

**Avaliação do desempenho em termos de durabilidade de betões  
projetados produzidos com agregados reciclados grossos de betão**

**José Francisco Nunes e Silva Nobre**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Orientadores:**

Professor Doutor Jorge Manuel Calião Lopes de Brito

Professor Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

**Júri:**

Presidente: Professor Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Orientador: Professor Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Vogal: Professor Doutor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

**Novembro de 2018**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

No final de um longo caminho, é tempo de olhar para trás e agradecer àqueles que me levaram ao colo, que me levantaram nos momentos difíceis, aqueles que não me deixaram ficar abatido e me motivaram a continuar e a procurar alcançar sempre mais e melhor.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer a Deus, aquele que me deu o dom da vida e me ama incondicionalmente, e aos meus pais por um dia Lhe terem dito sim, como Maria.

À minha mulher, Catarina, pelo seu amor, por todas as noites que passou em branco para me acompanhar na reta final desta dissertação, por fazer a minha vida mais feliz com o seu sorriso e por ser a maior motivação e inspiração que Deus poderia ter colocado na minha vida.

A toda a minha família, e em especial os meus pais e irmãos, por todo o carinho e amor com que me educaram e com o qual sempre me apoiaram. Sem eles, não teria sido possível terminar esta etapa da minha vida.

A todos os meus amigos e “irmãos” em Deus, pelas suas palavras de ânimo e por serem sempre um porto de abrigo, durante as tempestades. Um agradecimento muito especial também ao meu amigo e colega de laboratório, Gonçalo Duarte, por toda a sua ajuda, empenho e boa disposição no desenvolvimento de toda a dissertação.

Ao meu orientador Professor Doutor Jorge de Brito e co-orientador Professor Doutor Miguel Bravo, pela enorme disponibilidade, motivação e conhecimento científico transmitido ao longo de toda a dissertação, e por nunca terem desistido de mim.

Gostaria também de agradecer aos Engenheiros Rawaz Kurda e Jorge Pontes, à Engenheira Sofia Real e em especial ao Engenheiro João Pacheco, por toda a disponibilidade, paciência e ajuda prestada dentro e fora do Laboratório de Construção.

Ao Professor Doutor Pedro Raposeiro da Silva, do ISEL, expresse o meu agradecimento pelo seu apoio técnico e ajuda no fornecimento do equipamento necessário à realização do ensaio de retração.

Aos técnicos do Laboratório de Construção, Francisco Almeida e Pedro Costa, por todo o auxílio prestado na realização da campanha experimental.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento muito especial à empresa H Tecnic e aos Engenheiros João Farinha e Nuno Cerqueira, pelo acompanhamento e planeamento, fundamentais, em todo o processo de projeção do betão e ainda à empresa Unibetão, pelo fornecimento do betão de origem, necessário à produção dos agregados reciclados.

*En una noche oscura,  
con ansias, en amores inflamada,  
¡oh dichosa ventura!,  
salí sin ser notada  
estando ya mi casa sosegada.*

*A oscuras y segura,  
por la secreta escala, disfrazada,  
¡oh dichosa ventura!,  
a oscuras y en celada,  
estando ya mi casa sosegada.*

*En la noche dichosa,  
en secreto, que nadie me veía,  
ni yo miraba cosa,  
sin otra luz y guía  
sino la que en el corazón ardía.*

*Aquista me guiaba  
más cierto que la luz de mediodía,  
adonde me esperaba  
quien yo bien me sabía,  
en parte donde nadie parecía.*

*¡Oh noche que guiaste!  
¡oh noche amable más que el alborada!  
¡oh noche que juntaste  
Amado con amada,  
amada en el Amado transformada!*

*En mi pecho florido,  
que entero para él solo se guardaba,  
allí quedó dormido,  
y yo le regalaba,  
y el ventalle de cedros aire daba.*

*El aire de la almena,  
cuando yo sus cabellos esparcía,  
con su mano serena  
en mi cuello hería  
y todos mis sentidos suspendía.*

*Quédeme y olvídeme,  
el rostro recliné sobre el Amado,  
cesó todo y déjeme,  
dejando mi cuidado  
entre las azucenas olvidado.*

*San Juan de la Cruz  
São João da Cruz*

## Resumo

Na presente dissertação, foi avaliado o desempenho em termos de durabilidade de betões projetados com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Foram estudadas quatro composições com taxas de substituição de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados de betão de 0, 20, 50 e 100%.

A incorporação de agregados reciclados exigiu um aumento da relação a/c, de modo a manter a trabalhabilidade, e conduziu a uma redução das perdas por efeito de ricochete, fenómeno bastante interessante uma vez que se trata de uma das maiores desvantagens do betão projetado.

De modo a caracterizar a durabilidade do betão projetado no estado endurecido fez-se ensaios de absorção por imersão, absorção por capilaridade, resistência à carbonatação, resistência à penetração de cloretos e retração. Em todos estes ensaios, obteve-se perdas de desempenho em termos de durabilidade. Contudo, todas as perdas de desempenho foram reduzidas, pelo que, se tidas em consideração no dimensionamento do betão, não inviabilizam a introdução de este tipo de agregados no betão projetado.

**Palavras-chave:** Betão; betão projetado; projeção por via seca; agregados reciclados grossos de betão; efeito de ricochete; desempenho em termos de durabilidade.

## Abstract

The purpose of this dissertation was to study the effect of replacing natural coarse aggregates with recycled concrete coarse aggregates on shotcrete's durability performance. The dry-mix process was used and four mixes with 0%, 20%, 50% and 100% replacement ratios were analysed.

The incorporation of recycled aggregates demanded an increase of the w/c ratio to maintain the workability in all the mixes, and resulted in reductions of the rebound effect, which is a very positive consequence since it is one of the biggest disadvantages of the dry-mix process.

To characterize the durability of shotcrete, the following tests were conducted: water absorption by immersion, water absorption by capillarity, carbonation resistance, chloride ion penetration resistance and shrinkage. In all of them, a performance loss occurred. Nevertheless, all the losses were low, which means that, if considered in the design of the shotcrete, this type of aggregates can be used.

**Keywords:** Sprayed concrete; shotcrete; dry-mix process; recycled concrete coarse aggregate; rebound effect; durability performance.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>Índice</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xii</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Considerações iniciais .....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Metodologia e organização da dissertação.....	1
<b>2. Estado-da-arte</b> .....	<b>3</b>
2.1. Betão projetado .....	3
2.1.1. Origem e principais aplicações .....	3
2.1.2. Vantagens e desvantagens .....	4
2.1.3. Via seca e via húmida.....	5
2.1.4. Propriedades do BP no estado fresco.....	7
2.1.5. Propriedades do BP no estado endurecido.....	7
2.2. Agregados reciclados .....	12
2.2.1. Considerações gerais .....	12
2.2.2. Propriedades dos agregados reciclados .....	13
2.3. Propriedades do betão convencional produzido com AR .....	18
2.3.1. Considerações gerais .....	18
2.3.2. Propriedades no estado fresco.....	19
2.3.3. Propriedades no estado endurecido.....	20
2.4. Betão projetado com introdução de AR.....	25
2.4.1. Considerações gerais .....	25
2.4.2. Propriedades no estado fresco.....	26
2.4.3. Propriedades no estado endurecido.....	26
<b>3. Campanha experimental</b> .....	<b>29</b>
3.1. Definição de objetivos .....	29
3.2. Planeamento da campanha experimental.....	29
3.2.1. 1ª fase - obtenção dos materiais .....	29

3.2.2.	2ª fase - caracterização dos agregados e das misturas .....	29
3.2.3.	3ª fase - betonagem dos painéis .....	30
3.2.4.	4ª fase - ensaios no estado endurecido .....	30
3.3.	Composição dos betões .....	30
3.3.1.	Máxima dimensão dos agregados.....	30
3.3.2.	Volume de vazios .....	31
3.3.3.	Índice de vazios .....	32
3.3.4.	Dosagem da água de amassadura (A).....	33
3.3.5.	Relação a/c.....	33
3.3.6.	Volume das partículas de cimento ( $V_c$ ) .....	33
3.3.7.	Volume de agregados ( $V_a$ ) .....	33
3.3.8.	Volume total de partículas sólidas ( $V_s$ ).....	33
3.3.9.	Percentagem do volume de cimento em relação ao volume total de partículas sólidas (C%) .....	34
3.3.10.	Curva de referência de Faury.....	34
3.3.11.	Composição do betão de referência.....	37
3.3.12.	Composições dos BP com x% de ARGB (BPx) .....	37
3.4.	Produção dos ARGB .....	37
3.5.	Betonagem dos painéis por via seca .....	40
3.5.1.	Determinação do número e dimensão dos painéis .....	40
3.5.2.	Preparação dos painéis para a projeção.....	41
3.5.3.	Projeção do betão por via seca .....	42
3.6.	Procedimentos de ensaio dos betões no estado endurecido .....	42
3.6.1.	Extração e preparação das carotes.....	42
3.6.2.	Resistência à compressão.....	43
3.6.3.	Resistência à penetração de cloretos .....	44
3.6.4.	Resistência à carbonatação .....	46
3.6.5.	Absorção de água por imersão .....	46
3.6.6.	Absorção de água por capilaridade.....	48
3.6.7.	Retração .....	49
<b>4.</b>	<b>Análise de resultados.....</b>	<b>51</b>
4.1.	Caraterização dos agregados .....	51
4.1.1.	Análise granulométrica .....	51
4.1.2.	Massa volúmica e absorção de água .....	52
4.1.3.	Baridade e volume de vazios .....	52
4.1.4.	Teor de humidade.....	53
4.1.5.	Resistência à fragmentação pelo ensaio de <i>Los Angeles</i> .....	53
4.1.6.	Índice de forma .....	53

4.2.	Caraterização dos betões no estado fresco .....	54
4.2.1.	Relação a/c .....	54
4.2.2.	Perdas por efeito de ricochete .....	55
4.3.	Desempenho mecânico dos betões no estado endurecido .....	55
4.3.1.	Resistência à compressão .....	55
4.3.2.	Módulo de elasticidade .....	57
4.4.	Desempenho em termos de durabilidade do BP .....	58
4.4.1.	Absorção de água por imersão .....	58
4.4.2.	Absorção de água por capilaridade .....	61
4.4.3.	Resistência à penetração de cloretos .....	65
4.4.4.	Resistência à carbonatação .....	68
4.4.5.	Retração .....	71
<b>5.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>75</b>
5.1.	Caraterização dos ARGB .....	75
5.2.	Caraterização dos betões no estado fresco .....	75
5.3.	Caraterização dos betões no estado endurecido .....	76
5.4.	Considerações finais .....	78
5.5.	Desenvolvimentos futuros .....	78
<b>6.</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
	Anexo A - ficha técnica do cimento .....	I
	Anexo B - fichas técnicas dos agregados naturais .....	III
	Anexo B.1 - areia fina .....	III
	Anexo B.2 - areia grossa .....	IV
	Anexo B.3 - bago de arroz .....	V
	Anexo B.4 - brita 1 .....	VI
	Anexo C - resultados da análise granulométrica .....	VII
	Anexo D - resistência à compressão .....	VIII
	Anexo D.1 - 7 dias .....	VIII
	Anexo D.2 - 28 dias .....	VIII
	Anexo D.3 - 56 dias .....	IX
	Anexo E - restantes propriedades mecânicas do BP .....	X
	Anexo E.1 - aderência <i>pull-off</i> .....	X
	Anexo E.2 - resistência à tração por compressão diametral .....	X
	Anexo E.3 - velocidade de propagação dos ultra-sons .....	X
	Anexo E.4 - resistência à abrasão .....	X

Anexo F - absorção de água por imersão .....	XI
Anexo G - absorção de água por capilaridade .....	XII
Anexo H - resistência à penetração de cloretos .....	XIII
Anexo H.1 - 28 dias .....	XIII
Anexo H.2 - 91 dias .....	XIV
Anexo I - resistência à carbonatação .....	XV
Anexo I.1 - 7 dias.....	XV
Anexo I.2 - 28 dias.....	XV
Anexo I.3 - 56 dias.....	XVI
Anexo I.4 - 91 dias.....	XVI
Anexo J - retração .....	XVII
Anexo K - levantamento bibliográfico da massa volúmica dos ARGB .....	XVIII
Anexo L - características do betão de origem .....	XIX

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Carl Ethan Akeley (1864-1926), em 1910 (Teichert, 2002) .....	3
Figura 2.2 - Plastergun utilizada em 1907 por Carl Akeley (Teichert, 2002).....	3
Figura 2.3 - Farnworth Tunnel revestido a betão projetado, Bolton, Reino Unido (Murphy, 2015).....	4
Figura 2.4 - Muro de contenção de terras em betão projetado, edifício Les Hautes de la Closerie, Nice, França (Peixoto, 2017).....	4
Figura 2.5 - Ricochete em função do ângulo de projeção, adaptado de ACI Committee 506 (2016) ....	5
Figura 2.6 - Efeitos de formação de bolsas de material proveniente do ricochete (Ryan, 1973).....	5
Figura 2.7 - Representação esquemática da via seca (Sika, 2010) .....	6
Figura 2.8 - Esquema de equipamento de pressão de câmara dupla (ACI Committee 506, 2016).....	6
Figura 2.9 - Frente de carbonatação num provete de betão projetado (Santos, 2011).....	10
Figura 2.10 - Génese dos ARB (Pereira, 2010) .....	13
Figura 2.11 - Evolução da absorção de água dos ARGB ao longo do tempo (Fonseca, 2009) .....	17
Figura 2.12 - Relação entre a massa volúmica do betão e a massa volúmica dos agregados (Angulo, 2005).....	20
Figura 2.13 - Relação entre a massa volúmica do betão e a taxa de substituição de AN por ARGB, adaptado de Fonseca (2009) .....	20
Figura 2.14 - Resistência à compressão ao longo do tempo (Rao et al., 2011) .....	21
Figura 2.15 - Evolução da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de ARGB (Rao et al., 2011).....	22
Figura 2.16 - Resultados para a penetração de cloretos (Matias & de Brito, 2005).....	22
Figura 2.17 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição de ARGB (Levy, 2001).....	23
Figura 2.18 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de ARGB (Soares, 2014).....	24
Figura 2.19 - Evolução ao longo do tempo da retração (Gómez-Soberón, 2001).....	24
Figura 2.20 - Relação entre a retração e a taxa de substituição de ARGB (Malešev et al., 2010) .....	25
Figura 2.21 - Resistência à compressão ao longo do tempo obtida por Banthia & Chan (2000).....	27
Figura 3.1 - Curvas de Faury para o betão de referência .....	35
Figura 3.2 - Cofragem betão de origem .....	39
Figura 3.3 - Betão de origem após a betonagem.....	39

Figura 3.4 - Blocos do BO .....	39
Figura 3.5 - Britadeira de maxilas .....	39
Figura 3.6 - Agitador de peneiros .....	39
Figura 3.7 - Modelo em AutoCAD dos painéis realizados.....	41
Figura 3.8 - Painéis preparados para receber o betão projetado .....	41
Figura 3.9 - Medidor de caudal .....	42
Figura 3.10 - Máquina de projeção por via seca .....	42
Figura 3.11 - Interior da câmara inferior da máquina de projeção.....	42
Figura 3.12 - Ponta da mangueira de projeção.....	43
Figura 3.13 - Projeção por via seca .....	43
Figura 3.14 - Extração de carotes com caroteadora.....	43
Figura 3.15 - Carotes após extração.....	43
Figura 3.16 - Painel após extração de carotes .....	43
Figura 3.17 - Provetes no interior da câmara de vácuo.....	44
Figura 3.18 - Manga de borracha com provete em posição .....	44
Figura 3.19 - Esquema de montagem do ensaio de migração (adaptado de LNEC, E 463-2004) .....	45
Figura 3.20 - Marcações para a medição da penetração dos cloretos .....	45
Figura 3.21 - Provetes de betão depois de aplicada a solução de nitrato de prata.....	45
Figura 3.22 - Provetes depois de aplicada a impermeabilização dos topos.....	46
Figura 3.23 - Provetes depois de aplicada a fenolftaleína .....	46
Figura 3.24 - Provetes imergidos em 1/3 da sua altura .....	47
Figura 3.25 - Pesagem da massa hidrostática.....	47
Figura 3.26 - Tabuleiro com provetes para o ensaio de absorção por capilaridade .....	48
Figura 3.27 - Pesagem de provete para o ensaio de absorção por capilaridade .....	48
Figura 3.28 - Provetes após colagem de pastilhas metálicas.....	49
Figura 3.29 - Realização de leitura com retratómetro.....	49
Figura 4.1 - Curvas granulométricas .....	51
Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão média estimada em cubos, adaptado de Duarte (2018) .....	56
Figura 4.3 - Redução de resistência à compressão em função da percentagem de ARGB .....	57

Figura 4.4 - Influência da percentagem de ARGB no módulo de elasticidade (levantamento bibliográfico)	58
Figura 4.5 - Carote com material desagregado.....	59
Figura 4.6 - Material desagregado retirado da interface entre BP e betão de substrato .....	59
Figura 4.7 - Relação entre a absorção de água por imersão e a %ARGB .....	60
Figura 4.8 - Evolução da absorção de água por imersão com a %AR, obtida por vários autores .....	60
Figura 4.9 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão .....	61
Figura 4.10 - Evolução da absorção de água por capilaridade com a taxa de incorporação de ARGB62	
Figura 4.11 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a %ARGB obtida por vários autores	63
Figura 4.12 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo.....	63
Figura 4.13 - Relação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade às 72 h.....	64
Figura 4.14 - Gráfico da evolução do coeficiente de difusão dos cloretos com o aumento da %ARGB	65
Figura 4.15 – Evolução do coeficiente de difusão de cloretos em função da %ARGB (levantamento bibliográfico)	66
Figura 4.16 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias (Silva et al., 2015).....	67
Figura 4.17 - Relação entre a absorção por capilaridade e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias .....	68
Figura 4.18 - Evolução da profundidade de carbonatação com a %ARGB.....	69
Figura 4.19 - Evolução da profundidade de carbonatação com %ARGB (levantamento bibliográfico)	70
Figura 4.20 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação, aos 28 dias	71
Figura 4.21 - Evolução da retração aos 91 com a percentagem de ARGB (levantamento bibliográfico)	72
Figura 4.22 - Evolução da retração ao longo do tempo .....	73
Figura 4.23 - Evolução da retração aos 91 dias com a taxa de substituição de AGN por ARGB.....	74

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Índice de forma (levantamento bibliográfico) .....	14
Tabela 2.2 - Coeficiente de Los Angeles (levantamento bibliográfico) .....	15
Tabela 2.3 - Absorção de água (levantamento bibliográfico) .....	16
Tabela 2.4 - Massa volúmica e baridade (levantamento bibliográfico) .....	18
Tabela 2.5 - Efeito de ricochete (Chan, 1998).....	26
Tabela 2.6 - Resistência à compressão de BPAR (Chan, 1998).....	27
Tabela 2.7 - Absorção de água de BPAR (Chan, 1998).....	28
Tabela 3.1 - Verificação do efeito de parede .....	31
Tabela 3.2 - Estimativa do $V_v$ em função da máxima dimensão do agregado, adaptado de Coutinho (1988) .....	31
Tabela 3.3 - Valores de K e K' .....	32
Tabela 3.4 - Classificação da trabalhabilidade .....	32
Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros A e B em função da trabalhabilidade (Coutinho, 1988).....	34
Tabela 3.6 - Coordenadas dos pontos para traçar a curva de Faury.....	35
Tabela 3.7 - Declives e ordenadas na origem da curva de referência sem cimento .....	36
Tabela 3.8 - Granulometria da curva teórica de Faury sem cimento .....	36
Tabela 3.9 - Composição do betão de referência .....	37
Tabela 3.10 - Composição do BP20.....	38
Tabela 3.11 - Composição do BP50 .....	38
Tabela 3.12 - Composição do BP100.....	39
Tabela 3.13 - Ensaio de durabilidade a realizar no estado endurecido .....	40
Tabela 3.14 - Ensaio mecânicos a realizar no estado endurecido .....	40
Tabela 4.1 - Resultados da massa volúmica e absorção de água dos agregados em estudo.....	52
Tabela 4.2 - Resultados para a baridade e percentagem de vazios dos agregados em estudo .....	52
Tabela 4.3 - Teor de humidade dos ARGB .....	53
Tabela 4.4 - Resistência à fragmentação pelo ensaio de Los Angeles.....	53
Tabela 4.5 - Índice de forma dos agregados utilizados .....	54
Tabela 4.6 - Relação a/c efetiva nos BP analisados .....	54
Tabela 4.7 - Perdas por efeito de ricochete.....	55



Tabela 4.8 - Resistência à compressão média estimada em cubos, adaptado de Duarte (2018).....	56
Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade secante para cada composição, adaptado de Duarte (2018) .....	57
Tabela 4.10 - Resultados obtidos para a absorção de água por imersão.....	59
Tabela 4.11 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	61
Tabela 4.12 - Qualidade do betão em função do coeficiente de absorção, adaptado de Browne (1991) .....	64
Tabela 4.13 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade .....	64
Tabela 4.14 - Evolução do coeficiente de difusão de cloretos .....	65
Tabela 4.15 - Resistência à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão (Gjørv, 2009) .....	67
Tabela 4.16 - Profundidade de carbonatação .....	68
Tabela 4.17 - Coeficientes de carbonatação dos betões estudados .....	70
Tabela 4.18 - Resultados obtidos no ensaio de retração .....	71
Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios aos agregados.....	75
Tabela 5.2 - Resultados da caracterização do betão no estado fresco .....	76
Tabela 5.3 - Resultados obtidos para a caracterização dos betões no estado endurecido .....	76

## Acrónimos

AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
AFN	Agregados finos naturais
AFR	Agregados finos reciclados
AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGN	Agregados grossos naturais
AGR	Agregados grossos reciclados
ARGB	Agregados reciclados grossos de betão
BR	Betão de referência
B20	Betão convencional com incorporação de 20% de ARGB
B50	Betão convencional com incorporação de 50% de ARGB
B100	Betão convencional com incorporação de 100% de ARGB
BAR	Betão com agregados reciclados
BAGR	Betão com agregados grossos reciclados
BARGB	Betão com agregados grossos reciclados de betão
BO	Betão de origem
BP	Betão projetado
BP20	Betão projetado com incorporação de 20% de ARGB
BP50	Betão projetado com incorporação de 50% de ARGB
BP100	Betão projetado com incorporação de 100% de ARGB
BPAR	Betão projetado com agregados reciclados
BPARGB	Betão projetado com agregados grossos reciclados de betão
BPR	Betão projetado de referência
RCD	Resíduos de construção e demolição
UE	União Europeia

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

O betão armado é uma das técnicas construtivas mais utilizadas na indústria da construção e, com o contínuo crescimento da população mundial e a conseqüente necessidade de habitações e edifícios de serviços, entre outros, prevê-se que continue a crescer. Este aumento traz consigo um agravamento da escassez de recursos naturais, e um crescente aumento dos resíduos da construção e demolição (RCD), pelo que é fundamental continuar a estudar alternativas que possam combater estas problemáticas.

A utilização de agregados reciclados (AR) em substituição dos agregados naturais (AN) é uma das soluções que pode combater simultaneamente a escassez de recursos e a produção em excesso de resíduos que, de outra forma, acabariam em aterros.

Inúmeros estudos foram levados a cabo com betões não projetados para compreender as implicações da utilização de AR no betão e, em geral, todos eles concluíram que, apesar de esta introdução conduzir a reduções de desempenho a nível mecânico e sobretudo de durabilidade, é possível obter betões com boa qualidade utilizando este tipo de agregados. No entanto, a informação sobre a utilização de AR na produção de betões projetados (BP) é praticamente nula.

O BP é uma técnica muito utilizada em obras subterrâneas e contenção de terras, que podem chegar a ter quilómetros de extensão, motivo pelo qual seria importante poder utilizar AR na produção de BP, evitando que grandes quantidades de resíduos fossem desperdiçadas. Para além destas utilizações, o BP é também muito vantajoso na reabilitação e reforço de estruturas, fundamentais no futuro da construção, bem como em estruturas com geometrias complexas, devido à redução de cofragem possibilitada por esta técnica. A possibilidade de aliar a reabilitação de estruturas com o reaproveitamento dos resíduos originados pela própria reabilitação é um grande avanço para a indústria da construção.

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo estudar o desempenho em termos de durabilidade de betões projetados com taxas de substituição de agregados grossos naturais (AGN) por agregados grossos reciclados de betão (ARGB) de 0, 20, 50 e 100%. Com este estudo, pretende-se validar a viabilidade técnica de esta solução, que permitirá diminuir o impacto ambiental da indústria da construção.

Refere-se ainda que esta dissertação foi realizada em paralelo com a dissertação com o tema “Avaliação do desempenho mecânico de betões projetados com agregados reciclados grossos de betão”, realizada por Gonçalo Filipe Marques Duarte, aluno do Instituto Superior Técnico (Duarte, 2018).

## 1.3. Metodologia e organização da dissertação

De modo a desenvolver a presente dissertação, foi necessário em primeiro lugar proceder à revisão da literatura nacional e internacional existente sobre a temática em estudo, nomeadamente

sobre ARGB, betões projetados com ARGB e ainda sobre betões não projetados com introdução de ARGB. Esta etapa foi fundamental para compreender as propriedades dos ARGB e a sua influência no betão. Esta revisão da literatura confirmou que não existe nenhum estudo que tenha avaliado a durabilidade de BP com AR, existindo apenas uma dissertação e um artigo, relacionados com mesma campanha experimental, que estudaram as propriedades mecânicas de BP com introdução de AR (Chan, 1998; Banthia & Chan, 2000). Por esta razão, foi necessário comparar os resultados obtidos com os valores obtidos para betões não projetados, análogos.

A segunda fase prende-se com o planeamento e execução de toda a campanha experimental, fundamental nesta dissertação. Todos os passos necessários à realização da mesma, desde o *procurement* do material até aos ensaios de caracterização do betão em termos de durabilidade no estado endurecido, são explicados em detalhe no capítulo 3 - Campanha experimental.

A dissertação divide-se nos seguintes capítulos:

- **1. Introdução** - o presente capítulo, onde se indica as motivações que conduziram à escolha do tema de esta dissertação, bem como os objetivos, metodologia e organização da mesma;
- **2. Estado-da-arte** - onde é apresentado o levantamento do conhecimento existente na literatura nacional e internacional sobre: betão projetado, agregados reciclados, betão não projetado (convencional) com introdução de AR e sobre betão projetado com introdução de AR;
- **3. Campanha experimental** - onde se encontra a descrição detalhada de todas as fases da campanha experimental, incluindo os procedimentos e tipo de provetes utilizados nos ensaios;
- **4. Análise de Resultados** - com a análise detalhada de todos os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade executados, bem como um breve resumo de algumas propriedades mecânicas determinadas por Duarte (2018);
- **5. Conclusões** - onde se apresenta uma síntese dos resultados analisados no capítulo anterior e se desenvolve as conclusões. Neste capítulo, adianta-se também algumas propostas para desenvolvimentos futuros a realizar no âmbito dos betões projetados com introdução de AR;
- **6. Referências bibliográficas** - contendo todas as referências a que se recorreu no decorrer da presente dissertação;
- **ANEXOS** - onde se podem encontrar informações complementares, como fichas de produto e tabelas de resultados detalhadas.

## 2. Estado-da-arte

Este capítulo tem como objetivo introduzir as temáticas abordadas nesta dissertação, fazendo um levantamento do conhecimento e estudos realizados até à data, em primeiro lugar sobre betão projetado (BP), em segundo sobre betão convencional produzido com agregados reciclados grossos de betão (BARGB) e, finalmente, em terceiro lugar, sobre betão projetado produzido com agregados reciclados grossos de betão (BPARGB). Este último ponto é sem dúvida aquele sobre o qual menos estudos foram realizados, o que prova o interesse e inovação do tema da presente dissertação.

### 2.1. Betão projetado

#### 2.1.1. Origem e principais aplicações

A origem do betão projetado remonta ao início do século XXI com a invenção da então chamada *Plastergun* (Figura 2.2) por *Carl Ethan Akeley* (Figura 2.1), taxidermista do *Field Columbian Museum* (agora *Field Museum of Natural History*) em Chicago. *Akeley* desenvolveu esta máquina, a pedido do diretor do museu, para projetar argamassa na fachada do museu. A 9 de Maio de 1911, *Akeley* registou a patente para esta máquina com o nome "*Apparatus for mixing and applying plastic or adhesive materials*". Mais tarde, os direitos da máquina foram comprados pela empresa *Cement Gun Company*, nome pelo qual a máquina tinha, entretanto, começado a ser conhecida (Teichert, 2002). Esta empresa foi a grande responsável pelo desenvolvimento e promoção do betão projetado nos EUA, tendo patenteado o nome *Gunite*. O processo que utiliza este tipo de máquina tem o nome de via seca. Atualmente existe um outro processo designado de via húmida, que utiliza um equipamento diferente, razão pela qual os dois processos possuem características diferentes, que são analisadas no ponto 2.1.3. deste documento.



Figura 2.1 - Carl Ethan Akeley (1864-1926), em 1910 (Teichert, 2002)



Figura 2.2 - Plastergun utilizada em 1907 por Carl Akeley (Teichert, 2002)

Em meados da década de 1930, a *American Railway Engineering Association* utilizou pela primeira vez o termo *Shotcrete* para descrever o betão projetado que, em 1951, foi adotado pelo *American Concrete Institute* e é atualmente um dos nomes pelos quais o betão projetado é mais conhecido, não só nos EUA, mas por todo o mundo. Nos anos 50, houve grandes evoluções, tendo sido desenvolvida a via húmida e a introdução de agregados grossos, que até então não eram introduzidos na mistura.

O termo *Shotcrete* continuou a ser utilizado para nomear este novo processo por via húmida. Durante os anos 70 e 80, continuaram os avanços em especial nas bombas de betão e nos materiais utilizados, como a adição de fibras, que permitiram a bombagem de betões com menor abaixamento a maiores distâncias e em maiores volumes. Mais recentemente, têm sido desenvolvidas técnicas utilizando robôs para projetar o betão, trazendo mais vantagens a esta técnica (ACI Committee 506, 2016). Nas normas europeias em vigor, EN 14487 e EN 14488, ambas adaptadas para norma portuguesa, respetivamente, NP EN 14487 (2008) e NP EN 14488 (2008), utiliza-se o termo *Sprayed Concrete* para designar o betão projetado.

O betão projetado pode ser aplicado em diversas situações das quais se destaca as seguintes: túneis (Figura 2.3), muros de contenção (Figura 2.4) e reabilitação e reparação de estruturas (Armen-gaud *et al.*, 2017).



Figura 2.3 - Farnworth Tunnel revestido a betão projetado, Bolton, Reino Unido (Murphy, 2015)



Figura 2.4 - Muro de contenção de terras em betão projetado, edifício Les Hautes de la Closerie, Nice, França (Peixoto, 2017)

### 2.1.2. Vantagens e desvantagens

Como referido por Ryan (1973), uma das principais vantagens do BP é a sua versatilidade e boa aderência a diversos materiais, que advêm da velocidade de impacto contra a superfície do material. A sua boa capacidade de aderência aliada à redução ou mesmo dispensa de cofragem tornam esta alternativa especialmente vantajosa, técnica e economicamente, para situações de reabilitação e reparação (ACI Committee 506, 2016). O facto de serem duas das grandes áreas de intervenção atual faz do BP uma técnica com bastante interesse.

Em situações de reparação, a utilização de BP reduz ainda em cerca de 50% a mão-de-obra necessária (American Shotcrete Association, 2017). Se às vantagens mencionadas se acrescentar a possibilidade de se utilizar materiais reciclados no seu fabrico, como cinzas volantes ou em especial agregados reciclados (AR), o BP revela ser um material que contribui para a sustentabilidade da construção, o que mostra a relevância do tema em estudo.

No entanto, o betão projetado traz também algumas desvantagens, a mais importante das quais é o efeito de ricochete. Este efeito caracteriza-se pelo ressalto dos agregados ao atingirem a superfície de projeção e pode atingir até cerca de 50% do volume de betão (Armelin & Banthia, 1998). No entanto,

este efeito nem sempre atinge valores tão elevados, especialmente se for utilizada a via húmida (ACI Committee 506, 2016), com a qual normalmente não se excede 10% de ricochete (Bravo, 2014). Este valor depende também da relação água/cimento (*a/c*), das dimensões dos agregados grossos, da temperatura, e da forma como o betão é projetado (ângulo, velocidade, caudal e distância) (Armengaud *et al.*, 2017), pelo que, quando o BP é corretamente aplicado por mão-de-obra experiente, a percentagem de ricochete é reduzida consideravelmente. Na Figura 2.5, pode-se observar o efeito do ângulo de projeção no ricochete; o ideal é a projeção a 90° e, se esse ângulo for reduzido, o ricochete aumenta e a força de impacto diminui, prejudicando a compactação do betão, uma vez que no BP a compactação do betão é realizada apenas pelo próprio processo de projeção.

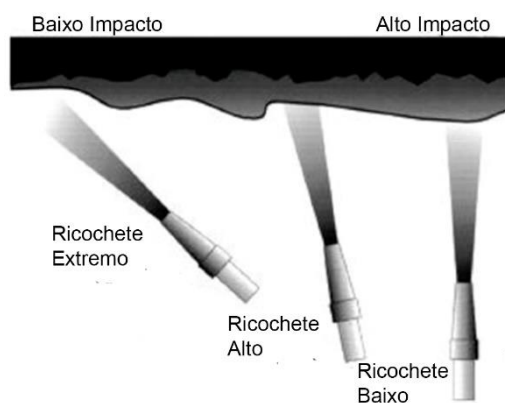


Figura 2.5 - Ricochete em função do ângulo de projeção, adaptado de ACI Committee 506 (2016)

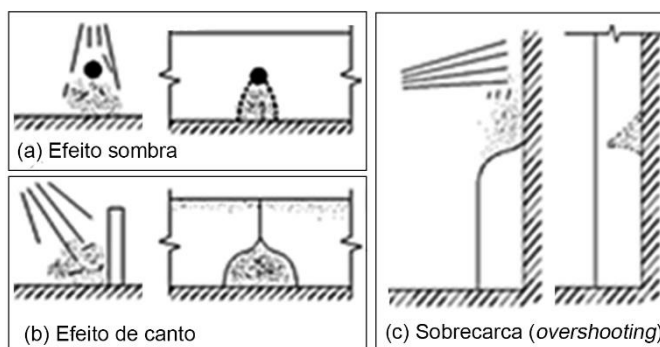


Figura 2.6 - Efeitos de formação de bolsas de material proveniente do ricochete (Ryan, 1973)

Outra desvantagem do BP é a formação de bolsas com o material que sofreu ricochete, devido a acumulações em cantos (Figura 2.6.b), projeção excessiva (*overshooting*) (Figura 2.6.c) ou sobretudo devido ao efeito de sombra (Figura 2.6.a) provocado pelas armaduras do betão. Estes efeitos acontecem sobretudo quando o BP é aplicado por mão-de-obra inexperiente e não são garantidos os espaçamentos recomendados entre armaduras (Ryan, 1973). Como na campanha experimental em estudo não foram utilizadas armaduras, o efeito de sombra não foi relevante e foram tomadas medidas para evitar o efeito de canto e o *overshooting*, nomeadamente a projeção junto à base para evitar o efeito de canto, e a remoção dos excessos de ricochete acumulados, de modo a evitar o *overshooting*.

### 2.1.3. Via seca e via húmida

A principal diferença entre os dois processos é o momento em que se adiciona a água à mistura. Enquanto pela via seca a água apenas é adicionada na extremidade da mangueira pelo operador, que regula a quantidade adicionada, pela via húmida todos os componentes, incluindo a água, são previamente misturados e só depois projetados (Armengaud *et al.*, 2017). Esta diferença entre os dois processos vai conduzir a diferentes resultados nas várias propriedades do betão.

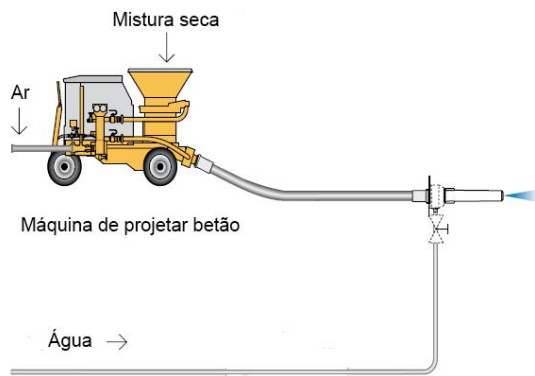


Figura 2.7 - Representação esquemática da via seca (Sika, 2010)

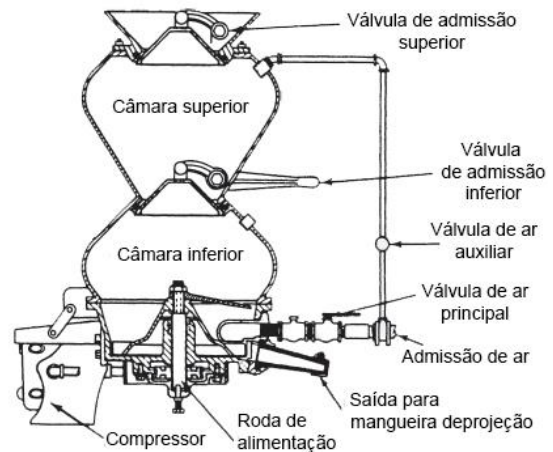


Figura 2.8 - Esquema de equipamento de pressão de câmara dupla (ACI Committee 506, 2016)

Na Figura 2.7, encontra-se representado um esquema do processo por via seca. Em primeiro lugar, começa-se por introduzir ar comprimido na mangueira de projeção, de seguida é introduzida lentamente a mistura de agregados e cimento, proveniente da misturadora, e finalmente o operador da boca de injeção controla a água necessária para obter a trabalhabilidade pretendida. Existem dois tipos de equipamentos que se pode utilizar nesta via: equipamentos de pressão e equipamentos de rotor, também chamados de alimentação contínua. Os equipamentos de pressão podem ser de uma ou duas câmaras e na Figura 2.8 pode-se observar um esquema de um equipamento de duas câmaras. A câmara inferior é a primeira a ser preenchida; depois de esta estar cheia, a válvula de admissão inferior permite criar pressão na câmara inferior e iniciar a projeção, enquanto se atesta a câmara superior, permitindo assim uma utilização contínua do equipamento (ACI Committee 506, 2016).

