaste à medida que a taxa de substituição de AFR aumenta (aos 91 dias ocorrem perdas até 105% na família PF 65 e até 75% na família PF 45). 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, devido à argamassa antiga que se encontra aderida aos mesmos.

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 e fluência. Aos 28 dias, ocorrem aumentos de retracção e fluência inferiores a 26%, em ambas as famílias. Verifica-se que, na família PF 65, a amassadura 100% AGR (substituição apenas ao nível do agregado grosso) apresenta valores de retracção e fluência inferiores à amassadura 50% AR, concluindo-se que a pasta é a principal responsável pela variação destas propriedades.

O EC2 apresenta fórmulas para estimar as propriedades do betão convencional 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 os valores de resistência à tracção e módulo de elasticidade, de forma a poder compará-los com os resultados experimentais obtidos. Comparando os resultados obtidos experimentalmente com 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 com 100% AFR, verifica-se diferenças de 6% e 11%, para os ensaios de resistência à tracção e módulo de elasticidade, respectivamente.

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 AFR 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.

Constata-se ainda que, nos três ensaios, os BAC com 100% AGR (substituição por AR apenas ao nível dos grossos) apresentam melhores desempenhos do que os BAC com 50% AR (substituição ao nível dos finos e grossos), o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos AFR. A pasta mantém-se inalterada (só com AN), o que se traduz numa melhoria face ao BAC com 50% AR.

O aumento da taxa de substituição de AN por AR no BAC faz aumentar a penetração de iões cloreto (aumentos de 5-69% para a família PF 65 e 6-42% para a família PF 45, 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, o que explica que as amassaduras com 100% AGR registem o melhor desempenho dos BAC com AR, uma vez que não se faz substituição de AN por AR ao nível da pasta.

Quando se analisa o transporte de todos os tipos de iões no BAC (através do ensaio de resistividade eléctrica), verifica-se que este diminui com a substituição de AN por AR, o que está de acordo com o ensaio de penetração de iões cloreto. Ocorrem aumentos de 8-46% e 22-66%, para a família PF 65 e PF 45, respectivamente, aos 28 dias.

Nas primeiras idades, a carbonatação dos BAC da família PF 65 é imperceptível e só começa a ser visível a partir dos 56 dias de idade. Aos 91 dias, a máxima profundidade de carbonatação, correspondente à amassadura com 100% AFR, é inferior a 3 mm (muito reduzida). Este facto é explicado pela reduzida relação a/c usada nas misturas (0,43).

Os valores da profundidade de carbonatação tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição de AN por AR ao nível dos finos. As amassaduras com 100% AGR apresentam profundidades de carbonatação inferiores às das amassaduras com 25% AR, pelo que se conclui que a alteração da pasta é mais relevante para a propagação da carbonatação no interior do betão do que a alteração do agregado. Esta situação está de acordo com o expectável, uma vez que a absorção de água (por imersão e por capilaridade) apresentou uma tendência idêntica.

6. Bibliografia

Bogas J. A., “**Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida**”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011, 1696 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.

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, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013, 232 p.

Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gyarre, F., Serrano-López, M. A., Serna, P., Castaño-Tabares, J. O., “**Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete**”. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 2545-2553.

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

Kebaili, 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., “**Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates**”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, 2009, pp. 622–627.

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.

Malhotra, V., “**Testing hardened concrete: nondestructive methods**”, *American*

Concrete Institute, 1976.

Modani, P. O., Mohitkar, V. M., “**Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development**”, Vol. 4, N° 3, 2014, pp. 430–440.

Pacheco Torgal F., Jalali S., “**A Sustentabilidade dos Materiais de Construção**”, TecMinho, 2010.

Panda, K. C., Bal, P. K., “**Properties of self-compacting concrete using recycled coarse aggregate**”, Procedia Engineering, Vol. 51, 2013, pp. 159–164.

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., 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.

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

Safiuddin, M., Salam, M. a., Jumaat, M. Z., “**Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete**”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 11, N° 4, 2011, pp. 1023–1041.

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

Surya, M., Vvl, K. R., Lakshmy, P., “**Recycled aggregate concrete for transportation infrastructure**”, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 104, 2013, pp.1158–1167.

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.

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, Setembro de 2015

Autores

Sara Santos
Aluna de Mestrado

Tiago Barroqueiro
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Pedro Silva
Professor Adjunto