

Desempenho de betões com agregados grossos reciclados provenientes da indústria de pré-fabricação

Diogo André Fonseca Soares

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Prof. Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Prof. Doutor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Júri

Presidente: Prof. Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Vogal: Prof. Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Julho 2014

RESUMO

Esta dissertação apresenta os resultados de uma campanha experimental desenvolvida com o intuito de avaliar o efeito da incorporação no betão de agregados provenientes da reciclagem de elementos de betão produzidos pela indústria da pré-fabricação. Pretendeu-se, em particular, estudar a utilização da fracção grossa destes agregados reciclados em diferentes percentagens de substituição e a possibilidade ou necessidade de se proceder à compensação dessa composição através da utilização de vários teores de um superplastificante, de modo a recuperar as características de um betão de referência, ou seja, um betão fabricado com composição análoga mas em que a totalidade dos agregados é de origem natural.

Realizou-se uma extensa campanha de ensaios laboratoriais de forma a avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade do betão. Além disso, foram realizados ensaios em estruturas executadas à escala real com o objectivo de caracterizar o betão *in situ*.

Os resultados mostram que os betões com agregados grossos reciclados possuem um desempenho equivalente ao do betão de referência em algumas das propriedades analisadas, sendo que, nas propriedades em que se registou um decréscimo de desempenho, o mesmo foi inferior ao mencionado no levantamento bibliográfico efectuado. É possível concluir que os agregados grossos reciclados originários de elementos pré-fabricados de betão são de muito boa qualidade e passíveis de ser utilizados no fabrico de novos betões. A utilização de um superplastificante é, em todas as propriedades, benéfica para o desempenho do betão, conseguindo-se atenuar por completo o efeito prejudicial dos agregados reciclados, nas propriedades em que o mesmo ocorreu.

Palavras-chave: Agregados reciclados de betão; superplastificante; desempenho mecânico; durabilidade; estruturas à escala real; ensaios *in situ*.

ABSTRACT

This master's dissertation presents the results of an experimental campaign developed with the aim of evaluating the effect of the incorporation in concrete of recycled aggregates from crushed elements produced by the precast concrete industry. The specific purpose was to study the use of the coarse fraction of these aggregates at various replacement ratios and the possibility/need of correcting the composition of the concrete mixes made with them with various contents of a superplasticizer, in order to replicate the characteristics of a reference concrete, *i.e.* a mix with an analogous composition but where all aggregates are primary.

An extensive set of tests was performed to evaluate the mechanical and durability properties of all concrete mixes. Furthermore, various tests were performed in four full-scale recycled concrete structures to characterize *in situ* the concrete.

The results prove that the concrete mixes with recycled aggregates have an equivalent performance to that of the reference concrete in most of the properties, and in the others where a performance loss was registered that loss was lower than the one reported in the literature review performed. It is concluded that the quality of the coarse aggregates recycled from precast elements is very good and totally fit for the production of new concrete. The use of a superplasticizer is beneficial for concrete performance in all properties analysed and the effects of recycled aggregates, on the properties in which it occurred, can be mitigated.

Keywords: Recycled concrete aggregates; superplasticizer; mechanical performance; durability; full-scale structures; *in situ* tests.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi o culminar de longos meses de árduo trabalho que me orgulho de concluir. Marca ainda o término da minha vida académica e, por isso, quero deixar o meu agradecimento a todos os intervenientes durante este trajecto.

Em primeiro lugar, manifesto o meu profundo agradecimento às pessoas que tornaram possível a realização deste projecto. Ao meu colega João Pacheco, que sempre batalhou no sentido de levar para a frente o projecto, sendo a sua ajuda fundamental no trabalho desenvolvido. Muitos foram os dias de trabalho juntos mas sempre com a mesma boa disposição e disponibilidade para efectuar o que fosse necessário. Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador científico desta dissertação, por todo o saber que me transmitiu, pelo seu apoio incondicional e por incentivar a trabalhar sempre mais e melhor. Agradeço-lhe também a enorme disponibilidade para ajudar a qualquer dia e a qualquer hora. Ao Professor Doutor João Ferreira, co-orientador científico desta dissertação, por todo o apoio e auxílio demonstrado. Por último, ao Engenheiro Miguel Guerreiro, sem o qual este projecto não se teria desencadeado.

Às empresas Sika e Secil, por cederem alguns dos materiais utilizados na investigação. À empresa Batalha dos Anjos, Lda, pela reciclagem dos elementos de betão. À empresa Mestretor, pela execução das estruturas. Ao grupo Opway por ter financiado o projecto.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil do IST, Leonel Silva e João Lopes, pela enorme ajuda durante a realização da campanha experimental.

Aos meus colegas investigadores do IST, Diogo Pedro, Miguel Bravo, Jorge Pontes e Sofia Real, com os quais tive o prazer de partilhar o espaço de trabalho e que demonstraram sempre disponibilidade para ajudar.

A todos os meus colegas do IST, especialmente ao Ricardo, ao Barbosa, à Sílvia e à Patrícia, por fazerem parte do meu percurso académico e pela enorme amizade demonstrada, a qual foi e é muito importante para mim.

Aos meus amigos, pelos momentos bons e menos bons que já passamos juntos e que certamente iremos continuar a passar. Ao Pimenta, ao Heitor, ao Vítor e ao Vázquez, por serem como irmãos para mim.

Por último, e sem dúvida os mais importantes para mim, a toda a minha família, em especial ao meu pai, aos meus avós, aos meus tios, à minha prima e à Amélia, por todo o carinho e apoio que me deram, não só ao longo deste percurso como em toda a minha vida. Agradeço-lhes por fazerem de mim o que sou hoje.

Em memória da minha mãe, que infelizmente não me viu a alcançar este feito mas que de certeza estaria orgulhosa de mim.

ACRÓNIMOS

AP - agregados primários ou naturais, de origem pétreo;

AR - agregados reciclados ou secundários;

AFP - agregados finos principais ou naturais;

AFR - agregados finos reciclados ou secundários;

AGP - agregados grossos primários ou naturais;

AGR - agregados grossos reciclados ou secundários;

ARB - agregados reciclados de betão;

AFRB - agregados finos reciclados de betão;

AGRB - agregados grossos reciclados ou secundários de betão;

AGRB 4-10 - agregados grossos reciclados ou secundários de betão, de fracção granulométrica compreendida entre 4 e 10 mm;

AGRB 10-20 - agregados grossos reciclados ou secundários de betão, de fracção granulométrica compreendida entre 10 e 20 mm;

BAR - betão fabricado com incorporação, mesmo que parcial, de agregados reciclados;

BARB - betão com incorporação, total ou parcial, de agregados reciclados provenientes de betão;

BAGR - betão fabricado com incorporação, apenas, de agregados grossos reciclados, mesmo que não substituindo, na totalidade, os agregados grossos primários;

BAFRB - betão com incorporação, total ou parcial, de agregados finos reciclados de betão;

BAGRB - betão fabricado com incorporação, apenas, de agregados reciclados grossos de betão, mesmo que não substituindo, na totalidade, os agregados grossos primários;

BO - betão de origem;

BR - betão de referência ou convencional, sem incorporação de agregados reciclados;

B10 - betão com 10% de substituição de AGP por AGRB;

B20 - betão com 20% de substituição de AGP por AGRB;

B25 - betão com 25% de substituição de AGP por AGRB;

B30 - betão com 30% de substituição de AGP por AGRB;

B40 - betão com 40% de substituição de AGP por AGRB;

B50 - betão com 50% de substituição de AGP por AGRB;

B100 - betão com substituição integral de AGP por AGRB;

B100SP0.5 - betão com substituição integral de AGP por AGRB, e com introdução de adjuvante na proporção de 25% da dosagem máxima recomendada pelo produtor (o que equivale, neste estudo, a 0,5% da quantidade de cimento);

B100SP1.0 - betão com substituição integral de AGP por AGRB, e com introdução de adjuvante na proporção de 50% da dosagem máxima recomendada pelo produtor (o que equivale, neste estudo, a 1,0% da quantidade de cimento);

B100SP1.5 - betão com substituição integral de AGP por AGRB, e com introdução de adjuvante na proporção de 75% da dosagem máxima recomendada pelo produtor (o que equivale, neste estudo, a 1,5% da quantidade de cimento);

B100SP2.0 - betão com substituição integral de AGP por AGRB, e com introdução de adjuvante na proporção de 100% da dosagem máxima recomendada pelo produtor (o que equivale, neste estudo, a 2,0% da quantidade de cimento);

RCD - resíduos de construção e demolição;

Relação a/c - relação água / cimento;

SP - superplastificante.