Na via húmida, a mistura é colocada na máquina de projeção já com a água, sendo necessário apenas introduzir ar comprimido de forma a controlar a velocidade da projeção. Esta via tem algumas vantagens: em primeiro lugar, pela via húmida obtém-se propriedades mais consistentes e previsíveis e uma maior segurança na relação *a/c* efetiva, devido à maior segurança na quantidade de água adicionada, que não se tem pela via seca (Burns, 2008); adicionalmente, o ACI Committee 506 (2016) refere que, através da via húmida, se consegue menores perdas de material por ricochete e também menor formação de pó durante o processo de projeção. Este refere ainda que esta via permite maiores volumes de projeção para os mesmos diâmetros de extremidade da boca de injeção. No entanto a via húmida é mais suscetível de causar entupimentos na mangueira de projeção, devido ao endurecimento da pasta de cimento, e requer a lavagem de todo o equipamento sempre que é interrompida a projeção. Esta desvantagem conduz a custos de manutenção bastante superiores, relativamente à via seca, razão pela qual muitas empresas optam pela via seca.



## **2.1.4. Propriedades do BP no estado fresco**

### **2.1.4.1. Massa volúmica**

Segundo o Concrete Institute of Australia (2010), a massa volúmica de um BP normal varia entre 2200 e 2400 kg/m<sup>3</sup>. Gasparim (2007), na sua campanha experimental, que englobou 24 tipos de BP, obteve valores entre 2462 e 2561 kg/m<sup>3</sup> para a massa volúmica. Estes valores, tal como concluído por Bravo (2014), são semelhantes aos esperados para um betão convencional.

### **2.1.4.2. Capacidade de bombeamento, projeção e trabalhabilidade**

No BP, é fundamental assegurar que a mistura, por um lado, seja fluida, de modo a poder ser bombeada, e por outro, que tenha alguma rigidez, de forma a não haver perdas excessivas por ricochete, que tenha uma boa aderência ao suporte e uma boa coesão da mistura (Austin *et al.*, 2015).

É, pois, importante controlar a trabalhabilidade do BP, que está intimamente ligada a estas duas capacidades, bombeamento e projeção. Geralmente, para atingir a fluidez necessária para o bombeamento, é necessário aumentar a relação a/c, mas este aumento leva a perdas de resistência, pelo que muitas vezes se recorre a superplastificantes para atingir uma maior trabalhabilidade sem aumentar a relação a/c (ACI Committee 506, 2016).

## **2.1.5. Propriedades do BP no estado endurecido**

### **2.1.5.1. Resistência à compressão**

A resistência à compressão é uma das principais propriedades de um betão e depende, entre outros factores, da relação a/c e da quantidade de cimento. Em geral, a resistência à compressão aumenta com o aumento da quantidade de cimento e com a diminuição da relação a/c. Outro fator que pode influenciar bastante a resistência de um betão é a compactação e, no caso do BP, esta é efetuada utilizando apenas a própria força de projeção, o que se pode traduzir em valores inferiores de resistência. No entanto, o BP obtém normalmente valores entre 28 e 41 MPa, e consegue atingir valores superiores a 83 MPa quando utilizadas misturas com reduzida relação a/c e adição de sílica de fumo (ACI Committee 506, 2016).

Como o BP é utilizado sobretudo em túneis, contenção de terras e reabilitação, muitas vezes é mais importante assegurar uma maior resistência a curto prazo, o que se consegue utilizando aceleradores de presa. No entanto, a longo prazo, a resistência e durabilidade do betão é reduzida, como comprovaram vários autores (Prudêncio Jr., 1998; Jolin *et al.*, 1997; Gebler *et al.*, 1992; Schutz, 1982; Galobardes-Reyes, 2013), apesar de, nos últimos anos, terem sido desenvolvidos trabalhos no sentido de encontrar aceleradores que contrariem ou pelo menos reduzam esses efeitos negativos (Won *et al.*, 2015) e que estudem mais detalhadamente os fenómenos que os provocam (Salvador *et al.*, 2016).

### 2.1.5.2. Resistência à penetração de cloretos

Um dos principais mecanismos de degradação das estruturas de betão é a penetração dos iões cloreto, em especial em estruturas próximas do mar e em pontes. A penetração destes iões até ao nível das armaduras causa a sua corrosão, provocando fendilhação, destacamentos e eventualmente perdas de resistência da estrutura, o que exigirá uma ação de manutenção precoce.

A penetração dos cloretos pode ocorrer de três formas distintas: através de absorção capilar, permeação e difusão. A absorção capilar acontece, como o próprio nome indica, através da absorção, por parte dos poros do betão, da água que ciclicamente entra em contacto com a superfície do betão exposta às condições ambientais. Ao absorver a água, os iões cloreto nela dissolvidos são transportados para o interior do betão. Apesar de este processo ser muito comum, raramente é responsável por levar os cloretos até às armaduras, mas diminui rapidamente a distância que os mesmos têm de percorrer por difusão.

A permeação resulta das diferenças de pressão entre a superfície e o interior do betão. Com o aumento da pressão exterior, e no caso de existirem iões cloreto na superfície, dá-se a migração destes para o interior do betão. Contudo, é raro haver as condições necessárias para que este mecanismo ocorra (Stanish et al., 1997).

Por último, a difusão é, das três, a principal responsável por fazer chegar os cloretos às armaduras, pelo que o seu funcionamento será detalhado um pouco melhor. A difusão consiste no transporte dos iões cloreto através de um gradiente de concentrações e, para que este movimento ocorra, é necessária a existência de uma fase líquida contínua. O processo de difusão é regido pela 1ª lei de Fick, que toma a seguinte equação, numa situação unidimensional:

$$J = -D_{eff} \frac{dC}{dx} \quad (2.1)$$

Onde:

$J$  - fluxo de iões cloreto [kg/s];

$D_{eff}$  - coeficiente de difusão efetiva [m<sup>2</sup>/s];

$C$  - concentração de iões cloreto [kg/m<sup>3</sup>];

$x$  - distância à superfície [m].

A equação (2.1) só pode ser utilizada depois de se ter atingido um regime estacionário, ou seja, quando a concentração não variar ao longo do tempo. No entanto, pode-se derivá-la e assim obter uma equação para um regime não estacionário, a que se dá o nome de 2ª lei de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

Adotando as seguintes condições de fronteira: a concentração à superfície é constante; a concentração inicial no betão é nula; qualquer ponto suficientemente longe da superfície tem concentração nula, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{eff}t}}\right) \quad (2.3)$$

Onde:

$C(x, t)$  - Concentração de iões cloreto a uma distância  $x$  da superfície após o tempo  $t$ ;

$\operatorname{erf}$  - Função de erro.

Existem vários fatores que influenciam a difusão no betão, a começar pelas próprias características do betão. Ao ser um material poroso, vai ter uma fase sólida e outra líquida/gasosa, o que conduz a um fluxo não homogéneo, que não vai depender só do coeficiente de difusão através dos poros (fase líquida/gasosa), mas da quantidade de água presente nos poros e da própria estrutura e disposição dos poros no betão. No entanto, o valor do coeficiente já tem, implicitamente, estes efeitos incluídos (Stanish *et al.*, 1997).

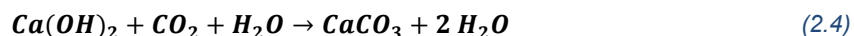
Outros factores, como a relação a/c, a idade do betão e a introdução de cinzas volantes ou outros materiais, vão influenciar a estrutura do betão e o estado de hidratação do mesmo, influenciando também a penetração dos cloretos. A temperatura de cura do betão também pode afetar a difusão dos cloretos: quanto mais elevada for a temperatura de cura, mais rapidamente ocorre a hidratação do betão, apresentando assim uma melhor resistência à penetração que um betão da mesma idade, mas com uma cura a uma temperatura mais baixa. Embora a curto prazo traga vantagens, a longo prazo o betão de cura normal apresentará um coeficiente de difusão de cloretos mais baixo, do que recorrendo a temperaturas elevadas. Para além destes fatores, o próprio betão pode reagir com os iões cloreto, reduzindo a quantidade de iões que se propagam por difusão. Este efeito é controlado pelo tipo de cimento e adições utilizadas na mistura, e pode ser tido em conta se for determinado o coeficiente de difusão apenas depois de se ter atingido um estado estacionário, quando se pode considerar que já todas as reações ocorreram (Santos, 2011).

Tendo em conta que o BP terá tendência a ser mais poroso, devido à baixa compactação, é de esperar que a resistência à penetração dos iões cloreto seja também mais baixa.

### **2.1.5.3. Resistência à carbonatação**

A carbonatação é o processo através do qual o dióxido de carbono, presente na atmosfera, penetra nos poros do betão reagindo com os componentes alcalinos do betão, reduzindo assim a sua alcalinidade, levando à despassivação das armaduras e permitindo a sua corrosão (Santos, 2011).

Neste processo, ocorrem várias reações como a do dióxido de carbono com o hidróxido de sódio e de potássio, dissolvidos na solução intersticial dos poros do betão, mas a principal reação responsável pela carbonatação é a do dióxido de carbono com o hidróxido de cálcio, que se apresenta de seguida:



Para garantir a segurança das estruturas de betão, é fundamental controlar a profundidade da carbonatação. Esta profundidade mede-se desde a superfície exposta à atmosfera e vai aumentando gradualmente para o interior. À linha que separa a zona carbonatada do resto do betão dá-se o nome de frente de carbonatação. Existem vários métodos para identificar a posição da frente de carbonatação, tanto em estruturas existentes como em provetes de ensaio.

Nesta dissertação, foram realizadas carotes em painéis de betão projetado, que foram pulverizadas com um indicador ácido / base, neste caso uma solução incolor de fenolftaleína, que em meios com pH superior a 9 (meios alcalinos), apresenta uma cor rosa-carmim, permitindo distinguir a zona carbonatada (zona incolor) da zona não carbonatada (zona rosa-carmim), como se pode observar na Figura 2.9.

Em estruturas já existentes, também é possível determinar a frente de carbonatação através da realização de um orifício junto à superfície do betão exposta e analisando, com o mesmo indicador, a superfície do furo. Este processo repete-se, aumentando gradualmente a profundidade do orifício e analisando o respetivo pó, até o indicador mostrar uma cor rosa-carmim, o que indica que se atingiu a frente de carbonatação (Ware, 2013).

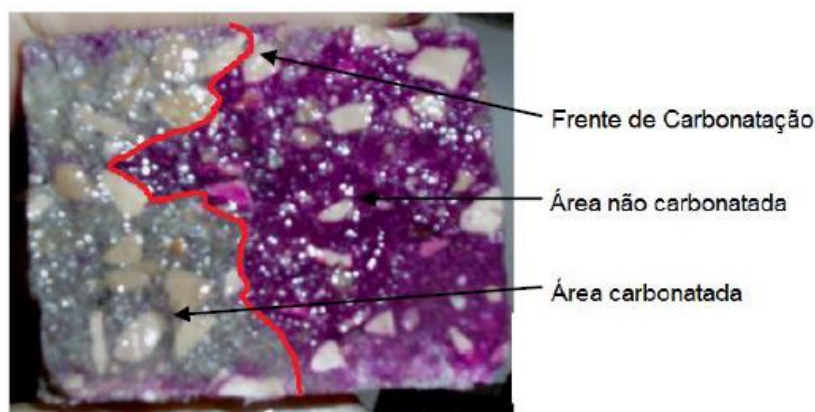


Figura 2.9 - Frente de carbonatação num provete de betão projetado (Santos, 2011)

É importante não só poder medir a profundidade da frente de carbonatação, mas também poder estudar a sua evolução ao longo do tempo, de forma a tomar as medidas necessárias para garantir um bom funcionamento da estrutura até ao fim da sua vida útil. Existem vários modelos de previsão propostos, em geral, baseados em estudos empíricos ou semi-empíricos.

Estes modelos não são muito exatos e são bastante complexos, uma vez que existem múltiplas variáveis a influenciar a velocidade de carbonatação, tais como a relação entre concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e no betão, o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$ , a permeabilidade, a humidade relativa, a resistência à compressão, o grau de hidratação, entre outros. A maioria destes modelos utiliza a seguinte equação para determinar a profundidade da carbonatação (Bravo, 2016):

$$x = K_c \sqrt{t} \quad (2.5)$$

Onde:

$x$  - Profundidade de carbonatação [mm];

$K_c$  - Coeficiente de carbonatação [mm/ano<sup>0,5</sup>];

$t$  - Tempo de exposição [anos].

Apesar de a expressão em si ser simples, a determinação do  $K_c$  é complexa, pois reflete a influência das características do betão e da exposição ambiental, nomeadamente da humidade. Nestes estudos, é a relação entre as concentrações de CO<sub>2</sub> no exterior e no interior do betão, e não os seus valores absolutos, que influenciam os modelos, pelo que é possível desenvolver ensaios experimentais acelerados, recorrendo a câmaras de carbonatação, onde se pode controlar a temperatura, humidade e teor de CO<sub>2</sub>.

Tal como no caso dos cloretos, devido à maior porosidade do BP, é esperado que este também apresente valores inferiores para a resistência à carbonatação.

#### **2.1.5.4. Absorção de água**

A absorção de água, processo pelo qual a água é absorvida pelo betão através dos seus poros e pela ação das forças capilares, é uma das propriedades diretamente relacionadas com a durabilidade de um betão, pois quanto maior a absorção de água maior a facilidade com que os agentes de degradação, como os cloretos e os sulfatos, entram no betão (Levy, 2001).

Esta pode ser medida através de ensaios de absorção por capilaridade e por imersão, e corresponde ao volume total de poros permeáveis, enquanto o índice de vazios representa todos os poros do betão. Por esta razão, a absorção é fortemente influenciada pela estrutura de poros. A porosidade pode classificar-se quanto à dimensão e forma dos poros.

Quanto à dimensão (Coutinho & Gonçalves, 1994):

- a) Grandes poros (dimensão >10 µm): derivados da granulometria e métodos de mistura e compactação;
- b) Poros capilares (dimensão entre 2 e 10 µm): resultantes do excesso de água de amassadura;
- c) Pequenos poros (dimensão da ordem do nanómetro): resultantes das reações de hidratação do betão, independentes da quantidade de água.

Quanto à forma (Coutinho & Gonçalves, 1994):

- a) Porosidade fechada: os poros não comunicam entre si;
- b) Porosidade aberta: os poros comunicam entre si, formando canais ou capilares de diâmetro maior ou menor.

No betão projetado, a porosidade deve-se essencialmente à granulometria, à relação a/c e à velocidade de impacto, e em geral obtêm-se valores entre 14 e 17% (Santos, 2011).

A utilização de agregados mais porosos irá conduzir a resultados superiores de absorção, enquanto a utilização de baixas relações a/c levará a baixas absorções. No entanto, betões demasiado

secos poderão conduzir a valores superiores, de absorção, devido à sua baixa trabalhabilidade. Uma velocidade de impacto baixa não assegurará uma compactação suficiente, uma vez que, no betão projetado, a compactação se deve unicamente à própria projeção (ACI Committee 506, 2016).

### **2.1.5.5. Retração**

A retração é uma propriedade muito importante pois pode influenciar a durabilidade do betão. No caso de intervenções de reparação, por exemplo, é essencial assegurar uma boa aderência do BP ao suporte, de forma a diminuir a fendilhação e evitar possíveis destacamentos devido às tensões tangenciais provocadas pela retração.

No BP, são utilizadas, geralmente, granulometrias inferiores às utilizadas em betões convencionais, resultando em betões com uma quantidade de pasta cimentícia maior e, logo, também uma retração maior. Habitualmente, o BP tem uma relação a/c mais baixa do que um betão convencional, o que pode diminuir a retração mas, e em especial na via seca, é difícil controlar a relação a/c efetiva, não havendo garantias de que a relação a/c se mantenha baixa. Os agregados também afetam a retração pelo que agregados de diferentes origens podem conduzir a diferentes retrações. Sabe-se ainda que a utilização de aceleradores de presa aumenta a retração e o risco de fendilhação (ACI Committee 506, 2016).

No seu estudo sobre retração e durabilidade do BP, Lagerblad *et al.* (2010) confirmam que a retração no BP é maior do que no betão convencional, devido à maior porosidade deste. Os mesmos autores afirmam ainda que, por o BP ser muitas vezes aplicado numa base já rígida, as reações de hidratação ocorrem num ambiente mais constricto, conduzindo a uma maior fissuração.

## **2.2. Agregados reciclados**

### **2.2.1. Considerações gerais**

Segundo a European Aggregates Association, em 2015, na União Europeia (EU), foram produzidos 2524 milhões de toneladas de agregados dos quais apenas 196 foram de AR. Apesar de este valor representar um ligeiro aumento em relação a valores de 2012, onde se registou uma produção de 178 milhões de toneladas de AR, este aumento deve-se mais provavelmente a uma escassez de AN do que a uma procura por utilizar materiais mais sustentáveis (UEPG, 2018). Para além destes dados, sabe-se que, só na Europa, se produzem anualmente cerca de 850 milhões de toneladas de RCD. Embora haja alguma discordância acerca deste, valor fica claro que a indústria da construção tem um forte impacte ambiental (Evangelista, 2014).

É assim vital implementar medidas que possam mitigar o impacte ambiental desta grande indústria, uma delas é a utilização de AR, que diminui por um lado o consumo de AN e, por outro, diminui a quantidade de resíduos depositados em aterros.

A norma NP EN 12620:2002+A1 (2010) define agregado reciclado como sendo um agregado proveniente do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção. Existe assim uma grande variedade de agregados aos quais se pode chamar reciclados, desde agregados

provenientes diretamente de resíduos da construção e demolição (RCD), sem nenhuma seleção particular, até agregados em que se aproveita apenas um determinado tipo de resíduo, por exemplo apenas resíduos cerâmicos ou apenas betão. Na presente dissertação, foram estudados agregados reciclados de betão (ARB), ou seja, provenientes apenas de betão triturado. Os ARB são constituídos pelos AN originalmente presentes no betão de origem, e pela argamassa a estes aderida depois de triturados (Pacheco, 2014), como se pode observar na Figura 2.10. Segundo Poon et al. (2004), os AN representam cerca de 65 a 70% do volume dos ARB.

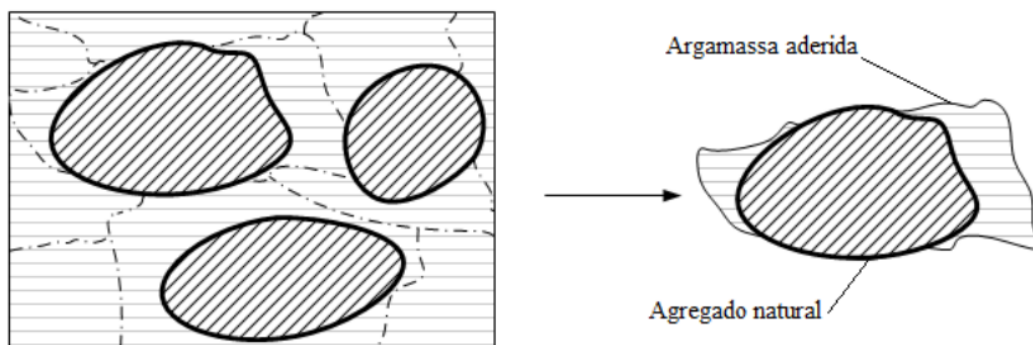


Figura 2.10 - Gênese dos ARB (Pereira, 2010)

### 2.2.2. Propriedades dos agregados reciclados

Os agregados são um dos principais constituintes de um betão e, como tal, têm uma grande influência nas suas propriedades. Relativamente aos ARB, Soares (2014) afirma que a sua introdução, total ou parcial, num betão conduz a um desempenho inferior quando comparado com um betão análogo, utilizando exclusivamente AN. Refere ainda que este desempenho inferior se deve às diferentes características destes agregados, nomeadamente à presença da argamassa aderida aos ARB.

Apesar de os AR poderem apresentar um desempenho inferior, vários autores, como Chan (1998), Kwan *et al.* (2012), Bravo *et al.* (2015) e Pacheco *et al.* (2017), concluíram que é viável utilizar AR na produção de betão, mas é recomendável que se imponha limitações ao seu uso e que seja controlada a sua qualidade.

#### 2.2.2.1. Forma das partículas

A forma das partículas influencia as propriedades finais do betão, tal como a trabalhabilidade, ângulo de atrito interno, compacidade e todas as propriedades que dependam da quantidade de água de amassadura (Coutinho, 1988). Sabe-se também que partículas alongadas e lamelares são indesejáveis para o fabrico de betão, dando-se preferência a partículas de maior esfericidade e angulosas.

A origem dos AR é um fator preponderante na forma dos agregados. Levy (2001) atesta que, dependendo do tipo de britadora utilizada, se obtém agregados totalmente diferentes entre si. Fonseca (2009), citando Gonçalves & Neves (2003), indica que a utilização de uma britadora de maxilas seguida de uma rotativa, conduz a granulometrias e formas mais favoráveis. Apesar das possíveis variações, pode-se admitir que, em geral, os ARGB apresentam uma superfície mais rugosa e alongada, que conduz

a uma redução na trabalhabilidade e aumento de absorção de água (Fonseca, 2009; Pacheco, 2014; Soares, 2014). Contudo, esta superfície pode também conduzir a um aumento de resistência, pois pode favorecer as ligações entre a matriz cimentícia e os agregados, como comprovado por Leite (2001).

A forma das partículas pode ser determinada recorrendo a vários ensaios diferentes. Os principais parâmetros determinados são o índice de forma, o índice volumétrico, o índice de angulosidade, o índice de achatamento, o coeficiente volumétrico e o coeficiente de escoamento (Fonseca, 2009).

Nesta dissertação, apenas se realizou o ensaio do índice de forma (SI), que corresponde à percentagem das partículas com relação comprimento/espessura maior do que 3, expressa em relação à massa total do provete ensaiado. Para tal recorreu-se à norma EN 933-4 (2008). Na Tabela 2.1, encontram-se os resultados obtidos por diversos autores para o índice de forma. Como se pode constatar, o valor do índice de forma dos ARGB é em geral superior ao dos AN, mas os valores de Soares (2014) são inferiores para os ARGB, o que se pode dever aos diferentes métodos de britagem utilizados.

*Tabela 2.1 - Índice de forma (levantamento bibliográfico)*

Fonte	Tipo de agregado	SI (%)
Fonseca (2009)	Bago de arroz	8,6
	Brita 1	13,4
	Brita 2	11,1
	ARGB	24,3
Larrañaga (2004)	AGN: 6 - 12 mm	21,0
	AGN: 12 - 18 mm	24,0
	AGN: 18 - 25 mm	29,0
	ARGB: 6 - 12 mm	24,0
	ARGB: 12 - 18 mm	28,0
	ARGB: 18 - 25 mm	31,0
Etxeberria <i>et al.</i> (2007)	AGN	25,0
	ARGB	28,0
Soares (2014)	Bago de arroz	16,4
	Brita 1	21,7
	Brita 2	14,5
	ARGB: 4 - 10 mm	11,5
	ARGB: 10 - 20 mm	12,2

### **2.2.2.1. Resistência mecânica**

A resistência mecânica dos ARB é, em geral, inferior à dos AN, devido à argamassa aderida aos primeiros, proveniente do betão que lhes deu origem. Vários autores confirmaram que a resistência dos ARB depende da do próprio betão de origem, da quantidade de argamassa aderida aos ARB e também dos AN presentes nos mesmos (Larrañaga, 2004; Tabsh & Abdelfatah, 2009; Fonseca, 2009; Soares, 2014).

Para determinar a resistência mecânica dos agregados, é aconselhado utilizar o ensaio de Los Angeles seguindo a norma NP EN 1097-2 (2011), que permite aferir a resistência à fragmentação. Este



ensaio consiste em colocar uma amostra de agregado num tambor rotativo com esferas de aço. Depois da centrifugação terminar determina-se a massa retida num peneiro de 1,6 mm ( $m$ ). Com este resultado calcula-se o coeficiente de Los Angeles ( $\Delta LA$ ) da seguinte forma:

$$\Delta LA = \frac{5000}{50} - m (\%) \quad (2.6)$$

A norma NP EN 12620:2002+A1 (2010) indica que valores de  $\Delta LA$  iguais ou inferiores a 40 são aceitáveis para utilização em betão.

Na Tabela 2.2 , encontra-se o levantamento bibliográfico realizado para os valores do  $\Delta LA$  . Como se pode constatar, o valor para os agregados reciclados encontra-se aproximadamente entre 30 e 40, cerca de 30% superior ao valor referente aos AN. Apesar de apresentarem um desempenho inferior aos AN, os AR continuam a cumprir o estipulado na norma NP EN 12620:2002+A1 (2010), obtendo valores inferiores a 40 para  $\Delta LA$ , tal como concluído por Soares (2014).

*Tabela 2.2 - Coeficiente de Los Angeles (levantamento bibliográfico)*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de agregado</b>	<b><math>\Delta LA</math></b>
Soares (2014)	Bago de arroz	22,3
	Brita 1	27,2
	Brita 2	31,5
	ARGB: 4 - 10 mm	33,3
	ARGB: 10 - 20 mm	41,2
Malesev <i>et al.</i> (2010)	AGN: 4 - 8 mm	26,3
	AGN: 8 - 16 mm	29,0
	AGN: 16 - 31,5 mm	29,2
	ARGB: 4 - 8 mm	29,6
	ARGB: 8 - 16 mm	33,7
Juan & Gutiérrez (2009)	ARGB: 16 - 31,5 mm	34,0
	ARGB	38,9
Fonseca (2009)	Bago de arroz	28,3
	Brita 1	29,4
	Brita 2	30,7
	ARGB	42,7
Gomes (2007)	AGN	28,5
	ARGB	38,0
Larrañaga (2004)	AGN	19,8
	ARGB	33,5
Barra & Vasquez (1998)	ARGB: 6 - 12 mm	29,5
	ARGB: 12 - 20 mm	31,0
<b>Média</b>	<b>AGN</b>	<b>27,5</b>
<b>Desvio-padrão</b>		<b>3,5</b>
<b>Média</b>	<b>ARGB</b>	<b>35,0</b>
<b>Desvio-padrão</b>		<b>4,5</b>

### 2.2.2.1. Absorção de água

A absorção de água é uma das principais propriedades que distingue os AR dos AN. Enquanto com os AN não é necessário ter uma preocupação especial, visto terem uma taxa de absorção baixa, com os AR deve-se proceder a uma avaliação cuidada. No caso de serem utilizados AR, é importante que seja conhecida a sua taxa de absorção antes da sua utilização em novos betões, de forma a controlar as propriedades do novo betão. No caso dos ARGB, a elevada absorção deve-se sobretudo à argamassa aderida aos AN originais, e aumenta com o aumento da porosidade dos ARGB.

*Tabela 2.3 - Absorção de água (levantamento bibliográfico)*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de agregado</b>	<b>Absorção de água, 24h (%)</b>
Soares (2014)	Bago de arroz	1,0
	Brita 1	1,8
	Brita 2	1,3
	ARGB: 4 - 10 mm	4,6
	ARGB: 10 - 20 mm	4,7
Kou & Poon (2012)	AGN: 2,25 - 10 mm	1,1
	AGN: 5 - 20 mm	1,1
	ARGB: 2,25 - 10 mm	4,3
	ARGB: 5 - 20 mm	3,5
Rao <i>et al.</i> (2011)	AGN	1,1
	ARGB	3,9
Fonseca (2009)	Bago de arroz	1,7
	Brita 1	1,5
	Brita 2	1,3
	ARGB	6,1
Juan & Gutiérrez (2009)	ARGB: 4 - 8 mm	9,7
	ARGB: 8 - 16 mm	7,5
Ferreira (2007)	Brita 1	0,7
	Brita 2	1,2
	ARGB	5,8
Gomes (2007)	Brita 1	2,2
	Brita 2	2,3
	ARGB	8,5
Movassaghi (2006)	AGN	1,4
	ARGB	11,6
Matias & de Brito (2005)	AGN	0,8
	ARGB	4,1
<b>Média</b>	<b>AGN</b>	<b>1,4</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>AGN</b>	<b>0,5</b>
<b>Média</b>	<b>ARGB</b>	<b>6,2</b>
<b>Desvio</b>	<b>ARGB</b>	<b>2,6</b>

Segundo Leite (2001), uma das dificuldades em utilizar AR na produção de betão deve-se não só à sua elevada taxa de absorção, mas também à grande variabilidade desta, sobretudo por poder variar durante o processo de produção.

Contrariamente ao constatado com a resistência mecânica, a absorção de água não parece ser influenciada pela resistência do betão de origem, tendo em conta o estudo levado a cabo por Hansen & Narud (1983) que avaliaram ARGB provenientes de betões com diferentes relações a/c, e consequentemente diferentes resistências. Na Tabela 2.3, reúne-se o levantamento bibliográfico realizado, relativamente à taxa de absorção de água às 24 horas para AGN e ARGB, bem como a média e desvio-padrão obtidos a partir dos valores recolhidos.

De acordo com Larrañaga (2004), a absorção de água dos ARB depende do tamanho das suas partículas, da densidade e da quantidade de pasta de cimento aderida às mesmas. O mesmo autor refere ainda que a taxa de absorção aumenta com a diminuição do tamanho e densidade da pasta, ou seja, partículas maiores e com maior densidade absorvem menos água. Por outro lado, quanto maior a quantidade de pasta aderida, maior a taxa de absorção de água.

Nos seus trabalhos, Ferreira (2007) e Fonseca (2009) ambos observaram que a absorção de água por parte dos ARGB, no primeiro minuto corresponde a cerca de 70% do total absorvido às 24 horas e que ao fim de 5 minutos 90% da água já tinha sido absorvida. Após os 5 minutos, o processo de absorção mantém-se praticamente constante, como se pode constatar na Figura 2.11.

Uma vez que uma percentagem muito alta da absorção de água por parte dos ARGB se dá nos primeiros minutos, é possível determinar uma absorção potencial dos ARGB durante o tempo correspondente à amassadura do betão, 10-15 minutos, e adicionar uma quantidade extra de água, equivalente a essa absorção, de forma a evitar que ocorram alterações na relação a/c pretendida (Soares, 2014).

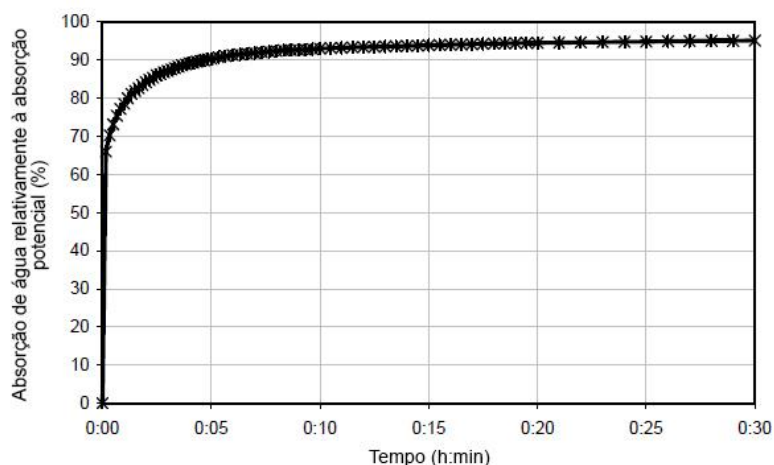


Figura 2.11 - Evolução da absorção de água dos ARGB ao longo do tempo (Fonseca, 2009)

### 2.2.2.2. Massa volúmica e baridade

A massa volúmica, quando se fala de agregados, é a razão entre a massa de uma partícula individual desse agregado e o volume da mesma e é uma das propriedades que melhor representa a qualidade dos

agregados. A baridade é definida como a massa por unidade de volume de um agregado contido num recipiente, sendo que este volume inclui os espaços entre as partículas do agregado e entre estas e o recipiente. A baridade depende do grau de compactação, da granulometria e da forma das partículas (Coutinho, 1988).

Para além da baridade, que se pode também chamar massa volúmica aparente, existem vários tipos de massa volúmica. Existe a massa volúmica dos agregados saturados com a superfície seca ( $\rho_{sss}$ ) que representa o quociente entre a massa dos agregados saturados com a superfície seca e o seu volume absoluto, incluindo o de todos os seus poros (volume exterior das partículas). Existe a massa volúmica das partículas secas ( $\rho_{rd}$ ), relação entre a massa do agregado seco em estufa e o volume exterior das suas partículas. Existe ainda a massa volúmica do material impermeável ( $\rho_a$ ), que corresponde à relação entre a massa do material seco em estufa e volume absoluto do material, incluindo apenas o volume dos poros não acessíveis à água (Coutinho, 1988).

Os AR apresentam, em geral, uma massa volúmica e baridade inferior à dos AN (de Brito, 2002), pois as matérias-primas que os originam são menos densas e mais porosas do que os AN, especialmente, no caso do ARGB, em que a pasta de cimento aderida aos agregados pode representar cerca de 30% do seu volume (Soares, 2014).

Como indicam Poon *et al.* (2004) e Larrañaga (2004), a massa volúmica depende da origem dos AR e das dimensões das partículas, por exemplo, ARGB provenientes de betões de elevado desempenho, que apresentam baixas relações *a/c*, possuem maior massa volúmica e menor porosidade do que ARGB com origem em betões de média resistência, que tem baixas relações *a/c*. Larrañaga (2004) refere ainda que o processo de britagem também influencia esta propriedade.

Na Tabela 2.4, encontram-se as médias e desvios padrão obtidos no levantamento bibliográfico das massas volúmicas, onde se pode constatar que os ARGB apresentam valores ligeiramente mais baixos e com uma dispersão ligeiramente superior. No anexo K, pode-se consultar o levantamento bibliográfico com os valores individuais obtidos por cada autor.

*Tabela 2.4 - Massa volúmica e baridade (levantamento bibliográfico)*

	Tipo de agregado	$\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{sss}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_b$ (Mg/m <sup>3</sup> )
Média	AGN	2,7	2,6	2,6	1,4
Desvio-padrão		0,0	0,0	0,1	0,1
Média	ARGB	2,6	2,4	2,3	1,3
Desvio		0,1	0,1	0,1	0,1

## 2.3. Propriedades do betão convencional produzido com AR

### 2.3.1. Considerações gerais

O betão armado continua a ser uma das técnicas mais utilizadas na indústria da construção, devido à sua facilidade de produção e baixos custos e pode até ser considerado em termos de impacte ambiental mais eficaz do que o aço, se considerado todo o processo de fabrico. Estima-se que se

produza 10 mil milhões de metros cúbicos de betão por ano em todo o mundo e apesar da crise económica sentida na Europa nos últimos anos, entre 2015 e 2017 a quantidade total de betão produzido nos países pertencentes à UE aumentou de 220 para 235 milhões de metros cúbicos (ERMCO, 2017).

Embora a uma taxa menor, a população mundial continua em crescimento e prevê-se que em 2030 atinja 8,6 mil milhões de pessoas (UN-DESA-PD, 2017) e que, em 2050, 68% vivam em áreas urbanas, correspondendo a um aumento de 18% em relação a 2018. O aumento na produção de betão confirma a tendência de a população viver cada vez mais em grandes áreas urbanas, aumentando a necessidade de novas habitações e a reabilitação das existentes.

Este aumento de procura tem como consequência direta a necessidade de maiores quantidades de agregados finos e grossos, aumentando o problema da escassez de recursos e trazendo consigo outros impactes ambientais negativos, como a alteração de escoamento no leito de rios, causada pela extração de areias, desflorestação originada pela criação de pedreiras a céu aberto e a geração de resíduos (Evangelista, 2014).

## **2.3.2. Propriedades no estado fresco**

### **2.3.2.1. Trabalhabilidade**

A trabalhabilidade avalia a maior ou menor facilidade com que um betão é transportado, colocado, compactado e acabado. Para avaliar esta propriedade, é importante saber os meios disponíveis para aplicar o betão, pois uma trabalhabilidade pode ser adequada para um determinado equipamento e para outro não o ser (Coutinho & Gonçalves, 1994).

Num estudo que envolva vários tipos de betão diferentes, é importante manter a trabalhabilidade constante, pois esta propriedade condiciona fortemente o desempenho do betão. Para aferir a trabalhabilidade, utiliza-se o ensaio do cone de Abrams, seguindo a norma NP EN 12350-2 (2009), onde se mede o abaixamento de um tronco de cone de betão, depois de se retirar rapidamente o molde (Soares, 2014).

Existem vários fatores que influenciam a trabalhabilidade do betão, como a relação a/c, a dimensão, forma e granulometria dos agregados e a sua capacidade de absorção de água (Akroyd, 1962). É assim de esperar que, substituindo os AN por ARGB com curvas granulométricas semelhantes, e mantendo a mesma relação a/c, se obtenham betões com uma trabalhabilidade inferior, devido à elevada absorção de água por parte dos ARGB (de Brito, 2005).

Para manter a mesma trabalhabilidade entre BR e BARGB análogos, é necessário compensar a maior absorção de água por parte dos ARGB. Existem duas possibilidades diferentes: pré-saturar os ARGB ou adicionar uma quantidade extra de água durante a amassadura, de modo a compensar a água absorvida por estes. No entanto, Fonseca (2009), citando Ferreira (2007), avança que a pré-saturação dos agregados é prejudicial ao desempenho mecânico do betão e, em especial, ao desempenho de durabilidade, sendo por isso preferível compensar a absorção adicionando água à amassadura. Poon *et al.* (2004) também chegaram à mesma conclusão, afirmando que pré-saturar os ARGB é nocivo para o betão.

### 2.3.2.2. Massa volúmica

A massa volúmica de um betão está diretamente ligada aos seus constituintes. Sendo os agregados um dos seus principais elementos, é de esperar que estes tenham uma grande influência nesta propriedade (de Brito, 2005). Assim, quanto maior for a massa volúmica dos ARGB, maior será a massa volúmica dos BARGB, como se pode observar na Figura 2.12 (Angulo, 2005).

Como referido, os ARGB possuem uma massa volúmica inferior à dos AN, pelo que os BARGB possuirão também uma massa volúmica inferior. Esta será dependente do grau de substituição de AN por ARGB, quanto maior o grau de substituição, menor a massa volúmica, como se pode observar na Figura 2.13, onde se encontram os dados do levantamento bibliográfico realizado por Fonseca (2009).

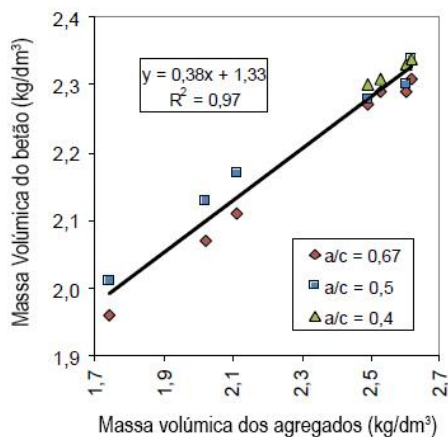


Figura 2.12 - Relação entre a massa volúmica do betão e a massa volúmica dos agregados (Angulo, 2005)

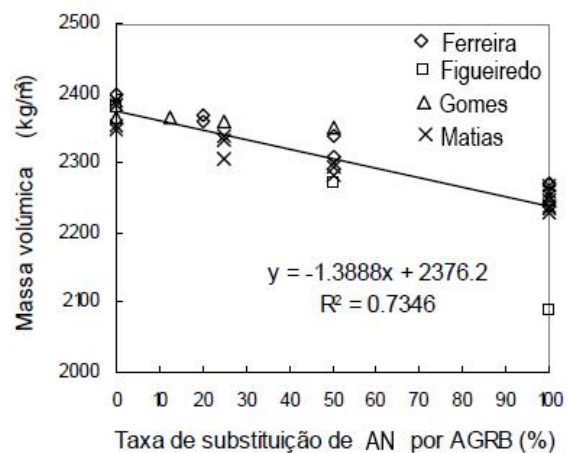


Figura 2.13 - Relação entre a massa volúmica do betão e a taxa de substituição de AN por ARGB, adaptado de Fonseca (2009)

### 2.3.3. Propriedades no estado endurecido

#### 2.3.3.1. Resistência à compressão

Apesar de a resistência à compressão dos ARGB ser inferior à dos AN, segundo de Brito (2005), desde que se mantenham as curvas granulométricas dos agregados e a trabalhabilidade do betão, é expectável que o BARGB e o BR apresentem resistências mecânicas semelhantes. Contudo, para classes de betão elevadas, a introdução de ARGB pode ter efeitos negativos significativos.

Rao *et al.* (2011) obtiveram valores de resistência à compressão aos 7 dias para betões com 50 e 100% de substituição de AN por ARGB (B50 e B100), superiores aos do BR. Contudo, adotaram uma taxa de crescimento da resistência ao longo do tempo inferior como se pode verificar na Figura 2.14. Os autores atribuíram este efeito à elevada absorção de água da argamassa aderida aos ARGB e à sua textura rugosa, que lhe proporcionaram uma melhor ligação entre a nova pasta cimentícia e os ARGB.

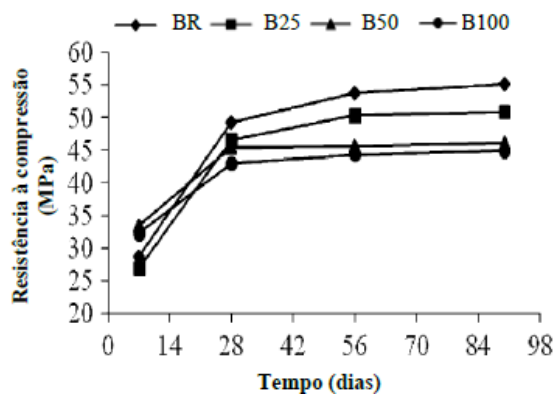


Figura 2.14 - Resistência à compressão ao longo do tempo (Rao et al., 2011)

Segundo Etxeberria *et al.* (2007), que realizaram estudos com betões com 25, 50 e 100% de AR, para betões com resistência à compressão entre 30 e 45 MPa, a substituição de 25% dos agregados conduz a resistências semelhantes entre BR e BAR análogos.

De modo semelhante, Limbachiya *et al.* (2000), refere que, para substituições até 30%, não se verificaram diferenças relevantes para os valores da resistência à compressão. Já aos 28 dias, betões com 100% de ARGB tiveram valores mais baixos comparativamente com betões com 30% de ARGB, revelando que elevados níveis de substituição têm efeitos negativos na resistência.

### 2.3.3.2. Resistência à penetração de cloretos

Para estudar a durabilidade de um betão, é fundamental determinar a sua resistência à penetração de cloretos. Uma vez que os ARGB são mais porosos, é expectável que a sua resistência à penetração de cloretos diminua com o aumento da taxa de substituição de AN por ARGB, devido à maior facilidade de penetração por parte dos agentes agressivos, neste caso os cloretos, no betão.

Kou & Poon (2012) estudaram betões com 20, 50 e 100% de substituição de AN por ARGB (B20, B50 e B100, respetivamente), tendo obtido reduções na resistência à penetração de cloretos. Os mesmos autores estudaram estes betões com diferentes tempos de cura, chegando à conclusão de que, para idades superiores, os betões apresentam uma resistência superior, devido ao maior volume de produtos hidratados e conseqüentemente menor volume de vazios. Foram ainda introduzidas cinzas volantes no fabrico do betão, levando a uma melhoria de desempenho dos betões.

No seu estudo, Rao *et al.* (2011) chegaram às mesmas conclusões, obtendo uma diferença entre o B100 e o BR de 0,7 mm para a profundidade de penetração, ou seja, uma profundidade 14% maior no B100. A evolução da penetração dos cloretos com o incremento da taxa de incorporação de ARGB obtida por estes autores encontra-se na Figura 2.15.

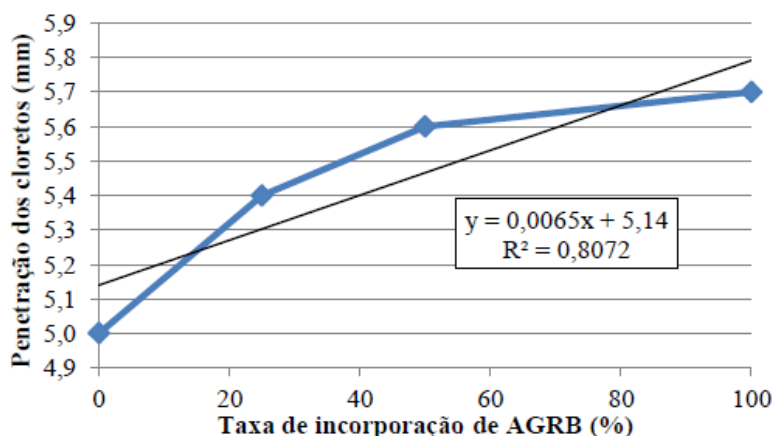


Figura 2.15 - Evolução da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de ARGB (Rao et al., 2011)

Matias & de Brito (2005), contrariamente ao esperado, obtiveram valores inferiores de penetração de cloretos em betões com 100% de ARGB, quando comparados com o BR. Esta tendência contrária ao esperado poderá justificar-se pela adição de superplastificante a este tipo de betão. Na Figura 2.16, pode-se observar que no B100 com superplastificante do tipo 2, ocorreu uma redução de cerca de 16%.

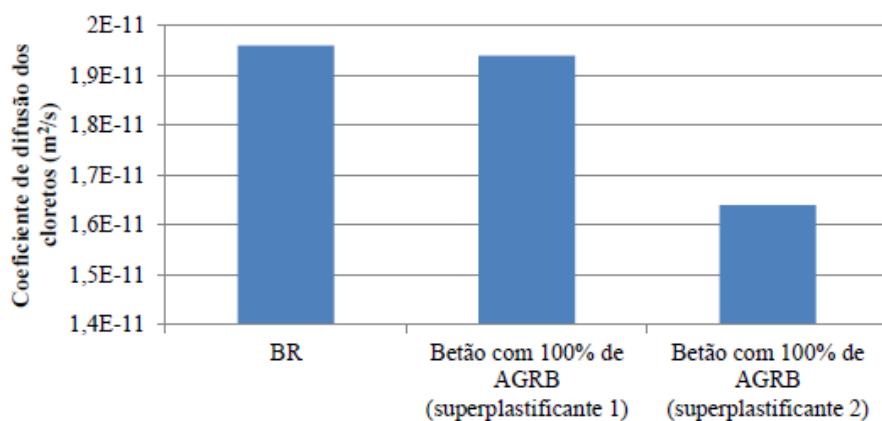


Figura 2.16 - Resultados para a penetração de cloretos (Matias & de Brito, 2005)

### 2.3.3.3. Resistência à carbonatação

Tal como a penetração dos iões cloro, a carbonatação é um dos principais mecanismos responsáveis pela despassivação das armaduras, no interior do betão, favorecendo o início da corrosão das mesmas e, conseqüentemente, degradando as estruturas de betão armado. É por isso de extrema importância avaliar a resistência à carbonatação de um betão ao longo da sua vida útil. Como referido acerca da penetração dos cloretos, a maior porosidade e permeabilidade dos ARGB irá prejudicar o desempenho do betão (Soares, 2014).

Rocha & Resende, (2004), citando Kikuchi *et al.* (1998), concluíram que os BARB apresentam uma maior profundidade de carbonatação do que o BR, quando submetidos a um ensaio acelerado de carbonatação, cujos resultados, segundo Levy (2001), apresentam uma clara correlação com os resultados obtidos em condições normais de exposição. No seu estudo, Kikuchi *et al.* (1998) concluíram



ainda que os betões com incorporação de agregados finos reciclados de betão (BAFRB) possuem maiores profundidades de carbonatação do que os BARGB.

Por outro lado, Levy (2001) obteve resultados semelhantes entre BARGB e BR. A diferença entre os resultados para os diferentes betões foi diminuindo à medida que se aumentou a resistência à compressão do betão, diminuindo a relação a/c. Este efeito pode ser observado na Figura 2.17. O investigador avança como justificação para estes resultados o facto de se ter utilizado uma maior quantidade de cimento nos BARGB, de modo a obter a mesma resistência à compressão, o que pode ter reduzido a permeabilidade do betão, travando a progressão do dióxido de carbono.

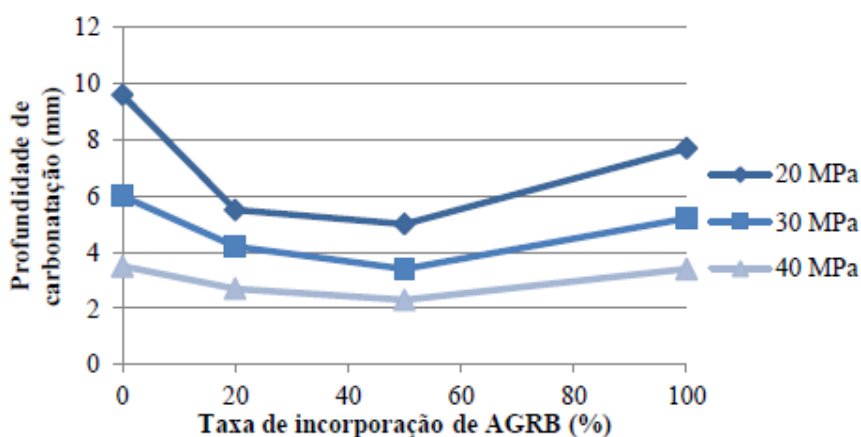


Figura 2.17 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição de ARGB (Levy, 2001)

#### 2.3.3.4. Absorção de água

Uma vez mais, a elevada porosidade dos ARGB, influencia negativamente o betão. Ao serem mais porosos, os BARGB irão possuir uma maior absorção de água e é expectável que esta aumente com o aumento da taxa de incorporação de ARGB (Soares, 2014).

Várias investigações, como as de Kou & Poon (2012), Matias & de Brito (2005), Maleševc *et al.* (2010) e Rao *et al.* (2011), concluíram que a absorção tanto por capilaridade como por imersão foram superiores nos BARGB. Maleševc *et al.* (2010) obtiveram um valor cerca de 44% superior para o B100 e 22% superior para o B50, quando comparado com o BR. No estudo de Matias & de Brito (2005), o ensaio de absorção por capilaridade teve uma considerável dispersão de resultados, entre 19% e 80%. Os autores apontam como justificação para esta dispersão a diferença entre as dimensões dos provetes nas duas fases, tendo concluído que os BARGB foram sensíveis a esta alteração de dimensões. Na Figura 2.18, pode-se ver claramente a ligação entre o aumento da absorção e o aumento da taxa de incorporação de ARGB.

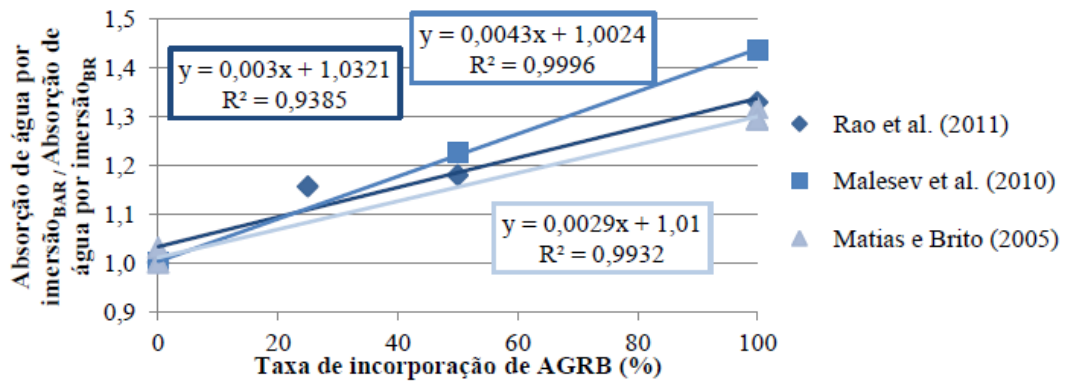


Figura 2.18 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de ARGB (Soares, 2014)

### 2.3.3.5. Retração

A retração é uma propriedade com grande importância no betão, pois pode ter uma influência direta sobre a deformação das estruturas. Pode dar origem a fissuração ao introduzir tensões internas no betão e conseqüentemente prejudicar a sua durabilidade e ainda provocar a perda de pré-esforço que pode afetar a estabilidade (de Brito, 2005).

Os betões com introdução de ARGB possuem uma maior retração relativamente a betões sem AR, sendo esta uma das propriedades apontada como mais afetada pela substituição de AN por AR. Esta diferença na retração deve-se ao menor módulo de elasticidade dos ARGB, que lhes confere menor capacidade de resistir à deformação. Deve-se também à maior absorção de água dos ARGB e à frequente maior quantidade de água ou cimento utilizada nas amassaduras, para manter a trabalhabilidade e resistência dos betões (Ferreira, 2007).

Gómez-Soberón (2001) afirma que, até taxas de substituição de 30%, a retração do betão não é afetada. Contudo, para taxas de incorporação de 60 e 100%, regista-se um aumento de cerca de 25%. Na Figura 2.19, pode-se observar claramente o referido, constatando-se dois grupos distintos, o primeiro formado pelo BR ( $r=0.0$ ) e pelos B15 e B30 ( $r=0.15$  e  $r=0.30$ ), com valores mais baixos, e outro formado pelos B60 e B100 ( $r=0.6$  e  $r=1.0$ ), com valores superiores, para a retração.

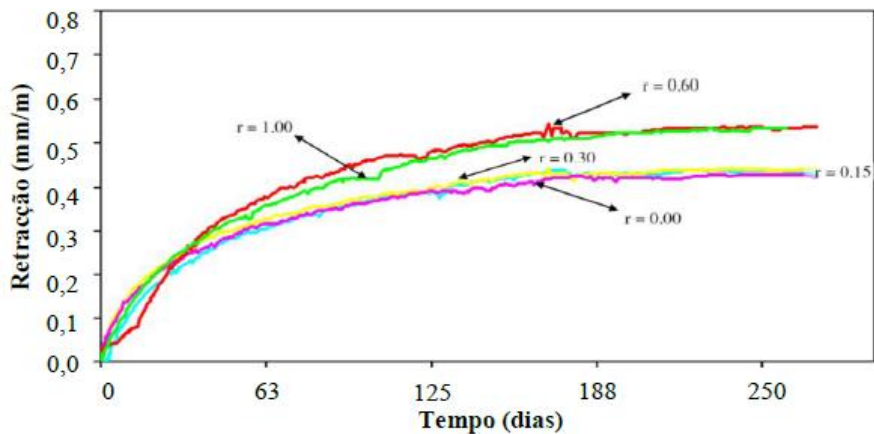


Figura 2.19 - Evolução ao longo do tempo da retração (Gómez-Soberón, 2001)

Na sua campanha experimental, Kou & Poon (2012) constataram que a retração do betão é afetada negativamente pela introdução de ARGB, verificando-se aumentos de cerca de 33%. Os investigadores apontam o acréscimo de pasta de cimento, aderida aos ARGB, como causa para este aumento. Indicam ainda que a introdução de cinzas volantes na composição do betão reduz a retração, sendo assim vantajosa a sua utilização.

Matias & de Brito (2005) confirmaram a tendência para o aumento da retração com a introdução de ARGB, tendo obtido incrementos de 23 e 52% em betões com 100% de ARGB e utilizando dois tipos de superplastificantes, concluindo que a utilização de superplastificantes permite compensar o efeito dos ARGB nesta propriedade.

Malešev *et al.* (2010) também avaliaram a retração de betões com incorporação de 0, 50 e 100% de ARGB, constatando, para um betão com 100% de ARGB, um aumento de 20% na retração, relativamente ao BR. Porém, o betão com 50% de substituição registou um valor inferior, contrariando o esperado. Esta tendência manteve-se em todas as idades estudadas, como se pode verificar na Figura 2.20.

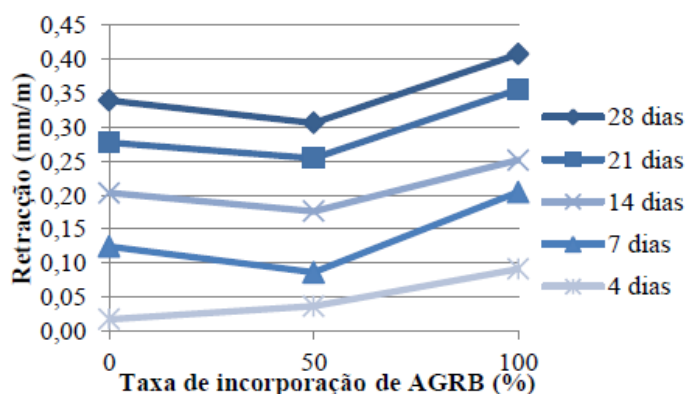


Figura 2.20 - Relação entre a retração e a taxa de substituição de ARGB (Malešev *et al.*, 2010)

## 2.4. Betão projetado com introdução de AR

### 2.4.1. Considerações gerais

Como referido, o betão projetado tem várias vantagens que o tornam interessante, como a reduzida mão-de-obra e a dispensa de cofragem. Mas tem também várias desvantagens, como o desperdício de material devido ao efeito de ricochete, o que a nível de impacte ambiental o podem tornar menos interessante. No entanto, a possibilidade de utilizar AR no seu fabrico é uma vantagem que contribui para a diminuição do impacte ambiental, pois por um lado reutiliza-se materiais que de outra forma iriam para aterros e, por outro, combate-se a escassez de recursos naturais (ACI Committee 506, 2016).

A aplicação de AR na produção de BP foi estudada por Chan (1998), na sua dissertação, onde analisou betões projetados e não projetados, com e sem substituição de AN por AR. No entanto, tirando este estudo, a informação sobre a utilização de AR em BP é muito escassa, principalmente em termos do estudo da sua durabilidade. Apesar da carência de informação, podem ser retiradas ilações do que esperar em cada propriedade, utilizando o conhecimento existente sobre BP e BAR.

Chan (1998) estudou BP por via seca e por via húmida, realizando ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, observação microscópica, entre outros ensaios mecânicos, mas nenhum ensaio de durabilidade, como a resistência à carbonatação ou à penetração de cloretos. Neste trabalho, o autor recorreu ao fabrico de painéis de cofragem em madeira, com 350x440x100 mm, que foram depois betonados, por projeção e convencionalmente, conforme o tipo de betão. Destes painéis o autor retirou carotes de 57 mm de diâmetro e 96 mm de altura e ainda vigas de 100x100x350mm para cumprir a norma ASTM C1018-94b do ensaio de resistência à flexão.

## 2.4.2. Propriedades no estado fresco

### 2.4.2.1. Capacidade de bombeamento, projeção e trabalhabilidade

Como esperado, devido à sua forma e alta permeabilidade, a adição de AR ao BP provoca uma perda de trabalhabilidade e rápido endurecimento inicial, que pode levar também ao entupimento parcial da mangueira de projeção, refletindo-se em jactos de material durante a projeção, o que exige uma vibração e amassadura constante. Por outro lado, a introdução de AR contribui para uma melhor coesão do betão, conduzindo a valores para o ricochete 4% inferiores, chegando até 7% inferiores quanto adicionadas fibras. Na Tabela 2.5, apresenta-se os valores para o ricochete, determinados por Chan (1998).

*Tabela 2.5 - Efeito de ricochete (Chan, 1998)*

Betão projetado	Agregados	Material perdido por efeito de ricochete (%)
Via seca	Naturais	25
	Reciclados	21
Via húmida	Naturais	18
	Reciclados	15

### 2.4.2.2. Massa volúmica

Como analisado, a massa volúmica de betões com introdução de AR é menor do que a de betões apenas com AN, devido à baixa massa volúmica dos AR. Foi também constatado que, em betões projetados, a massa volúmica é semelhante à de betões análogos betonados convencionalmente, pelo que se espera que a massa volúmica de BP com introdução de AR, seja mais baixa, tal como acontece com betões convencionais com AR.

## 2.4.3. Propriedades no estado endurecido

### 2.4.3.1. Resistência à compressão

Nos betões convencionais, quanto limitada a taxa de incorporação de AR a 20-30%, a sua introdução não afetou significativamente a resistência à compressão dos betões. No estudo realizado por Banthia & Chan (2000), o betão projetado com agregados reciclados (BPAR) obteve valores claramente inferiores para a resistência à compressão. Os resultados obtidos neste estudo podem ser observados na Figura 2.21 onde:

- SR - betão projetado por via seca com introdução de AR;
- SN - betão projetado por via seca;
- HR - betão projetado por via húmida com introdução de AR;
- HN - betão projetado por via húmida;
- CR - betão convencional com introdução de AR;
- CN - betão convencional.

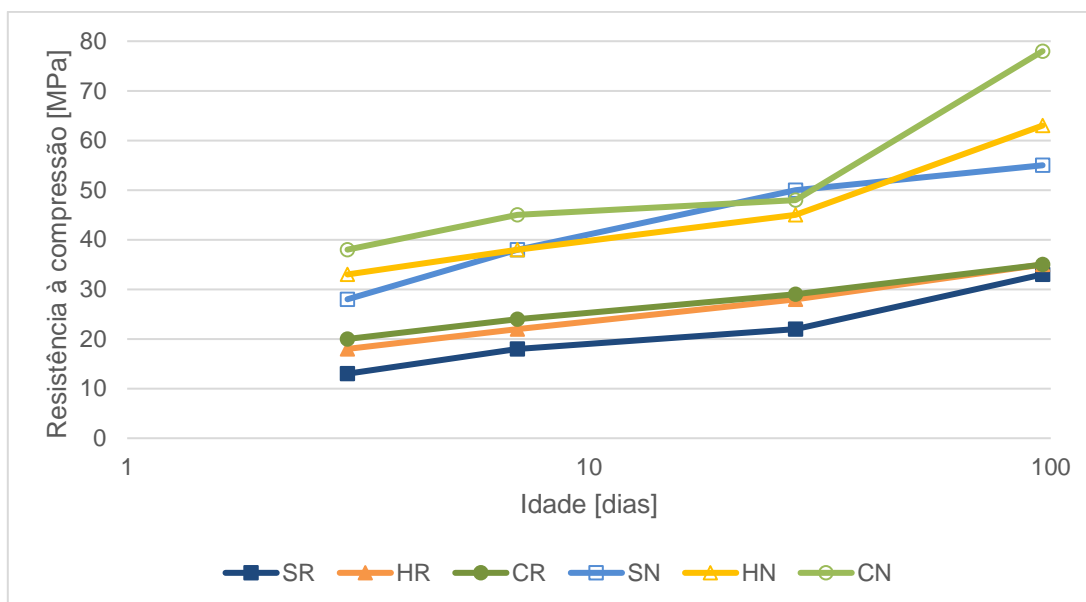


Figura 2.21 - Resistência à compressão ao longo do tempo obtida por Banthia & Chan (2000)

Como referido, analisando a Figura 2.21, pode-se constatar a clara diferença entre a resistência dos betões com introdução de AR e os betões sem AR. No entanto, se se comparar apenas o SR e HR com o CR, pode-se ver que a diferença de resistências entre eles é mais reduzida do que entre os betões sem AR, pelo que a introdução de AR em BP pode não ser tão prejudicial como nos betões convencionais. Refere-se ainda que esta investigação foi realizada com betões com 100% de substituição de AN por AR, o que pode ser a causa da grande diferença entre os betões. Nota-se ainda que a projeção por via húmida foi menos afetada pelos agregados reciclados do que a projeção por via seca. Este efeito é confirmado pelos resultados de Chan (1998), que se encontram na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Resistência à compressão de BPAR (Chan, 1998)

Betão	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	96 dias	
Projetado	Via húmida	22	28	35
	Via seca	18	22	33
Não projetado	22	28	35	

### 2.4.3.2. Absorção de água, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação

Analisando os resultados obtidos por Chan (1998) para a absorção de água, confirma-se que a introdução de AR conduz a uma maior absorção e que o BP obtém valores ligeiramente superiores aos obtidos pelo betão não projetado.

*Tabela 2.7 - Absorção de água de BPAR (Chan, 1998)*

Betão	Absorção de água (%)		
	AN	ARGB	
Projetado	Via seca	7,5	12,7
	Via húmida	7,0	11,7
Não projetado		6,9	11,3

Não foram encontrados na literatura dados relativos a ensaios de resistência à penetração de cloretos nem de resistência à carbonatação em BPAR. No entanto, sabe-se que, quando aplicado por mão-de-obra experiente, o BP pode obter valores semelhantes, apesar de ligeiramente inferiores, aos obtidos com um betão convencional análogo (Santos, 2011).

Como analisado para os betões convencionais, a introdução de ARGB prejudica estas duas propriedades e ambas estão correlacionadas com a absorção de água, pelo que, considerando os resultados obtidos por Chan (1998) para a absorção de água, se espera que para o BP também ocorram reduções de resistência e que os valores obtidos sejam ligeiramente inferiores aos obtidos para betões não projetados análogos.

### 2.4.3.3. Retração

Esta propriedade, como referido, é bastante afetada pela introdução de AR e, como discutido, é também prejudicada, embora menos, quando se utiliza BP. Assim, é de esperar que o BPARGB obtenha valores inferiores aos obtidos em betões convencionais com ARGB, mas não foi possível encontrar resultados na literatura que o confirmem.

## 3. Campanha experimental

### 3.1. Definição de objetivos

O objetivo da presente campanha experimental é estudar a variação do desempenho em termos de durabilidade do BP, que advém da progressiva substituição dos AGN por ARGB, nomeadamente nas taxas de substituição 0, 20, 50 e 100%, (BPR, BP20, BP50 e BP100). A taxa de 0%, ou seja, sem ARGB, permite obter um betão de referência que possa servir como base de comparação e validação de resultados. A taxa de 20% é um limite muitas vezes imposto por normas internacionais. A taxa de 100% é o limite máximo que se pode utilizar para a taxa de substituição e, como tal, permite enquadrar os resultados. A taxa de 50% é um ponto intermédio entre as duas taxas limites, pelo que permite uma melhor compreensão do andamento das características do betão, nas taxas intermédias não estudadas nesta dissertação (Guerra, 2013).

No planeamento desta campanha experimental, são mencionados todos os ensaios realizados no âmbito desta dissertação bem como na realizada em simultâneo por Duarte (2018), já mencionada, pois, uma vez que os ensaios foram realizados em conjunto, foi necessário tê-los em conta de modo a calcular as quantidades de materiais necessárias para a campanha experimental. Apesar de não fazer parte dos objetivos da presente dissertação, são apresentados resumidamente todos os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, dando especial atenção aos ensaios de compressão e módulo de elasticidade por serem propriedades importantes na análise de desempenho em termos de durabilidade do betão.

### 3.2. Planeamento da campanha experimental

#### 3.2.1. 1ª fase - obtenção dos materiais

Esta fase engloba todo o processo de obtenção dos materiais necessários à realização da campanha experimental. Para tal, foi necessário calcular, em primeiro lugar, as quantidades de cada material a encomendar: cimento, agregados finos naturais, agregados grossos naturais e ainda a quantidade de betão de origem (BO) necessária para a produção dos ARGB. Esta fase compreendeu também a betonagem e britagem do BO.

#### 3.2.2. 2ª fase - caracterização dos agregados e das misturas

A 2ª fase destina-se à caracterização de todos os agregados a utilizar nas composições de betão em estudo nesta dissertação, tanto AN como ARGB. Para tal, foram seguidas as seguintes normas:

- agregados para betão - NP EN 12620:2002 + A1:2010
- análise granulométrica - NP EN 933-1:2014 e NP EN 933-2:1999;
- determinação da massa volúmica e absorção de água - NP EN 1097-6:2016;
- determinação da baridade e do volume de vazios - NP EN 1097-3:2002;
- determinação do índice de forma - EN 933-4:2008;
- ensaio de desgaste de *Los Angeles* - NP EN 1097-2:2011;
- determinação do teor de humidade - NP EN 1097-5:2011.

Nesta fase, realizou-se ainda o acerto das várias composições de betão de forma a manter a mesma trabalhabilidade nas diferentes composições. Como referido, ao incorporar ARGB, é necessário compensar a água absorvida em excesso por estes, de modo a manter a trabalhabilidade pretendida e, para tal, foi adicionada água à amassadura. Para este efeito, foi necessário, através de betonagens experimentais, determinar a quantidade de água a adicionar.

### **3.2.3. 3ª fase - betonagem dos painéis**

Esta fase teve como objetivo a realização da cofragem e betonagem dos painéis de betão projetado. Inicialmente, procedeu-se à produção das cofragens em madeira e à betonagem do betão de substrato com incorporação de uma malha eletrossoldada. Depois de este fazer presa e endurecer, procedeu-se à preparação da sua superfície e projeção das várias composições de betão. Durante a projeção, foi medida a quantidade de material perdido por ricochete, bem como a quantidade de água utilizada. Ao fim de cerca de 5 dias, depois de o BP ganhar alguma resistência, avançou-se com a extração das carotes necessárias para os ensaios.

### **3.2.4. 4ª fase - ensaios no estado endurecido**

Nesta fase, procedeu-se à realização dos ensaios em estado endurecido necessários à caracterização dos betões em termos de durabilidade. Paralelamente, foram também realizados os ensaios mecânicos.

## **3.3. Composição dos betões**

Para determinar a composição dos vários betões, adotou-se o método de Faury e seguiu-se a norma NP EN 206:2013+A1 (2017). Foi ainda necessário assumir os seguintes pressupostos:

- **classe de resistência:** C30/37;
- **classe de exposição:** XC3;
- **classe de consistência:** S3 (100 a 150 mm);
- **mínima dosagem de cimento (C):** 350 kg/m<sup>3</sup>;
- **ligante:** CEM I 42,5 R;
- **máxima dimensão do agregado:** 12,5 mm;
- **adições e adjuvantes:** nenhuns;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

É importante definir estes pressupostos e assegurar que são cumpridos nas diferentes composições de betão, de modo a se poder comparar os resultados dos diferentes ensaios.

### **3.3.1. Máxima dimensão dos agregados**

A máxima dimensão de um agregado ( $D$ ) pode ser definida como a menor dimensão da abertura da malha do peneiro, de uma série de peneiros de referência, através da qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado (Coutinho, 1988).



Na presente campanha experimental, adotou-se  $D = 12,5$  mm, que se julgou ser adequada e se adapta ao conjunto de peneiros da série base mais série 2 (0; 1; 2; 4; 6,3 (6); 8; 10; 12,5 (12); 14; 16; 20; 31,5 (32); 40; 63 [mm]), definido na NP EN 12620:2002 + A1 (2010). Este é um parâmetro muito importante na composição de um betão, uma vez que influencia o volume de vazios e pode criar dificuldades na vibração e aumentar o efeito de parede se não for corretamente definido. Segundo Faury (1953), pode-se assegurar que o efeito de parede não ocorre se:

$$D \leq \frac{4}{3} R \quad (3.1)$$

onde  $R$  é o menor raio dos moldes a utilizar que é dado por:

$$R = \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante do volume de betão}} \quad (3.2)$$

Uma vez que os provetes necessários para esta campanha experimental foram obtidos de carotes retiradas dos painéis, apenas se tem de verificar se o  $D$  adotado não é superior ao que verifica a não ocorrência do efeito de parede, segundo Faury (1953), nos painéis. Como se pode observar na Tabela 3.1, devido à sua grande dimensão não apresentarão nenhum problema.

*Tabela 3.1 - Verificação do efeito de parede*

Provete	Dimensões [m]	Superfície confinante [m <sup>2</sup> ]	Volume do provete [m <sup>3</sup> ]	Raio [mm]	$D_{\text{máx}}$ [mm]
Painel	1,50 x 1,10	0,25	0,62	402,44	536,59

Deste modo a escolha do  $D$  prendeu-se com a informação existente sobre investigações semelhantes à desta dissertação. No seu trabalho, Burns (2008) utilizou 10 mm como valor do parâmetro  $D$  enquanto que Chan (1998) utilizou 20 mm. Uma vez que o efeito de ricochete aumenta com o aumento das dimensões dos agregados, optou-se por escolher um valor de  $D$  intermédio, mas mais baixo (12,5 mm), de modo a poder controlar este efeito.

### 3.3.2. Volume de vazios

Existe sempre uma percentagem do volume do betão que é ocupada por ar (vazios), ainda que se siga todos os procedimentos para a correta fabricação e betonagem do betão. Segundo Coutinho (1988), o volume de vazios pode ser obtido através de uma correspondência direta com o  $D$  utilizado, recorrendo aos valores da Tabela 3.2.