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações gerais	1
1.2.	Objectivos.....	2
1.3.	Metodologia e organização da dissertação	3
2.	ESTADO DA ARTE	5
2.1.	Introdução.....	5
2.2.	Descrição das principais campanhas experimentais	5
2.3.	Propriedades dos agregados reciclados.....	7
2.3.1.	Massa volúmica e baridade.....	8
2.3.2.	Absorção de água.....	9
2.3.3.	Forma das partículas	12
2.3.4.	Resistência mecânica	14
2.4.	Propriedades dos betões com agregados grossos reciclados de betão	15
2.4.1.	Trabalhabilidade	15
2.4.2.	Massa volúmica	19
2.4.3.	Resistência à compressão.....	20
2.4.4.	Resistência à tracção por compressão diametral	23
2.4.5.	Módulo de elasticidade	25
2.4.6.	Resistência à abrasão	27
2.4.7.	Velocidade de propagação de ultra-sons.....	29
2.4.8.	Absorção de água.....	31
2.4.9.	Retracção	34
2.4.10.	Carbonatação	36
2.4.11.	Penetração de cloretos	38
2.5.	Conclusões gerais	41
3.	CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	43
3.1.	Introdução.....	43
3.2.	Planeamento da campanha experimental	43
3.2.1.	Primeira fase experimental	43
3.2.2.	Segunda fase experimental	44
3.2.3.	Terceira fase experimental	45
3.2.4.	Quarta fase experimental.....	46
3.3.	Produção dos agregados reciclados de betão	46
3.3.1.	<i>Procurement</i> dos elementos pré-fabricados	47
3.3.2.	Reciclagem dos elementos pré-fabricados	48
3.4.	Composição e produção dos betões	50

3.4.1.	Introdução	50
3.4.2.	Composição do betão de referência.....	50
3.4.2.1.	Máxima dimensão do agregado.....	51
3.4.2.2.	Dosagem de cimento	51
3.4.2.3.	Volume de vazios (VV).....	52
3.4.2.4.	Índice de vazios (IV)	52
3.4.2.5.	Dosagem de água de amassadura (A) e relação água/cimento (a/c).....	53
3.4.2.6.	Volume das partículas sólidas (VS)	54
3.4.2.7.	Volume das partículas de cimento (VC)	54
3.4.2.8.	Percentagem do volume de cimento relativamente ao volume sólido total (C%)	54
3.4.2.9.	Curva de referência de Faury e proporção dos agregados	54
3.4.3.	Betões com AGRB	58
3.4.4.	Betões com superplastificante	60
3.4.5.	Amassadura (laboratório).....	61
3.4.6.	Composição final dos betões.....	63
3.5.	Estruturas à escala real	64
4.	RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	67
4.1.	Introdução.....	67
4.2.	Ensaio de identificação dos agregados.....	67
4.2.1.	Análise granulométrica	67
4.2.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	68
4.2.3.	Massa volúmica aparente	70
4.2.4.	Desgaste de Los Angeles.....	71
4.2.5.	Teor de humidade.....	73
4.2.6.	Índice de forma	73
4.3.	Ensaio ao betão no estado fresco	75
4.3.1.	Abaixamento (cone de Abrams).....	75
4.3.2.	Massa volúmica.....	76
4.4.	Ensaio mecânico ao betão no estado endurecido.....	78
4.4.1.	Resistência à compressão	78
4.4.2.	Resistência à tracção (por compressão diametral).....	83
4.4.3.	Módulo de elasticidade.....	85
4.4.4.	Velocidade de propagação de ultra-sons	86
4.4.5.	Resistência à abrasão.....	87
4.5.	Ensaio de durabilidade ao betão no estado endurecido	89
4.5.1.	Retracção.....	89
4.5.2.	Absorção de água por imersão	91

4.5.3.	Absorção de água por capilaridade	93
4.5.4.	Resistência à carbonatação	95
4.5.5.	Resistência à penetração dos cloretos	97
4.6.	Ensaio de caracterização <i>in situ</i> do betão em pórticos à escala real	99
4.6.1.	Resistência à compressão em provetes cúbicos.....	99
4.6.2.	Resistência à compressão em carotes	101
4.6.3.	Velocidade de propagação de ultra-sons	104
4.6.4.	Dureza superficial (esclerómetro de Schmidt)	105
4.6.5.	Comparação dos resultados <i>in situ</i> e em laboratório	107
4.6.5.1.	Resistência à compressão em provetes cúbicos.....	107
4.6.5.2.	Resistência à compressão em carotes	108
4.6.5.3.	Velocidade de propagação de ultra-sons	109
4.7.	Conclusões.....	110
4.7.1.	Propriedades dos agregados	110
4.7.2.	Propriedades do betão no estado fresco.....	111
4.7.3.	Propriedades mecânicas do betão no estado endurecido	111
4.7.4.	Propriedades de durabilidade do betão no estado endurecido	112
4.7.5.	Propriedades do betão em pórticos à escala real	113
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	115
5.1.	Considerações finais	115
5.2.	Conclusões gerais	116
5.3.	Desenvolvimentos futuros	119
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	Anexo A - Ficha técnica do cimento	
	Anexo B - Fichas técnicas dos agregados naturais	
	Anexo C - Evolução da absorção de água dos AGRB	
	Anexo D - Ficha técnica do superplastificante	
	Anexo E - Ensaio aos agregados: análise granulométrica	
	Anexo F - Ensaio aos agregados: massa volúmica e absorção de água	
	Anexo G - Ensaio aos agregados: massa volúmica aparente, volume de vazios e desgaste de Los Angeles	
	Anexo H - Ensaio aos agregados: teor de humidade; temperaturas em Lisboa entre Março e Setembro de 2013	
	Anexo I - Ensaio aos agregados: índice de forma	
	Anexo J - Ensaio ao betão no estado fresco: abaixamento e massa volúmica	
	Anexo K - Ensaio ao betão endurecido: resistência à compressão	
	Anexo L - Ensaio ao betão endurecido: resistência à tracção (por compressão diametral)	
	Anexo M - Ensaio ao betão endurecido: módulo de elasticidade	
	Anexo N - Ensaio ao betão endurecido: velocidade de propagação de ultra-sons	

Anexo O - Ensaio ao betão endurecido: resistência à abrasão

Anexo P - Ensaio ao betão endurecido: retracção

Anexo Q - Ensaio ao betão endurecido: absorção de água por imersão

Anexo R - Ensaio ao betão endurecido: absorção de água por capilaridade

Anexo S - Ensaio ao betão endurecido: resistência à carbonatação

Anexo T - Ensaio ao betão endurecido: resistência à penetração de cloretos

Anexo U - Ensaio de caracterização do betão *in situ*: resistência à compressão em provetes

Anexo V - Ensaio de caracterização do betão *in situ*: velocidade de propagação de ultra-sons

Anexo W - Ensaio de caracterização do betão *in situ*: dureza superficial

Anexo X - Temperaturas em Taipadas (Setúbal) entre Julho e Outubro de 2013

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Constituição média dos RCD	1
Figura 2.1 - Correlação entre as propriedades massa volúmica e absorção de água	10
Figura 2.2 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água dos AGRB	10
Figura 2.3 - Evolução da absorção de água ao longo do tempo pelos AGRB	11
Figura 2.4 - Evolução da absorção de água de AGR	11
Figura 2.5 - Ligação agregado/pasta de cimento (<i>zoom</i> de 8000x): esquerda - AP; direita - ARB	13
Figura 2.6 - Morfologia da zona da ligação agregado / pasta de cimento (<i>zoom</i> de 5000x): a - AP; b - ARB; c - ARB (HPC)	13
Figura 2.7 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles, para diferentes origens dos agregados	15
Figura 2.8 - Relação entre o desgaste de Los Angeles e a massa volúmica	15
Figura 2.9 - Abaixamento medido no betão em função da massa volúmica dos seus agregados (esquerda) e da sua massa volúmica no estado fresco (direita)	16
Figura 2.10 - Efeito da água livre na amassadura no abaixamento inicial dos betões	17
Figura 2.11 - Resultados do ensaio de abaixamento para diferentes tipos de amassaduras	18
Figura 2.12 - Massa volúmica do betão no estado fresco em função da massa volúmica dos seus agregados	19
Figura 2.13 - Massa volúmica de betões com AGR e AFR, para várias relações a/c	19
Figura 2.14 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB	19
Figura 2.15 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB	21
Figura 2.16 - Evolução da resistência à compressão de BAGRB ao longo do tempo	21
Figura 2.17 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB	21
Figura 2.18 - Evolução da resistência à compressão de BAGRB ao longo do tempo	22
Figura 2.19 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões	22
Figura 2.20 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB	23
Figura 2.21 - Resistência à compressão consoante a relação água / cimento e a taxa de incorporação de AGR ..	23
Figura 2.22 - Influência da origem de AGRB na resistência à tracção: composição 1	24
Figura 2.23 - Influência da origem de AGRB na resistência à tracção: composição 2	24
Figura 2.24 - Relação da resistência à tracção com a taxa de substituição de AGRB, aos 28 dias de idade	24
Figura 2.25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a taxa de substituição de AGRB	26
Figura 2.26 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB	26
Figura 2.27 - Relação do desgaste por abrasão com a taxa de substituição de AGRB	27
Figura 2.28 - Efeito dos AGRB na resistência à abrasão, para betões de igual resistência	27
Figura 2.29 - Comparação da resistência à abrasão entre o BR e B100	28
Figura 2.30 - Relação entre a resistência à compressão e a perda de espessura por abrasão	28
Figura 2.31 - Relação entre a resistência à tracção e a perda de espessura por abrasão	28
Figura 2.33 - Relação entre o módulo de elasticidade e a perda de espessura por abrasão	29
Figura 2.34 - Relação entre a velocidade dos ultra-sons e a relação a/c	30
Figura 2.35 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGR	30
Figura 2.36 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB	30
Figura 2.37 - Relação da velocidade de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB	30
Figura 2.38 - Relação entre a velocidade de ultra-sons e a resistência à compressão e massa volúmica	30
Figura 2.39 - Relação entre a absorção de água do betão com a massa volúmica dos seus agregados, em que IT C corresponde a AGRB e IT V a AGR de cerâmicos	31
Figura 2.40 - Absorção de água por capilaridade	31
Figura 2.41 - Evolução da absorção de água por capilaridade em BAGRB, 1º ciclo de amassaduras	32
Figura 2.42 - Evolução da absorção de água por capilaridade em BAGRB, 3º ciclo de amassadura	32
Figura 2.43 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB	32
Figura 2.44 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de AGRB	33
Figura 2.45 - Ensaio de absorção de água por capilaridade em BAGRB	33