*Tabela 3.2 - Estimativa do  $V_v$  em função da máxima dimensão do agregado, adaptado de Coutinho (1988)*

Máxima dimensão do agregado ( $D$ ) [mm]	Volume de vazios ( $V_v$ ) [l/m <sup>3</sup> ]
9.5	30
12.7	25
19.1	20
25.4	15

Para obter o valor correspondente a um  $D$  de 12,5mm, é necessário recorrer a uma interpolação

a partir dos valores da Tabela 3.2. Este cálculo encontra-se na equação (3.3):

$$V_v = 25 - (12,7 - 12,5) \times \frac{(25 - 30)}{(12,7 - 9,5)} = 25,31 \text{ l/m}^3 = 0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.3)$$

### 3.3.3. Índice de vazios

O índice de vazios ( $I_v$ ) é o resultado da soma dos volumes de água e vazios, por  $\text{m}^3$  de betão, após a betonagem (Ceia, 2013). Faury (1953) propôs a equação (3.4) para o cálculo do índice de vazios:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{D - 0,75} \quad (3.4)$$

em que  $K$  e  $K'$  dependem da trabalhabilidade do betão e da natureza dos agregados e são obtidos consultando as Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 - Valores de  $K$  e  $K'$

Trabalhabilidade	Meios de compactação possíveis de empregar	Valores de $K$			Valores de $K'$
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia e agregados grossos britados	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra húmida	Vibração potente e compressão (pré-fabricação)	0,24	0,25	0,27	0,002
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
Plástica	Vibração média	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,35	0,003
<b>Mole</b>	<b>Apiloamento</b>	<b>0,34 a 0,36</b>	<b>0,36 a 0,38</b>	<b>0,38 a 0,40</b>	<b>0,003</b>
Fluida	Espalhamento compactação pelo peso próprio	$\leq 0,36$	$\geq 0,38$	$\geq 0,40$	$\geq 0,004$

Tabela 3.4 - Classificação da trabalhabilidade

Classificação da Trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes			
Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Método de medição da trabalhabilidade	
		Grau Vêbê	Abaixamento do cone de Abrams [mm]
Terra húmida	Vibração potente e compressão (pré-fabricação)	> 30	-
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	30 a 10	-
Plástica	Vibração normal	10 a 2	0 a 40
<b>Mole</b>	<b>Apiloamento</b>	-	<b>50 a 150</b>
Fluida	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	-	> 150

A partir da Tabela 3.4, e sabendo que se admitiu uma classe de abaixamento do cone de *Abrams* entre 100 e 150 mm, retira-se que o betão pretendido terá de ter uma consistência mole. Pela Tabela Tabela 3.3, tal conduz a  $K=0,38$  e  $K'=0,003$ . Utilizando os valores já determinados para  $R$  e  $D$ , obtém-se o valor de  $I_v$  recorrendo à equação (3.5):

$$I_v = \frac{0,38}{\sqrt[5]{12,5}} + \frac{0,003}{\frac{402,44}{12,5} - 0,75} = 0,200 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.5)$$

### 3.3.4. Dosagem da água de amassadura (A)

Para determinar a dosagem de água de amassadura basta utilizar os valores já definidos do  $I_v$  e do  $V_v$  como mostra a equação (3.6):

$$I_v = A + V_v \Leftrightarrow A = I_v - V_v = 0,200 - 0,025 = 0,175 \text{ m}^3/\text{m}^3 = 175 \text{ l}/\text{m}^3 \quad (3.6)$$

### 3.3.5. Relação a/c

A partir do valor da dosagem de água e da dosagem de cimento, tira-se diretamente pela definição a relação a/c, como ilustra a equação (3.7):

$$\frac{a}{c} = \frac{\text{dosagem de água (l/m}^3\text{)}}{\text{dosagem de cimento (kg/m}^3\text{)}} = \frac{A}{C} = \frac{175}{350} = 0,50 \text{ l}/\text{kg} \quad (3.7)$$

### 3.3.6. Volume das partículas de cimento ( $V_c$ )

O volume de partículas de cimento ( $V_c$ ) é dado por:

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} = \frac{350}{3050} = 0,115 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.8)$$

onde  $\delta_c$  é a massa volúmica do cimento (3050 kg/m<sup>3</sup>).

### 3.3.7. Volume de agregados ( $V_a$ )

Sabe-se que por m<sup>3</sup> de betão se tem:

$$1 = V_c + A + V_v + V_a \quad (3.9)$$

pelo que o volume total ocupado pelos agregados é igual a 0,685 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

### 3.3.8. Volume total de partículas sólidas ( $V_s$ )

De modo a obter o volume de partículas sólidas basta somar o volume das partículas de cimento e o volume de agregados, como se pode constatar na equação (3.10):

$$V_s = V_c + V_a = 0,115 + 0,685 = 0,800 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.10)$$

### 3.3.9. Percentagem do volume de cimento em relação ao volume total de partículas sólidas (C%)

A percentagem do volume de cimento em relação ao volume total de partículas sólidas é dado pela equação (3.11):

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 = \frac{0,115}{0,800} \times 100 = 14,38\% \quad (3.11)$$

### 3.3.10. Curva de referência de Faury

Com vista a obter a máxima compactidade possível, recorre-se à curva de referência de Faury, de modo a calcular a composição granulométrica ideal e as quantidades ponderadas de cada um dos agregados que compõem o betão. Assim, através desta curva, consegue-se obter as percentagens de material retido em cada peneiro. Estas percentagens são relativas ao volume total de partículas sólidas e não ao volume total de betão.

A curva de referência de Faury é definida por três pontos, que formam dois segmentos de reta, num gráfico em que as ordenadas correspondem à percentagem de material passado em cada peneiro e as abcissas representam os valores das aberturas dos vários peneiros em mm. O valor das abcissas vai variar entre 0,0065 mm (Faury, 1953) e  $D$  (12,5 mm) e está representado numa escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas. Dois dos pontos estão definidos à partida e correspondem aos extremos das abcissas indicados, 0,0065 mm e 12,5 mm, aos quais correspondem, respetivamente, 0% e 100% de percentagem de material passado. Resta apenas determinar o terceiro ponto que se calcula para a abcissa igual a  $D/2$ , utilizando a seguinte expressão sugerida por Faury (1953):

$$Y_{D/2} = A + 17 \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (3.12)$$

Onde A e B são parâmetros sugeridos por Faury, que podem ser consultados na Tabela 3.5, e que dependem da natureza dos agregados e da trabalhabilidade do betão e é percentagem de material retido no peneiro  $D/2$ .

Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros A e B em função da trabalhabilidade (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia e agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
<b>Mole</b>	<b>Apiloamento</b>	<b>28</b>	<b>30</b>	<b>32</b>	<b>2</b>
Fluída	Sem nada	32	34	38	2

Consultando a Tabela 3.5 para uma trabalhabilidade mole e substituindo na equação (3.12), fica:

$$Y_{6,25} = 30 + 17 \sqrt[5]{12,5} + \frac{2}{\frac{402,44}{12,5} - 0,75} \Leftrightarrow \quad (3.13)$$

$$\Leftrightarrow Y_{6,25} = 66,17 \% \quad (3.14)$$

Por fim, uma vez que a curva de referência é relativa ao volume total de partículas sólidas, é necessário retirar a percentagem de cimento, de forma a poder ser calculada a percentagem de cada fração granulométrica. Na Tabela 3.6, são apresentadas as coordenadas finais utilizadas para traçar as curvas de Faury com e sem cimento, que estão representadas na Figura 3.1.

Tabela 3.6 - Coordenadas dos pontos para traçar a curva de Faury

Ponto	Abertura quadrada dos peneiros [mm]	% de material passado no peneiro		
		Curva de Faury com cimento	Com cimento retirado	Curva de Faury sem cimento
1	0,0065	0	-14,35	-16,75
2	7	66,17	51,82	60,51
3	14	100	85,65	100

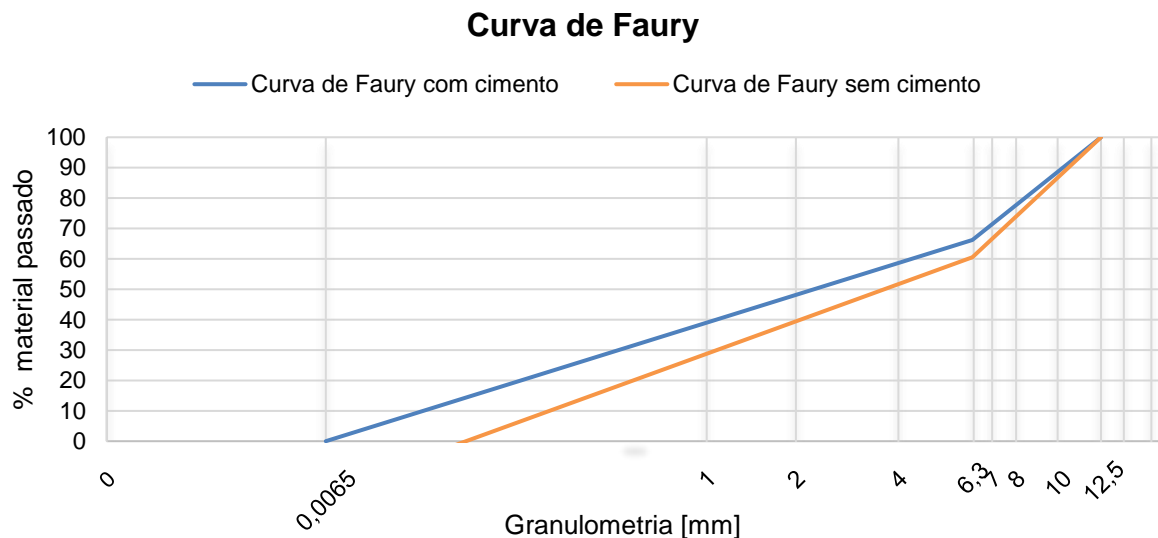


Figura 3.1 - Curvas de Faury para o betão de referência

A partir dos pontos utilizados para o traçado das retas que formam as curvas de referência de Faury, é possível também determinar as equações das mesmas. A partir delas, consegue-se obter a percentagem de material acumulado passado em cada peneiro, para a curva de Faury sem cimento. A forma geral da equação da reta é dada por:

$$Y_x = m \sqrt[5]{x} + b \quad (3.15)$$

onde:

$Y_x$ , é a percentagem de material passado no peneiro com abertura  $x$ ;

$m$ , é o declive da reta;

$b$ , é a ordenada na origem.

Os coeficientes  $m$  e  $b$  são obtidos pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$m = \frac{\Delta Y_x}{\Delta \sqrt[5]{x}} \quad (3.16)$$

$$b = Y_x - m \sqrt[5]{x} \quad (3.17)$$

Para a curva de referência sem cimento, obteve-se os resultados expressos na Tabela 3.7.

*Tabela 3.7 - Declives e ordenadas na origem da curva de referência sem cimento*

Segmento de reta	$m$	$B$
$D$ entre 0,0065 e 7	7,705	-42,944
$D$ entre 7 e 12,5	184,101	-205,096

Com os coeficientes calculados, foi possível definir a percentagem de material acumulado passado, na curva teórica, para cada abertura quadrada dos peneiros adotados. Calculadas estas percentagens, determinou-se a percentagem de material retido em cada peneiro recorrendo à expressão:

$$\% \text{ material retido no peneiro } i = \%x_i - \%x_{i-1} \quad (3.18)$$

Onde  $\%x_i$  e  $\%x_{i-1}$  representam, respetivamente, a percentagem de material acumulado passado nos peneiros  $i$  e  $i-1$ .

Determinou-se ainda o volume de agregado ( $V_i$ ) retido em cada peneiro ( $i$ ) pela expressão:

$$V_i = \frac{\% \text{ material retido no peneiro } i \times V_a}{100} \quad (3.19)$$

Todos os valores descritos e ainda a percentagem de material acumulado retido encontram-se discriminados na Tabela 3.8.

*Tabela 3.8 - Granulometria da curva teórica de Faury sem cimento*

Abertura quadrada dos peneiros [mm]	Retido		Acumulado	
	$V_i$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	(%)	Retido (%)	Passado (%)
12,5	0,04	7,12	7,12	92,88
10	0,09	13,55	20,66	79,34
8	0,09	12,96	33,62	66,38
6,3	0,06	9,11	42,73	57,27
4	0,04	6,66	49,39	50,61
2	0,06	9,06	58,45	41,55
1	0,05	7,89	66,33	33,67
0,0065	0,22	33,67	100,00	0,00

### 3.3.11. Composição do betão de referência

A partir da Tabela 3.8, foi possível determinar a composição do betão de referência, apresentada na Tabela 3.9. Nestes cálculos, assumiu-se as seguintes massas volúmicas:

- AGN - 2670 kg/m<sup>3</sup>;
- ARGB - 2369 kg/m<sup>3</sup>;
- água - 1000 kg/m<sup>3</sup>;
- areia fina - 2620 kg/m<sup>3</sup>;
- areia grossa - 2610 kg/m<sup>3</sup>;
- cimento - 3050 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.9 - Composição do betão de referência

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros [mm]	Material retido [%]	Volume [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Massa [kg/m <sup>3</sup> ]
Agregados grossos	12,5 - 10	13,32	0,09	243,5
	10 - 8	12,74	0,09	232,9
	8 - 6,3	13,28	0,09	242,8
	6,3 - 4	9,00	0,06	164,6
Agregados finos	Areia grossa	-	0,27	710,1
	Areia fina	-	0,08	214,4
Total de agregados			0,66	1758,8
Cimento: CEM I 42,5 R			0,12	350,0
Água			0,20	196,0
Vazios			0,02	0
Total			1,00	2304,8

### 3.3.12. Composições dos BP com x% de ARGB (BPx)

Depois de estabelecida a composição do betão de referência basta utilizar as diferentes taxas de substituição de AGN por ARGB para obter as diferentes composições. Uma vez que não se pretende substituir os AFN, recorreu-se ao software *SikaComp* para determinar as percentagens de areia fina e areia grossa e, a partir do volume total de agregados finos, determinar o volume de cada tipo de areia. Nas Tabelas 3.10, 3.11 e 3.12, encontram-se as composições dos betões com taxas de substituição de 20, 50 e 100%, respetivamente.

## 3.4. Produção dos ARGB

Para produzir os ARGB, foram produzidas vigas com cerca de 2,60x0,20x0,25 m, através da betonagem e vibração do betão pronto numa cofragem montada para o efeito, conforme se pode observar nas Figuras 3.2 e 3.3, a este betão deu-se a designação de betão de origem (BO) e as suas características encontram-se no anexo L.

Tabela 3.10 - Composição do BP20

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Material retido (%)	Agregados naturais		Agregados reciclados	
			Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )
Agregados grossos	12,5-10	13,33	0,07	194,0	0,02	47,9
	10-8	12,75	0,07	185,5	0,02	45,8
	8-6,3	13,29	0,07	193,4	0,02	47,7
	6,3-4	9,00	0,05	131,1	0,01	32,3
Agregados finos	Areia grossa	-	0,27	708,7	-	-
	Areia fina	-	0,08	214,4	-	-
Total de agregados			0,62	1625,9	0,07	173,7
Cimento: CEM I 42,5 R			0,12	350,0	-	-
Água			0,18	178,5	-	-
Vazios			0,02	0,0	-	-
Totais			0,93	2154,3	0,07	173,7
Massa total (kg/m <sup>3</sup> )				2328,0		

Tabela 3.11 - Composição do BP50

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Material retido (%)	Agregados naturais		Agregados reciclados	
			Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )
Agregados grossos	12,5-10	13,34	0,04	120,7	0,04	119,1
	10-8	12,76	0,04	115,4	0,04	113,9
	8-6,3	13,30	0,04	120,4	0,04	118,8
	6,3-4	9,01	0,03	81,6	0,03	80,5
Agregados finos	Areia grossa	-	0,27	706,4	-	-
	Areia fina	-	0,08	211,2	-	-
Total de agregados			0,51	1354,5	0,16	432,3
Cimento: CEM I 42,5 R			0,12	350,0	-	-
Água			0,18	182,0	-	-
Vazios			0,02	0,0	-	-
Totais			0,84	1886,5	0,16	432,3
Massa total (kg/m <sup>3</sup> )				2318,8		

Após o BO atingir os 28 dias de cura, as vigas foram desmoldadas e partidas em blocos de menor dimensão de modo a poderem ser triturados na britadeira de maxilas (Figura 3.5), como se pode constatar na Figura 3.4. Depois de calibrada para as dimensões pretendidas, utilizou-se a britadeira de maxilas para tritura todos os blocos de betão, que depois de triturados foram separados por recurso a um agitador de peneiros (Figura 3.6) nas frações granulométricas entre 4 e 12,5 mm e armazenados em barricas fechadas.



Tabela 3.12 - Composição do BP100

	Intervalo de peneiros (mm)	Material re-tido (%)	Agregados naturais		Agregados reciclados	
			Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Massa (kg/m <sup>3</sup> )
Tipo de agregado	12,5-10	13,35	-	-	0,09	213,2
	10-8	12,76	-	-	0,09	204,0
	8-6,3	13,31	-	-	0,09	212,6
	6,3-4	9,02	-	-	0,06	144,1
Agregados finos	Areia grossa	-	0,27	705,2	-	-
	Areia fina	-	0,08	186,1	-	-
Total de agregados			0,35	911,1	0,33	773,9
Cimento: CEM II A-L 42,5 R			0,12	350,0	-	-
Água			0,19	185,5	-	-
Vazios			0,02	0,0	-	-
Totais			0,67	1446,6	0,33	773,9
Massa total (kg/m <sup>3</sup> )			2220,5			



Figura 3.2 - Cofragem betão de origem



Figura 3.3 - Betão de origem após a betonagem



Figura 3.4 - Blocos do BO



Figura 3.5 - Britadeira de maxilas



Figura 3.6 - Agitador de peneiros

## 3.5. Betonagem dos painéis por via seca

### 3.5.1. Determinação do número e dimensão dos painéis

De modo a determinar as dimensões dos painéis, calculou-se em primeiro lugar o número total de carotes necessárias à realização de todos os ensaios no estado endurecido (mecânicos e de durabilidade). Nas Tabelas 3.13 e 3.14, apresenta-se todos os ensaios a realizar, bem como as dimensões dos provetes e o número de carotes necessárias por composição de betão em estudo, já com um coeficiente de segurança de 1,5, valor recomendado por Santos (2011), de modo a ter em conta as possíveis carotes perdidas.

*Tabela 3.13 - Ensaios de durabilidade a realizar no estado endurecido*

<b>Ensaios</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>N.º carotes</b>	<b>Forma e dimensões</b>
Claretos	28	3	Cilindros, $\Phi 100 \times 50$ mm
	90	3	
Carbonatação	7	3	Cilindros, $\Phi 100 \times 40$ mm
	28	3	
	56	3	
	90	3	
Absorção de água por imersão	28	3	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm
Absorção de água por capilaridade	28	5	Cilindros, $\Phi 150 \times 100$ mm
Retração	0-90	3	Cilindros, $\Phi 50 \times 100$ mm

*Tabela 3.14 - Ensaios mecânicos a realizar no estado endurecido*

<b>Ensaios</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>N.º carotes</b>	<b>Forma e dimensões</b>
Resistência à compressão	7	5	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm
	28	6	
	56	5	
Resistência à tração (por compressão diametral)	28	5	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm
Resistência ao desgaste	91	5	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm
Módulo de elasticidade	28	3	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm
Velocidade de propagação dos ultra-sons	28	-	Cilindros, $\Phi 100 \times 100$ mm

Com base no número total de carotes, foi decidido elaborar 8 painéis de betão, 2 para cada composição de betão em estudo, com 1,50 x 1,10 m. Optou-se por produzir dois painéis mais pequenos, em vez de apenas um maior por composição, de modo a facilitar o seu transporte e armazenamento no laboratório. Também por limitações do equipamento disponível para erguer os painéis, a espessura do betão de substrato foi limitada a 5 cm, de modo a reduzir o peso próprio do painel, apesar de a norma NP EN 14488-6 (2008) recomendar uma espessura de 8 cm. Para o betão projetado, definiu-se uma espessura de 10 cm, como utilizado por Chan (1998) na sua campanha experimental. De estes painéis, foram retiradas as carotes que serviram para obter os provetes necessários para os vários ensaios. Foi ainda realizado um modelo em *AutoCAD* (Figura 3.7) para verificar que a dimensão dos painéis era suficiente para a realização de todas as carotes necessárias, assegurando espaçamentos adequados entre elas.



*Figura 3.7 - Modelo em AutoCAD dos painéis realizados*

### 3.5.2. Preparação dos painéis para a projeção

As cofragens de madeira para os painéis foram construídas conforme o estipulado pela norma NP EN 14488-1 (2008). Depois de montadas, foi betonado o betão de substrato com uma malha eletrossoldada a meia altura, de modo a garantir o bom comportamento do painel. Ao fim de aproximadamente 28 dias, os painéis foram colocados numa posição próxima da vertical e a superfície do betão de substrato foi tratada por recurso a uma rebarbadora e jato de água, de modo a garantir a boa aderência do betão projetado. O resultado final pode ser observado na Figura 3.8 .



*Figura 3.8 - Painéis preparados para receber o betão projetado*



### 3.5.3. Projeção do betão por via seca

Antes do início da projeção do betão por via seca, foi necessário proteger toda área onde os painéis se encontravam apoiados, de modo a poder recolher e contabilizar todo o material perdido por ricochete. Foi também necessário montar um caudalímetro integrador (Figura 3.9) na mangueira de abastecimento de água, de forma a medir a quantidade de água gasta durante a projeção. Este valor foi posteriormente utilizado para calcular, aproximadamente, a relação a/c efetiva.

No início da projeção de cada composição, a mistura de agregados e cimento é introduzida na betoneira, de modo a assegurar uma mistura homogênea de todos os constituintes, e é de seguida introduzida na câmara superior da máquina de projeção (Figura 3.10). Quando esta se encontra cheia, é fechada e abre-se a câmara inferior. Nesta, um sistema rotativo (Figura 3.11), com auxílio do ar comprimido vindo de um compressor, encaminha a mistura seca até à ponta da mangueira (Figura 3.12), onde se encontra uma mangueira secundária que permite ao operador controlar a água adicionada à mistura. Na Figura 3.13, pode-se observar o operador da boca de injeção, durante projeção do betão por via seca. A extração de carotes iniciou-se apenas 5 dias após o final da projeção, de forma a assegurar a resistência mínima necessária para as carotes não serem danificadas.



Figura 3.9 - Caudalímetro integrador



Figura 3.10 - Máquina de projeção por via seca



Figura 3.11 - Interior da câmara inferior da máquina de projeção

## 3.6. Procedimentos de ensaio dos betões no estado endurecido

### 3.6.1. Extração e preparação das carotes

Para obter os provetes necessários, recorreu-se, como mencionado, a uma caroteadora (Figura 3.14), com uma coroa de dimensões adequadas a cada tipo de provete pretendido. Nesta investigação, foram necessárias coroas com 50, 100 e 150 mm. Depois de o BP obter a resistência suficiente para suportar a extração de carotes, cerca de 5 dias, foram extraídas todas as carotes requeridas para os ensaios mecânicos e de durabilidade. Após a sua extração, cada carote foi cortada, recorrendo a uma mesa de corte, na dimensão exigida pelo ensaio, no qual foi utilizada, assegurado que apenas BP permanece no

provete. Após garantidas as dimensões necessárias à realização do ensaio a que se destina a carote, esta é colocada nas condições de cura exigidas pelo ensaio. Na Figura 3.15 e 3.16, pode-se observar o aspeto das carotes e do painel após a extração.



Figura 3.12 - Ponta da mangueira de projeção



Figura 3.13 - Projeção por via seca



Figura 3.14 - Extração de carotes com caroteadora



Figura 3.15 - Carotes após extração



Figura 3.16 - Painel após extração de carotes

### 3.6.2. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão realizou-se seguindo a norma NP EN 12390-3 (2011), recorrendo a provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O ensaio consistiu na aplicação gradual de carga à velocidade constante de 0,6 MPa/s, na superfície plana do provete, por recurso a uma prensa mecânica, até ocorrer a rotura, registando-se a respetiva carga última.

Para obter o valor da resistência à compressão, aplicou-se a equação (3.20):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.20)$$

Onde,



$f_c$ , resistência à compressão [MPa];

$F$ , força de rotura à compressão [N];

$A_c$ , área da secção transversal submetida à aplicação da carga [mm<sup>2</sup>].

### 3.6.3. Resistência à penetração de cloretos

Para aferir a resistência à penetração de cloretos, recorreu-se à determinação do coeficiente de difusão dos cloretos. Quanto maior for o valor deste coeficiente, menor será a resistência do betão. Para realizar este ensaio, seguiu-se a especificação LNEC E 463 (2004), que estipula que se utilize provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. A estes provetes foi aplicado um potencial elétrico, entre os seus topos, que forçou, por migração, o transporte dos iões cloreto através do betão.

Depois de extraídos, os provetes a utilizar neste ensaio foram colocados na câmara húmida, a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ , até 14 dias antes do ensaio, quando foram transferidos para a câmara seca, a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ . Foram analisados quatro provetes por cada tipo de betão, aos 28 e aos 91 dias.

O ensaio iniciou-se com a colocação dos provetes numa câmara de vácuo (Figura 3.17) durante 3 h entre 10 a 50 mbar. Após este tempo e com a bomba de vácuo ligada, introduziu-se uma solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  até todos os provetes estarem completamente cobertos. Ao fim de mais 1 h, desligou-se o vácuo e deixou-se os provetes imersos por mais 20 h.



Figura 3.17 - Provetes no interior da câmara de vácuo

Figura 3.18 - Manga de borracha com provete em posição

De seguida, retirou-se os provetes da câmara e inseriu-se os mesmos em mangas de borracha, apertando-os com braçadeiras de modo a não ocorrer passagem de solução entre o provete e a manga, como se pode observar na Figura 3.18. Depois de montados nas mangas de borracha, foram colocados nos reservatórios de plástico juntamente com as soluções catódica (solução de  $\text{NaCl}$ ) e anódica (solução de  $\text{NaOH}$ ) e os respetivos cátodo e ânodo, como mostrado na Figura 3.19.

Estando a montagem terminada, ligou-se a fonte de alimentação ao sistema e aplicou-se uma diferença de potencial de 30 V. Registou-se a intensidade de corrente inicial e ajustou-se a voltagem conforme indicado no anexo 2 da especificação LNEC E463 (2004) e determinou-se a duração do ensaio estabelecida no mesmo anexo. Depois, mediu-se a temperatura inicial da solução anódica e,

decorrida a duração total do ensaio, previamente determinada, voltou-se a medir a temperatura da solução anódica. Foram também registados os valores da intensidade de corrente. Por último, retirou-se os provetes do interior das mangas de borracha e, com a ajuda de escopro e martelo, partiu-se os mesmos diametralmente em duas partes. A metade que apresentou a superfície mais perpendicular foi borrifada com uma solução de nitrato de prata (Figura 3.21) e decorridos 15 minutos, com um paquímetro, mediu-se a espessura do precipitado branco do cloreto de prata, que corresponde à penetração dos cloretos, de 10 em 10 mm até se obter sete medições (Figura 3.20).

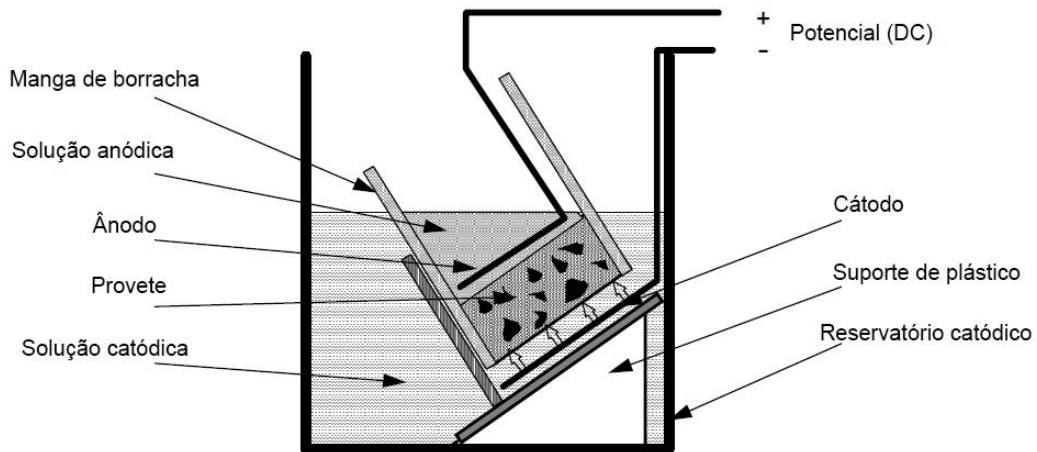


Figura 3.19 - Esquema de montagem do ensaio de migração (adaptado de LNEC, E 463-2004)



Figura 3.20 - Marcações para a medição da penetração dos cloretos



Figura 3.21 - Provetes de betão depois de aplicada a solução de nitrato de prata

Com os resultados obtidos, utilizou-se a equação simplificada (3.21), para determinar o valor do coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário:

$$D = \frac{0,0239 (273 + T) L}{(U - 2) t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_d}{U - 2}} \right) \quad (3.21)$$

sendo:

$D$ , o coeficiente de difusão no estado não estacionário [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ];

$U$ , o valor absoluto da voltagem aplicada [V];

$T$ , o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica [°C];

$L$ , a espessura do provete [mm];

$x_d$ , o valor médio da profundidade de penetração [mm];

$t$ , a duração do ensaio [horas].

### 3.6.4. Resistência à carbonatação

De modo a avaliar a resistência à carbonatação de um betão recorreu-se à exposição acelerada dos provetes de ensaio, utilizando uma câmara com alto teor de CO<sub>2</sub>. Para a realização deste ensaio seguiu-se a especificação LNEC E391 (1993) e foram utilizados cilindros de 100 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

Depois de extraídos do painel e retificados para as medidas exigidas, os provetes foram colocados em câmara húmida durante 14 dias, com uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ . De seguida, foram transferidos para uma câmara seca, a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ , durante outros 14 dias. No final deste tempo, aplicou-se um revestimento isolante nos topos de todos os provetes (Figura 3.22), de modo a que o acesso do CO<sub>2</sub> se dê apenas pela superfície lateral. Após a secagem deste revestimento, colocou-se todos os provetes na câmara de carbonatação, com uma concentração de  $5 \pm 0,1\%$  de CO<sub>2</sub>, uma humidade relativa de 55-65% e uma temperatura de  $23 \pm 3$  °C.



Figura 3.22 - Provetes depois de aplicada a impermeabilização dos topos



Figura 3.23 - Provetes depois de aplicada a fenolftaleína

Foram colocados quatro provetes por cada tipo de betão e por cada idade em estudo. Neste caso foram estudados quatro tipos de betão diferentes, aos 7, 28, 56 e 91 dias após a entrada na câmara de carbonatação. Nas datas estabelecidas, são retirados 4 provetes de cada tipo de betão e partidos, com auxílio de martelo e escopro em quatro partes iguais. Depois de partidos, aplica-se a solução de fenolftaleína (Figura 3.23) e mede-se a profundidade de carbonatação com auxílio de uma craveira. No total deverão ser efetuadas 8 medições por provete.

### 3.6.5. Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão corresponde à diferença entre a massa do provete imerso em água e a massa do mesmo seco em estufa, representada em termos do volume do provete. Este ensaio



permite avaliar, indiretamente a porosidade aberta e, deste modo, também a durabilidade do betão (Coutinho & Gonçalves, 1994).

Para a realização deste ensaio, seguiu-se a especificação LNEC E394 (1993) e utilizou-se quatro provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura, por cada tipo de betão, de modo a respeitar as exigências da especificação. Antes da realização do ensaio, e depois de extraídos dos painéis, os provetes permaneceram em câmara húmida até aos 28 dias de idade, com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ .

Aos 28 dias, os provetes foram retirados da câmara húmida e imersos em água, num recipiente com apoios plásticos para a água estar em contacto com todas as faces do provete, até atingir massa constante. Este processo deve ser realizado de forma faseada, de modo a que o provete fique imerso sucessivamente, em intervalos de 1 hora, a 1/3 da sua altura (Figura 3.24), 2/3 da sua altura e na totalidade da sua altura, não ultrapassando em mais do que 2 cm. Depois de atingida a massa constante, os provetes foram retirados da água e pesados ao ar, com a superfície seca, e imersos em água, recorrendo a uma balança hidrostática (Figura 3.25), registando-as como  $m_1$  e  $m_2$ , respetivamente.

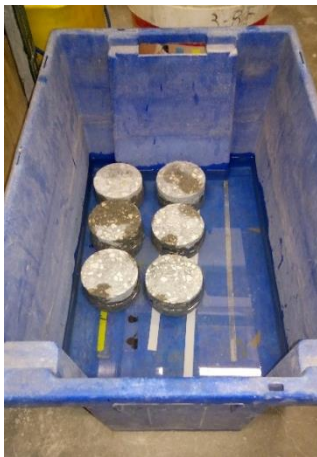


Figura 3.24 - Provetes imergidos em 1/3 da sua altura



Figura 3.25 - Pesagem da massa hidrostática

De seguida, foram colocados numa estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante e depois foram pesados, registando-se a sua massa como  $m_3$ . Por último, para determinar a absorção por imersão, recorreu-se à equação (3.22):

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.22)$$

sendo:

$A_i$ , absorção de água por imersão [%];

$m_1$ , massa do provete saturado com superfície seca [g];

$m_2$ , massa hidrostática do provete saturado [g];

$m_3$ , massa do provete seco em estufa [g].

### 3.6.6. Absorção de água por capilaridade

Esta propriedade pretende medir a capacidade de o betão absorver líquidos através dos vasos capilares e corresponde à diferença entre a massa de um provete, que permaneceu em contacto com água numa das suas faces, e a sua massa seca. Para realizar este ensaio, seguiu-se a especificação LNEC E 393 (1993) e foram necessários três provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade, e durante este período os provetes foram mantidos em câmara húmida, com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ , até 14 dias antes do ensaio, quando foram colocados numa estufa ventilada à temperatura de  $60 \pm 5$  °C. Após este período, os provetes foram retirados da estufa e foram registadas as respetivas massas como  $M_0$ .

Depois de pesados, os provetes foram colocados num tabuleiro sobre apoios de plástico que permitiam o contacto da base do provete com a água (Figura 3.26). Encheu-se o tabuleiro, cuidadosamente, sem molhar as faces laterais do provete, até atingir  $5 \pm 1$  mm acima da base do provete, e de imediato cobriu-se este tabuleiro com uma campânula. Durante o ensaio, manteve-se o nível de água constante. Ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas, após os provetes terem entrado em contacto com a água, efetuou-se medições das massas  $M_i$ , correspondentes a cada tempo. Para realizar estas medições, retirou-se os provetes do tabuleiro, permitindo que a água escorresse, e colocou-se os mesmos numa base não absorvente durante  $60 \pm 5$  segundos. Após este tempo, registou-se o valor da massa (Figura 3.27).



Figura 3.26 - Tabuleiro com provetes para o ensaio de absorção por capilaridade



Figura 3.27 - Pesagem de provete para o ensaio de absorção por capilaridade

Para determinar a absorção por capilaridade, em cada instante, recorreu-se a equação (3.23):

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A_s} \times 100 \quad (3.23)$$

sendo:

$A_c$ , absorção de água por capilaridade, no instante  $t_i$  [g/mm<sup>2</sup>];

$M_0$ , massa do provete seco em estufa [g];

$M_i$ , massa do provete no instante  $t_i$  [g];

$A_s$ , área da face do provete que esteve em contacto com a água [mm<sup>2</sup>].

### 3.6.7. Retração

Para conduzir este ensaio, seguiu-se a especificação LNEC E 398 (1993). De forma a determinar a retração, foi necessário medir a diferença entre o valor do comprimento de um provete após a secagem em condições controladas e o seu comprimento imediatamente após a desmoldagem. Na presente dissertação, por se tratar de betão projetado, não foi possível utilizar moldes, pelo que se recorreu à extração de carotes. Desta forma, o ensaio iniciou-se imediatamente depois da extração das carotes, aos 5 dias de idade. Analisou-se três provetes, por tipo de betão, de forma cilíndrica com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Imediatamente após a extração das carotes, estas foram retificadas de modo a possuírem as dimensões pretendidas, tendo o cuidado de manter a sua ortogonalidade. Depois de rectificadas, procedeu-se à colagem de uma pastilha metálica, centrada, em cada um dos topos, recorrendo a uma cola de secagem rápida na base da pastilha e bucha química à volta das mesmas (Figura 3.28). O ensaio teve a duração de 91 dias e os provetes foram mantidos, durante toda a duração do ensaio, em câmara seca, a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e uma humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ .



Figura 3.28 - Provetes após colagem de pastilhas metálicas

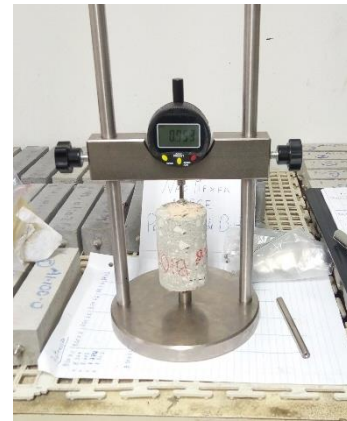


Figura 3.29 - Realização de leitura com retratómetro

Devido às reduzidas dimensões do provete, foi utilizado um retratómetro (Figura 3.29), habitualmente utilizado nos ensaios de retração de argamassas. Antes de cada leitura, o retratómetro foi calibrado através de uma barra padrão. Após a calibração, procedeu-se à primeira leitura, que foi considerada como referência para as leituras seguintes. As leituras seguintes tiveram uma frequência maior nos primeiros dias, reduzindo-se progressivamente após o período inicial.

Através da utilização da equação (3.24), pode-se obter o valor da retração num dado instante:

$$\varepsilon = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (3.24)$$

onde:

$\varepsilon$ , retração num dado instante [mm/mm];

$d_i$ , distância inicial medida pelo retratómetro [mm];

$d_f$ , distância medida pelo retratómetro num dado instante [mm].



## 4. Análise de resultados

Este capítulo diz respeito à análise dos resultados obtidos na campanha experimental. Em primeiro lugar, são apresentados os resultados da caracterização dos agregados, seguidos dos resultados dos ensaios realizados ao betão no estado fresco. Por último, apresenta-se resumidamente os resultados dos ensaios realizados ao betão no estado endurecido relativos ao desempenho mecânico e de forma mais detalhada os relativos à durabilidade. Como referido, o desempenho a nível mecânico foi analisado em detalhe na dissertação de mestrado realizada em paralelo por Duarte (2018).

### 4.1. Caracterização dos agregados

#### 4.1.1. Análise granulométrica

Para realizar a análise granulométrica, seguiu-se o estipulado pela norma NP EN 933-1 (2014), obtendo-se os resultados apresentados no anexo C. Com estes resultados, foi possível construir as curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.1. Este ensaio é de grande importância, pois a granulometria dos agregados pode afetar diretamente a compacidade da mistura, ou seja, a quantidade de vazios, influenciando assim também a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade do betão (Bravo, 2016).

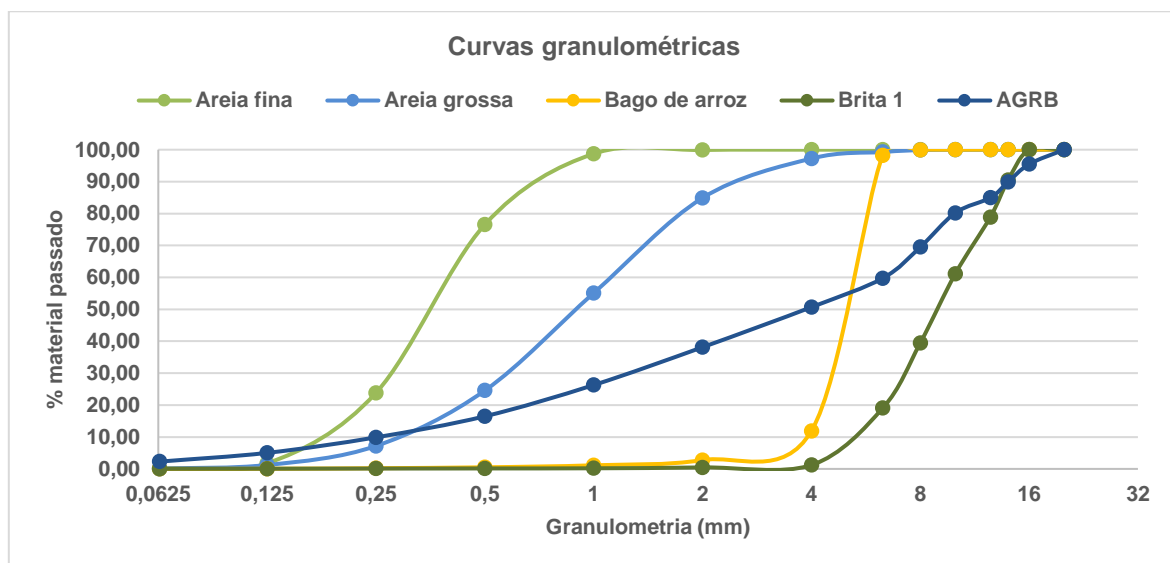


Figura 4.1 - Curvas granulométricas

Através da análise das curvas granulométricas, é possível constatar que os AGRB apresentam uma granulometria mais extensa, isto é, mais contínua, do que os AN. Segundo a norma NP EN 206:2013+A1 (2017), apenas se deve utilizar agregados com granulometria extensa em betões de classe de resistência C12/15. No entanto, relembra-se que nesta dissertação todos os agregados grossos, tanto os naturais como os reciclados, foram peneirados e separados por intervalos de peneiros, de forma a se obter betões de granulometrias idênticas, ajustando-os diretamente a partir da curva de Faury teórica.

### 4.1.2. Massa volúmica e absorção de água

De modo a determinar a massa volúmica e absorção de água dos agregados, utilizou-se a norma NP EN 1097-6 (2016). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

*Tabela 4.1 - Resultados da massa volúmica e absorção de água dos agregados em estudo*

	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	ARGB
$\rho_a$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,59	2,62	2,71	2,72	2,66
$\rho_{rd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,55	2,57	2,63	2,62	2,37
$\rho_{sss}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,56	2,59	2,66	2,65	2,49
WA <sub>24</sub> [%]	0,59	0,71	1,02	1,65	4,55

Como esperado, analisando os resultados da Tabela 4.1, pode-se constatar que os ARGB apresentam em geral massa volúmica mais baixa do que os AGN e absorção de água bastante superior. Isto deve-se à argamassa cimentícia aderida aos AN de origem, que fazem parte da constituição dos ARGB, como analisado no ponto 2.2.1 do presente documento. Observou-se ainda que os valores obtidos para os ARGB são semelhantes aos obtidos em outras investigações, e apresentados nas Tabelas 2.3 e 2.4 deste documento, valores compreendidos entre 2,3 e 2,7 Mg/m<sup>3</sup> para a massa volúmica e entre 4 e 8% para a absorção de água às 24 horas.

### 4.1.3. Baridade e volume de vazios

Seguindo a norma NP EN 1097-3 (2002), foram analisadas três amostras de cada tipo de agregado e realizada a média dos valores obtidos para a baridade ( $\rho_b$ ) e percentagem de vazios, que se encontram na Tabela 4.2.

*Tabela 4.2 - Resultados para a baridade e percentagem de vazios dos agregados em estudo*

	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	ARGB
$\rho_b$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,56	1,54	1,41	1,41	1,29
Vazios [%]	40,0	40,0	46,6	46,1	45,7

Analisando em primeiro lugar apenas os AN, constatou-se que os AFN apresentam uma baridade superior aos AGN, o que pode ser justificado pela granulometria mais extensa das areias face aos AGN. Esta granulometria mais extensa permite aos AFN ocuparem mais eficientemente os espaços, daí também possuírem uma percentagem de vazios menor.

Em relação aos ARGB, confirma-se, como esperado, que estes apresentam um valor inferior de baridade, devido à sua maior porosidade, resultante da pasta cimentícia aderida aos AN de origem, presentes nos ARGB. No entanto, comparando a percentagem de vazios dos ARGB com os AGN, não se encontra grandes variações, apresentando os ARGB um valor ligeiramente inferior, devido à sua granulometria mais contínua.

#### 4.1.4. Teor de humidade

O ensaio do teor de humidade foi realizado por recurso à norma NP EN 1097-5 (2011) e apenas para os ARGB, uma vez que este tipo de agregados pode possuir uma elevada capacidade de absorção de água, contrariamente aos AGN onde a absorção de água pode ser desprezada. Depois de peneirados, todos os agregados foram mantidos em reservatórios estanques de modo a que o seu teor de humidade não fosse afetado ao longo da campanha experimental, apesar de todas as projeções terem sido realizadas em dias consecutivos. Indica-se ainda que todos os AF utilizados foram sujeitos a um processo de secagem antes da sua utilização e mantidos em reservatórios herméticos, pelo que também não foram alvo deste ensaio.

Na Tabela 4.3 apresenta-se o resultado obtido para o teor de humidade dos ARGB e também o valor das massas utilizadas para o cálculo deste parâmetro, nomeadamente a massa  $M_1$  e  $M_2$  que representam, a massa do provete húmido e a massa do provete seco, respetivamente.

*Tabela 4.3 - Teor de humidade dos ARGB*

	$M_1$ [g]	$M_2$ [g]	w [%]
ARGB	2522,47	2472,03	2,0%

#### 4.1.5. Resistência à fragmentação pelo ensaio de Los Angeles

O ensaio de Los Angeles foi executado seguindo a norma NP EN 1097-2 (2011), para os AGN e para os ARGB. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 4.4.

*Tabela 4.4 - Resistência à fragmentação pelo ensaio de Los Angeles*

	AGN	ARGB	Perda de resistência [%]
$\Delta LA$ (%)	25	36	31

Pelos valores da Tabela 4.4, pode-se observar que os ARGB apresentaram maior fragmentação que os AGN, resultado da presença de uma pasta cimentícia, de menor resistência, aderida aos AN de origem presentes na constituição dos ARGB. Contudo, os ARGB continuam a respeitar o limite de 40% para o coeficiente  $\Delta LA$  estipulado pela norma NP EN 12620:2002+A1 (2010), a partir do qual é necessário realizar uma avaliação com base em utilizações anteriores do agregado.

Comparando os resultados obtidos com os valores recolhidos de outras campanhas experimentais, e apresentados na Tabela 2.2, os ARGB encontram-se dentro dos valores esperados para o  $\Delta LA$ , entre 30 e 40%, bem como os AGN, que se encontram entre 20 e 28%.

#### 4.1.6. Índice de forma

Neste ensaio, foi utilizada a norma EN 933-4 (2008) e analisados todos os agregados grossos utilizados nesta campanha experimental com dimensão superior a 4 mm e inferior a 63 mm. Todos os agregados fora destas dimensões são rejeitados das amostras para este ensaio. Os resultados obtidos para o índice de forma são apresentados na Tabela 4.5.



*Tabela 4.5 - Índice de forma dos agregados utilizados*

	Bago de arroz	Brita 1	ARGB
Índice de forma [%]	22,3	26,7	49

Observando a Tabela 4.5, é fácil constatar que os ARGB apresentam um valor de índice de forma bastante superior ao dos AGN. Esta relação entre AGN e ARGB era a esperada, devido ao processo de britagem e à natureza dos ARGB, mas no levantamento bibliográfico realizado (Tabela 2.1) não se verificou uma diferença tão elevada. Como referido, os diferentes processos utilizados na britagem dos AR, conduzem a uma grande variabilidade na forma destes agregados, pelo que a britadeira de maxilas utilizada pode ser a razão para a maior diferença obtida nesta investigação.

É expectável que o valor do índice de forma elevado para os ARGB conduza a uma redução de trabalhabilidade, que se poderá traduzir num maior consumo de água, uma vez que, ao utilizar a via seca na projeção, o operador manterá a mesma trabalhabilidade em todas as composições de betão regulando a quantidade de água utilizada.

## 4.2. Caraterização dos betões no estado fresco

### 4.2.1. Relação a/c

Como referido, nesta campanha experimental, foi utilizado o processo por via seca para projetar o betão, pelo que foi importante medir a quantidade de água efetivamente utilizada durante a projeção, de modo a se poder calcular, aproximadamente, a relação a/c efetiva. Esta propriedade é fundamental para uma melhor análise e compreensão dos resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido. Os resultados obtidos para as diferentes composições de betão encontram-se na Tabela 4.6.

*Tabela 4.6 - Relação a/c efetiva nos BP analisados*

Betão	Volume de água [m <sup>3</sup> ]	Volume de betão [m <sup>3</sup> ]	Cimento [kg]	Relação a/c
BPR	0,0800	0,500	175,00	0,46
BP20	0,0668	0,410	143,50	0,47
BP50	0,0880	0,500	175,00	0,50
BP100	0,0876	0,500	175,00	0,50

Como esperado, devido à maior absorção dos ARGB, resultado da pasta cimentícia aderida aos AN de origem presentes nestes agregados, nas composições com maior taxa de substituição de AGN por ARGB, foi necessário utilizar uma maior quantidade de água, conduzindo a relações a/c maiores.

Antes de se realizar a projeção para o painel, de onde foram retirados os provetes de ensaio, a máquina de projeção começa por projetar apenas a mistura de agregados e cimento e só depois é adicionada a água pelo operador da boca de injeção, que a ajusta até obter a trabalhabilidade pretendida e inicia a projeção do painel. Na projeção do BP20, este processo de afinação requereu menos tempo, o que justifica o menor volume de betão utilizado nesta composição.



Recorda-se que este método de obtenção da relação a/c é muito sensível, pois durante a própria projeção o operador pode fazer variar a quantidade de água de modo a obter a trabalhabilidade necessária, pelo que a relação a/c pode variar ao longo da projeção. É também necessário referir a dificuldade em medir de forma precisa as quantidades de materiais utilizadas.

#### 4.2.2. Perdas por efeito de ricochete

Para avaliar as perdas por efeito de ricochete, foi recolhido e pesado todo o material que não aderiu aos painéis durante a projeção de cada uma das composições, separadamente. Os valores de estas pesagens encontram-se na Tabela 4.7, bem como a percentagem de ricochete, relativamente ao total projetado.

*Tabela 4.7 - Perdas por efeito de ricochete*

Betão	Perdas por ricochete [kg]	Massa total de betão projetado [kg]	Perdas por ricochete [%]
BPR	210	770,01	27,27
BP20	162	768,25	21,09
BP50	200	765,22	26,14
BP100	140	732,77	19,11

Analisando os resultados obtidos, constata-se que todos os betões com incorporação de AR apresentam perdas por efeito de ricochete menores do que o BPR, entre 20 e 27%, aproximadamente. Estes resultados foram ao encontro do esperado e anteriormente obtido por Chan (1998), que também estudou BP com agregados reciclados pela via seca, e obteve perdas por ricochete de 25 e 21% para BPR e BP100, respetivamente.

Esta redução nas perdas por ricochete, quando incorporados ARGB, deve-se à menor massa volúmica e maior rugosidade destes agregados, que conferiu aos betões uma maior coesão superficial. O resultado obtido para o BP50, mais elevado do que para o BP100, pode ter-se devido ao processo de projeção e não a um efeito relacionado com a composição do betão. Sabe-se que a posição e ângulo em que ocorre a projeção pode ter efeitos significativos na quantidade de betão perdido por efeito de ricochete (ACI Committee 506, 2016).

### 4.3. Desempenho mecânico dos betões no estado endurecido

#### 4.3.1. Resistência à compressão

Apesar de o alvo desta dissertação ser a avaliação da durabilidade, é imprescindível conhecer o desempenho mecânico, e em especial a resistência à compressão de um betão, de modo a estudar e compreender melhor as suas características. Por este motivo, apresenta-se de seguida os resultados e meios de ensaio utilizados para determinar a resistência à compressão.

Neste ensaio, foram utilizados provetes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diâmetro por 100 mm de altura, obtidos por extração e corte de carotes. No entanto, não foi possível garantir a mesma altura em todos os provetes devido a irregularidades na espessura dos painéis e a zonas em que o BP não tinha uma qualidade adequada na ligação ao betão de substrato, pelo que a altura variou entre 90 e 70 mm.

Os ensaios decorreram aos 7, 28 e 56 dias de cura e foi seguida a norma NP EN 12390-3 (2011). Os resultados obtidos para todos os provetes ensaiados são apresentados no anexo D.

Apesar das variações na altura dos provetes mencionadas, é possível, através da equação (4.1) desenvolvida pela Concrete Society (1976), obter valores para a resistência equivalente em cubos, através da relação altura / diâmetro das carotes:

$$f_{cm,cubo} = \frac{2,3}{(1,5 + 1/\lambda)} f_{cm,carote} \quad (4.1)$$

sendo:

$\lambda$ , relação altura / diâmetro da carote;

$f_{cm,cubo}$ , resistência à compressão média estimada em cubos [MPa];

$f_{cm,carote}$ , resistência à compressão média em carotes [MPa].

Os resultados assim obtidos podem ser analisados através da Figura 4.2 e da Tabela 4.8.

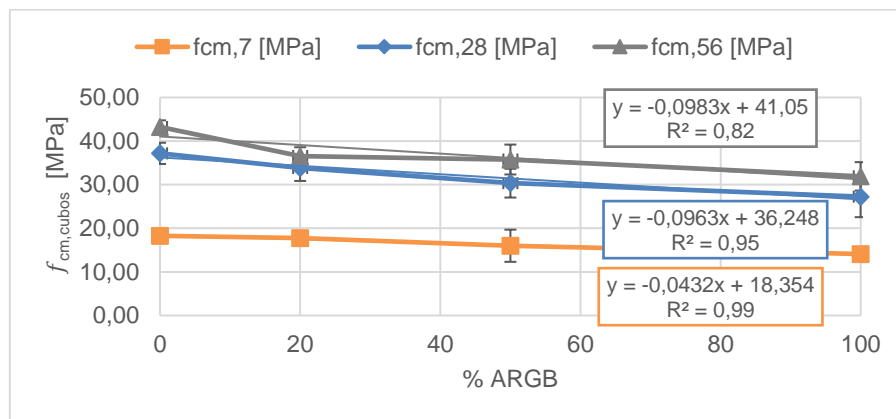


Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão média estimada em cubos, adaptado de Duarte (2018)

Tabela 4.8 - Resistência à compressão média estimada em cubos, adaptado de Duarte (2018)

Betão	f <sub>cm,7</sub> [MPa]	S <sub>d</sub>	Δ <sub>BPR,7</sub> [%]	f <sub>cm,28</sub> [MPa]	S <sub>d</sub>	Δ <sub>BPR,28</sub> [%]	f <sub>cm,56</sub> [MPa]	S <sub>d</sub>	Δ <sub>BPR,56</sub> [%]
BPR	18,27	1,50	-	37,18	2,43	-	43,24	1,52	-
BP20	17,72	1,54	-3%	33,83	2,97	-9%	36,58	2,00	-15%
BP50	15,99	3,69	-12%	30,35	3,30	-18%	35,77	3,43	-17%
BP100	14,09	0,43	-23%	27,25	4,71	-27%	31,91	3,26	-26%

Através da Figura 4.2 e da Tabela 4.8, é possível constatar que, tal como esperado, a resistência à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, consequência da maior relação a/c dos betões com maior percentagem de ARGB, com exceção do BP100 que obteve a mesma relação a/c do que o BP50.

Para o ensaio da resistência à compressão aos 7 dias, obteve-se valores cerca de 50% inferiores aos obtidos aos 28 dias. Este resultado pode ser justificado pelo facto de o processo de extração de carotes ter sido realizado prematuramente, introduzindo microfissuração no betão.

Os ensaios em carotes de idades jovens são inclusivamente desaconselhados pelo Concrete Institute of Australia (2010), que recomenda a utilização de métodos indiretos nestas situações. Na Tabela 4.8, encontram-se também os valores para a redução de resistência de cada betão relativamente ao BPR ( $\Delta_{BPR}$ ) bem como do desvio padrão ( $S_d$ ). Verificou-se que, para o BP100, a redução variou entre 20 e 30%, valores semelhantes aos obtidos para betões convencionais. Poon *et al.* (2004) e Soares *et al.* (2015) obtiveram, respetivamente, 25 e 28% de perdas de resistência, valores muito próximos aos obtidos na presente campanha experimental. Na Tabela 4.3, encontra-se a perda de resistência à compressão em função da percentagem de ARGB, obtida por vários autores.

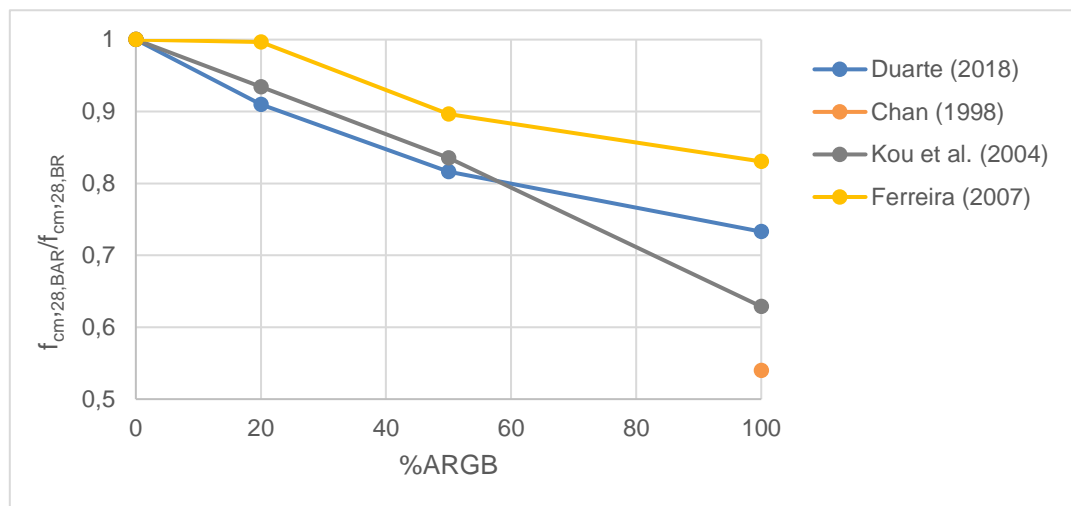


Figura 4.3 - Redução de resistência à compressão em função da percentagem de ARGB

Chan (1998), que também estudou a perda de resistência por compressão de betões projetados com introdução de agregados reciclados, obteve cerca de 56% de redução, para o betão com taxa de substituição de AN por AR de 100%. A Figura 4.3 deixa claro que o valor obtido por Chan (1998), para a resistência à compressão, é bastante inferior ao obtido por outros autores. No entanto, na sua investigação, Chan (1998), substituiu também a fração fina dos agregados, o que pode justificar este reduzido valor.

De forma geral, os betões com maior taxa de incorporação de ARGB obtiveram uma maior dispersão de resultados relativamente ao BPR, como indicam os valores superiores de desvio-padrão.

### 4.3.2. Módulo de elasticidade

Uma vez que o ensaio do módulo de elasticidade é importante na análise da retração de um betão, apresenta-se na Tabela 4.9 os resultados obtidos para esta propriedade nos ensaios desenvolvidos em paralelo por Duarte (2018), como referido na introdução de este documento.

Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade secante para cada composição, adaptado de Duarte (2018)

Betão	$E_{cm}$ [GPa]	$\Delta_{BPR}$ [%]	$S_d$ [GPa]
BPR	26,14	-	1,02
BP20	25,41	-2,79	0,87
BP50	24,34	-6,88	1,79
BP100	18,08	-30,84	1,57

Como se pode observar na Tabela 4.9, o valor do módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da percentagem de substituição de AGN por ARGB, conforme esperado, devido à maior relação a/c e porosidade dos ARGB, confirmada pela elevada absorção de água analisada no ponto 4.1.2, o que conduz a um betão mais deformável, em especial para taxas de substituição superiores a 50%.

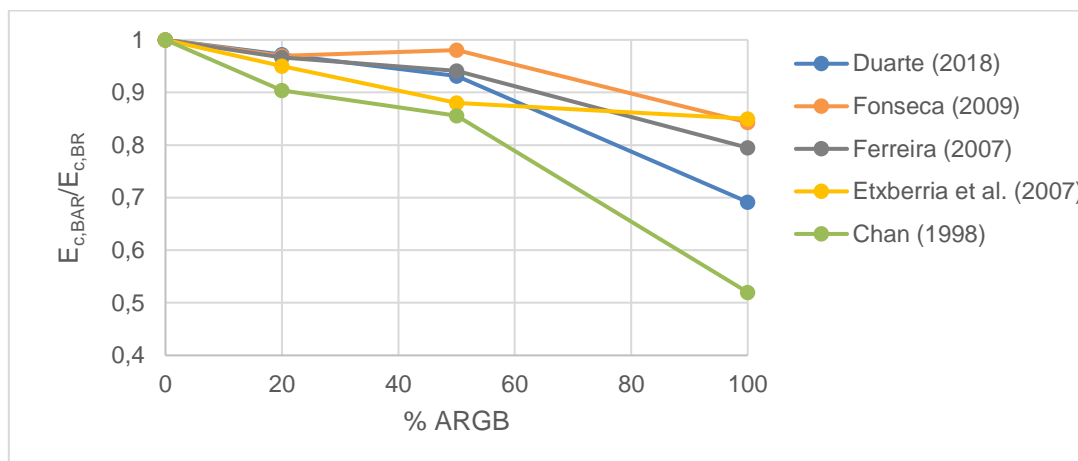


Figura 4.4 - Influência da percentagem de ARGB no módulo de elasticidade (levantamento bibliográfico)

Quando comparados com os valores obtidos por outros autores, como Etxeberria *et al.* (2007) e Ferreira *et al.* (2011), que estudaram betões convencionais, constata-se que a utilização de betão projetado conduziu a maiores reduções no módulo de elasticidade, para a taxa de 100% de substituição de AGN por ARGB. Estes autores obtiveram, respetivamente, 14,74 e 20,51% de redução, enquanto na dissertação de Duarte (2018) se alcançaram reduções de 30,84%. No entanto, como se pode verificar na Figura 4.4, para percentagens de ARGB até 20%, os resultados obtidos por Duarte (2018) são praticamente coincidentes com os obtidos pelos restantes autores, e para percentagens até 50%, a variação foi reduzida. Por outro lado, Chan (1998), que estudou betão projetado com introdução de agregados reciclados, obteve reduções superiores, cerca de 52% para o processo por via seca face ao BPR. Contudo, Chan (1998), introduziu também agregados finos reciclados na sua investigação o que pode justificar a maior redução.

Agregados de menores dimensões possuem uma maior porosidade, conduzindo assim a valores inferiores de módulo de elasticidade. Este facto pode justificar não só as maiores reduções na investigação de Chan (1998), como referido, mas também as maiores reduções obtidas na presente investigação, relativamente às investigações desenvolvidas para betões não projetados, uma vez que a máxima dimensão utilizada na campanha experimental em estudo foi de 12,5 mm, valor bastante inferior ao utilizado na generalidade das campanhas experimentais envolvendo betões não projetados.

## 4.4. Desempenho em termos de durabilidade do BP

### 4.4.1. Absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção de água por imersão realizados avaliam a permeabilidade do betão à água à pressão atmosférica, aferindo assim a porosidade aberta dos vários betões. Na presente dissertação, foram analisados três provetes cilíndricos por composição de betão, cada um com 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Tal como aconteceu no ensaio da resistência à compressão, devido a alguma inconsistência na altura do painel e a bolsas de material desagregado na zona de ligação do BP com o betão de substrato, devido a agregados acumulados devido ao efeito de ricochete, não foi possível garantir em todos os provetes a altura de 100 mm. Na Figura 4.5, pode-se observar claramente o material desagregado na faixa inferior da carote e, na Figura 4.6, pode-se verificar o material completamente desagregado retirado da ligação entre o BP e o betão de substrato.



*Figura 4.5 - Carote com material desagregado*



*Figura 4.6 - Material desagregado retirado da interface entre BP e betão de substrato*

Na realização destes ensaios, foi seguida a especificação LNEC E394 (1993). Os resultados para cada provete individual podem ser consultados no anexo F e, na Tabela 4.10, encontram-se os valores médios para cada composição de betão e ainda a variação, em percentagem, dos valores obtidos para cada composição em relação ao valor obtido para o BPR.

*Tabela 4.10 - Resultados obtidos para a absorção de água por imersão*

Betão	Absorção de água por imersão [%]	$\Delta_{BPR}$ (%)
BPR	13,4	0,0%
BP20	14,4	7,7%
BP50	14,6	8,6%
BP100	15,4	14,7%

Analisando a Tabela 4.10 e a Figura 4.7, pode-se observar um aumento da absorção de água por imersão com o aumento da percentagem de ARGB. Este aumento foi de cerca de 14,7% para o betão com 100% de substituição de AGN por ARGB. À exceção do BPR, todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo de valores avançado pelo ACI Committee 506 (2016), de 14 a 17%, para betões de boa qualidade. O aumento de absorção provocado pela introdução de ARGB pode dever-se à crescente relação a/c necessária para manter a trabalhabilidade em todas as composições e também à maior absorção dos ARGB quando comparada com os AGN, resultante da pasta de cimento que se encontra aderida aos AN de origem presentes na constituição dos ARGB.

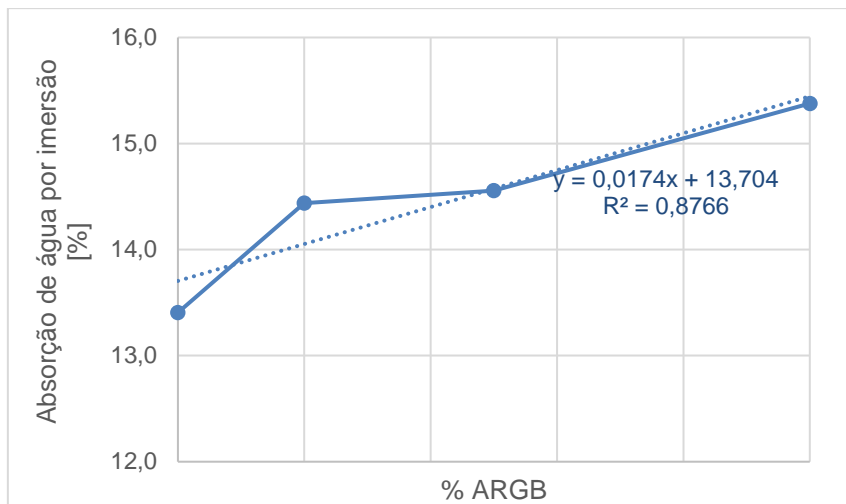


Figura 4.7 - Relação entre a absorção de água por imersão e a %ARGB

Na Figura 4.7, é possível observar que o aumento da absorção de água por imersão com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB se processa de forma aproximadamente linear, como comprova o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,88. A mesma relação linear foi obtida em outras campanhas experimentais envolvendo betões convencionais com introdução de agregados reciclados grossos (Soares, 2014; Bravo, 2016).

Uma vez que não existem estudos sobre a absorção de água de BP com introdução de AR, os resultados obtidos na presente dissertação foram comparados com os obtidos em outras investigações envolvendo betões convencionais com substituição de AGN por AGR. Esta comparação pode ser analisada na Figura 4.8, de onde se pode concluir que os resultados obtidos nesta campanha experimental são ligeiramente inferiores aos obtidos pela generalidade dos investigadores. No entanto, para taxas de substituição de AGN por ARGB até 20%, foram obtidos valores superiores aos de alguns estudos.

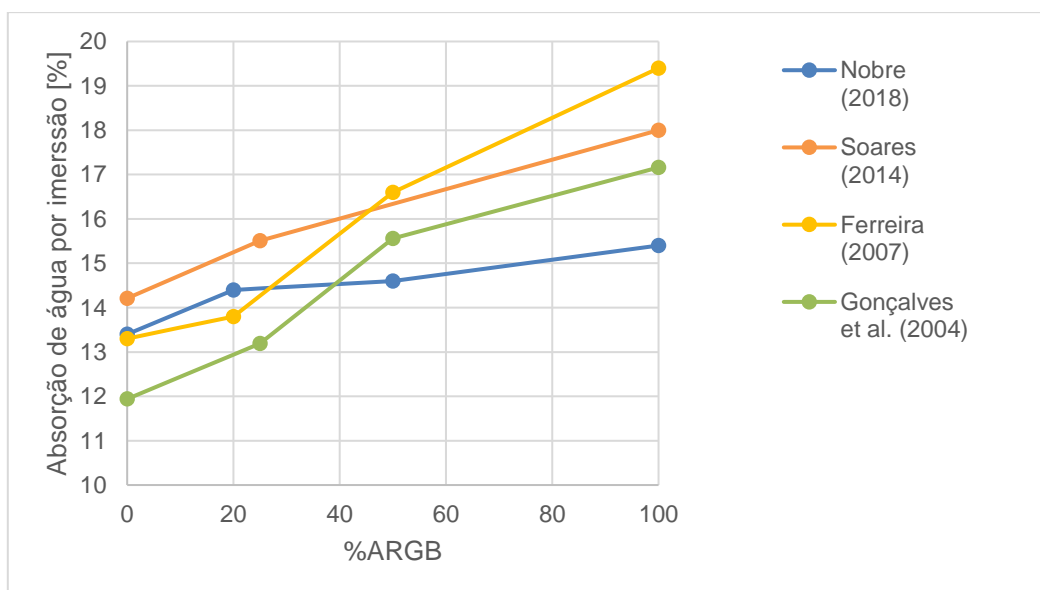


Figura 4.8 - Evolução da absorção de água por imersão com a %AR, obtida por vários autores

A variação em relação ao BPR máxima obtida na presente dissertação foi de 15%, enquanto no levantamento bibliográfico realizado atingiu valores até cerca de 46%, nomeadamente na campanha de Gonçalves (2004), o que pode indicar que o BP é menos afetado pela introdução de AR. Contudo, os valores obtidos também podem ter sido influenciados pela qualidade dos ARGB, que ao serem um dos principais componentes da constituição do betão possuem uma grande influência sobre as propriedades no estado endurecido do mesmo.

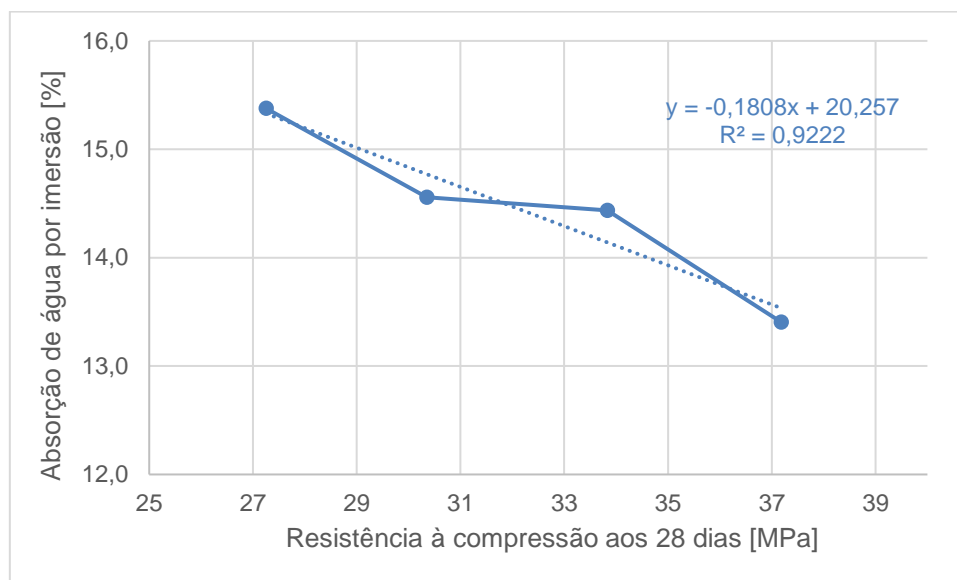


Figura 4.9 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão

Na Figura 4.9, pode-se observar que relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão, ambas aos 28 dias, é fortemente linear, comprovada pelo valor do  $R^2$  de 0,92. Tal relação já tinha sido observada por diversos autores (Ferreira, 2000; Soares, 2014; Bravo, 2016).

#### 4.4.2. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade, aos 28 dias de idade, foi determinada recorrendo ao ensaio descrito pela especificação LNEC E393 (1993). Foram ensaiados três provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 100 mm de altura por composição de betão. Os resultados obtidos para este ensaio são apresentados na Tabela 4.11, onde se pode encontrar as absorções capilares por período de leitura após o início do ensaio (1, 3, 6, 24 e 71 horas) e as variações das absorções capilares às 72 horas em relação ao BPR. Os valores individuais de cada provete estudado podem ser consultados no anexo G.

Tabela 4.11 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade

Betão	Absorção capilar [g/mm <sup>2</sup> ]					$\Delta_{BPR,72h}$ [%]
	1 hora	3 horas	6 horas	24 horas	72 horas	
BR	4,48E-04	5,93E-04	7,18E-04	1,01E-03	1,32E-03	-
B20	4,24E-04	6,28E-04	7,18E-04	1,06E-03	1,38E-03	5%
B50	4,46E-04	6,37E-04	7,91E-04	1,18E-03	1,62E-03	23%
B100	5,44E-04	6,53E-04	8,20E-04	1,28E-03	1,82E-03	38%



A análise dos valores da Tabela 4.11 permite concluir que a absorção de água por capilaridade aumenta com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB. Este aumento deve-se, à maior relação a/c verificada nos betões com maior percentagem de ARGB, necessária para manter a mesma trabalhabilidade em todas as composições, e à maior absorção de água dos ARGB quando comparada com AGN, resultado da pasta cimentícia aderida aos AN de origem que constituem os AGR, pasta essa que apresenta uma maior absorção, comparativamente com o material pétreo constituinte dos AGN.

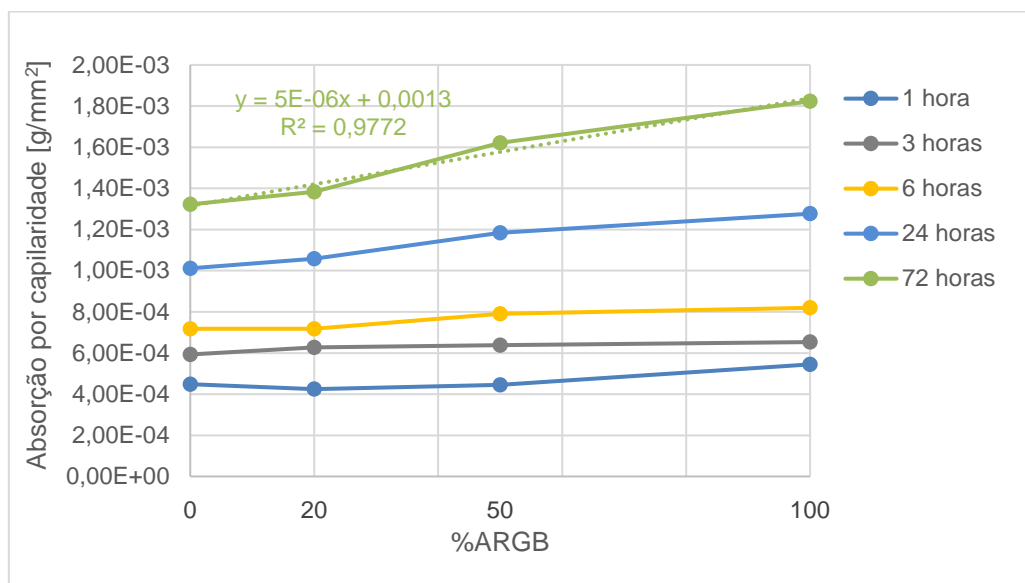


Figura 4.10 - Evolução da absorção de água por capilaridade com a taxa de incorporação de ARGB

Na Figura 4.10, apresenta-se a evolução da absorção de água por capilaridade com o aumento da taxa de incorporação de ARGB para os vários períodos de tempo medidos. É possível constatar, pela observação deste gráfico, que a absorção de água por capilaridade aumenta com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, de forma linear como comprova o coeficiente de correlação,  $R^2$  de 0,98, obtido para as 72 horas. É possível também concluir que a variação em relação ao valor obtido para o BPR aumenta com o tempo de ensaio.

Na Figura 4.11, encontra-se a relação obtida entre a absorção de água por capilaridade às 72 horas e a percentagem de ARGB, obtida por vários autores. Pela análise deste gráfico, é possível concluir que os resultados obtidos na presente campanha experimental estão de acordo com o obtido nas investigações sobre betões não projetados analisadas, com exceção das campanhas experimentais desenvolvidas por Gonçalves *et al.* (2004) e Kou & Poon (2012).

Observando a Figura 4.12, é possível concluir que em todas as composições a absorção de água por capilaridade se processa de forma mais intensa nas primeiras horas depois do betão se encontrar em contacto com a água. Neste gráfico, é também possível comprovar que a substituição de AGN por ARGB até 20% introduz um reduzido aumento de absorção, de cerca de 5%. Por outro lado, como se pode consultar na Tabela 4.11, para taxas de substituição de 50 e 100% de AGN por ARGB, foram obtidos aumentos de 23 e 38%, respetivamente.