Figura 2.46 - Relação do coeficiente de absorção capilar com o teor de AGRB, para cimento tipo I 42,5R.....	34
Figura 2.47 - Relação do coeficiente de absorção capilar com o teor de AGRB, para cimento tipo II-A/L 42,5R.....	34
Figura 2.48 - Relação do coeficiente de absorção capilar com a quantidade de cimento.....	34
Figura 2.49 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de AGRB.....	34
Figura 2.50 - Evolução ao longo do tempo da retracção em BAGRB.....	35
Figura 2.51 - Evolução da retracção nos betões ao longo do tempo para betões da mesma classe de resistência.....	36
Figura 2.52- Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB.....	36
Figura 2.53 - Evolução da retracção ao longo do tempo em BAGRB.....	36
Figura 2.54 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB.....	37
Figura 2.55 - Profundidade de carbonatação em função da taxa de substituição de AGRB.....	37
Figura 2.56 - Resultados do ensaio de carbonatação em BAGRB, com e sem introdução de cinzas volantes.....	37
Figura 2.57 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo.....	38
Figura 2.58 - Relação da resistência à carbonatação com a taxa de substituição de AGRB.....	38
Figura 2.59 - Relação da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de AGRB.....	39
Figura 2.60 - Relação entre a percentagem de cloretos, na camada de 0-1 cm, e a taxa de substituição de AGRB.....	40
Figura 2.61 - Relação entre a percentagem de cloretos, na camada de 0-1 cm, e a taxa de substituição de AGRB, desprezando os resultados para a taxa de 100%.....	40
Figura 2.62 - Resultados da campanha de Matias e Brito (2005) para a penetração de cloretos.....	40
Figura 2.63 - Efeito dos AGRB na penetração de cloretos, para betões de igual resistência.....	40
Figura 2.64 - Relação da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de AGRB.....	40
Figura 3.1 - Maciços demolidos.....	48
Figura 3.2 - Outros elementos demolidos.....	48
Figura 3.3 - Acessórios (balde, tesoura de maxilas e martelo pneumático).....	49
Figura 3.4 - Primeira fase: Giratória com martelo pneumático.....	49
Figura 3.5 - Segunda fase: Giratória com tesoura de maxilas.....	49
Figura 3.6 - Resíduos resultantes da segunda fase do processo de demolição.....	49
Figura 3.7 - Armadura contida nos elementos de betão.....	49
Figura 3.8 - Resíduos de aço produzidos pela operação.....	49
Figura 3.9 - Equipamento de britagem.....	49
Figura 3.10 - Britadeira de maxilas (primária).....	49
Figura 3.11 - Tapete rolante.....	49
Figura 3.12 - Moinho de martelos (secundário).....	49
Figura 3.13 - Moinho de martelos (terciário).....	49
Figura 3.14 - Curvas de referência de Faury.....	55
Figura 3.15 - Determinação das percentagens dos agregados e gamas granulométricas.....	56
Figura 3.16 - Determinação das percentagens dos agregados: AP.....	57
Figura 3.17 - Determinação das percentagens dos agregados: AFP e AGR.....	57
Figura 3.188 - Contentores com agregados.....	58
Figura 3.199 - <i>Big bags</i> com AGRB.....	58
Figura 3.20 - Evolução da absorção de água de AGRB ao longo do tempo.....	60
Figura 3.21 - Lubrificação dos moldes.....	62
Figura 3.22 - Betoneira de eixo inclinado (primeira fase do processo de amassadura).....	62
Figura 3.23 - Introdução dos componentes na betoneira.....	62
Figura 3.243.24 - Enchimento dos moldes.....	62
Figura 3.25 - Vibração do betão.....	62
Figura 3.26 - Aspecto final após nivelamento da superfície do betão.....	62
Figura 3.27 - Estrutura-tipo (geometria de projecto e simetria ortogonal).....	64
Figura 3.28 - Amassadura do betão.....	64
Figura 3.29 - Elevação do betão.....	64

Figura 3.30 - Colocação do betão no pórtico	64
Figura 3.31 - Vibração do betão.....	65
Figura 3.32 - Provetes cúbicos e viga	65
Figura 3.33 - Pilar	65
Figura 4.1 - Agregados naturais	68
Figura 4.2 - Agregados reciclados	68
Figura 4.3 - Curva granulométrica dos vários agregados.....	68
Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água dos AGRB	70
Figura 4.5 - Relação entre a massa volúmica saturada com superfície seca e a absorção de água dos AGRB	70
Figura 4.6 - Comparação dos resultados da baridade de AGP das diversas investigações	71
Figura 4.7 - Comparação dos resultados da baridade de AGRB das diversas investigações	71
Figura 4.8 - Comparação dos resultados do desgaste de Los Angeles de AGP das diversas investigações.....	72
Figura 4.9 - Comparação dos resultados do desgaste de Los Angeles de AGRB das diversas investigações.....	72
Figura 4.10 - Relação entre a massa volúmica seca e o desgaste de Los Angeles	72
Figura 4.11 - Relação entre a absorção de água e o desgaste de Los Angeles	72
Figura 4.12 - Relação da relação a/c efectiva com a percentagem de SP.....	76
Figura 4.13 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB	77
Figura 4.14 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações.....	78
Figura 4.15 - Relação da massa volúmica com a percentagem de SP.....	78
Figura 4.16 - Variação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB: 2ª fase experimental	79
Figura 4.17 - Variação da resistência à compressão com a percentagem de SP: 2ª fase experimental	80
Figura 4.18 - Variação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB: 3ª fase experimental	82
Figura 4.19 - Relação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	82
Figura 4.20 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo	83
Figura 4.21 - Evolução da resistência à compressão nos betões com SP.....	83
Figura 4.22 - Relação da resistência à compressão aos 28 dias com a relação a/c efectiva	83
Figura 4.23 - Relação da resistência à tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AGRB .	84
Figura 4.24 - Relação da resistência à tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	84
Figura 4.25 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB	85
Figura 4.26 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	86
Figura 4.27 - Relação do módulo de elasticidade com a massa volúmica	86
Figura 4.28 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB	87
Figura 4.29 - Relação da velocidade de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	87
Figura 4.30 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com o módulo de elasticidade	88
Figura 4.31 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a massa volúmica.....	88
Figura 4.32 - Relação da resistência à abrasão com a taxa de substituição de AGRB	88
Figura 4.33 - Relação da resistência à abrasão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	88
Figura 4.34 - Deformação devido a retracção ao longo do tempo	89
Figura 4.35 - Regressões logarítmicas da deformação devido a retracção ao longo do tempo	89
Figura 4.36 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB (aos 91 dias).....	90
Figura 4.37 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	90
Figura 4.38 - Relação da retracção com o módulo de elasticidade	91
Figura 4.39 - Relação da retracção com a massa volúmica.....	91
Figura 4.40 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB	92
Figura 4.41 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações.....	92

Figura 4.42 - Relação da absorção de água por imersão com a massa volúmica	93
Figura 4.43 - Relação da absorção de água por capilaridade com a taxa de substituição de AGRB	94
Figura 4.44 - Relação da absorção de água por capilaridade com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	94
Figura 4.45 - Coeficientes de absorção capilar ao longo do tempo.....	94
Figura 4.46 - Relação da absorção de água por capilaridade (72 horas) com a absorção por imersão.....	95
Figura 4.47 - Relação da absorção de água por capilaridade (72 horas) com a massa volúmica	95
Figura 4.48 - Relação da profundidade de carbonatação com a taxa de substituição de AGRB, para os vários períodos de ensaiado	96
Figura 4.49 - Relação da resistência à carbonatação (aos 91 dias) com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações	96
Figura 4.50 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo.....	97
Figura 4.51 - Relação da resistência à carbonatação (91 dias) com a resistência à compressão (28 dias)	97
Figura 4.52 - Relação da resistência à carbonatação (91 dias) com a absorção de água por capilaridade	97
Figura 4.53 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a taxa de substituição de AGRB	99
Figura 4.54 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos (aos 91 dias) com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações.....	99
Figura 4.55 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a absorção de água por capilaridade (72 horas)	99
Figura 4.56 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a profundidade de carbonatação	99
Figura 4.57 - Aspecto geral dos provetes correspondentes ao segundo piso do B25	100
Figura 4.58 - Relação da resistência à compressão em provetes cúbicos com a taxa de substituição de AGRB	100
Figura 4.59 - Exemplo de rotura não satisfatória (B25 - viga).....	102
Figura 4.60 - Exemplos de roturas satisfatórias	102
Figura 4.61 - Relação da resistência à compressão em carotes com a taxa de substituição de AGRB: geral	103
Figura 4.62 - Relação da resistência à compressão em carotes com a taxa de substituição de AGRB: vigas, pilares e lajes.....	103
Figura 4.63 - Relação entre a resistência à compressão obtida em carotes e em provetes cúbicos	103
Figura 4.64 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB: geral	104
Figura 4.65 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB: pilares e vigas	104
Figura 4.66 - Relação da dureza superficial com a taxa de substituição de AGRB (geral).....	106
Figura 4.67 - Relação da dureza superficial com a taxa de substituição de AGRB (pilares, vigas e lajes).....	106
Figura 4.68 - Relação da dureza superficial com a resistência à compressão em provetes cúbicos	106
Figura 4.69 - Relação da dureza superficial com a resistência à compressão em carotes	106
Figura 4.70 - Relação da dureza superficial com a resistência à abrasão.....	107
Figura 4.71 - Relação entre a resistência à compressão <i>in situ</i> (provetes cúbicos) e em laboratório	108
Figura 4.72 - Evolução da resistência à compressão nos betões com SP (<i>in situ</i> e laboratório)	108
Figura 4.73 - Relação entre a resistência à compressão <i>in situ</i> (carotes) e em laboratório	109
Figura 4.74 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons <i>in situ</i> e em laboratório.....	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Composição dos RCD por tipo de actividade, em percentagem por peso.....	2
Tabela 2.1 - Composições dos BR de Limbachiya <i>et al.</i> (2000).....	5
Tabela 2.2 - Composição dos betões (1 m ³) ensaiados no estudo de Gonçalves <i>et al.</i> (2004).....	5
Tabela 2.3 - Composições dos betões de Malesev <i>et al.</i> (2010).....	6
Tabela 2.4 - Quantidades dos agregados utilizados por Malesev <i>et al.</i> (2010).....	6
Tabela 2.5 - Composições dos betões de Rao <i>et al.</i> (2011).....	6
Tabela 2.6 - Composição dos AGR utilizados por Kou e Poon (2012).....	6
Tabela 2.7 - Composições dos betões de Kou e Poon (2012).....	7
Tabela 2.8 - Amassaduras realizadas por Matias e Brito (2005).....	7
Tabela 2.9 - Composição do betão utilizada por de Matias e Brito (2005).....	7
Tabela 2.10 - Massa volúmica de ARB, consoante a sua gama granulométrica.....	9
Tabela 2.11 - Massas volúmicas e baridade (levantamento bibliográfico).....	9
Tabela 2.12 - Propriedades de AP e AR de acordo com Hansen e Narud (1983).....	10
Tabela 2.13 - Absorção de água.....	12
Tabela 2.14 - Índice de forma.....	14
Tabela 2.15 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles de dois tipos de AGRB.....	14
Tabela 2.16 - Desgaste de Los Angeles.....	15
Tabela 2.17 - Resultados do ensaio de abaixamento e quantidade adicional de água nos BAGRB.....	18
Tabela 2.18 - Resultados do ensaio de abrasão de Konin (2012).....	28
Tabela 3.1 - Composições de betão.....	43
Tabela 3.2 - Variáveis e resultados dos ensaios aos agregados.....	44
Tabela 3.3 - Variáveis e resultados dos ensaios ao betão no estado fresco.....	45
Tabela 3.4 - Ensaio realizados em laboratório.....	46
Tabela 3.5 - Ensaio <i>in situ</i> realizados nas estruturas.....	46
Tabela 3.6 - Variáveis e resultados dos ensaios ao betão no estado endurecido.....	47
Tabela 3.7 - Dimensão máxima admissível do agregado.....	51
Tabela 3.8 - Dosagem de cimento pela fórmula de Bolomey.....	52
Tabela 3.9 - Relação entre o volume de vazios e a máxima dimensão dos agregados.....	52
Tabela 3.10 - Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento.....	53
Tabela 3.11 - Valores dos parâmetros K e K'.....	53
Tabela 3.12 - Pontos pertencentes à curva de referência de Faury.....	54
Tabela 3.13 - Valores dos parâmetros A e B para determinação do ponto 2 da curva de referência de Faury.....	55
Tabela 3.14 - Pontos da curva de referência de Faury.....	55
Tabela 3.15 - Resultados do método de Faury.....	56
Tabela 3.16 - Curva de referência de Faury.....	57
Tabela 3.17 - Resultados do método de Faury e acerto do módulo de finura: AP.....	58
Tabela 3.18 - Resultados do método de Faury e acerto do módulo de finura: AFP e AGR.....	58
Tabela 3.19 - Provetes e cofragens necessárias por amassadura.....	61
Tabela 3.20 - Volume por amassadura e total.....	61
Tabela 3.21 - Composição dos betões: segunda fase experimental.....	63
Tabela 3.22 - Composição dos betões: terceira e quarta fases experimentais.....	63
Tabela 4.1- Resultados do ensaio de análise granulométrica.....	68
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de massa volúmica e absorção de água.....	69
Tabela 4.3 - Comparação dos resultados obtidos no ensaio de massa volúmica e absorção de água nas diversas investigações.....	69
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de massa volúmica aparente.....	70
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de desgaste de <i>Los Angeles</i>	71
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de desgaste de teor de humidade.....	73