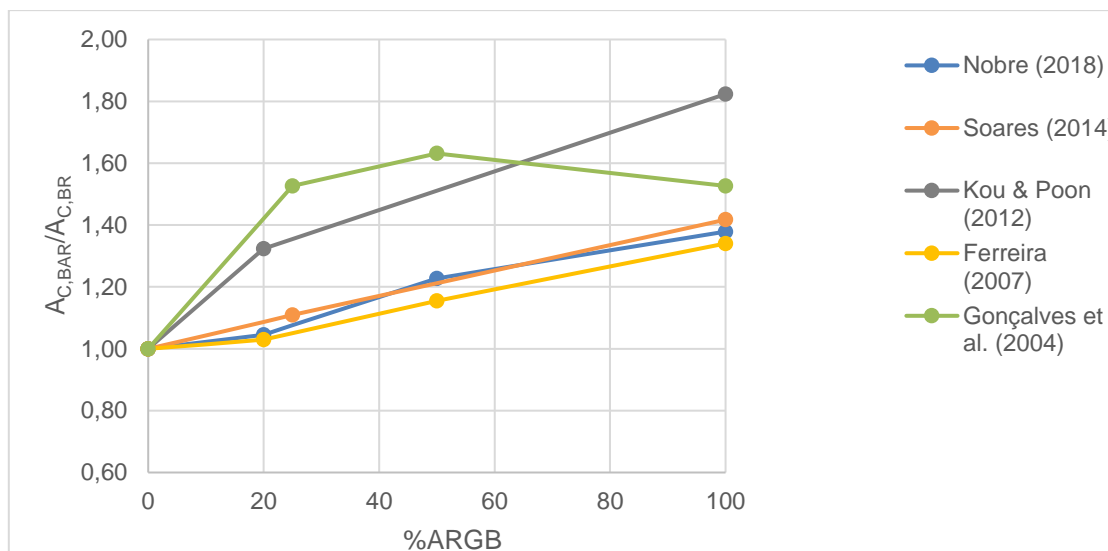


Figura 4.11 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a %ARGB obtida por vários autores

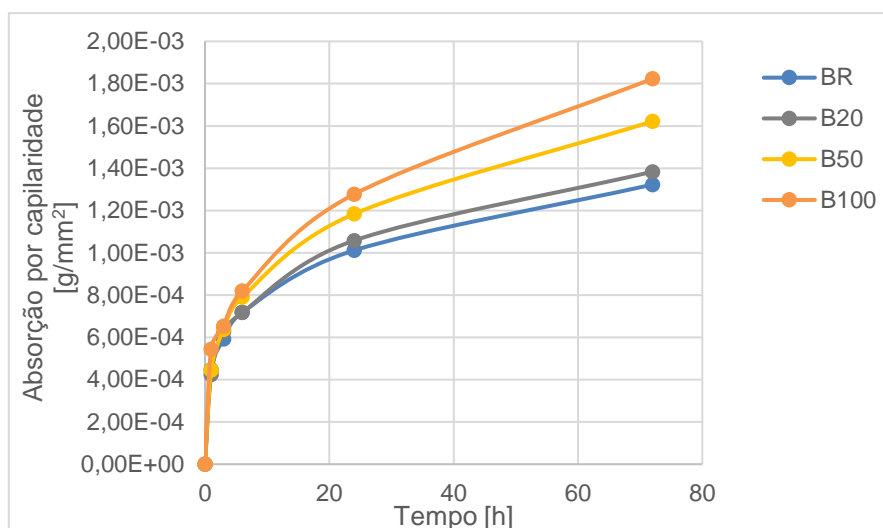


Figura 4.12 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo

Hall (1989), citado por Bravo (2016), afirma que a absorção por capilaridade é proporcional à raiz quadrada do tempo, conforme indicado pela equação (4.2):

$$AC_i = S \times t_i^{0,5} \quad (4.2)$$

sendo:

$AC_i$ , absorção de água por capilaridade [mg/mm<sup>2</sup>];

$S$ , coeficiente de absorção [mg/mm<sup>2</sup>·min<sup>0,5</sup>];

$t$ , tempo [min].

O coeficiente de absorção obtido a partir desta equação pode ser utilizado como um parâmetro de controlo da qualidade de um betão. Diversos autores propuseram diferentes classificações com base neste coeficiente. Na Tabela 4.12, pode-se analisar o modelo proposto por Browne (1991) para classificar um betão recorrendo ao coeficiente de absorção ( $S$ ).

Tabela 4.12 - Qualidade do betão em função do coeficiente de absorção, adaptado de Browne (1991)

Qualidade do betão	Coefficiente de absorção [mg/mm <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
Baixa	> 0,2
Média	0,2 – 0,1
Elevada	< 0,1

Na presente dissertação, foi calculado o coeficiente S para as diferentes composições de betão e determinada a qualidade como proposto por Browne (1991). Os resultados obtidos para o coeficiente S e qualidade do betão são apresentados na Tabela 4.13, bem como os respetivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) e a variação do coeficiente de absorção em relação ao BPR.

Tabela 4.13 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Betão	S [mg/mm <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	$\Delta_{BPR}$ [%]	R <sup>2</sup>	Qualidade
BPR	0,014	0%	0,79	Elevada
BP20	0,015	6%	0,80	Elevada
BP50	0,017	21%	0,85	Elevada
BP100	0,018	28%	0,84	Elevada

Analisando os dados da Tabela 4.13, pode-se comprovar pelos valores elevados de R<sup>2</sup> (entre 0,79 e 0,85) que a relação proposta por Hall (1989) se mantém válida para betões projetados com introdução de agregados reciclados.. Com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, verificou-se um aumento do coeficiente de absorção, como se verifica facilmente pela variação em relação ao BPR, que variou entre 6 e 28%.

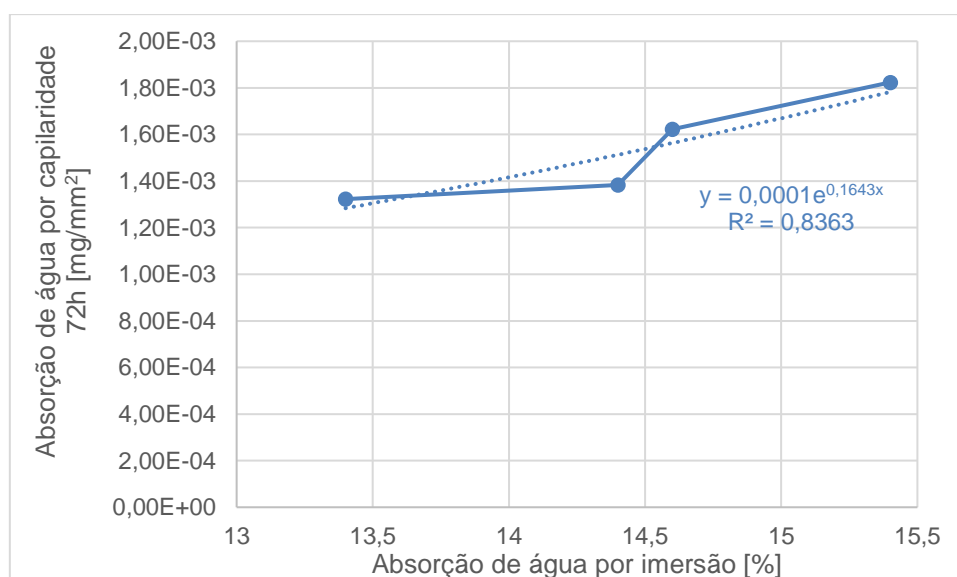


Figura 4.13 - Relação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade às 72 h

Na Figura 4.13, correlacionou-se a absorção de água por imersão com a absorção de água por capilaridade e pode-se constatar, pelo valor  $R^2$  de 0,84, que existe uma boa relação exponencial entre estas duas propriedades, tal como sugerido por Ferreira (2000) na sua investigação.

#### 4.4.3. Resistência à penetração de cloretos

Para realizar o ensaio da resistência à penetração de cloretos, foram utilizados três provetes, por composição, de 100 mm de diâmetro por 50 mm de altura. No entanto, devido à dificuldade em obter um corte preciso, com a mesa de corte utilizada para retificar as carotes, nem todas as carotes utilizadas possuíam exatamente 50 mm de altura. Contudo, a fórmula utilizada para determinar o coeficiente de difusão de cloretos, já mencionada na equação (3.21), tem em conta a altura do provete pelo que não foi necessário proceder a nenhuma correção de resultados adicional devido a este problema.

Para determinar o coeficiente de difusão dos cloretos ( $D$ ), recorreu-se ao ensaio de migração em regime não estacionário, regulado pela especificação LNEC E463 (2004). Na Tabela 4.14, encontram-se, resumidamente, os resultados para o coeficiente  $D$ , bem como a variação deste parâmetro em relação ao BPR. No anexo H, podem ser consultados estes resultados em maior detalhe.

Tabela 4.14 - Evolução do coeficiente de difusão de cloretos

Betão	28 dias		91 dias	
	$D [x 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$	$\Delta_{\text{BPR}} (\%)$	$D [x 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$	$\Delta_{\text{BPR}} (\%)$
BPR	13,5	0	6,8	0
BP20	14,4	7	7,7	13
BP50	15,5	15	8,6	26
BP100	16,9	25	10,0	47

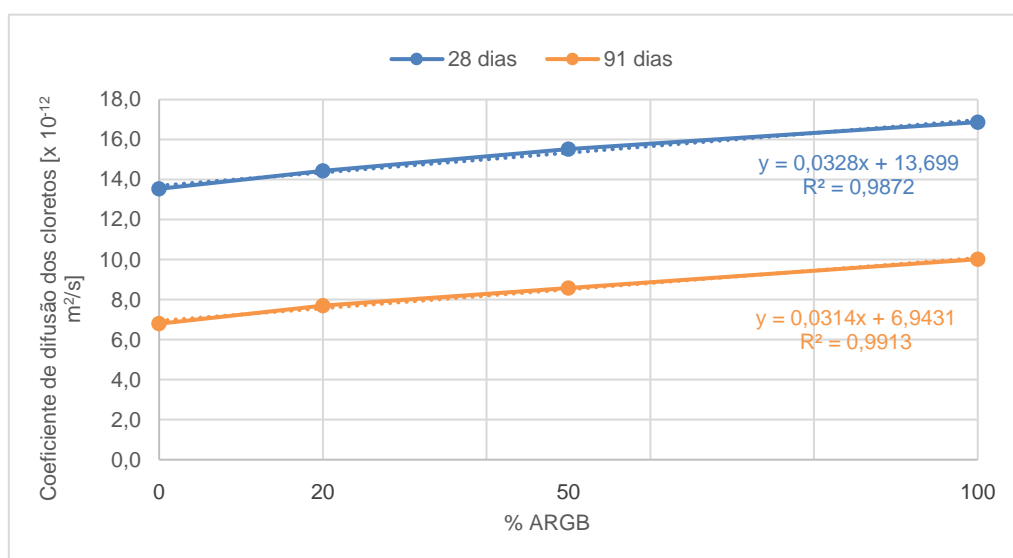


Figura 4.14 - Gráfico da evolução do coeficiente de difusão dos cloretos com o aumento da %ARGB

Através da Figura 4.14, pode verificar-se que o coeficiente de difusão dos cloretos aumenta com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB e que têm uma relação linear, como se pode

confirmar pelos coeficientes de determinação da regressão linear (0,99). Este resultado deve-se aos ARGB que, por conterem na sua constituição AN com uma pasta de cimento aderida, têm uma maior absorção, quando comparados com os AGN. O resultado também pode ter sido influenciado pela maior relação a/c dos betões com maior percentagem de ARGB, à exceção do BP100 que tem uma relação a/c igual ao BP50.

Os resultados obtidos estão de acordo com o concluído por Silva *et al.* (2015), que estudaram 16 investigações diferentes sobre betões convencionais com AR, tendo obtido a mesma relação entre a taxa de substituição de AN por AR e o coeficiente de difusão de cloretos. Na sua tese, Bravo (2016) também obteve uma relação linear com coeficiente de regressão linear semelhante. É importante também referir que o valor do coeficiente de difusão dos cloretos para o BPR foi semelhante ao obtido por Santos (2011), cerca de  $13,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Da Figura 4.14, pode também constatar-se que, como esperado e obtido por Kou *et al.* (2004), no ensaio aos 91 dias obteve-se valores inferiores para o coeficiente de difusão, ou seja, uma maior resistência à penetração dos cloretos com o aumento do tempo de cura. Este efeito deve-se provavelmente ao maior volume de produtos hidratados.

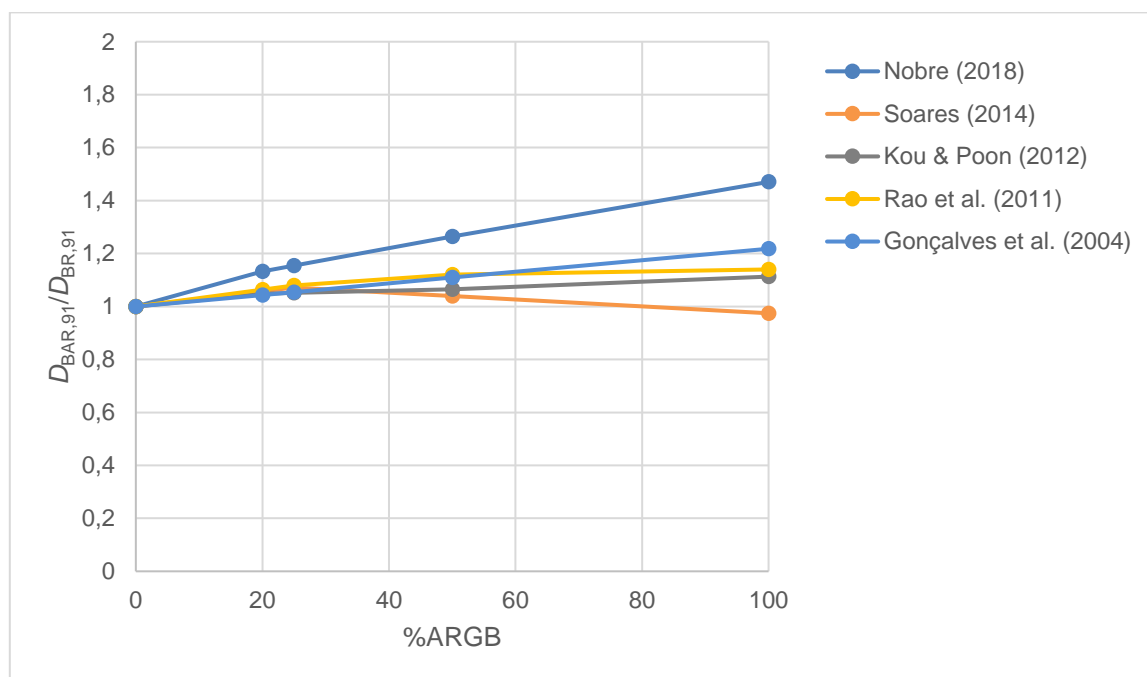


Figura 4.15 – Evolução do coeficiente de difusão de cloretos em função da %ARGB (levantamento bibliográfico)

Na Figura 4.15, pode-se observar a influência da percentagem de ARGB no coeficiente de difusão de cloretos obtido por vários autores. Como se pode constatar, o betão projetado analisado na presente dissertação obteve um maior aumento do coeficiente de difusão, comparativamente aos resultados obtidos nos restantes estudos em betão não projetado. Este resultado deve-se à maior relação a/c efetiva do BP, resultado de ter sido utilizada a via seca, motivo pelo que não foi possível controlar a relação a/c. Silva *et al.* (2015) e Bravo (2016) indicaram que o coeficiente de difusão de cloretos possui uma relação exponencial com a resistência à compressão, como se pode verificar na Figura 4.16.

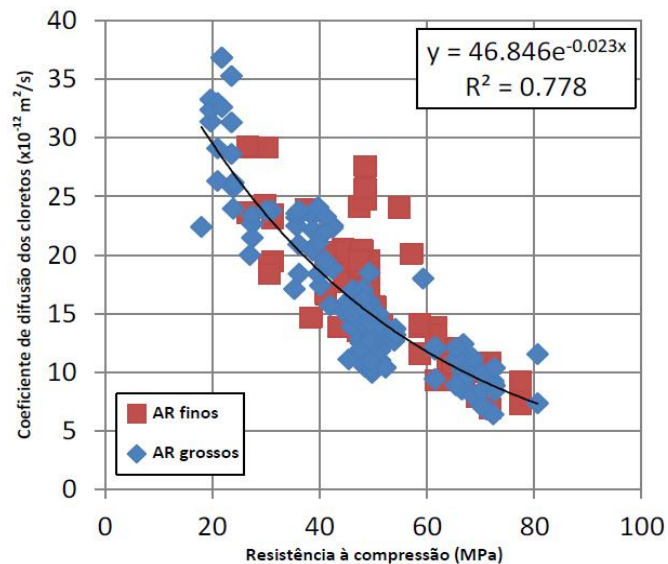


Figura 4.16 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias (Silva *et al.*, 2015)

Na presente dissertação, foi obtida a mesma relação entre estas duas propriedades, tendo-se obtido uma equação semelhante, equação (4.3), com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99.

$$D = 30,518e^{-0,022f_{cm}} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}) \quad (4.3)$$

A penetração de cloretos e a carbonatação no betão são os dois principais processos de despassivação das armaduras no betão, pelo que se utilizou a classificação sugerida por Gjrv (2009), e apresentada na Tabela 4.15, para avaliar a resistência à penetração de cloretos, a partir do coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 4.15 - Resistência à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão (Gjrv, 2009)

$D [x 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$	Resistência à penetração de cloretos
>15	Baixa
10 – 15	Moderada
5 – 10	Alta
2,5 – 5	Muito alta
< 2,5	Extremamente alta

Aos 28 dias, apenas o BP100, obteve uma resistência à penetração baixa, tendo obtido as restantes composições uma resistência moderada. Já aos 91 dias, todos os betões apresentaram uma resistência alta. Os BP estudados na presente investigação obtiveram valores de resistência à penetração de cloretos superiores aos determinados para betões convencionais com AR (Soares *et al.* 2015; Bravo, 2016), o que pode significar que o BP é menos suscetível à penetração de cloretos.

Foi concluído por diversos investigadores que a penetração dos iões cloretos no betão se desenvolve maioritariamente por absorção de água por capilaridade. Na sua campanha experimental, Ferreira (2000) referiu que o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por capilaridade

possuem uma relação linear. Na presente dissertação, foi obtida a mesma conclusão, como se pode constatar pelo  $R^2$  de 0,98 obtido na regressão linear realizada na Figura 4.17.

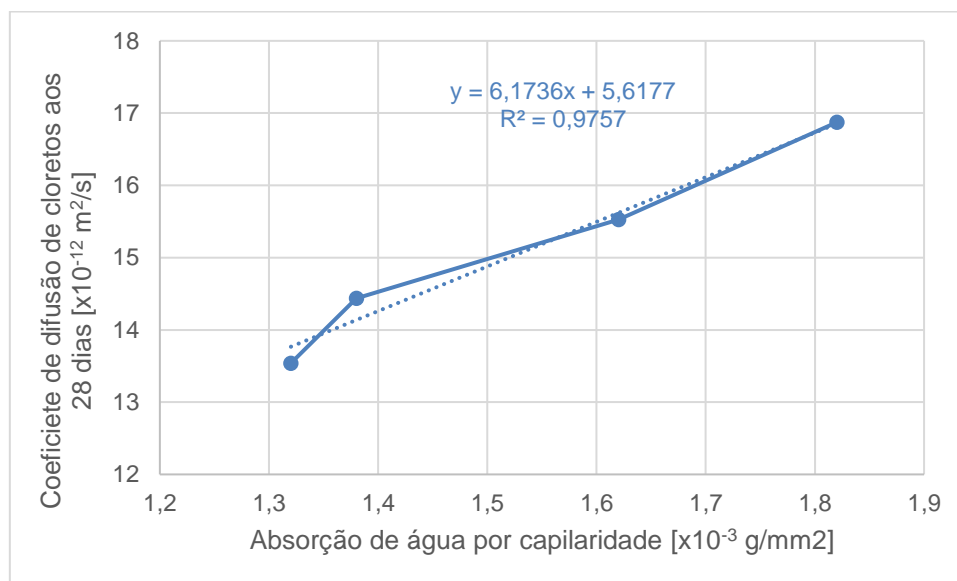


Figura 4.17 - Relação entre a absorção por capilaridade e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias

#### 4.4.4. Resistência à carbonatação

Na presente dissertação, foram analisados quatro provetes cilíndricos por composição, com 100 mm de diâmetro por 40 mm de altura, seguindo-se em todos os ensaios a especificação LNEC E391 (1993). Depois de atingidos os 28 dias de cura, conforme estipulado pela especificação citada, os provetes foram colocados na câmara de carbonatação acelerada, a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ , durante 7, 28, 56 e 91 dias, períodos nos quais se efetuaram os ensaios. Na Tabela 4.16, encontram-se os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação ( $d_k$ ), para cada composição e idade, e também a variação em relação ao BPR ( $\Delta_{BPR}$ ). Os resultados da profundidade de carbonatação para cada provete individual podem ser consultados no anexo I.

Tabela 4.16 - Profundidade de carbonatação

Betão	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
	$d_k$ [mm]	$\Delta_{BPR}$ [%]	$d_k$ [mm]	$\Delta_{BPR}$ [%]	$d_k$ [mm]	$\Delta_{BPR}$ [%]	$d_k$ [mm]	$\Delta_{BPR}$ [%]
BPR	0,2	-	3,3	-	3,5	-	4,6	-
BP20	0,3	75%	5,2	56%	5,2	47%	5,5	20%
BP50	0,7	237%	5,4	64%	5,6	58%	7,0	52%
BP100	0,7	254%	6,6	98%	6,6	87%	6,9	48%

Comparando os resultados obtidos para o BPR aos 91 dias, com os obtidos por Santos (2011), que variaram entre 8,20 e 18,50 mm, pode verificar-se que os resultados obtidos nesta dissertação são bastante inferiores, indicando uma maior resistência à carbonatação. Esta grande discrepância de resultados, pode-se dever a uma relação a/c efetiva mais elevada no estudo realizado por Santos (2011),

e também às dificuldades sentidas durante a referida campanha experimental, como a existência de vazios em vários provetes e a ineficácia do produto de proteção utilizado nos topos dos provetes.

Através da Figura 4.18, pode-se observar que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento da percentagem de substituição de AGN por ARGB. Uma vez mais, este aumento está relacionado com a maior relação a/c dos betões com maior taxa de substituição de AGN por ARGB, necessária para manter a mesma trabalhabilidade em todas as misturas. Para além da relação a/c do betão, a maior absorção de água por parte dos ARGB quando comparada com os AGN, e que se deve, como referido, à argamassa aderida aos AN de origem presentes nos ARGB, conduz também a profundidades de carbonatação superiores. Verifica-se que a profundidade de carbonatação também segue uma relação linear com o aumento da percentagem de ARGB, confirmada pelo valor de  $R^2$  entre 0,72 e 0,86. Esta relação está de acordo com o concluído pelo levantamento bibliográfico realizado por Silva *et al.* (2015). A diminuição da resistência à carbonatação com o aumento da percentagem de ARGB pode dever-se à maior porosidade dos ARGB e ao aumento da relação a/c necessário para manter a trabalhabilidade em todas as composições. Entre 7 e 28 dias, ocorre uma grande variação na profundidade de carbonatação, o que já não se verifica nos intervalos de tempo seguintes, em especial entre os 28 e os 56 dias, onde a profundidade se mantém praticamente constante. Tal pode dever-se em grande parte às reações de hidratação do cimento já terem acontecido aos 28 dias. Aliás, esta é uma das vantagens apontadas ao BP, a capacidade de, apesar de não atingir resistências tão elevadas como um betão convencional análogo, conseguir atingir maiores resistências em menor tempo. Recordar-se ainda que a mesma tendência tinha sido observada na resistência à compressão.

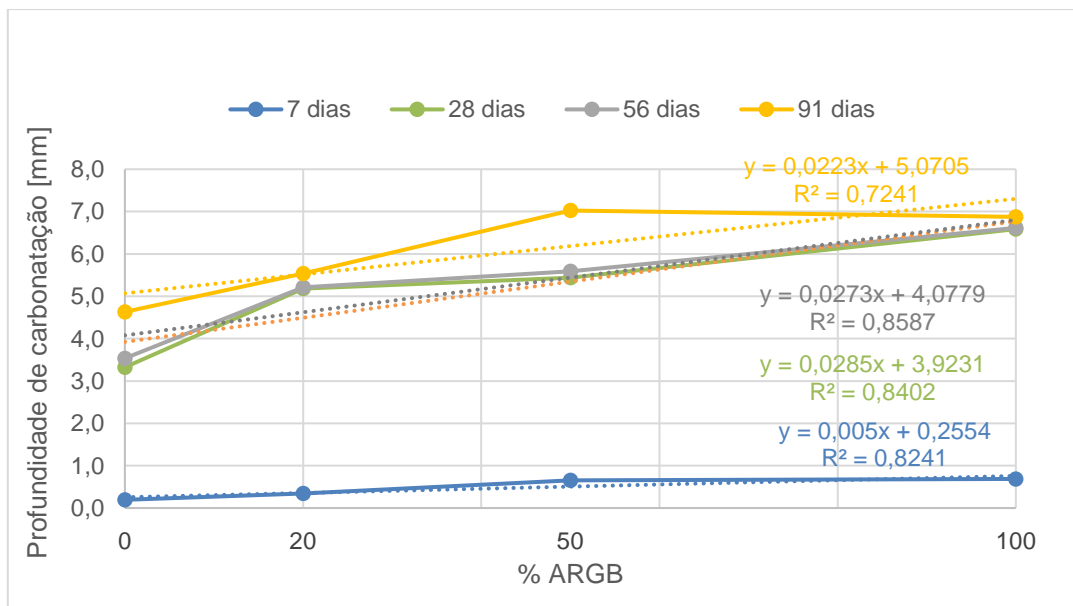


Figura 4.18 - Evolução da profundidade de carbonatação com a %ARGB

Na Figura 4.19, apresenta-se os resultados do levantamento bibliográfico da evolução da profundidade de carbonatação com a percentagem de ARGB.

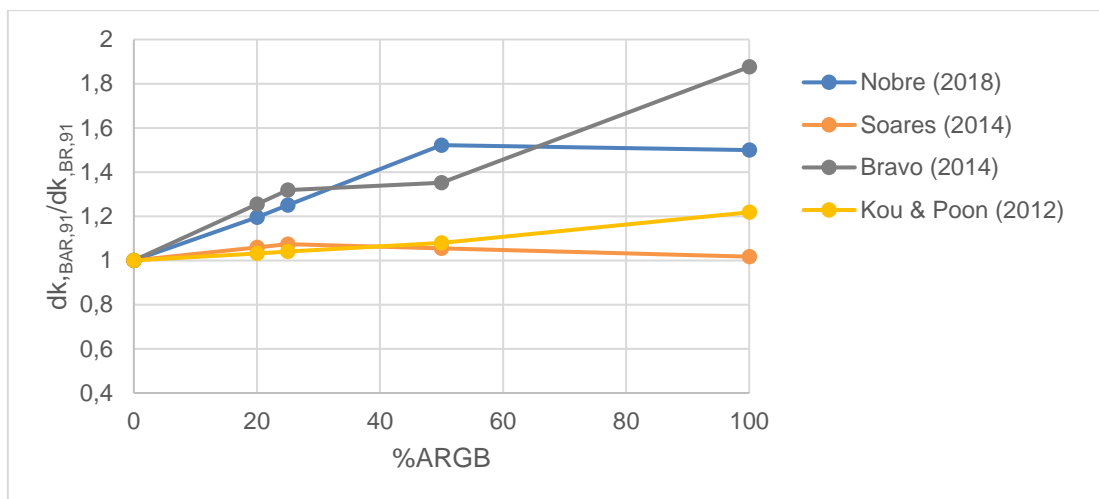


Figura 4.19 - Evolução da profundidade de carbonatação com %ARGB (levantamento bibliográfico)

Por análise da Figura 4.19, pode-se constatar que os valores obtidos na presente campanha experimental se encontram dentro dos valores obtidos para a avaliação desta propriedade em betões não projetados. Recordar-se que se comparou os valores obtidos nesta investigação, com valores relativos a betões não projetados, devido à inexistência de estudos de carbonatação sobre BP com AR.

O valor de  $d_k$  pode ser estimado, para um dado intervalo de tempo ( $t$ ), utilizando a primeira lei de Fick que indica que a profundidade de carbonatação varia com a raiz quadrada, afetada de uma constante de carbonatação ( $K_c$ ), conforme indica a equação (4.4):

$$d_k = K_c t^{0,5} \quad (4.4)$$

Diversos autores citados por Bogas (2011) afirmam que a potência do tempo pode variar entre 0,2 e 0,5, consoante as condições de exposição ambiental. O mesmo autor refere ainda que, para condições de carbonatação acelerada, é adequado utilizar o valor de 0,5 para a potência do tempo, como indicado na equação (4.4). Bravo (2016) e Evangelista (2014) confirmaram que esta lei continua a poder ser utilizada em betões convencionais com introdução de AR. Na presente dissertação, foi também possível determinar coeficientes  $K_c$  para cada uma das composições de betão, bem como os coeficientes  $R^2$  correspondentes, que podem ser consultados na Tabela 4.17, onde se apresentam também as variações percentuais dos coeficientes de carbonatação relativamente ao BPR. Como se pode constatar, os valores de  $K_c$  aumentam com o aumento da %ARGB, e os valores de  $R^2$ , apesar de não serem excelentes, são razoáveis pelo que se pode considerar que a 1ª lei de Fick continua a poder ser utilizada em betões projetados com introdução de agregados reciclados.

Tabela 4.17 - Coeficientes de carbonatação dos betões estudados

Betão	$K_c$ [mm/ano <sup>0,5</sup> ]	$R^2$	$\Delta_{BPR}$ [%]
BPR	11,44	0,88	0,0%
BP20	13,46	0,71	17,6%
BP50	16,35	0,84	42,9%
BP100	16,05	0,69	40,3%



Como referido por Bravo (2016), muitas vezes a resistência à compressão é utilizada como um indicador, ainda que pouco rigoroso, da durabilidade, pelo que é importante confirmar se a relação linear existente entre esta propriedade e a resistência à carbonatação se mantém para BPAR, tal como concluído pela generalidade das investigações para betões convencionais com introdução de AR (Soares, 2014). Na Figura 4.20, pode-se observar a relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão, ambas aos 28 dias. Como esperado, a profundidade de carbonatação aumenta com a diminuição da resistência à compressão, e confirma-se, pela aproximação linear com coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,92, que o BPAR continua a seguir a relação observada entre estas duas propriedades em betões convencionais.

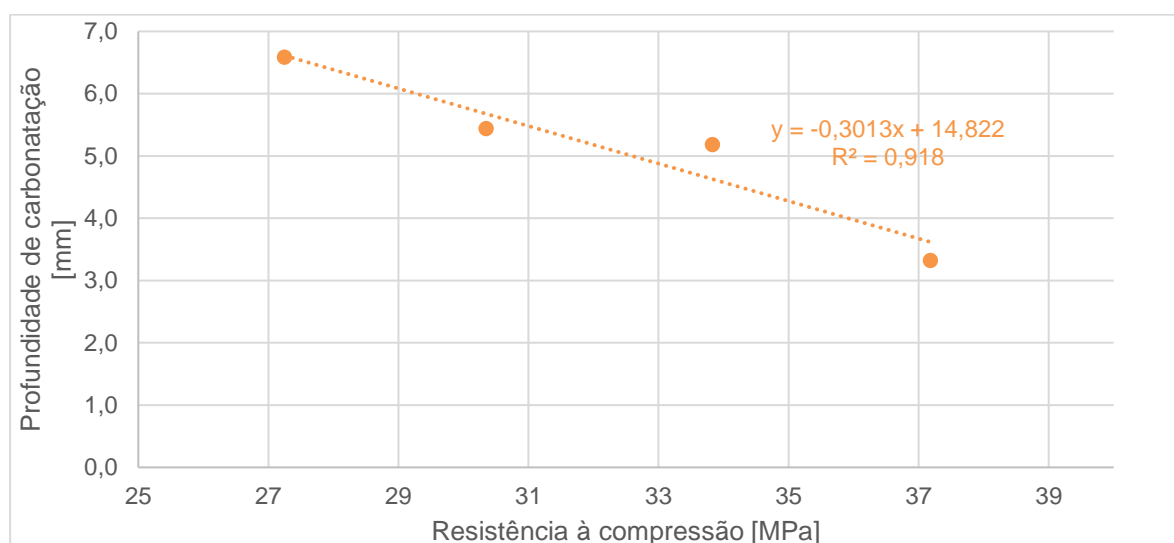


Figura 4.20 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação, aos 28 dias

#### 4.4.5. Retração

Para o ensaio da retração, seguiu-se o procedimento estipulado pela especificação LNEC E398 (1993), e foram ensaiados dois provetes cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura por composição. Neste ensaio, não foi possível garantir a altura de 100 mm em todos os provetes, no entanto todas as medidas são realizadas em relação à altura inicial, pelo que as diferenças de altura entre provetes são tidas em consideração.

Na Tabela 4.18, encontram-se os valores para a extensão de retração obtidos aos 7, 28, 60 e 91 dias, bem como a sua variação em relação ao BPR. No anexo J, podem ser consultadas todas as medições realizadas para cada provete individualmente.

Tabela 4.18 - Resultados obtidos no ensaio de retração

Idade [dias]	BPR		BP20		BP50		BP100	
	[m/m]	$\Delta_{BPR}$ [%]	[m/m]	$\Delta_{BPR}$ [%]	[m/m]	$\Delta_{BPR}$ [%]	[m/m]	$\Delta_{BPR}$ [%]
7	-4,16E-04	-	-1,89E-04	-55%	-4,21E-04	1%	-5,19E-04	25%
28	-5,36E-04	-	-4,23E-04	-21%	-5,99E-04	12%	-8,07E-04	51%
60	-5,96E-04	-	-4,92E-04	-17%	-7,90E-04	33%	-8,58E-04	44%
91	-6,26E-04	-	-5,14E-04	-18%	-8,18E-04	31%	-8,65E-04	38%

Analisando os valores para a retração aos 91 dias, pode-se constatar que, à exceção do BP20, a retração aumentou com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB. Este aumento justifica-se pelo aumento da relação a/c e principalmente pelo menor módulo de elasticidade dos ARGB. O aumento da relação a/c aumenta a quantidade de água evaporável no betão e a menor rigidez dos ARGB diminui também a rigidez dos provetes de betão, o que reduz a sua capacidade de restringir a retração do betão (Whiting et al., 2012).

O valor superior para o BPR face ao BP20 pode-se dever aos provetes utilizados para o ensaio do BPR terem sido extraídos de uma zona dos painéis em que o betão apresentava uma maior relação a/c efetiva. Lembra-se que, por se ter realizada a projeção por via seca, o operador da boca de injeção pode regular a quantidade de água durante a projeção de modo a manter a trabalhabilidade. O valor da retração do BPR também pode ter sido influenciado pelo efeito de ricochete. Segundo Armen-gaud *et al.* (2017), na projeção por via seca, o elevado efeito de ricochete conduz a uma composição efetiva com maior percentagem de cimento, o que leva a uma maior retração. Na presente campanha experimental, o BPR foi a composição que sofreu maior efeito de ricochete, cerca de 27%, o que pode ter conduzido ao valor de retração superior ao esperado.

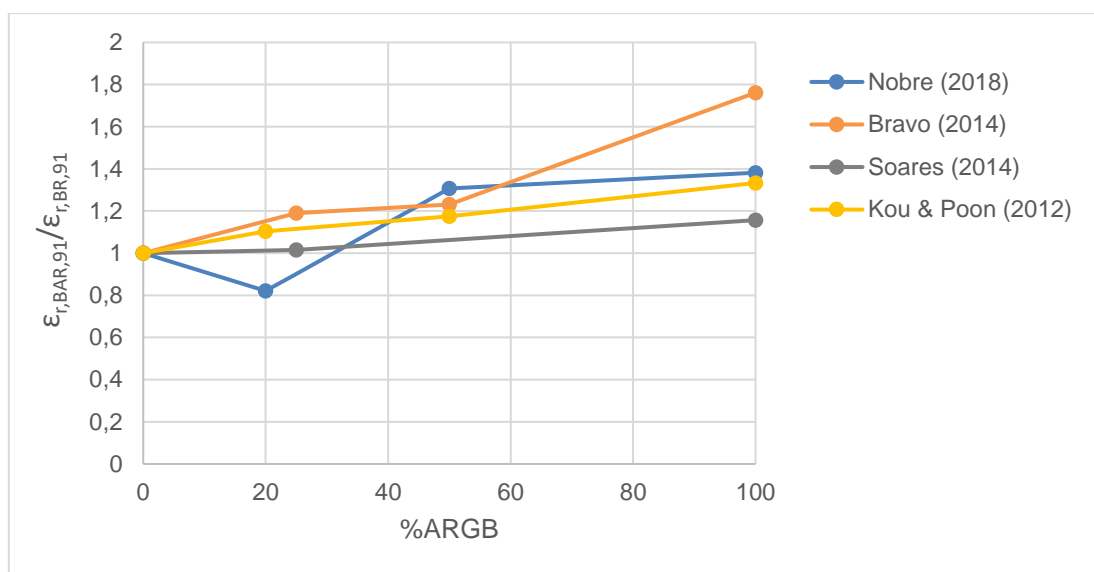


Figura 4.21 - Evolução da retração aos 91 com a percentagem de ARGB (levantamento bibliográfico)

Na Figura 4.21, à exceção da aparente redução para o BP20, o betão projetado apresentou um andamento de retração aos 91 dias, em função da percentagem de ARGB, semelhante aos betões convencionais análogos. Recorda-se que, na Figura 4.21, se comparou os resultados da presente dissertação com resultados de estudos envolvendo betões não projetados com introdução de ARGB, por não existirem estudos que tenham analisado a retração de BP com introdução de AR.