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de índice de forma	74
Tabela 4.8 - Comparação dos resultados obtidos no ensaio de índice de forma nas diversas investigações.....	74
Tabela 4.9 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento: 2ª fase da campanha experimental	75
Tabela 4.10 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento: 3ª fase da campanha experimental	75
Tabela 4.11 - Influência da incorporação de SP num betão com 100% de AGRB	76
Tabela 4.12 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica: 2ª fase da campanha experimental	77
Tabela 4.13 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica: 3ª fase da campanha experimental	77
Tabela 4.14 - Resultados obtidos no ensaio resistência à compressão: 2ª fase da campanha experimental	79
Tabela 4.15 - Resultados obtidos no ensaio resistência à compressão: 3ª fase da campanha experimental.....	81
Tabela 4.16 - Variação da resistência à compressão entre a 2ª e a 3ª fase experimental.....	81
Tabela 4.17 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	83
Tabela 4.18 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade	85
Tabela 4.19 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	86
Tabela 4.20 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão	88
Tabela 4.21 - Resultados obtidos no ensaio de retracção aos 7 e 91 dias.....	91
Tabela 4.22 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão	92
Tabela 4.23 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade	93
Tabela 4.24 - Relações entre as absorções capilares ao longo do tempo com o valor relativo às 72 horas.....	94
Tabela 4.25 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à carbonatação para as várias idades de ensaio	95
Tabela 4.26 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração dos cloretos.....	98
Tabela 4.27 - Resultados obtidos nos provetes dos vários betões	98
Tabela 4.28 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em provetes	100
Tabela 4.29 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em carotes	101
Tabela 4.30 - Resistência à compressão equivalente em cubos <i>in situ</i> (geral)	102
Tabela 4.31 - Resistência à compressão equivalente em cubos <i>in situ</i> (pilares, vigas e lajes)	102
Tabela 4.32 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	104
Tabela 4.34 - Resultados obtidos no ensaio de dureza superficial (geral).....	105
Tabela 4.35 - Resultados obtidos no ensaio de dureza superficial (pilares, vigas e lajes)	105
Tabela 4.35 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão <i>in situ</i> (provetes cúbicos) e em laboratório.....	107
Tabela 4.36 - Relações entre as resistências dos betões nas duas idades de ensaio (<i>in situ</i> e laboratório).....	108
Tabela 4.37 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão <i>in situ</i> (carotes) e em laboratório.....	108
Tabela 4.38 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons <i>in situ</i> e em laboratório	109
Tabela 5.1 - Resultados obtidos nas propriedades dos agregados finos e grossos	117
Tabela 5.2 - Resultados obtidos nas diversas propriedades dos betões analisados em laboratório	118
Tabela 5.3 - Resultados obtidos nas diversas propriedades dos betões analisados <i>in situ</i>	118

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Actualmente, e na situação em que o sector da construção se encontra, é impensável tal não se reflectir na busca da sua sustentabilidade, ou seja, uma construção que procure responder às necessidades actuais minorando os impactes ambientais, sociais e económicos de modo a não comprometer as necessidades de gerações futuras.

Com o crescimento e desenvolvimento da população, deu-se um aumento proporcional do consumo de recursos naturais e energia. Por isto, e pelas inevitáveis consequências que lhe estão associadas, tem-se assistido a uma mudança de mentalidades em relação ao meio ambiente. Um dos sectores com maior responsabilidade pelo consumo de recursos naturais e pela geração de resíduos é a indústria da construção, produzindo anualmente aproximadamente 850 milhões de toneladas na União Europeia, o que equivale a cerca de 31% da produção total, sendo a maior percentagem de entre todos os sectores (EEA, 2009). Apesar de ser uma actividade antiquíssima, só nas ultimas décadas as preocupações com os seus resíduos têm vindo a emergir, assim como as tentativas de os controlar.

Deste modo, os resíduos da construção e demolição (RCD) são sem dúvida um dos grandes focos de atenção, dada a sua quantidade e diversidade de tipologias de materiais, como se verifica na Figura 1.1.

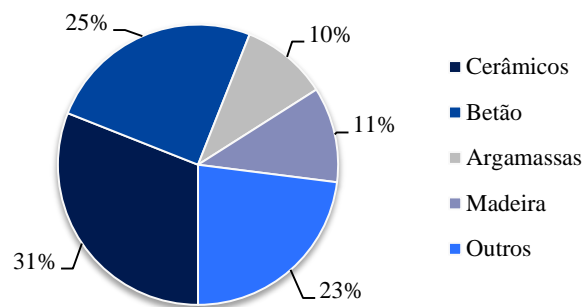


Figura 1.1 - Constituição média dos RCD (levantamento bibliográfico de Gonçalves, 2007)

Os RCD, tal como o nome indica, são gerados nas actividades de demolição, reabilitação e construção (as percentagens correspondentes aos vários tipos de origem dos RCD estão presentes na Tabela 1.1). Estes provocam diversos impactes ambientais, tais como o uso de áreas de aterro, deposições em locais ilegais, assoreamento de rios e lagos, para além do próprio desperdício de material. Perante este facto, existe a necessidade de gerir adequadamente os RCD, o que pode ter por base algumas medidas apontadas por Angulo (2005): evitar deposições ilegais por meio de regulamentação e criando uma maior atractividade para esses resíduos, que minimize os custos de recolha, transporte e deposição; triar os resíduos de modo a aumentar a sua reciclabilidade e a reduzir os custos de deposição; estimular a reciclagem por meio de especificações, directivas e normas, que encorajem a utilização dos materiais reciclados de uma forma competitiva.

Apesar destes aspectos negativos, apenas em alguns países se assiste a elevadas taxas de aproveitamento dos RCD, tais como Holanda e Dinamarca, que apresentam taxas de reciclagem superiores a 90% (EEA, 2011). Por outro lado, encontram-se países como Espanha e Portugal, que actualmente ainda apresentam reduzidas quantidades recicladas de RCD, cerca de 10% e 5%, respectivamente (Vázquez, 2005; Gonçalves, 2005).

De modo a ter em conta esta problemática da sustentabilidade da construção em Portugal, foi publicado no Diário da República o Decreto-Lei n.º 46/2008 que legisla o regime das operações de gestão de RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação. Também no sentido de incrementar o aproveitamento de resíduos, foi definido a nível europeu uma meta para 2020, conforme disposto na Directiva n.º 2008/98/CE, em que 70% dos RCD (excluindo solos e rochas sem presença de substâncias perigosas) terão que ser reutilizados ou reciclados.

Tabela 1.1 - Composição dos RCD por tipo de actividade, em percentagem por peso (adaptado de Mália, 2010)

Composição	Construção (%)	Reabilitação (%)	Demolição (%)
Betão e tijolos	45,79	47,69	84,16
Madeira	13,67	30,31	6,42
Metal	1,32	3,59	4,33
Gesso	6,25	5,72	0,15
Papel, cartão e plásticos	4,50	0,89	0,27
Vidro	0,47	0,41	0,12
Isolamentos	1,87	0,51	0,07
Amianto	-	0,7	0,32
Outros resíduos perigosos	0,23	0,04	0,04
Outros	25,89	10,13	4,13

Uma das formas de recuperar os RCD é a transformação dos mesmos em agregados, os quais são passíveis de diversas aplicações. A Associação Europeia de Agregados estima uma produção anual de 3 biliões de agregados na União Europeia, em que os agregados reciclados (AR) gerados representam apenas cerca de 5% da mesma (UEPG, 2013). Segundo a associação referida, os países que geram mais AR são a Alemanha e o Reino Unido, aos quais corresponde uma produção de 65 e 50 milhões de toneladas, respectivamente. No entanto, o país com maior rácio entre a produção de AR e a total é a Holanda (cerca de 25%). Relativamente a Portugal, estima-se que a produção deste tipo de agregados seja praticamente nula.

Uma vez que o betão é um dos principais constituintes dos RCD, uma parte importante dos AR corresponde a este material. Este tipo de agregados pode ser obtido pela demolição de estruturas de betão e pela reciclagem de elementos pré-fabricados e provetes laboratoriais. São conhecidas actualmente diversas aplicações dos agregados reciclados de betão (ARB), como em fundações, pavimentação, estabilização de solos, betão armado, entre outras (Oikonomou, 2005; Hansen, 1992).

Diversos estudos científicos, nomeadamente alguns efectuados no Instituto Superior Técnico, têm sido desenvolvidos no âmbito da utilização de betões britados, provenientes de demolições de estruturas de betão, como agregados para a composição de novos betões. Estes estudos têm demonstrado a viabilidade da utilização destes betões reciclados em elementos estruturais de betão armado. É neste contexto que se desenvolve a presente dissertação, focando em particular a utilização de agregados grossos reciclados de betão (AGRB) provenientes da indústria de pré-fabricação.

Sendo o betão utilizado em pré-fabricação de muito boa qualidade, é de esperar que a sua utilização para obtenção de agregados grossos a incorporar no fabrico de novos betões apresente vantagens relativamente à reciclagem de betões comuns, nomeadamente ao nível do comportamento mecânico e da durabilidade. Para além disto, os resíduos originados pelos elementos de betão pré-fabricados não possuem qualquer tipo de contaminantes, ao contrário dos RCD.

Deste modo, com os resultados deste estudo, poder-se-á comprovar a possibilidade de utilização de taxas de substituição dos agregados superiores às previstas nos demais regulamentos existentes, desde que seja demonstrada a qualidade dos AGR. Assim, pretende-se que a investigação possa contribuir para uma utilização mais abrangente dos AR, resultando numa diminuição dos impactes ambientais associados à prática construtiva.

1.2. Objectivos

Esta dissertação surge com o sentido de complementar e reforçar o trabalho desenvolvido em torno da utilização de betões com incorporação de agregados reciclados (BAR), dando, assim, seguimento a várias campanhas experimentais realizadas nesta área de estudo. A presente dissertação encontra-se integrada no âmbito do projecto ADIST AD0054 “BARPINP - Utilização de resíduos de betão da indústria de pré-fabricação como agregados reciclados na execução de estruturas de betão”, o qual foi desenvolvido pelo grupo Opway em parceria com o Instituto Superior Técnico.

Mais concretamente, estudou-se a fracção grossa de AR de betões pré-fabricados, incidindo nas propriedades dos agregados e de betões produzidos com os mesmos, no estado fresco e endurecido, relativamente ao seu desempenho mecânico e em termos de durabilidade. Foi estudado um betão de referência (BR) com a mesma posologia dos betões com agregados grossos reciclados de betão (BAGRB) mas produzido com agregados naturais, ou primários (AP). Deste modo, é possível avaliar a variação de desempenho dos BAGRB face ao BR, em função de diferentes taxas de substituição dos agregados. Outro objectivo desta dissertação é quantificar o benefício da utilização de um superplastificante (SP) num betão com substituição integral dos agregados grossos.

As composições de betão a analisar, num total de onze, são as seguintes:

- **BR** - Betão de referência, com classe de resistência C25/30 (comummente utilizada no sector construtivo);
- **B100** - Betão com 100% de AGRB sem adjuvantes;
- **Bx** - Betão com x% de AGRB sem adjuvantes: com taxas de substituição de 10, 20, 30, 40 e 50%;
- **B100SPx** - Betão com 100% de AGRB com SP: com quantidades introduzidas de 0,5, 1, 1,5 e 2% da dosagem de cimento.

Devem ser mantidas inalteradas algumas características com o intuito de obter uma correcta comparação entre as várias composições de betão em estudo, das quais se destacam:

- trabalhabilidade;
- dosagem de cimento;
- curva granulométrica dos AR e AP.

Além destes aspectos, é também objectivo do projecto a execução de estruturas de dois pisos de betão armado à escala real. A realização de ensaios nestas estruturas constitui a componente mais inovadora do projecto, uma vez que até à data não há quaisquer estudos sobre ensaios de estruturas à escala real produzidas com betões com AR. Estes ensaios incluíram ensaios de caracterização do betão *in situ*, ensaios não destrutivos de caracterização dinâmica das estruturas e ensaios de carga horizontal e vertical, o primeiro dos quais destrutivo.

Os ensaios de caracterização do betão nas estruturas são alvo de análise nesta dissertação. Os restantes ensaios a realizar nas estruturas, bem como as opções de dimensionamento das mesmas, serão abordados na dissertação do aluno João Nuno Noronha Ramos Vigário Pacheco.

Da parte do grupo Opway, os objectivos do presente projecto são:

- eliminar a deposição em aterro de resíduos resultantes da produção de artefactos em betão;
- reduzir custos associados à deposição em aterro e à aquisição de matérias-primas.
- reduzir o consumo de matérias-primas (agregados) nas unidades produtoras de artefactos de betão;
- ganhar conhecimento para poder incorporar os agregados reciclados quer na indústria de pré-fabricação de betão, quer em estruturas betonadas *in situ*;
- diminuir o impacto ambiental das actividades a nível da pré-fabricação e da construção *in situ*.

1.3. Metodologia e organização da dissertação

A primeira etapa da realização desta dissertação correspondeu a uma pesquisa bibliográfica, nacional e internacional, de modo a obter conhecimentos sobre o tema e sensibilidade na análise dos resultados, bem como adquirir o conhecimento necessário para efectuar uma correcta planificação e execução dos ensaios a realizar no âmbito do trabalho experimental.

Seguiu-se a estruturação do plano de ensaios, com base nas normas e especificações de agregados e betão estrutural. Para além dos vários ensaios a serem realizados, fazem parte integrante deste plano a definição das volumetrias dos materiais, dos meios necessários à sua execução e da cronologia das betonagens.

Definidos os ensaios a realizar e as quantidades de materiais necessárias, procedeu-se à produção dos AR (leia-se

demolição e britagem dos elementos de betão pré-fabricados) a incorporar nas diversas amassaduras. Seguidamente, procedeu-se à caracterização dos AP e AR através de vários ensaios, uma vez que os agregados têm influência tanto no processo de composição dos betões como no seu desempenho.

A fase seguinte correspondeu à realização dos ensaios ao betão, envolvendo a preparação dos materiais, a formulação e produção dos vários betões e a recolha de resultados. Esta etapa revela-se de extrema importância uma vez que dela dependem a qualidade e viabilidade dos resultados. Tanto esta fase como a anterior tiveram lugar no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

Em simultâneo com a fase anterior, decorreram os ensaios nas estruturas, as quais foram construídas no estaleiro do grupo Opway localizado em Taipadas, no distrito de Setúbal.

Durante todas as etapas, procurou-se efectuar, assim que possível, o tratamento e análise dos resultados obtidos, os quais foram alvo de comparação com outras campanhas experimentais.

Todo este trabalho culminou na redacção da dissertação, compilando todas as informações, análises, discussões e conclusões obtidas. Deste modo, a presente dissertação é composta pelos seguintes capítulos, para além do actual:

- **capítulo 2** - este capítulo, resulta do levantamento do estado da arte, a nível nacional e internacional, sobre a utilização de AGRB no fabrico de novos betões, com ênfase em agregados obtidos a partir de elementos pré-fabricados; este capítulo contém a apresentação, descrição e análise dos resultados registados em diferentes investigações desenvolvidas neste sentido;
- **capítulo 3** - neste capítulo, é realizada uma descrição da campanha experimental da presente investigação, descrevendo o processo de obtenção dos AGRB, as normas e procedimentos referentes aos vários ensaios realizados nos agregados e betões e a formulação e produção dos betões;
- **capítulo 4** - este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3 e à sua análise e discussão, através da explicação de cada um dos fenómenos verificados e do estabelecimento de correlações entre os diversos parâmetros, pretendendo-se extrair ilações sobre a influência dos AGRB no desempenho do betão, assim como o efeito de um SP num betão com substituição da totalidade da fracção grossa dos agregados; são também comparados os resultados alcançados com os recolhidos no estado da arte;
- **capítulo 5** - por último, no capítulo 5, é apresentada uma conclusão geral da dissertação, principalmente com base nos resultados obtidos no capítulo 4; são ainda feitas propostas para desenvolvimentos futuros na mesma área;
- **bibliografia e anexos.**

Nos capítulos 2 e 4, procurou-se determinar os coeficientes de correlação de Pearson (R^2), com o intuito de avaliar qualitativamente a aproximação estatística das variáveis em questão. Deste modo, e com base em investigações realizadas anteriormente no IST, estabelece-se a seguinte escala de avaliação de correlações:

- **R^2 até 0,5** - correlação fraca;
- **R^2 entre 0,5 e 0,6** - correlação pouco satisfatória;
- **R^2 entre 0,6 e 0,7** - correlação razoável;
- **R^2 entre 0,7 e 0,8** - correlação satisfatória;
- **R^2 entre 0,8 e 0,9** - correlação boa;
- **R^2 entre 0,9 e 1** - correlação excelente;

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

O presente capítulo tem como principal objectivo apresentar de forma sucinta os resultados obtidos em outras investigações laboratoriais sobre AGR, com especial ênfase nos AGRB e na sua incorporação em betões. Serão abordados os aspectos com maior relevância para a realização da actividade experimental e para posterior análise e discussão dos resultados obtidos, possibilitando-se antecipar tendências dos resultados dos ensaios.