Em geral, todos os valores de retração foram superiores aos obtidos para betões convencionais análogos. Na sua campanha experimental, Bravo (2016) obteve valores entre  $-3 \times 10^{-4}$  e  $-6 \times 10^{-4}$  m/m para a retração aos 91 dias e, na presente dissertação, foram obtidos valores entre  $-5,1 \times 10^{-4}$

e  $-8,65 \times 10^{-4}$ . Como adiantado para o BPR, este aumento pode dever-se ao efeito de ricochete que, embora menor para os BPARGB, também existe e não pode ser desprezado. Contudo, estes valores podem também ter sido inflacionados devido à reduzida dimensão dos provetes ensaiados que, correspondendo a uma superfície específica superior, pode conduzir a trocas de água com o ambiente mais rápidas (Coutinho & Gonçalves, 1994).

No entanto, no presente estudo, foram obtidos valores entre 18 e 38% de aumento em relação ao betão de referência, valores que se encontram dentro do intervalo de valores obtido por Hansen (1986), no seu levantamento bibliográfico sobre BAR, que concluiu que a introdução de AGR conduz a um aumento entre 20 e 50% em relação ao betão de referência, o que significa que o efeito da introdução de AR no betão se processa de igual modo nos BP.

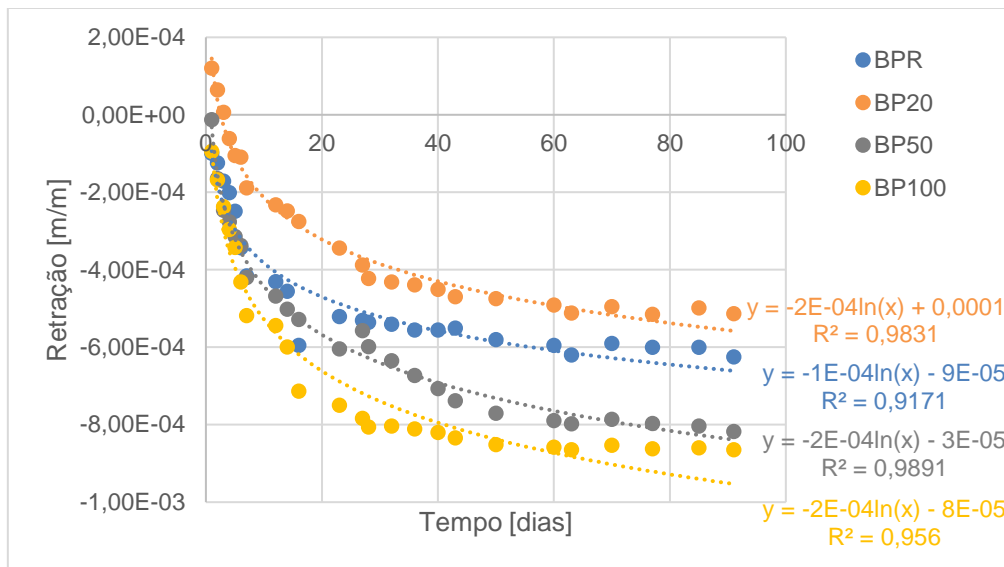


Figura 4.22 - Evolução da retração ao longo do tempo

Na Figura 4.22, pode-se constatar que a retração aumenta ao longo do tempo segundo uma função logarítmica, como se demonstra pelos elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos nas regressões logarítmicas (entre 0,92 e 0,99). Esta tendência confirma que a retração se processa em especial em idades jovens, após as quais os valores tendem a permanecer inalterados. Esta tendência foi observada pela generalidade dos investigadores para betões não projetados, como Bravo (2016), Cartuxo *et al.* (2014) e Whiting *et al.* (2012).

Na Figura 4.23, apresenta-se a regressão linear realizada para a relação entre a retração aos 91 dias e a taxa de substituição de AGN por ARGB, para a qual se obteve um coeficiente de correlação de 0,86. Este valor indica que a retração aumenta linearmente com o aumento da percentagem de ARGB.

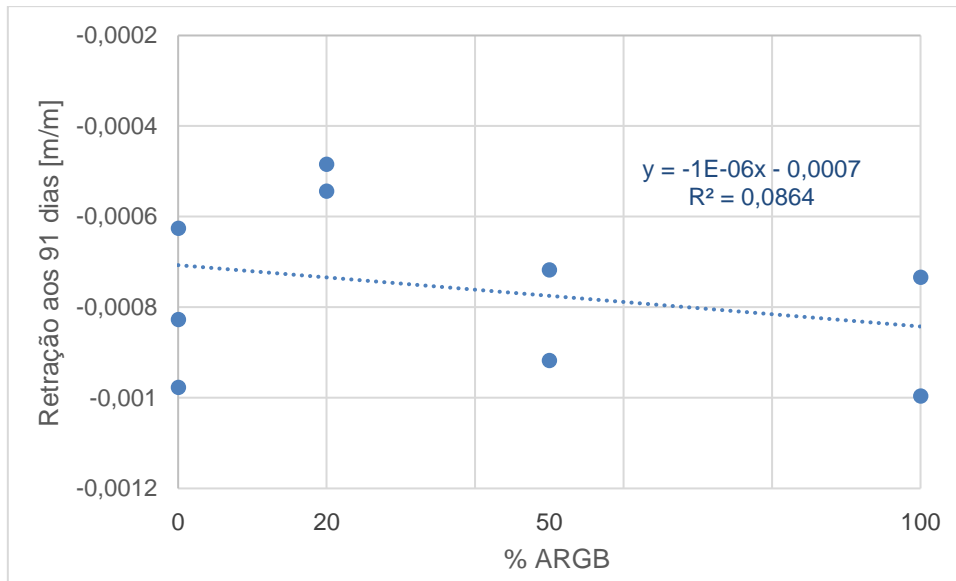


Figura 4.23 - Evolução da retração aos 91 dias com a taxa de substituição de AGN por ARGB

## 5. Conclusões

### 5.1. Caraterização dos ARGB

A partir dos ensaios realizados aos ARGB foi possível concluir que devido à argamassa aderida aos mesmos, estes possuem um maior volume de vazios e absorção de água, bem como menor valor de massa volúmica. A presença da argamassa aderida conduziu também a um reduzido valor de resistência à fragmentação, como mostra o valor superior do coeficiente de Los Angeles, devido à baixa resistência desta pasta cimentícia quando comparada com o material pétreo.

Este tipo de agregados apresentou também uma granulometria mais extensa quando comparados com os AN. Apesar de na presente investigação este facto não apresentar um problema, na sua utilização corrente pode ser uma desvantagem.

Os ARGB apresentaram também uma forma alongada, comprovada pelo índice de forma elevado, contudo esta caraterística está associada ao processo de britagem, pelo que poderia ser melhorada, alterando o método utilizado na trituração dos agregados, como comprovado em outras investigações onde se obtiveram valores inferiores.

Refere-se ainda que os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, e se encontram resumidos na Tabela 5.1.

*Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios aos agregados*

	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	ARGB
$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2587	2623	2708	2724	2658
$\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2548	2574	2634	2624	2370
$\rho_{sss}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2564	2594	2661	2648	2478
WA24 [%]	0,59	0,71	1,02	1,65	4,55
$\rho_{b,médio}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1557	1544	1409	1406	1287
Índice de forma [%]	-	-	22,3	26,7	45
$\Delta LA$ [%]	-	-	25	25	36

### 5.2. Caraterização dos betões no estado fresco

Uma vez que se adotou a projeção por via seca, não foi possível controlar a relação a/c diretamente, uma vez que a adição de água foi controlada pelo operador. Contudo foi possível registar a quantidade de água utilizada na projeção de cada composição de betão, e com esta calcular a relação a/c efetiva. Com o aumento da taxa de substituição de AN por ARGB verificou-se, como esperado, um aumento da relação a/c, à exceção do BP100 que manteve a mesma relação a/c que o BP50.

Foram também contabilizadas as perdas por efeito de ricochete, tendo-se obtido uma redução de cerca de 30%, para o BP100. Sendo o efeito de ricochete uma das maiores desvantagens do BP, estes resultados foram muito importantes e confirmaram o interesse da utilização de estes agregados.

A redução do efeito de ricochete pode justificar-se pela menor massa volúmica e maior rugosidade dos ARGB, que permitem uma melhor coesão superficial. Apesar da elevada absorção de água por parte de estes agregados, é possível que, por estabelecerem contacto com a água apenas no instante da projecção, não seja esta a principal razão para as menores perdas por ricochete.

Os resultados obtidos para a caracterização de cada composição no estado fresco são resumidos na Tabela 5.2.

*Tabela 5.2 - Resultados da caracterização do betão no estado fresco*

	Relação a/c	Perdas por ricochete [%]	$\Delta_{BR}$ [%]
BPR	0,46	27,27	-
BP20	0,47	21,09	- 22,7
BP50	0,50	26,14	- 4,1
BP100	0,50	19,11	- 29,9

### 5.3. Caracterização dos betões no estado endurecido

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos betões estudados no estado endurecido, bem como a variação máxima em relação ao BPR, encontram-se resumidos na Tabela 5.3.

*Tabela 5.3 - Resultados obtidos para a caracterização dos betões no estado endurecido*

	BPR	BP20	BP50	BP100	$\Delta_{BPR,máx}$ (%)
Resistência à compressão, 28 dias [MPa]	37,18	33,83	30,35	27,25	-27,0
Módulo de elasticidade [GPa]	26,14	25,41	24,34	18,08	-30,8
Absorção de água por imersão [%]	13,4	14,4	14,6	15,4	14,7
Absorção de água por capilaridade, 72 horas [ $\times 10^{-3}$ g/mm <sup>2</sup> ]	1,32	1,38	1,62	1,82	38,0
Coefficiente de difusão de cloretos, 91 dias [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s]	6,8	7,7	8,6	10,0	47,0
Profundidade de carbonatação, 91 dias [mm]	4,6	5,5	7,0	6,9	48,0
Retração, 91 dias [ $\times 10^{-4}$ m/m]	-6,26	-5,14	-8,18	-8,65	38,2

Como concluído por Duarte (2018), pode afirmar-se que de forma geral, a introdução de ARGB reduz as propriedades mecânicas do betão, conduzindo a reduções até cerca de 30% na resistência à compressão e módulo de elasticidade.

De modo a analisar os betões em termos de durabilidade foram realizados ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, resistência à penetração de cloretos, resistência à carbonatação e retração.

No ensaio de absorção de água por imersão pôde observar-se um aumento, de forma linear, com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB. Foram registados aumentos até cerca de 15%,

no entanto todos os valores obtidos encontram-se dentro dos valores avançados pelo ACI Committee 506 (2016) para um BP de boa qualidade. Também se confirmou que a absorção de água por imersão aumenta linearmente com a diminuição da resistência à compressão.

O ensaio de absorção de água por capilaridade também revelou uma relação linear com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, com aumentos até cerca de 38%, no entanto para taxas de substituição até 20% o aumento foi de apenas 5%. Deve referir-se que foi possível concluir que, para todas as composições, a absorção de água por capilaridade se processa de forma mais intensa nas primeiras horas depois do betão entrar em contacto com a água. Foi ainda determinado um coeficiente de absorção (S) que, segundo a classificação proposta por Browne (1991), atribui uma qualidade elevada a todos betões estudados, apesar do aumento verificado para o S. Estudou-se também a relação entre os dois tipos de absorção, por imersão e por capilaridade, tendo-se obtido uma boa relação exponencial entre as duas, com um coeficiente  $R^2$  de 0,84.

Quanto à avaliação da resistência à penetração dos cloretos, verificou-se um aumento, de forma linear, do coeficiente de difusão de cloretos com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, com uma variação em relação ao BPR até cerca de 47%. No entanto para taxas de substituição inferiores a 20% a variação foi apenas até cerca de 13%. Confirmou-se também que, como esperado, a resistência à penetração de cloretos aumenta com o tempo de cura, facto provado pelos valores inferiores obtidos para o coeficiente de difusão aos 91 dias. Para melhor avaliar esta propriedade recorreu-se à classificação proposta por GjØrv (2009), sendo que aos 28 dias todos os betões, à excepção do BP100, que obteve uma classificação baixa, obtiveram uma classificação moderada. Já aos 91 dias, todos os betões foram classificados como de alta resistência.

Deve ainda referir-se que os betões estudados nesta dissertação obtiveram valores de resistência à penetração de cloretos superiores aos determinados em betões não projetados análogos (Soares *et al.* 2015; Bravo, 2016), o que pode sugerir que o BP é menos suscetível à penetração de cloretos. É importante recordar que o valor do coeficiente de difusão de cloretos obtido para o BPR, aos 28 dias, foi semelhante ao obtido por Santos (2011), cerca de  $13,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

No ensaio da resistência à carbonatação obtiveram-se valores para o BPR bastante inferiores aos obtidos por Santos (2011), esta diferença pode dever-se a uma relação  $a/c$  efetiva inferior na presente campanha experimental e também às dificuldades sentidas por Santos (2011), na sua campanha experimental, como a existência de vazios nos provetes analisados e a ineficácia do produto de proteção utilizado nos topos dos provetes. Como notado nas propriedades já mencionadas, a profundidade de carbonatação também aumentou com o aumento da percentagem de substituição de AGN por AGR de forma linear.

Verificou-se ainda que a profundidade de carbonatação aumentou com a diminuição da resistência à compressão de forma linear, confirmada pelo coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,92 obtido na regressão linear.

Por fim nos ensaios de avaliação da retração aos 91 dias constatou-se que a extensão de retração aumentou de forma linear com o aumento da taxa de substituição de AGN por ARGB, justificado

principalmente pelo menor módulo de elasticidade dos ARGB. A única exceção foi o BP20 que obteve valores inferiores ao BPR, tal pode ter-se devido ao BPR ter obtido perdas por efeito ricochete superiores aos restantes betões, conduzindo a uma percentagem de cimento maior. Comparando os valores obtidos na presente dissertação com valores obtidos para betões não projetados análogos, verificou-se que os betões projetados apresentaram maior retração. Contudo este resultado pode ter sido influenciado pela reduzida dimensão dos provetes utilizados na presente campanha experimental, que por terem uma superfície específica superior, podem realizar trocas de água com o ambiente mais rapidamente (Coutinho & Gonçalves, 1994). Analisando a evolução da retração ao longo do tempo pôde-se verificar que esta aumenta de forma logarítmica, indicando que esta se desenvolve sobretudo nas idades mais jovens, após as quais estabiliza.

## **5.4. Considerações finais**

Sendo a indústria da construção uma das principais responsáveis pela geração de resíduos e pelo consumo de grandes quantidades de matérias primas, é imperativo continuar a desenvolver soluções que possam combater o impacte ambiental desta indústria.

O betão projetado é uma tecnologia muito utilizada em reabilitação e reforço de estruturas, uma das áreas com maior crescimento e que se prevê continuar a crescer cada vez mais, pelo que os resultados da presente dissertação, pioneira a nível mundial no estudo da durabilidade de betões projetados com introdução de ARGB, são de grande interesse.

A campanha experimental levada a cabo na presente dissertação mostrou que a utilização de agregados reciclados em betão projetado é viável a nível técnico e que pela redução do efeito de ricochete o pode ser também a nível económico. Estas conclusões são bastante relevantes uma vez que a introdução de AR no betão projetado poderá ajudar a combater a escassez de recursos e a gestão de resíduos, contribuindo para uma diminuição do impacte ambiental da indústria da construção.

## **5.5. Desenvolvimentos futuros**

A presente dissertação foi sem dúvida um ponto de partida importante para o estudo de betões projetados com introdução de agregados reciclados. Contudo é importante que os resultados obtidos sejam comprovados e complementados, se possível com campanhas experimentais de maior dimensão que possam ter maior significância estatística. Para tal sugere-se que os seguintes aspetos sejam estudados:

- comparação da projeção de betões com ARGB por via seca com a projeção de betões com ARGB por via húmida, em termos mecânicos e de durabilidade;
- análise do desempenho mecânico e em termos de durabilidade de betões projetados com introdução de AR de RCD;



- análise do desempenho mecânico e em termos de durabilidade de betões projetados com introdução de agregados finos reciclados;
- análise do desempenho mecânico e em termos de durabilidade de estruturas realizadas com betão projetado com introdução de AR;
- estudo da influência de superplastificantes em betões projetados com introdução de AR;
- estudo da viabilidade económica de betões projetados com introdução de AR.



## 6. Referências bibliográficas

- ACI Committee 506. (2016). *ACI 506R-16 - Guide to Shotcrete*. American Concrete Institute.
- Akroyd, T. (1962). *Concrete: Properties and manufacture*. Londres: Pergamon Press.
- American Shotcrete Association. (2017). Sustainability of Shotcrete. Obtido de <http://www.shotcrete.org/pages/why-shotcrete/sustainability.htm>
- Angulo, S. C. (2005). Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento de Concretos. *Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo*.
- Armelin, H., & Banthia, N. (1998). Development of a General Model of Aggregate Rebound for Dry-mix Shotcrete - (Part II). *Materials and structures*, 31, 195-202. doi:10.1007/bf02480400
- Armengaud, J., Casaux-Ginestet, G., Cyr, M., Husson, B., & Jolin, M. (15 de Março de 2017). Characterization of Fresh Dry-mix Shotcrete and Correlation to Rebound. *Construction and Building Materials*, 135, 225-232. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.220
- Armengaud, J., Casaux-Ginestet, G., Cyr, M., Husson, B., & Jolin, M. (2017). Characterization of Fresh Dry-mix Shotcrete and Correlation to Rebound. *Construction and Building Materials*, 135, 225 - 232.
- Artur Peixoto Consultores Geotecnia. (2017). Obtido em 27 de Abril de 2017, de <https://www.apgeotecnia.pt/portfolio/closerie.html>
- Austin, S. A., Goodier, C. I., & Robins, P. J. (2005). Low-volume Wet-process Sprayed Concrete: Pumping and Spraying. *Materials and Structures*, 38, 229 - 237.
- Banthia, N., & Chan, C. (2000). Use of Recycled Aggregate in Plain and Fiber-Reinforced Shotcrete. *ACI Concrete International: Design & Construction*, 22(6), 41 - 46.
- Barra, M., & Vasquez, E. (1998). Properties of Concrete With Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and Their Interpretation. *Use of Recycled Concrete Aggregate, International Symposium on Sustainable Construction, London*, 19 - 30.
- Bogas, J. (2011). Caracterização de Betões Estruturais com Agregados Leves de Argila Expandida. *(Tese de Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portuga*, 1596.
- Bravo, M. (2014). Aplicação de Betão Projectado. *(Trabalho Realizado no âmbito da disciplina Curso Avançado em Reabilitação de Edifícios e Estruturas Especiais), Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.

- Bravo, M. (2016). Desempenho de Betões Produzidos com Agregados Reciclados Obtidos a Partir de RCD de Centrais de Reciclagem Portuguesas. (*Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil*), Instituto Superior Técnico.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical Performance of Concrete Made with Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59-74.
- Browne, R. (1991). Field Investigations. Site & Laboratory Tests; Maintenance, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures. *CEEC, Lisboa*.
- Burns, D. (2008). Characterization of Wet-Mix Shotcrete for Small Line Pumping. (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*), Université Laval, Québec.
- Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jimenez, J., & Ledesma, E. (2014). Rheological Behaviour of Concrete Made With Fine Recycled Concrete Aggregates - Influence of the Superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 89, 36 - 47.
- Ceia, F. (2013). Resistência ao Corte da Interface Entre Betão Normal e Betão com Agregados Reciclados. (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Chan, C. (Outubro de 1998). Use of Recycled Aggregate in Concrete. (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*), Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Concrete Institute of Australia. (2010). *Shotcreting in Australia* (2ª Edição ed.). Rhodes, Nova Gales do Sul, Austrália.
- Concrete Society. (1976). Concrete Core Testing for Strength. Report of a Concrete Society Working Party. *Concrete Society Technical Report No. 11*.
- Coutinho, A. (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão* (2ª ed., Vol. I). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, A., & Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão* (2ª ed., Vol. III). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- de Brito, J. (2002). Agregados Reciclados e sua Influência nas Propriedades dos Betões. *Universidade de Coimbra, Coimbra*.
- de Brito, J. (2005). Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões. Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil, Lisboa.
- ERMCO. (2017). Ready-mixed Concrete Industry Statistics (Year 2017).
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735–742.

- Evangelista, L. (2014). *Comportamento de Betões com Agregados Finos Reciclados de Betão*. (Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Faury, J. (1953). *Le béton. Influence de Ses Constituants Inertes. Règles à Adopter Pour sa Meilleure Composition, sa Confection et Son Transport Sur Les Chantiers*. Paris: Dunod.
- Ferreira, L. (2007). Betões estruturais com incorporação de agregados grossos. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ferreira, L., de Brito, J., & Barra, M. (2011). Influence of the Pre-Saturation of Recycled Coarse Concrete Aggregates on the Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617 - 627.
- Ferreira, R. (2000). Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão. *Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães*, 248.
- Figueiredo, F. (2005). Gestão Integrada dos Resíduos de Construção e Demolição. *Projecto de Investigação, FEUP, Porto*.
- Fonseca, N. (2009). Betões Estruturais com a Incorporação de Agregados Grossos Reciclados de Betão - Influência das Condições de Cura no Desempenho Mecânico. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa*.
- Galobardes Reyes, I. (Outubro de 2013). Characterization and Control of Wet-mix Sprayed Concrete With Accelerators. *Dissertação de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de la Construcció*.
- Gasparim, J. (2007). *Concreto Projetado Elaborado com Cimentos Especiais: Análise Segundo Parâmetros de Durabilidade*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- Gebler, S. H., Litvin, A., McLean, W., & Schutz, R. (Maio-Junho de 1992). Durability of Dry-Mix Shotcrete Containing Rapid-Set Accelerators. *ACI Materials Journal*, 89(3), 259-262.
- Gjorv, O. (2009). *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments* (1st Ed. ed., Vol. 1). New York, USA: Taylor & Francis.
- Gomes, M. (2007). Betões Estruturais com Incorporação de Agregados Reciclados de Betão e Cerâmicos com Reboco. *Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa*.
- Gómez-Soberón, J. M. (2001). Shrinkage of Concrete With Replacement of Aggregate With Recycled Concrete Aggregate. *ACI 5th International Conference, Cancun*, 21.
- Gonçalves, A., & Neves, R. (2003). "Agregados reciclados". *Seminário sobre Agregados*. LNEC, Lisboa.
- Hall, C. (1989). Water Sorptivity of Mortars and Concretes: a Review. *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51 - 61.

- Hamada, M. (1968). Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel. *International Symposium on Chemistry of Cement, 5 Proceedings II-3*, 343 - 382.
- Hansen, T. (1986). Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-the-art Report Developments 1945-1985. *Materials and Structures*, 19(111), 201 - 246.
- Hansen, T., & Narud, H. (1983). Strength of Recycled Concrete Made From Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International*, 5(1), 79 - 83.
- Hasaba, S. et al. (1981). Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled.
- Instituto Português da Qualidade . (2010). NP EN 12620:2002+A1. *Agregados para Betão*.
- Instituto Português da Qualidade. (2002). NP EN 1097-3. *Ensaios das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Agregados; Parte 3: Determinação da Baridade e do Volume de Vazios*.
- Instituto Português da Qualidade. (2008). EN 933-4. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates; Part 4: Determination of Particle Shape - Shape Index*;
- Instituto Português da Qualidade. (2011). NP EN 1097-2. *Ensaios das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Agregados; Parte 2: Métodos para a Determinação da Resistência à Fragmentação*;
- Instituto Português da Qualidade. (2011). NP EN 1097-5. *Ensaios das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Agregados; Parte 5: Determinação do Teor de Água por Secagem em Estufa Ventilada*;
- Instituto Português da Qualidade. (2011). NP EN 12390-3. *Ensaios do Betão Endurecido; Parte 3: Resistência à Compressão de Provetes*;
- Instituto Português da Qualidade. (2014). NP EN 933-1:.. *Ensaios das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 1: Análise Granulométrica - Método da Peneiração, Caparica, Portugal*.
- Instituto Português da Qualidade. (2016). NP EN 1097-6. *Ensaios das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Agregados; Parte 6: Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água, Caparica, Portugal*.
- Instituto Português da Qualidade. (2017). NP EN 206:2013+A1. *Betão Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade, Caparica, Portugal*.
- Instituto Português de Qualidade. (2010). NP EN 12620:2002 + A1:2010. *Agregados para Betão*.
- Jolin, M., Beaupré, D., Pigeon, M., & Lamontagne, A. (Novembro, 1997). Use of Set Accelerating Admixtures in Dry-Mix Shotcrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(4), 180-184.
- Juan, M., & Gutiérrez, P. (2009). Study on the Influence of Attached Mortar Content on Properties of Recycled Concrete Aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872 - 877.

- Kikuchi, M., Miura, T., & Dosho, Y. (1998). Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 1 – Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, 55 - 68.
- Kou, S., & Poon, C. (2012). Enhancing the Durability Properties of Concrete Prepared with Coarse Recycled Aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69 - 76.
- Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2004). Properties of Steam Cured Recycled Aggregate Fly Ash Concrete. *Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, International RILEM Conference, Barcelona, Spain*, 590 - 599.
- Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., & Sulieman, M. (2012). Influence of the Amount of Recycled Coarse Aggregate in Concrete Design and Durability Properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). Especificação LNEC E391. *Betões. Determinação da Resistência à Carbonatação*.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). Especificação LNEC E393. *Betões. Determinação da Absorção de Água por Capilaridade*.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). Especificação LNEC E394. *Betões. Determinação da Absorção de Água por Imersão. Ensaio à Pressão Atmosférica*.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2004). Especificação LNEC E463. *Betões. Determinação do Coeficiente de Difusão dos Cloretos por Ensaio de Migração em Regime Não Estacionário*.
- Lagerblad, B., Fjällberg, L., & Vogt, C. (2010). Shrinkage and Durability of Shotcrete. *Shotcrete: Elements of a System*, 173 -180.
- Larrañaga, M. (2004). Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. *(Tese de Doutoramento), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha*.
- Leite, M. (2001). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. *(Tese de Doutoramento), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*.
- Levy, S. (2001). Contribuição ao Estudo da Durabilidade Concretos, Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria. *(Tese de Doutoramento em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil*.
- Limbachiya, M., Dhir, R., & Leelawat, T. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574 - 580.
- LNEC. (1993). Especificação LNEC E 391.

- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2(5), 1204 - 1225.
- Matias, S., & Brito, J. (2005). Betão com Agregados Grossos Reciclados de Betão e Recurso a Adjuvantes. *Relatório ICIST DCT n.º 3/05, Instituto Superior Técnico, Lisboa.*
- Movassaghi, R. (2006). Durability of Reinforced Concrete Incorporating Recycled Concrete as Aggregate (RCA). *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, University of Waterloo, Ontario, Canada.*
- Murphy World-Class Infrastructure.* (31 de Maio de 2015). Obtido em 27 de Abril de 2017, de <https://mulhollandmedia.dphoto.com/album/ad234z/photo/31876991>
- Pacheco, J. (2014). Desempenho de Estruturas Executadas em Betão com Agregados Grossos Reciclados Provenientes da Indústria de Pré-fabricação. (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pacheco, J., de Brito, J., Ferreira, J., & Soares, D. (2017). Dynamic Characterization of Full-scale Structures Made With Recycled Coarse Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 4195-4205.
- Pereira, P. (2010). Betões Estruturais com a Incorporação de Agregados Finos Reciclados de Betão. (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 31 - 36.
- Poon, C., Shui, Z., & Lam, L. (2004). Effect of Microstructure of ITZ on Compressive Strength of Concrete. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461–468.
- Prudêncio Jr., L. (1998). Accelerating Admixtures for Shotcrete. *Cement and Concrete Composites*, 20, 213-219.
- Rao, M., Bhattacharyya, S., & Barai, S. (2011). Influence of Field Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205–220.
- Rocha, B., & Resende, C. (2004). Propriedades de betões fabricados com agregados reciclados, Trabalho Final de Curso, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Ryan, T. (1973). *Gunitite - A Handbook For Engineers*. London: Cement and Concrete Association.
- Salvador, R., Cavalaro, S., Segura, I., Figueiredo, A., & Pérez, J. (2016). Early Age Hydration of Cement Pastes with Alkaline and Alkali-free Accelerators for Sprayed Concrete. *Construction and Building Materials*, 111, 386-398.



- Santos, M. (2011). *Avaliação do Desempenho do Betão Projectado em Reparação de Estruturas*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Aeródromos), Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Schutz, R. (1982). Effects of Accelerators on Shotcrete Properties. *Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Shotcrete for Underground Support IV*, (pp. 139-153). Paipa, Colombia.
- Sika. (2010). Tecnologia Sika para Betão Projectado.
- Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2015). Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete. *Materials Research*, 18(2), 427 - 440.
- Silva, R., de Brito, J., Neves, R., & Dhir, R. (2015). Carbonation Behaviour of Recycled Aggregate Concrete". *Cement and Concrete Composites*, 62, 22 - 32.
- Soares, D. (2014). Desempenho de Betões com Agregados Grossos Reciclados Provenientes da Indústria de Pré-fabricação. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Soares, D., de Brito, J., Ferreira, J., & Pacheco, J. (2015). Use of Coarse Recycled Aggregates From Pre-cast Rejects: Mechanical and Durability Performance. *Construction and Building Materials*, 71, 263 - 272.
- Stanish, K., Hooton, R., & Thomas, M. (1997). Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review . *Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada*.
- Tabsh, S., & Abdelfatah, A. (2009). Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163 - 1167.
- Teichert, P. (2002). Carl Akeley - A Tribute to the Founder of Shotcrete. *Shotcrete*, 10-12.
- UEPG. (2018). *Estimates of Aggregates Production Data*. Obtido em 19 de Agosto de 2018, de <http://www.uepg.eu/statistics/estimates-of-production-data>
- UN-DESA-PD. (2017). (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division) - World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. ESA/P/WP/248.
- UN-DESA-PD. (2018). (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division) - World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Key Facts.
- Ware, T. (2013). Diagnosing and Repairing Carbonation in Concrete Structures. *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*, 1(4), 338-344.

- Whiting, B., McCarthy, T., & Lume, E. (2012). Drying Shrinkage of Concrete Made from Recycled Concrete Aggregate. *22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 1 - 6.
- Won, J.-P., Hwang, U.-J., & Lee, S.-J. (2015). Enhanced Long-term Strength and Durability of Shotcrete With High-strength C12A7 Mineral-based Accelerator. *Cement and Concrete Research*, 76, 121-129.
- Zhang, L. J. (2010). Is Shotcrete Sustainable? *Shotcrete, Fall 2010*, 20 - 26.

---

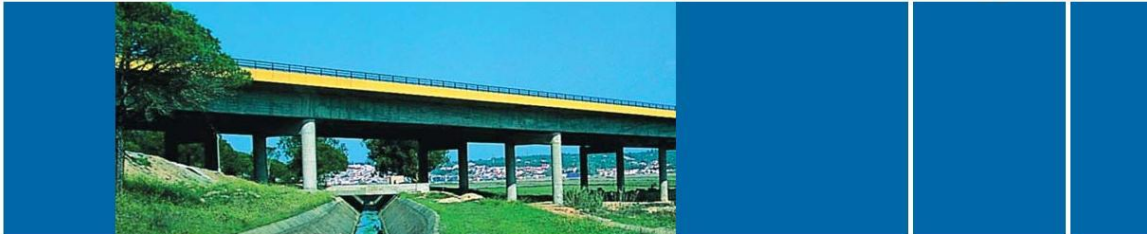
## **ANEXOS**

---



# Anexo A - ficha técnica do cimento

## CEM I 42,5R Cimento Portland



### Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão  
Fábrica Maceira-Liz

### Embalagem

Granel  
Sacos de 40kg

### Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.  
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

### Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland  
0% a 5% Outros Constituintes

### Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

### Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

### Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

### Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

### Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

### Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

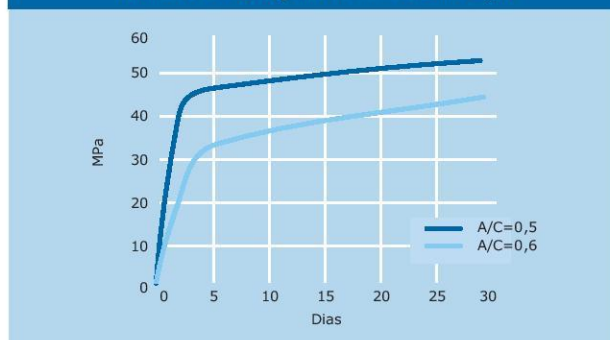
### Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência NP EN 196-1
2 dias	7 dias	
≥20	-	
		28 dias
		≥ 42,5 e ≤ 62,5

### Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.  
Ponte de Alcácer do Sal.



Direção Comercial  
Av. das Forças Armadas, 125 6º  
1600-079 LISBOA  
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte  
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro  
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul  
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco  
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial  
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - [comercial@secil.pt](mailto:comercial@secil.pt)  
Site - [www.secil.pt](http://www.secil.pt)

# Anexo B - fichas técnicas dos agregados naturais

## Anexo B.1 - areia fina



### FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

#### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

##### Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100		
6,3	100		
4	100	100	100
2	100	95	100
1	99	79	100
0,5	77		
0,25	18	0	43
0,125	1		
0,063	0,5	0,0	3,0

<sup>1)</sup> Valores em percentagem de passados

##### Controlo da produção

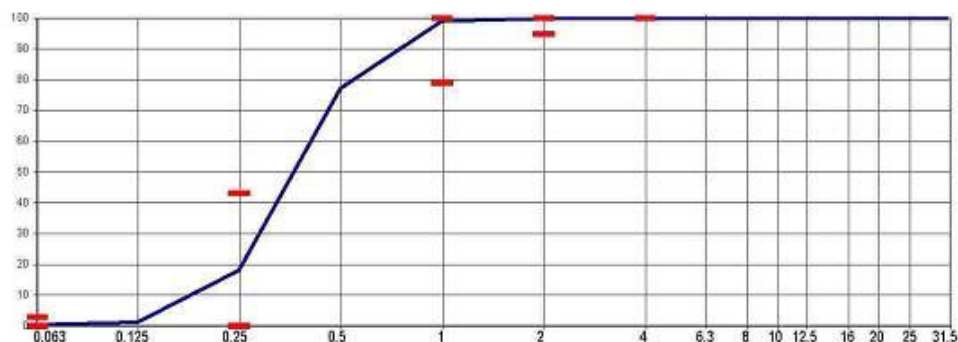
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,03	1,53	2,53
CF	2,27	1,77	2,77

##### Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (ø/D)	0/2	
Granulometria	G <sub>85</sub>	G <sub>85</sub> -G <sub>10</sub> -20
Massa Volumica:		
-- Material impermeável	2,63 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas secas em estufa	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	0,2%	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>0,8</sub>	
Enxofre total	0,04%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,019%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcali-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

NA-Não aplicável

DND- Desempenho não determinado



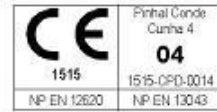
Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

## Anexo B.2 - areia grossa



### FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

#### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

##### Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100	100	100
6,3	100	98	100
4	97	92	99
2	85	65	99
1	52	32	72
0,5	12		
0,25	3	0	23
0,125	1		
0,063	0,4	0,0	3,0

<sup>1)</sup> Valores em percentagem de passados

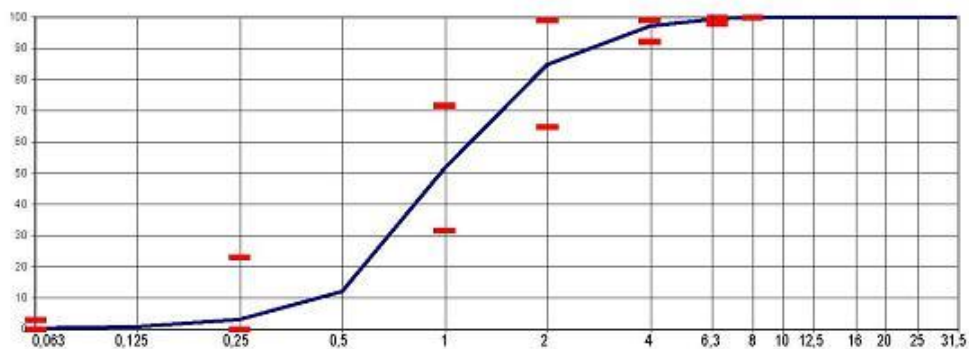
##### Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/4	
Granulometria	G <sub>85</sub>	G <sub>90</sub> -G <sub>Tc20</sub>
Massa Volúmica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>02</sub>	
Enxofre total	0,07%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves		DND
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência golofegeto		DND
Reactividade álcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico		DND

NA- Não aplicável DND-Desempenho não determinado

##### Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,49	2,99	3,99
CF	3,81	3,31	4,31



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

F 06.01 - 16/09/2005



## Anexo B.3 - bago de arroz



### Declaração de Desempenho

N.º 02 - Agregado 2/6



Código de identificação único do produto tipo: Agregado 2/6 (Bago de Arroz).