Em primeiro lugar, apresenta-se as principais campanhas desenvolvidas no âmbito do presente tema. Posteriormente, analisa-se as diferenças existentes nas propriedades dos AR relativamente aos AP, seguidas do desempenho mecânico e de durabilidade apresentado pelos BAGRB e respectiva comparação com o BR.

2.2. Descrição das principais campanhas experimentais

Apresenta-se, neste subcapítulo, as campanhas em que foram utilizados AGR provenientes de resíduos de betão gerados pela indústria de pré-fabricação (Limbachiya *et al.*, 2000; Gonçalves *et al.* (2004); Matias e Brito (2005); Malesev *et al.* (2010); Rao *et al.* (2011)). Além destas, e uma vez que as mesmas são escassas (principalmente ao nível das propriedades de durabilidade do betão), analisou-se também a investigação de Kou e Poon (2012). Procurou-se também analisar investigações em que se manteve a resistência à compressão igual entre os BAGRB e o BR (Limbachiya *et al.*, 2000; Levy, 2001).

O estudo da influência dos AR na produção de betões de elevado desempenho foi abordado por Limbachiya *et al.* (2000). Nesta campanha, são utilizados AR provenientes da britagem de elementos de betão pré-fabricados em duas granulometrias diferentes da fracção grossa (5/10 mm e 10/20 mm). Os autores referem que esta escolha recaiu sobre estes elementos devido à sua existência em grandes quantidades e ao facto de as suas características mecânicas serem adequadas para a produção de betões de elevado desempenho. São apresentadas, na Tabela 2.1, as composições dos três BR produzidos, sendo as mesmas alteradas para os BAGRB de modo a estes atingirem as mesmas resistências (o que é explicado no capítulo correspondente à resistência à compressão).

Tabela 2.1 - Composições dos BR de Limbachiya *et al.* (2000)

Resistência pretendida (MPa)	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	AG (kg/m ³)		AF (kg/m ³)	Superplastificante (% da dosagem de cimento)
			5-10 mm	10-20 mm		
50	370	165	405	810	650	0,6
60	460	165	405	810	575	0,6
70	560	165	405	810	495	0,7

Na campanha experimental de Gonçalves *et al.* (2004), foram analisados BAGRB para várias quantidades de cimento e percentagens de AR. Os ensaios alvos desta campanha foram respeitantes à avaliação da durabilidade do betão. A Tabela 2.2 contém as composições dos vários betões analisados.

Os AR foram provenientes de cubos de betão utilizados previamente no ensaio de resistência à compressão. Estes não foram produzidos com o propósito de serem utilizados neste estudo, tendo sido oriundos de várias fontes diferentes. A resistência dos cubos variou entre 35 e 45 MPa.

Tabela 2.2 - Composição dos betões (1 m³) ensaiados no estudo de Gonçalves *et al.* (2004)

Materiais	REF	REC	REF	REC	REC	REC	REF	REF
	250	250	350	350,25%	350,50%	350	450	450
% de substituição	0	100	0	25	50	100	0	100
AGRB 2 (kg)	-	656	-	163	326	653	-	660
AGRB 1 (kg)	-	365	-	91	181	363	-	397
AGP 2 (kg)	426	-	424	318	212	-	428	-
AGP 1 (kg)	728	-	724	543	362	-	732	-
AFP (kg)	795	795	696	696	696	696	596	596
Cimento (kg)	250	250	350	350	350	350	450	450
Água total (l)	166	215	173	185	197	222	172	222
Plastificante (l)	2,5	1,3	3,5	3,5	3,5	2,5	4,5	3,6
a/c efectiva	0,6	0,6	0,45	0,45	0,45	0,45	0,35	0,35

A investigação de Malesev *et al.* (2010) centrou-se na avaliação das propriedades dos betões no estado fresco e endurecido, para várias taxas de substituição de AGP por AGRB (0, 50 e 100%). Os seus ensaios incidiram no desempenho mecânico dos betões, sendo também avaliada a retracção e a absorção de água. Os AR foram produzidos a partir da britagem de cubos betonados (classe C30/37), cujo destino foi o ensaio de resistência à compressão, e de pilares pré-fabricados (classe C40/50). Os autores utilizaram uma quantidade adicional de água para compensar a absorção dos AGRB, e assim, manter a trabalhabilidade dos betões. Nas Tabelas 2.3 e 2.4, são apresentadas as composições dos betões preconizadas por estes autores.

Tabela 2.3 - Composições dos betões de Malesev *et al.* (2010)

Betão	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregados (kg/m ³)	Relação água / cimento efectiva
R0		180	1857	
R50	350	199	1816	0,51
R100		217	1776	

Tabela 2.4 - Quantidades dos agregados utilizados por Malesev *et al.* (2010)

Betão	AP (kg/m ³)				AGRB (kg/m ³)		
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm	16/30 mm	4/8 mm	8/16 mm	16/30 mm
R0	612	298	390	556	0	0	0
R50	600	145	191	272	118	136	354
R100	586	0	0	0	231	266	693

Rao *et al.* (2011) investigaram a influência de diferentes quantidades de AGRB obtidos através da demolição de elementos pré-fabricados, mais precisamente uma ponte com 15 anos, sem ter estado exposta a nenhum tipo de químicos. Os autores estudaram diversas propriedades dos betões, tais como, a resistência à compressão e tracção, o módulo de elasticidade, a absorção de água, a penetração dos cloretos e a velocidade dos ultra-sons. A trabalhabilidade entre as amassaduras foi mantida constante com recurso a superplastificantes, não alterando a relação água / cimento efectiva. A Tabela 2.5 apresenta as composições dos vários betões analisados.

Tabela 2.5 - Composições dos betões de Rao *et al.* (2011)

Betão	Cimento (kg/m ³)	AF (kg/m ³)	AGP (kg/m ³)	AGRB (kg/m ³)	Relação a/c	Superplastificante (% da dosagem de cimento)
BR			1261	0		0,050
B25	401	574	911	303	0,43	0,050
B50			585	585		0,175
B100			0	1119		0,225

O estudo de Levy (2001) focou a avaliação das propriedades de betões com a incorporação separada de AR de origem cerâmica e de betão, nas fracções fina e grossa. Para cada um destes tipos de agregados, foram produzidas amassaduras com taxas de incorporação de 0, 20, 50 e 100%, das quais apenas foram analisadas neste capítulo as que possuem AGRB. Os ensaios realizados incidiram principalmente no desempenho dos betões em termos de durabilidade. O autor procurou comparar betões com a mesma resistência à compressão (20, 30 e 40 MPa).

A investigação de Kou e Poon (2012) procurou avaliar o efeito da incorporação de cinzas volantes em BAGRB, introduzidas com o objecto de minimizar o efeito deste tipo de agregados, através da substituição de parte da quantidade de cimento ou em complemento a esta. Os autores formularam vários betões com taxas de substituição de 0, 20, 50 e 100% de AGP por AGRB, sendo que apenas aquelas em que não foram introduzidas cinzas serão alvo de análise. Os agregados foram originários de uma unidade de reciclagem situada em Hong Kong, estando a sua composição na Tabela 2.6. Procurou-se manter a trabalhabilidade (abaixamento aproximado de 100 mm) em todas as amassaduras, através do uso de superplastificantes. Na Tabela 2.7, são apresentadas as composições dos betões analisadas pelos investigadores em que não foram introduzidas cinzas volantes.

Tabela 2.6 - Composição dos AGR utilizados por Kou e Poon (2012)

Materiais	Composição (%)	
	10 mm	20 mm
AP	32,8	38,9
Betão	66,2	60,1
Cerâmicos, entre outros	1	1

Tabela 2.7 - Composições dos betões de Kou e Poon (2012)

Betão	Água	Cimento	AF	AGP	AGRB
R0				1048	0
R20				840	204
R50	225	410	642	524	506
R100				0	1017

A campanha experimental de Matias e Brito (2005) teve como principal objectivo o aprofundamento dos conhecimentos ligados à reciclagem de AGRB. Estes agregados tiveram origem na demolição e britagem de lajes alveolares. Os autores utilizaram superplastificantes, aproveitando as suas características de redutores de água, como forma de minimizar o aumento da relação água / cimento devida à incorporação deste tipo de agregados. Foi também realizada uma abordagem sobre o efeito da forma dos agregados nas várias propriedades dos betões produzidos. São apresentadas, na Tabela 2.8, as amassaduras efectuadas ao longo da campanha e, na Tabela 2.9, a composição do betão resultante da formulação de Faury.

Tabela 2.8 - Amassaduras realizadas por Matias e Brito (2005)

Designação da amassadura	Volume a produzir (l)	Tipos de agregados (% em volume)	Tipo de adição
Amassadura 1.1	20	100 % de AGP alongados	-
Amassadura 1.2	20	100 % de AGP arredondados	-
Amassadura 1.3	20	100 % de AGRB alongados	Adição extra de água
Amassadura 1.4	20	100 % de AGRB arredondados	Adição extra de água
Amassadura 2.1	20	100 % de AGRB	-
Amassadura 2.2	20	100 % de AGRB	Adjuvante tipo 1
Amassadura 2.3	20	100 % de AGRB	Adjuvante tipo 2
Amassadura 2.4	20	50 % de AGRB	-
Amassadura 2.5	20	50 % de AGRB	Adjuvante tipo 1
Amassadura 2.6	20	50 % de AGRB	Adjuvante tipo 2
Amassadura 2.7	20	25 % de AGRB	-
Amassadura 2.8	20	25 % de AGRB	Adjuvante tipo 1
Amassadura 2.9	20	25 % de AGRB	Adjuvante tipo 2
Amassadura 3.1	100	100 % de AGP	-
Amassadura 3.2	100	100 % de AGRB	Adjuvante tipo 1
Amassadura 3.3	100	100 % de AGRB	Adjuvante tipo 2

Tabela 2.9 - Composição do betão utilizada por de Matias e Brito (2005)

Componente	Malha do peneiro (mm)	Necessidades totais (m ³ /m ³)
	2,38-4,76	0,080
	4,76-9,52	0,091
AG	9,52-12,7	0,042
	12,7-19	0,111
	19-25,4	0,085
AF		0,240
Cimento		0,133
Água		0,206

2.3. Propriedades dos agregados reciclados

É de conhecimento geral que o betão é um material constituído por uma mistura devidamente ponderada entre agregados, finos e grossos, cimento e água, resultante do endurecimento da pasta de cimento. Além destes elementos, podem ainda fazer parte da sua composição adjuvantes e adições, sendo a sua incorporação destinada a fins diversos.

Desde sempre se utilizaram agregados naturais, britados ou não, na formulação do betão. Mais recentemente, tem-se começado a utilizar agregados obtidos por reciclagem de materiais com o intuito de colmatar parte da grande quantidade necessária de agregados para a produção de betão, bem como reduzir a quantidade de resíduos depositados em aterros. A sua incorporação, total ou parcial, na composição de um betão leva a um desempenho inferior deste, face a um betão análogo composto exclusivamente por agregados naturais.

Este desempenho inferior pode ser justificado pelas distintas características que os agregados reciclados (AR)

possuem em relação aos agregados naturais (AP). Os AR obtidos a partir de elementos de betão (ARB) são compostos por AP e por uma pasta endurecida, constituída por cimento e finos primários, aderida a eles. Em geral, os AP (grossos e finos) constituintes dos ARB representam entre 65 a 70% do seu volume, sendo o restante pertencente à argamassa aderida (Poon *et al.*, 2004a). A presença desta pasta aderida aos agregados do betão original tem influência directa nas principais diferenças encontradas nas características dos ARB face aos AP.

É assim necessário analisar e assegurar a qualidade dos AR, em termos da forma das suas partículas, massa volúmica, absorção de água, resistência mecânica, entre outras. Estas propriedades serão discutidas nos parágrafos seguintes.

2.3.1. Massa volúmica e baridade

A massa volúmica é a relação entre a massa de um corpo e o seu volume, sendo uma das propriedades que melhor representa a qualidade dos agregados. Aplicada aos agregados, é referente à massa volúmica das partículas individuais. A baridade de um agregado é definida como a massa por unidade de volume do mesmo contida num recipiente, sendo que este volume inclui os espaços entre as partículas do agregado e entre as partículas e o recipiente. Esta última propriedade depende do grau de compactação, da percentagem com que ocorrem as várias dimensões das partículas e da forma destas (Coutinho, 1988).

Podem ser considerados vários tipos de massa volúmica. Se as partículas dos agregados estão saturadas e têm a superfície saturada seca (ρ_{ss}), o quociente da sua massa pelo volume absoluto do material mais o de todos os seus poros (volume exterior das partículas) é a massa volúmica dos agregados saturados com a superfície seca. A massa volúmica das partículas secas (ρ_{rd}) é a relação entre a massa do material seco e a soma dos seus volumes exteriores. Quanto à relação entre a massa do material seco e o volume absoluto do material mais o dos poros deste nos quais a água não penetrou ao fim do tempo de imersão, a mesma é correspondente à massa volúmica do material impermeável (ρ_a) das partículas (Coutinho, 1988).

Geralmente, os AR apresentam uma massa volúmica menor do que os AP. Esta diminuição ocorre em função das características das suas matérias-primas, em particular a pasta de cimento aderida aos mesmos, uma vez que são menos densas do que os AP.

Segundo Bazuco (1999), referido por Rocha e Resende (2004), a massa volúmica dos AR pode variar de acordo com a sua origem e granulometria das suas partículas. O investigador obteve valores da massa volúmica dos AR inferiores em 5 a 10% aos dos AP.

Larrañaga (2004) afirma que a massa volúmica dos ARB depende da resistência do betão original e do tamanho das partículas, sendo proporcional a ambos os parâmetros. O autor refere ainda que a mesma depende também do processo de britagem.

Poon *et al.* (2004a) mencionam que AR provenientes de betões de elevado desempenho, que são formulados com baixa relação a/c e, por vezes, com presença de adições pozolánicas como a sílica de fumo, possuem maior massa volúmica e são menos porosos do que AR originados pela reciclagem de betões de média resistência (com relações a/c superiores).

Dessy *et al.* (1998), citado por Leite (2001), estudaram a massa volúmica de ARB para as diferentes granulometrias dos mesmos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.10, sendo inferiores aos que normalmente se encontra para AP da mesma dimensão. De acordo com os autores, a diminuição da massa volúmica para as fracções mais finas ocorre devido à maior quantidade de pasta de cimento do betão original existente nesta fracção. A mesma conclusão foi obtida por Malesev *et al.* (2010).

Juan e Gutiérrez (2009) concluíram, ao analisar quinze amostras de AGR provenientes de uma unidade de reciclagem de betão, que a argamassa aderida aos AR tem influência na massa volúmica dos mesmos. Por outras palavras, a massa volúmica dos agregados é tanto maior quanto menor for a quantidade de pasta de cimento envolvente aos agregados.

Tabela 2.10 - Massa volúmica de ARB, consoante a sua gama granulométrica (Leite, 2001, citando Dessy *et al.*, 1998; Malesev *et al.*, 2010)

Autor	Fracção granulométrica (mm)	ρ_{rd} (kg/dm ³)	ρ_{sss} (kg/dm ³)
Dessy <i>et al.</i> (1998)	0 - 4	2,214	2,394
	4 - 7	2,238	2,361
	7 - 16	2,335	2,453
Malesev <i>et al.</i> (2010)	4 - 8	-	2,346
	8 - 16	-	2,458
	16 - 31,5	-	2,489

Na Tabela 2.11, é exposto o resumo do levantamento bibliográfico realizado, relativamente às massas volúmicas dos agregados e à sua baridade (ρ_b). Conclui-se evidentemente que os AGRB possuem menores massas volúmicas e menor baridade, sendo que os resultados correspondentes a estes agregados apresentam maior dispersão de valores.

Tabela 2.11 - Massas volúmicas e baridade (levantamento bibliográfico)

Autor	Tipo de agregado	ρ_a (kg/dm ³)	ρ_{sss} (kg/dm ³)	ρ_{rd} (kg/dm ³)	ρ_b (kg/dm ³)	
Ferreira (2007)	Brita 1	2,7	2,67	2,65	1,42	
	Brita 2	2,69	2,64	2,6	1,33	
	AGRB	2,66	2,44	2,3	1,14	
Fonseca (2009) / Amorim (2008)	Bago de arroz	2,67	2,6	2,56	1,42	
	Brita 1	2,67	2,61	2,57	1,44	
	Brita 2	2,6	2,55	2,51	1,46	
	AGRB	2,69	2,45	2,31	1,17	
Gomes (2007)	Brita 1	2,62	2,59	2,57	1,53	
	Brita 2	2,61	2,57	2,53	1,53	
	AGRB	2,66	2,53	2,45	1,3	
Juan e Gutiérrez (2009)	AGRB: 4 - 8 mm	-	2,3	2,09	-	
	AGRB: 8 - 16 mm	-	2,35	2,18	-	
Larrañaga (2004)	AGP: 4 - 10 mm	2,71	2,66	2,63	-	
	AGP: 10 - 16 mm	2,72	2,68	2,66	-	
	AGP: 16 - 25 mm	2,71	2,68	2,66	-	
	AGRB: 4 - 10 mm	2,59	2,42	2,31	-	
	AGRB: 10 - 16 mm	2,59	2,43	2,33	-	
	AGRB: 16 - 25 mm	2,6	2,45	2,36	-	
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	AGP: 5 - 10 mm	-	2,6	-	1,36	
	AGP: 10 - 20 mm	-	2,6	-	1,36	
	AGRB: 5 - 10 mm	-	2,4	-	1,17	
	AGRB: 10 - 20 mm	-	2,41	-	1,21	
Matias e Brito (2005)	AGP	2,69	2,65	2,63	1,42 / 1,43	
	AGRB	2,61	2,45	2,36	1,25 / 1,26	
Young e Teo (2009)	AGP	2,63	2,56	2,55	1,47	
	AGRB	2,3	2,14	2,09	1,33	
Média	Desvio-padrão	AGP	2,67	2,62	2,59	1,43
		0,04	0,04	0,05	0,07	
Média	Desvio-padrão	AGRB	2,59	2,41	2,31	1,22
		0,12	0,1	0,1	0,08	

2.3.2. Absorção de água

A absorção de água é uma das principais propriedades que são distintas entre os agregados naturais e reciclados, tendo influência nas características do betão no estado fresco e endurecido. Para os primeiros, a taxa de absorção de água não tem relevância, uma vez que este tipo de agregados possui pouca porosidade. Pelo contrário, os AR apresentam uma maior capacidade de absorção de água, possuindo a sua avaliação elevada importância. Assim, no caso dos AR, esta propriedade deve ser conhecida antes da utilização dos mesmos na produção de novos betões de modo a controlar as suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Sendo os ARB compostos por AP e argamassa aderida entre eles, as suas propriedades físicas dependem tanto da qualidade como da quantidade desta última. A elevada porosidade da pasta de cimento aderida às partículas

recicladas traduz-se numa absorção de água por parte dos ARB substancialmente superior à dos AP, que é tanto maior quanto mais porosos forem os ARB.

Hansen e Narud (1983), citados por Leite (2001), mencionam que manter a uniformidade na produção de BAR é difícil, pois os AR possuem taxas de absorção sempre superiores às apresentadas pelos AP, e esta taxa ou o teor de água existente nos agregados podem variar durante a produção dos betões.