Utilizações previstas: Agregado para Betão; Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Fabricante: José Marques Gomes Galo, SA  
Apartado 1003  
Zambujal - 2971-808 Sesimbra

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP): Sistema 2+

Norma harmonizada: EN 12620:2002+A1:2008 - Agregados para Betão  
EN 13043:2002+AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Organismo Notificado: SGS-ICS - Serviços Internacionais de Certificação

#### Desempenho Declarado

Descrição Petrográfica:		Cálculo comparado de grão fino de cor branca aduzentada, pertencente ao Jurássico Superior		
Designação Granulométrica		EN 12620	EN13043	
Categoria Granulométrica		G-85/00	G-90/15	
Peneiro Intermediário		NA	G <sub>250</sub>	
Série base + Série 2	Granulometria Típica			
Peneiro <sup>1)</sup> (mm)	% Passante	Limite Inferior	Limite Superior	
85,0	100			
45,0	100			
37,5	100			
30,0	100			
16,0	100			
14,0	100			
12,5	100	100	100	
10,0	100			
8,0	100	88	100	
6,3	99	80	100	
4,0	27	20	43	
2,0	5	0	15	
1,0	3	0	5	
0,500	2			
0,250	2			
0,125	2			
0,063	1,7	0,0	4,0	

Outras Características do produto		EN 12620	EN13043
Massa Volumétrica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		2,71 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		2,60 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		2,60 ± 0,05	
Absorção de água (%)		WA <sub>2</sub> 0,0%	WA <sub>2</sub> 1
Teor de finos		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>
Índice de Achatamento		F <sub>10</sub>	F <sub>10</sub>
Índice de Forma		B <sub>10</sub>	B <sub>10</sub>
Resistência à Fragmentação <sup>2)</sup>		L <sub>10</sub>	
Resistência ao desgaste <sup>2)</sup>		M <sub>10</sub> 20	
Frituração por acetone <sup>2)</sup>		≤ 0,53% W/W	NA
Porcentagem de partículas estragadas		NA	C <sub>100</sub>
Teor de Humidade <sup>2)</sup>		Isento	NA
Contaminantes Orgânicos Leves <sup>2)</sup>		≤ 5,1%	m <sub>10</sub> 0,1
Constituintes que afetam o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>2)</sup>		< 120mg/m <sup>3</sup>	NA
Resistência ao Polimento		PSV <sub>10</sub>	PSV <sub>10</sub>
Resistência à Abração provocada por Pressão Hidráulica		A <sub>10</sub> AK	A <sub>10</sub> NH
Resistência ao Choque Térmico		NA	DND
Teor de Conchas do Agregado Grosso		SC <sub>10</sub>	NA
Composição Química		NA	DND
Substâncias Perigosas		DND	NA
Teor de Carbonatos <sup>2)</sup>		≈ 43% CO <sub>2</sub>	NA
Teor de Cloretos <sup>2)</sup>		≤ 0,01% Cl	NA
Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>2)</sup>		AS <sub>10</sub>	NA
Sílica Total <sup>2)</sup>		≤ 1% Si	NA
Resistência ao Gelo-Degelo do Agregado Grosso		F <sub>10</sub>	F <sub>10</sub>
Afinidade do Agregado Grosso com o Ligante Betuminoso		NA	DND
Reatividade Alcalina-Sílica <sup>2)</sup>		Classe I	NA
Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )		[1,31 - 1,34]	

<sup>1)</sup>Abertura quadrada dos peneiros em mm.

<sup>2)</sup>Valores em Porosidade aparente.

NA: Não aplicável

DND: Desempenho Não Determinado

<sup>2)</sup>Valor determinado num agregado com a mesma origem.

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.

A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do Fabricante por:

CWGA Galo

Em Sesimbra, em 03 de Julho de 2014

# Anexo B.4 - brita 1



## Declaração de Desempenho

Nº 03 – Agregado 6/12



Código de identificação único do produto tipo: Agregado 6/12 (Brita 1).

Utilizações previstas: Agregado para Betão; Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Fabricante: José Marques Gomes Galo, SA  
Apartado 1003  
Zambujal – 2971-908 Sesimbra

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP): Sistema 2+

Norma harmonizada: EN 12620:2002+A1:2008 - Agregados para Betão  
EN 13043:2002+AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Organismo Notificado: DGS-ICS – Serviços Internacionais de Certificação

### Desempenho Declarado

Descrição Petrográfica:		Cálculo com base de grão fino de cor branca adiantada, pertencente ao Jurássico Superior	
Distribuição Granulométrica		EN 12620	EN13043
Categoria Granulométrica		0,8/0,25	0,8/0,25
Período Intermediário		NA	Q <sub>200</sub>
Série base + Série 2	Granulometria Típica		
Passagem (%)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior
80,0	100		
45,0	100		
31,5	100		
20,0	100	100	100
16,0	100	98	100
14,0	100		
12,5	87	85	100
10,0	71		
8,0	39	36	54
6,3	12	0	20
4,0	2	0	5
2,0	1		
1,0	1		
0,600	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,7	0,0	1,0

Outras Características do produto		EN 12620	EN13043
Massa Volumétrica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		2,70 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		2,88 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		2,87 ± 0,05	
Absorção de água (%)		WA <sub>24</sub> 0,6%	WA <sub>24</sub> 1
Teor de Finos		F <sub>0,075</sub>	F <sub>0</sub>
Índice de Achatamento		F <sub>150</sub>	F <sub>150</sub>
Índice de Forma		8 <sub>150</sub>	8 <sub>150</sub>
Resistência à Fragmentação <sup>1)</sup>		LA <sub>10</sub>	
Resistência ao Desgaste <sup>2)</sup>		M <sub>10/20</sub>	
Retenção por secagem <sup>3)</sup>		es (005)MS	NA
Porcentagem de partículas arredondadas		NA	C <sub>1000</sub>
Teor de Humidade <sup>4)</sup>		Isento	NA
Contaminantes Orgânicos Leves <sup>5)</sup>		es 1%	m <sub>100</sub> 0,1
Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>6)</sup>		≤120mg	NA
Resistência ao Polimento		PSV <sub>10</sub>	PSV <sub>10</sub>
Resistência à Abrasão provocada por Pressão Triaxial		A <sub>10R</sub>	A <sub>10R</sub>
Resistência ao Choque Térmico		NA	(ND)
Teor de Carbonato do Agregado Grosso		SC <sub>10</sub>	NA
Composição Química		NA	(ND)
Substâncias Perigosas		DND	NA
Teor de Carbonatos <sup>7)</sup>		≤42%CO <sub>2</sub> 288%CaCO <sub>3</sub>	NA
Teor de Cloreto <sup>8)</sup>		≤0,001%	NA
Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>9)</sup>		AS <sub>10</sub>	NA
Enxofre Total <sup>10)</sup>		≤1%S	NA
Resistência ao Gelo/Degele do Agregado Grosso		F <sub>10</sub>	F <sub>10</sub>
Alinidade do Agregado Grosso com o ligante betuminoso		NA	(ND)
Reatividade Alcali-Sílica <sup>11)</sup>		Classe I	NA
Bandada (Mg/m <sup>3</sup> )			(1,38 - 1,29)

<sup>1)</sup>Abertura máxima das peneiras em mm.

Valores em Percentagem passada acumulada.

NA: Não aplicável  
DND: Desempenho Não Determinado.

<sup>12)</sup>Valor determinado num agregado com o mesmo origem.

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.

A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do Fabricante por:

Célia Galo

Em Sesimbra em 09 de Julho de 2014

## Anexo C - resultados da análise granulométrica

Peneiro [mm]	Areia fina		Areia grossa	
	Valor passado acumulado médio [%]	Desvio-padrão [%]	Valor passado acumulado médio [%]	Desvio-padrão [%]
20	100,00	0,00	100,00	0,00
16	100,00	0,00	100,00	0,00
14	100,00	0,00	100,00	0,00
12,5	100,00	0,00	100,00	0,00
10	100,00	0,00	100,00	0,00
8	100,00	0,00	99,87	0,04
6,3	100,00	0,00	99,28	0,08
4	100,00	0,00	97,23	0,24
2	99,90	0,08	84,89	0,47
1	98,73	0,24	55,09	1,01
0,5	76,53	0,39	24,55	0,16
0,25	23,83	0,53	7,19	0,16
0,125	1,77	0,26	1,22	0,27
0,063	0,10	0,00	0,07	0,01
0	0,00	0,00	0,00	0,00
D <sub>máx</sub> [mm] d <sub>min</sub> [mm] Módulo de finura	1 0,125 3,99		4 0,125 5,31	

Peneiro [mm]	Bago de arroz		Brita 1		ARGB	
	Valor passado acumulado médio [%]	Desvio-padrão [%]	Valor passado acumulado médio [%]	Desvio-padrão [%]	Valor passado acumulado médio [%]	Desvio-padrão [%]
20	100,00	0	100,00	0,00	100,00	0,00
16	100,00	0	99,96	0,06	95,46	1,36
14	100,00	0	90,47	0,66	89,91	2,09
12,5	100,00	0	78,87	1,41	84,94	1,63
10	100,00	0	61,12	1,19	80,19	2,89
8	99,86	1,55	39,43	1,50	69,48	4,26
6,3	98,23	1,42	19,05	1,21	59,74	4,52
4	11,87	1,21	1,20	1,21	50,67	4,73
2	2,78	0,4	0,47	0,48	38,12	5,08
1	1,14	0,52	0,19	0,19	26,28	4,31
0,5	0,5	0,12	0,14	0,14	16,48	2,97
0,25	0,22	0,1	0,11	0,11	9,89	1,79
0,125	0,04	0	0,07	0,07	5,02	0,85
0,063	0	0	0,03	0,03	2,29	0,35
0	0	0	0,00	0,00	0,61	0,11
D <sub>máx</sub> [mm] d <sub>min</sub> [mm] Módulo de finura	6,3 2 7,85		14 4 10,09		16 0,063 7,71	

## Anexo D - resistência à compressão

### Anexo D.1 - 7 dias

	Provete	h [mm]	Massa [g]	F <sub>máx</sub> [kN]	f <sub>cm,carote</sub> [MPa]	f <sub>cm,cubo</sub> [MPa]
BPR	1	80	1298.10	138,65	19,16	16,32
	2	75	1229.06	157,55	21,77	18,54
	3	80	1349.11	169,60	23,43	19,96
BP20	1	80	1306.70	180,16	22,6	19,25
	2	80	1275.21	171,25	21,47	18,29
	3	70	1105.20	155,52	19,5	15,62
BP50	1	85	1349.55	161,48	22,31	19,51
	2	70	1143.21	158,75	21,93	17,57
	3	70	1194,00	98,45	13,6	10,89
BP100	1	75	1220.10	117,3	16,21	14,10
	2	85	1298.23	112,21	15,5	13,56
	3	90	1454.04	118,1	16,32	14,62

### Anexo D.2 - 28 dias

	Provete	h [mm]	Massa [g]	F <sub>máx</sub> [kN]	f <sub>cm,carote</sub> [MPa]	f <sub>cm,cubo</sub> [MPa]
BPR	1	84	1384,20	290,33	40,11	34,91
	2	84	1377,50	283,24	39,13	34,05
	3	80	1461,85	316,17	43,68	39,14
	4	75	1191,80	354,08	48,92	40,47
	5	84	1376,70	310,48	42,89	37,33
BP20	1	75	1195,8	303,89	41,98	34,73
	2	80	1231,6	266,15	36,77	31,32
	3	84	1393,6	323,43	44,68	38,89
	4	84	1340,95	280,90	38,81	33,77
	5	80	1251,8	258,67	35,74	30,44
BP50	1	84	1376,65	250,32	34,58	34,73
	2	70	1132,3	309,28	42,73	31,32
	3	75	1256,5	293,80	40,59	38,89
	4	70	1106,23	258,15	35,66	33,77
	5	75	1208,78	221,15	30,55	30,44
BP100	1	80	1287,45	263,15	36,36	30,97
	2	80	1326,95	238,77	32,99	28,10
	3	75	1200,85	213,12	29,44	24,36
	4	90	1422,85	219,87	30,38	27,22
	5	85	1372,45	212,00	29,29	25,62

### Anexo D.3 - 56 dias

	Provete	h [mm]	Massa [g]	F <sub>máx</sub> [kN]	f <sub>cm,carote</sub> [MPa]	f <sub>cm,cubo</sub> [MPa]
BPR	1	90	1514,5	359,37	49,65	44,49
	2	70	1153,77	371,44	51,32	41,10
	3	75	1243,75	385,98	53,33	44,12
BP20	1	75	1260,6	295,42	40,81	33,77
	2	70	1160,78	345,36	47,71	38,22
	3	70	1162,49	341,18	47,14	37,76
BP50	1	70	1163,4	279,64	38,63	30,95
	2	70	1158,55	341,18	47,14	37,76
	3	75	1243,75	337,69	46,65	38,60
BP100	1	70	1220,10	298,72	41,27	33,06
	2	80	1298,23	299,05	41,32	35,19
	3	80	1454,04	233,37	32,24	27,46

## Anexo E - restantes propriedades mecânicas do BP

### Anexo E.1 - aderência *pull-off*

	$F_t$ [kN]	$\sigma_t$ [MPa]
BPR	2,18	1,11
BP20	2,11	1,08
BP50	2,17	1,11
BP100	2,23	1,14

### Anexo E.2 - resistência à tração por compressão diametral

	$f_{ctm}$ [MPa]	$S_d$ [MPa]	$D_{BR}$ [%]
BPR	3,33	0,34	-
BP20	3,10	0,52	-7%
BP50	3,01	0,50	-10%
BP100	2,84	0,17	-15%

### Anexo E.3 - velocidade de propagação dos ultra-sons

	$v_{us}$ [kms <sup>-1</sup> ]	$D_{BR}$ [%]
BPR	4,82	-
BP20	4,79	-0,45
BP50	4,54	-5,66
BP100	4,48	-6,97

### Anexo E.4 - resistência à abrasão

	$\Delta L$ [mm]	$\Delta L$ [%]	$D_{BR}$ [%]	$S_d$ [mm]
BPR	5.14	8.13%	0.00%	0.61
BP20	4.82	7.49%	-7.93%	0.41
BP50	5.01	7.73%	-4.94%	0.41
BP100	4.62	7.06%	-13.13%	0.14

## Anexo F - absorção de água por imersão

BPR	Massa do provete saturado [g]	Massa hidrostática [g]	Massa do provete seco [g]	Absorção de água [%]	Absorção média [%]
Provete 1	1154,5	662,7	1088,5	13,4	<b>13,4</b>
Provete 2	1202,7	690,8	1132,6	13,7	
Provete 3	1112,8	643,0	1051,2	13,1	

BP20	Massa do provete saturado [g]	Massa hidrostática [g]	Massa do provete seco [g]	Absorção de água [%]	Absorção média [%]
Provete 1	1258,8	720,6	1183,6	14,0	<b>14,4</b>
Provete 2	1076,1	618,2	1008,5	14,8	
Provete 3	1148,1	656,9	1076,5	14,6	

BP50	Massa do provete saturado [g]	Massa hidrostática [g]	Massa do provete seco [g]	Absorção de água [%]	Absorção média [%]
Provete 1	1039,8	593,2	974,8	14,5	<b>14,6</b>
Provete 2	1143,6	653,8	1073,6	14,3	
Provete 3	1072,0	611,1	1003,6	14,8	

BP100	Massa do provete saturado [g]	Massa hidrostática [g]	Massa do provete seco [g]	Absorção de água [%]	Absorção média [%]
Provete 1	1148,5	647,7	1072,4	15,2	<b>15,4</b>
Provete 2	1200,0	675,3	1115,6	16,1	
Provete 3	1179,4	649,8	1100,7	14,9	

## Anexo G - absorção de água por capilaridade

BPR							
ti [h]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Médias
	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
0	2093,7	0,00E+00	2015,1	0,00E+00	2771,6	0,00E+00	0,00E+00
1	2098,1	2,56E-04	2023,8	5,06E-04	2778,3	3,89E-04	4,48E-04
3	2099,6	3,43E-04	2026,4	6,57E-04	2780,7	5,29E-04	5,93E-04
6	2101,3	4,42E-04	2028,8	7,96E-04	2782,6	6,39E-04	7,18E-04
24	2104,6	6,34E-04	2033,9	1,09E-03	2787,6	9,30E-04	1,01E-03
72	2108,8	8,78E-04	2039,1	1,40E-03	2793,1	1,25E-03	1,32E-03

BP20							
ti [h]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Médias
	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
0	2186,5	0,00E+00	2469	0,00E+00	2408,9	0,00E+00	0,00E+00
1	2192,7	3,60E-04	2477,2	4,77E-04	2415,3	3,72E-04	4,24E-04
3	2194,4	4,59E-04	2479	5,81E-04	2420,5	6,74E-04	6,28E-04
6	2196	5,52E-04	2481	6,98E-04	2421,6	7,38E-04	7,18E-04
24	2199,5	7,56E-04	2487,1	1,05E-03	2427,2	1,06E-03	1,06E-03
72	2204,7	1,06E-03	2493,6	1,43E-03	2431,9	1,34E-03	1,38E-03

BP50							
ti [h]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Médias
	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
0	2590,7	0,00E+00	2753,8	0,00E+00	2458,7	0,00E+00	0,00E+00
1	2598,7	4,65E-04	2761,3	4,36E-04	2466,2	4,36E-04	4,46E-04
3	2602,5	6,86E-04	2764,5	6,22E-04	2469,1	6,05E-04	6,37E-04
6	2605,6	8,66E-04	2767,2	7,79E-04	2471,2	7,27E-04	7,91E-04
24	2612,2	1,25E-03	2774,2	1,19E-03	2477,9	1,12E-03	1,18E-03
72	2620,1	1,71E-03	2781,7	1,62E-03	2485,1	1,53E-03	1,62E-03

BP100							
ti [h]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Médias
	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>i</sub> [g]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	Absorção <sub>i</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
0	2492	0,00E+00	2031,3	0,00E+00	2135,1	0,00E+00	0,00E+00
1	2502	6,05E-04	2040,7	5,46E-04	2143,4	4,82E-04	5,44E-04
3	2505	7,56E-04	2042,2	6,34E-04	2144,9	5,70E-04	6,53E-04
6	2508	9,24E-04	2046,1	8,60E-04	2146,7	6,74E-04	8,20E-04
24	2517	1,47E-03	2054,2	1,33E-03	2152,8	1,03E-03	1,28E-03
72	2528	2,10E-03	2063,9	1,89E-03	2160,5	1,48E-03	1,82E-03



## Anexo H - resistência à penetração de cloretos

### Anexo H.1 - 28 dias

Betão	BPR			BP20			BP50			BP100		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Provete												
I <sub>(30V)</sub> [mA]	67	67	67	70	70	70	73	73	73	77	77	70
U <sub>corrigido</sub> [V]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
I <sub>inicial</sub> [mA]	53	53	53	57	57	57	60	60	60	67	67	60
t <sub>inicial</sub> [°C]	22,2	22,2	22,1	18,8	18,7	19	19,4	19,2	19,2	22	22,2	21,1
Duração [h]	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
I <sub>final</sub> [mA]	50	50	50	57	57	57	57	57	57	67	67	50
t <sub>final</sub> [°C]	23,6	23,7	23,6	23,2	23,2	23	23	23,2	23,2	23,9	23,7	21,3
e [mm]	49,3	53,1	54,2	53,0	52,6	52,8	48,2	45,3	49,2	51,4	50,8	57,8
x <sub>1</sub> [mm]	24,0	22,6	22,0	31,5	26,4	34,4	29,0	*	36,5	29,5	30,3	27,2
x <sub>2</sub> [mm]	22,6	21,9	24,0	31,6	29,5	29,0	27,7	*	34,2	28,0	31,5	35,6
x <sub>3</sub> [mm]	21,0	21,9	24,1	29,4	32,1	26,2	26,2	*	28,7	30,9	30,3	25,6
x <sub>4</sub> [mm]	22,1	21,6	23,7	29,9	37,1	25,6	28,2	*	30,7	29,8	27,5	24,9
x <sub>5</sub> [mm]	23,1	25,1	23,2	26,9	34,8	21,8	29,4	*	28,0	30,0	31,4	24,3
x <sub>6</sub> [mm]	21,5	22,5	24,1	26,6	32,6	24,8	31,1	*	29,4	29,8	32,1	23,5
x <sub>7</sub> [mm]	20,3	24,0	23,1	24,8	30,2	25,6	30,3	*	25,8	29,8	32,6	23,8
X <sub>8</sub> [mm]	20,3	20,7	23,1	30,2	27,3	24,7	28,7	*	22,2	28,2	31,5	23,3
X <sub>9</sub> [mm]	22,2	23,6	25,7	29,1	28,7	24,7	26,9	*	23,8	27,5	29,5	25,8
X <sub>10</sub> [mm]	21,8	20,1	25,6	31,2	31,1	22,1	30,7	*	27,1	28,3	29,5	22,2
X <sub>11</sub> [mm]	22,0	22,4	26,3	32,8	35,8	18,7	29,4	*	23,9	28,4	26,4	23,3
X <sub>12</sub> [mm]	24,6	22,4	26,7	29,4	30,5	22,0	31,6	*	21,8	30,5	27,2	24,6
X <sub>13</sub> [mm]	23,9	25,4	23,8	28,4	30,0	23,1	26,5	*	30,2	30,4	31,7	23,1
X <sub>11</sub> [mm]	25,5	24,3	25,1	32,9	31,5	21,0	25,3	*	25,8	28,1	32,7	22,3
Média	22,5	22,7	24,3	29,6	31,3	24,6	28,6	*	27,7	29,2	30,3	25,0
D [x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	12,4	13,5	14,7	17,7	18,6	14,4	15,6	*	15,4	17,1	17,5	16,0
<b>D<sub>Médio</sub> [x10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s]</b>	<b>13,5</b>			<b>14,4</b>			<b>15,5</b>			<b>16,9</b>		

## Anexo H.2 - 91 dias

Betão	BR			B20			B50			B100		
	2.9	2.16	2.19	4.11	4.12	4.19	5.1	5.20	5.27	7.7	7.13	7.17
$I_{(30V)}$ [mA]	100	100	100	33	33	33	43	43	43	47	47	47
$U_{\text{corrigido}}$ [V]	20	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	15
$I_{\text{inicial}}$ [mA]	67	67	67	23	23	23	17	17	17	20	20	20
$t_{\text{inicial}}$ [°C]	19,2	19,1	19	19,2	20	20,2	20,1	19,7	19,7	20	19,8	20,3
Duração [h]	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
$I_{\text{final}}$ [mA]	70	70	70	27	27	27	20	20	20	27	27	27
$t_{\text{final}}$ [°C]	23,2	23,2	23,1	23,4	23,4	23,6	23,2	23,2	23,4	23,0	23,1	23,1
$e$ [mm]	54,6	55,4	54,8	53,5	57,8	56,5	48,4	43,9	52,2	54,6	48,2	52,7
$x_1$ [mm]	8,8	7,7	9,3	11,4	12,7	11,3	8,2	9,6	5,5	15,8	14,4	9,3
$x_2$ [mm]	7,8	10,7	9,8	10,7	12,0	10,5	7,8	9,2	8,6	15,6	13,0	8,8
$x_3$ [mm]	9,0	8,4	15,1	15,3	11,1	10,5	6,4	7,5	9,6	14,0	11,6	7,8
$x_4$ [mm]	8,8	9,8	15,3	13,8	9,9	11,2	5,3	5,8	8,2	12,2	11,5	9,5
$x_5$ [mm]	9,1	6,4	9,1	11,9	10,3	9,5	6,1	5,6	7,7	10,8	11,4	10,1
$x_6$ [mm]	9,7	12,5	11,7	10,0	10,3	8,3	5,7	6,6	10,1	10,6	11,4	9,6
$x_7$ [mm]	7,6	10,1	10,2	8,1	9,9	8,7	6,6	5,8	6,5	9,5	11,8	8,9
Média	8,8	7,7	9,3	11,4	12,7	11,3	8,2	9,6	5,5	15,8	14,4	9,3
$D$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s]	7,8	10,7	9,8	10,7	12,0	10,5	7,8	9,2	8,6	15,6	13,0	8,8
$D_{\text{Médio}}$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s]	<b>6,8</b>			<b>7,7</b>			<b>8,6</b>			<b>10,0</b>		

## Anexo I - resistência à carbonatação

### Anexo I.1 - 7 dias

Provete	d <sub>k</sub> [mm]															
	BR				B20				B50				B100			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0,00	0,84	0,85	0,35	0,00	0,48	0,36	0,00	0,50	0,71	1,47	0,97	0,58	1,16	0,48	1,09
2	0,00	0,00	1,09	0,65	0,44	0,76	0,39	0,40	0,81	0,70	0,92	0,76	0,15	0,07	1,10	0,74
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,64	0,36	1,05	0,82	0,63	0,30	0,87	0,86	0,31	0,98
4	0,95	0,00	0,76	0,00	0,45	0,38	0,00	0,44	0,78	0,57	1,21	0,37	0,53	0,61	0,31	0,60
5	0,56	0,00	1,14	0,00	0,75	0,52	0,72	0,73	0,73	0,81	0,93	0,90	1,21	0,65	1,37	0,75
6	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	1,66	0,00	0,00	1,02	0,88	1,67	0,49	0,00	0,34	1,39	0,33
7	0,62	0,00	0,00	0,00	0,65	1,48	0,72	0,22	0,92	0,61	1,66	1,11	0,64	0,42	0,79	0,56
8	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,36	0,53	0,37	0,43	0,57	1,04	0,79	0,64	0,42	1,09	0,87
d <sub>km</sub> [mm]	0,27	0,11	0,52	0,21	0,29	0,76	0,42	0,32	0,65	0,71	1,19	0,60	0,58	0,57	0,86	0,75
<b>Média</b>	<b>0,19</b>				<b>0,34</b>				<b>0,65</b>				<b>0,69</b>			
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,18</b>				<b>0,22</b>				<b>0,27</b>				<b>0,14</b>			

### Anexo I.2 - 28 dias

Provete	d <sub>k</sub> [mm]															
	BR				B20				B50				B100			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1,18	2,23	3,14	3,66	6,47	4,23	5,64	5,19	7,18	5,62	3,74	5,44	10,4	4,31	8,04	6,62
2	*	4,03	2,02	2,17	4,13	4,74	4,56	4,02	5,52	6,63	4,48	3,92	7,3	4,59	7,76	6,1
3	1,39	4,54	1,91	3,11	5,72	5,33	5,89	7,79	7,18	5,29	4,6	5,3	6,89	6,08	7,14	6,45
4	*	3,28	3,65	3,24	3,67	5,09	4,95	7,15	6,98	4,16	5,31	4,55	6,29	5,25	7,65	5,4
5	*	3,1	5,91	2,66	5,74	5,04	4,14	5,74	6,2	6,62	4,97	4,07	4,5	5,16	7,58	7,59
6	*	4,09	4,44	*	5,09	5,86	3,59	6,61	7,12	5,09	4,32	6,18	5,45	6,48	6,5	7,71
7	*	2,09	4,62	*	3,99	5,16	6,45	5,4	4,89	*	4,52	5,25	5,16	5,78	6,9	6,34
8	*	2,85	4,58	2,65	4,89	4,68	3,87	5	7,4	5,83	4	6,123	7,98	6,5	8,28	6,58
d <sub>km</sub> [mm]	*	3,28	3,78	2,92	4,96	5,02	4,89	5,86	6,56	5,61	4,49	5,10	6,75	5,52	7,48	6,60
<b>Média</b>	<b>3,33</b>				<b>5,18</b>				<b>5,44</b>				<b>6,59</b>			
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,44</b>				<b>0,46</b>				<b>0,87</b>				<b>0,81</b>			

### Anexo I.3 - 56 dias

Provete	d <sub>k</sub> [mm]															
	BR				B20				B50				B100			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	4,64	2,54	3,01	3,52	*	5,59	4,19	3,33	*	5,75	*	6,25	4,78	7,01	8,33	8,27
2	3,75	4,36	3,18	4,94	2,88	5,04	5,19	3,29	*	5,61	*	6,69	6,85	5,25	7,49	8,30
3	4,17	4,02	4,21	3,68	3,08	4,68	5,31	4,18	*	5,78	5,36	6,86	4,26	4,50	8,33	8,05
4	3,23	3,57	3,28	4,89	6,32	6,13	6,19	4,08	*	4,31	5,11	6,79	4,73	5,23	8,47	6,25
5	4,40	2,50	3,07	3,82	5,64	4,93	4,34	4,88	*	5,55	5,24	7,00	5,20	5,05	8,11	*
6	3,61	2,68	3,32	4,31	5,73	5,32	5,03	6,61	*	5,38	4,89	5,08	7,73	7,71	7,93	6,42
7	3,16	2,67	2,81	3,53	5,50	4,36	5,42	4,65	*	5,67	5,27	6,46	4,70	4,00	8,08	6,36
8	3,67	2,51	2,60	3,50	6,80	4,31	4,92	6,76	*	4,96	4,71	5,18	7,88	5,22	8,66	5,52
d <sub>km</sub> [mm]	3,83	3,11	3,19	4,02	6,00	5,05	5,07	4,72	*	5,38	5,10	6,29	5,77	5,50	8,18	7,02
<b>Média</b>	<b>3,54</b>				<b>5,21</b>				<b>5,59</b>				<b>6,62</b>			
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,46</b>				<b>0,70</b>				<b>2,74</b>				<b>1,23</b>			

### Anexo I.4 - 91 dias

Provete	d <sub>k</sub> [mm]															
	BR				B20				B50				B100			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	7,67	*	6,06	3,46	7,00	6,47	4,62	6,15	7,31	9,20	*	5,26	8,16	5,42	6,83	6,38
2	4,19	4,44	4,53	4,44	8,19	5,23	5,80	6,51	6,93	7,02	*	6,86	8,53	5,93	6,03	8,40
3	5,97	5,35	4,25	4,32	6,00	4,66	6,21	6,57	6,86	8,70	*	6,97	8,85	5,65	5,70	8,20
4	5,43	4,84	4,46	4,29	5,91	5,61	4,66	5,73	8,71	7,52	*	8,41	8,53	6,06	5,59	7,20
5	4,50	3,91	4,59	5,31	7,18	7,01	5,22	5,22	5,35	6,41	*	6,92	7,57	5,36	6,31	8,43
6	4,33	*	4,84	4,06	7,73	5,24	5,10	4,72	6,59	5,81	*	6,94	7,63	5,85	5,88	8,32
7	5,16	*	5,49	4,63	7,10	4,20	5,92	5,64	*	*	*	6,93	7,83	5,67	6,46	7,74
8	5,13	*	4,52	5,04	*	3,93	5,89	6,67	*	*	*	5,10	7,30	*	5,31	7,26
d <sub>km</sub> [mm]	5,30	4,64	4,84	4,44	7,02	5,29	5,43	5,90	6,96	7,44	*	6,67	8,05	5,71	6,01	7,74
<b>Média</b>	<b>4,63</b>				<b>5,54</b>				<b>7,03</b>				<b>6,88</b>			
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,75</b>				<b>0,78</b>				<b>0,39</b>				<b>1,19</b>			

## Anexo J - retração

Extensão de Retração [ $\times 10^{-4}$ m/m]													
Idade [dias]	BPR				BP20			BP50			BP100		
	1	2	3	Média	1	2	Média	1	2	Média	1	2	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-2,05	-0,58	-1,00	-1,21	0,86	1,54	1,20	-0,79	0,53	-0,13	-1,72	-0,18	-0,95
2	-2,22	-3,12	-1,25	-2,20	0,21	1,06	0,64	-2,84	-0,45	-1,65	-2,08	-1,28	-1,68
3	-2,86	-3,65	-1,72	-2,75	-0,43	0,54	0,06	-3,21	-1,73	-2,47	-2,81	-1,95	-2,38
4	-3,21	-4,53	-2,02	-3,25	-1,07	-0,17	-0,62	-3,47	-2,06	-2,76	-3,45	-2,49	-2,97
5	-4,07	-4,84	-2,49	-3,80	-1,48	-0,64	-1,06	-3,95	-2,33	-3,14	-3,99	-2,87	-3,43
6	-4,54	-5,59	-3,44	-4,52	-1,43	-0,76	-1,09	-4,11	-2,64	-3,38	-4,84	-3,80	-4,32
7	-5,21	-6,25	-4,16	-5,21	-2,41	-1,37	-1,89	-4,95	-3,46	-4,21	-5,71	-4,67	-5,19
12	-5,19	-6,35	-4,31	-5,28	-2,93	-1,73	-2,33	-5,52	-3,84	-4,68	-6,07	-4,82	-5,44
14	-5,63	-6,80	-4,56	-5,66	-3,00	-1,96	-2,48	-6,01	-4,04	-5,03	-6,56	-5,44	-6,00
16	-6,02	-7,53	-5,96	-6,50	-3,27	-2,25	-2,76	-6,29	-4,29	-5,29	-7,74	-6,54	-7,14
23	-7,04	-7,78	-5,21	-6,68	-3,86	-3,03	-3,44	-7,00	-5,10	-6,05	-8,10	-6,90	-7,50
27	-7,28	-8,01	-5,31	-6,87	-4,13	-3,64	-3,88	-6,87	-4,29	-5,58	-8,40	-7,29	-7,84
28	-7,28	-8,16	-5,36	-6,93	-4,46	-4,00	-4,23	-7,26	-4,72	-5,99	-8,64	-7,49	-8,07
32	-5,46	-8,21	-5,41	-6,36	-4,55	-4,09	-4,32	-7,63	-5,07	-6,35	-8,59	-7,49	-8,04
36	-7,38	-8,26	-5,56	-7,07	-4,84	-3,95	-4,39	-8,04	-5,42	-6,73	-8,73	-7,49	-8,11
40	-7,48	-8,26	-5,56	-7,10	-5,03	-4,00	-4,51	-8,28	-5,87	-7,07	-8,97	-7,44	-8,20
43	-7,63	-8,61	-5,51	-7,25	-5,17	-4,23	-4,70	-8,55	-6,23	-7,39	-9,20	-7,49	-8,35
50	-7,73	-8,76	-5,81	-7,43	-5,13	-4,37	-4,75	-8,74	-6,68	-7,71	-9,44	-7,59	-8,52
60	-7,90	-8,91	-5,96	-7,59	-5,32	-4,52	-4,92	-8,92	-6,88	-7,90	-9,46	-7,70	-8,58
63	-8,52	-9,14	-6,21	-7,96	-5,48	-4,75	-5,12	-9,08	-6,88	-7,98	-9,58	-7,72	-8,65
70	-8,02	-9,32	-5,91	-7,75	-5,29	-4,61	-4,95	-8,90	-6,83	-7,86	-9,65	-7,42	-8,53
77	-8,17	-9,57	-6,01	-7,92	-5,51	-4,80	-5,15	-9,02	-6,93	-7,97	-9,82	-7,44	-8,63
85	-8,02	-9,47	-6,01	-7,83	-5,22	-4,75	-4,99	-9,29	-6,78	-8,04	-9,87	-7,34	-8,60
91	-8,27	-9,77	-6,26	-8,10	-5,44	-4,85	-5,14	-9,18	-7,18	-8,18	-9,96	-7,34	-8,65

## Anexo K - levantamento bibliográfico da massa volúmica dos ARGB

Autor	Tipo de agregado	$\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{sss}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_b$ (Mg/m <sup>3</sup> )
Soares (2014)	Bago de Arroz	2,71	2,63	2,66	1,41
	Brita 1	2,76	2,62	2,67	1,43
	Brita 2	2,72	2,62	2,67	1,37
	ARGB: 4 - 10 mm	2,65	2,37	2,48	1,28
	ARGB: 10 - 20 mm	2,66	2,37	2,48	1,25
Young & Teo (2009)	AGN	2,63	2,56	2,55	1,47
	ARGB	2,30	2,14	2,09	1,33
Fonseca (2009)	Bago de Arroz	2,67	2,60	2,56	1,42
	Brita 1	2,67	2,61	2,57	1,44
	Brita 2	2,60	2,55	2,51	1,46
	ARGB	2,69	2,45	2,31	1,17
Juan & Gutiérrez (2009)	ARGB: 4 - 8 mm	-	2,30	2,09	-
	ARGB: 8 - 16 mm	-	2,35	2,18	-
Ferreira (2007)	Brita 1	2,70	2,67	2,65	1,42
	Brita 2	2,69	2,64	2,6	1,33
	ARGB	2,66	2,44	2,3	1,14
Gomes (2007)	Brita 1	2,62	2,59	2,57	1,53
	Brita 2	2,61	2,57	2,53	1,53
	ARGB	2,66	2,53	2,45	1,30
Movassaghi (2006)	AGN	2,76	2,66	2,69	-
	ARGB	2,58	2,28	2,40	-
Matias & Brito (2005)	AGN	2,69	2,65	2,63	1,42
	ARGB	2,61	2,45	2,36	1,46
Larrañaga (2004)	AGN: 4 - 10 mm	2,71	2,66	2,63	-
	AGN: 10 - 16 mm	2,72	2,68	2,66	-
	AGN: 16 - 25 mm	2,71	2,68	2,66	-
	ARGB: 4 - 10 mm	2,59	2,42	2,31	-
	ARGB: 10 - 16 mm	2,59	2,43	2,33	-
	ARGB: 16 - 25 mm	2,60	2,45	2,36	-
<b>Média</b>	<b>AGN</b>	<b>2,7</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
<b>Desvio-padrão</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Média</b>	<b>ARGB</b>	<b>2,6</b>	<b>2,4</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>
<b>Desvio</b>		<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

## **Anexo L - características do betão de origem**

- classe de resistência: C30/37;
- classe de exposição ambiental: XC3 (P);
- classe de teor de cloretos: Cl0.4;
- $D_{\text{máx}}$  [mm]: 14.