Larrañaga (2004) encontrou valores de absorção entre 4 e 5% para os AGRB analisados na campanha experimental que desenvolveu. Estes resultados contrastam com a capacidade de absorção obtida para AP, que foi abaixo de 1%. O investigador refere que a absorção de água dos ARB depende do tamanho das suas partículas, da densidade e da quantidade de pasta de cimento aderida às mesmas. A taxa de absorção diminui com os dois primeiros factores, isto é, agregados de maior dimensão e com maior densidade possuem menor capacidade de absorver água. Pelo contrário, com a quantidade de argamassa aderida, a relação é inversa. O autor baseou-se, para fundamentar estes factos, nos resultados obtidos por Hansen e Narud (1983) para várias fontes de AGRB (com diferentes relações a/c, e consequentemente resistências distintas). Pela análise dos referidos resultados (Tabela 2.12), conclui-se que a capacidade de absorção é independente da resistência do betão de origem.

Tabela 2.12 - Propriedades de AP e AR de acordo com Hansen e Narud (1983) (Larrañaga, 2004)

Tipo de agregado	Fracção granulométrica (mm)	ρ_{sss} (kg/dm ³)	Δ LA (%)	Pasta de cimento aderida (%)	Absorção de água, 24 h (%)
AGP	4 - 8	2500	25,9	0	3,7
	8 - 16	2620	22,7	0	1,8
	16 - 32	2610	18,8	0	0,8
AGRB (a/c = 0,40)	4 - 8	2340	30,1	58	8,5
	8 - 16	2450	26,7	38	5
	16 - 32	2490	22,4	35	3,8
AGRB (a/c = 0,70)	4 - 8	2350	32,6	64	8,7
	8 - 16	2440	29,2	39	5,4
	16 - 32	2480	25,4	28	4
AGRB (a/c = 1,20)	4 - 8	2340	41,4	61	8,7
	8 - 16	2420	37	39	5,7
	16 - 32	2490	31,5	25	3,7

Angulo (2005) refere que, tal como se observa na Figura 2.1, existe uma dependência entre a absorção de água dos agregados e a sua massa volúmica aparente. O autor concluiu que, quanto maior for a baridade, menor será a absorção de água. A campanha experimental de Juan e Gutiérrez (2009) confirma este facto. Estes autores obtiveram, através da análise de variadas amostras de AGRB, uma correlação (R^2) de 0,97 para a relação entre a massa volúmica dos AR secos e a taxa de absorção de água às 24 horas dos mesmos (Figura 2.2), indiciando uma forte dependência entre estas duas propriedades. Para semelhante relação, mas considerando a massa volúmica saturada com superfície seca, a correlação obtida foi de 0,83.

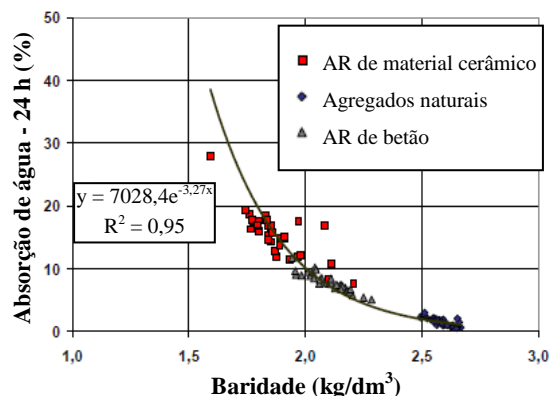


Figura 2.1 - Correlação entre as propriedades absorção de água e baridade (Angulo, 2005)

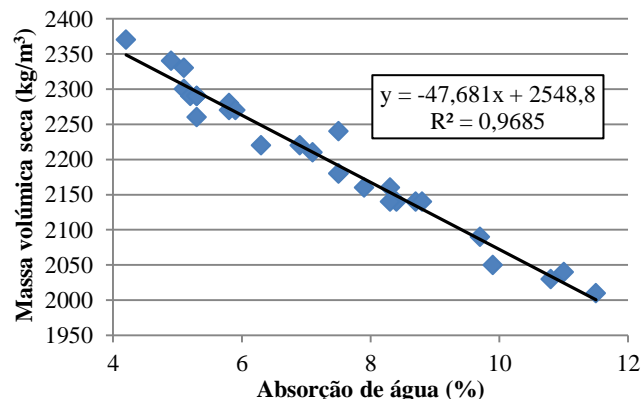


Figura 2.2 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água dos AGRB (adaptado de Juan e Gutiérrez, 2009)

Maultzsch e Mellmann (1998), citados por Rocha e Resende (2004), avaliaram a absorção de AR com diversas

granulometrias, tendo obtido valores entre 4 e 10%. Os mesmos autores concluíram que, após 10 minutos de imersão em água, os agregados absorvem cerca de 70 a 95% do total de água absorvida no final do ensaio (às 24 horas).

No estudo realizado por Bazuco (1999) com AGRB, reportado por Leite (2001), a taxa de absorção média, medida em 24 horas, foi de 8,45% e foi também observado que quase toda água é absorvida durante os primeiros 30 minutos de contacto dos agregados com a água.

Sabendo o potencial de absorção dos AR no tempo correspondente à duração da amassadura do betão, é possível determinar uma quantidade extra de água a adicionar na mesma, com o intuito de evitar que ocorram alterações na relação a/c.

Ferreira (2007) e Fonseca (2009) obtiveram evoluções da absorção de água ao longo do tempo, para AGRB, em tudo idênticas entre si. Como se observa na Figura 2.3, cerca de 70% da absorção potencial de água deste tipo de agregados ocorre no primeiro minuto, sendo atingido o valor de 90% ao fim de 5 minutos. Após decorrido este tempo de ensaio, o processo de absorção torna-se mais lento e com evoluções pouco significativas.

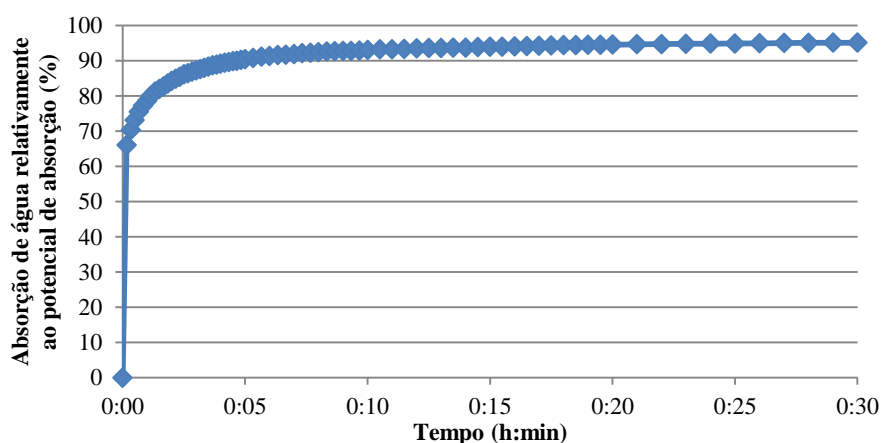


Figura 2.3 - Evolução da absorção de água ao longo do tempo pelos AGRB (Fonseca, 2009)

No entanto, os resultados de Leite (2001), que estudou a evolução da absorção de água para AGR e AFR, foram diferentes. Consta-se, pela Figura 2.4, que, aos 30 minutos, os agregados apenas tinham absorvido pouco mais de 50% da massa total de água. A absorção de água apresentou crescimento constante desde os dois minutos de ensaio. A autora defende que compensar apenas parcialmente a taxa de absorção dos AR pode ser considerado como suficiente, pois não há assim risco de diminuição excessiva da relação a/c das misturas devido à absorção, nem risco de deixar as misturas muito fluidas.

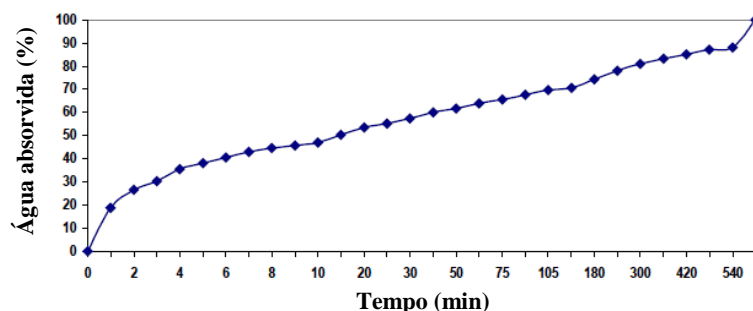


Figura 2.4 - Evolução da absorção de água de AGR (Leite, 2001)

A Tabela 2.13 reúne o levantamento bibliográfico realizado, relativamente à capacidade de absorção de água por parte dos AGP e AGRB. São apresentados, na mesma Tabela, a média e o desvio-padrão obtidos com os valores resultantes do levantamento bibliográfico. Conclui-se que os AGRB possuem elevada capacidade de absorção, sendo que os resultados correspondentes a estes agregados apresentam maior variabilidade.

Tabela 2.13 - Absorção de água (levantamento bibliográfico)

Autor	Tipo de agregado	Absorção de água, 24 h (%)
Ferreira (2007)	Brita 1	0,7
	Brita 2	1,2
	AGRB	5,8
Fonseca (2009) / Amorim (2008)	Bago de arroz	1,7
	Brita 1	1,5
	Brita 2	1,3
	AGRB	6,1
Gomes (2007)	Brita 1	2,2
	Brita 2	2,3
	AGRB	8,5
Juan e Gutiérrez (2009)	AGRB: 4 - 8 mm	9,7
	AGRB: 8 - 16 mm	7,5
Kou e Poon (2012)	AGP: 2,25 - 10 mm	1,1
	AGP: 5 - 20 mm	1,1
	AGRB: 2,25 - 10 mm	4,3
	AGRB: 5 - 20 mm	3,5
Larrañaga (2004)	AGP: 4 - 10 mm	1,1
	AGP: 10 - 16 mm	0,9
	AGP: 16 - 25 mm	0,7
	AGRB: 4 - 10 mm	4,7
	AGRB: 10 - 16 mm	4,3
	AGRB: 16 - 25 mm	4,3
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	AGP: 5 - 10 mm	2,5
	AGP: 10 - 20 mm	2,5
	AGRB: 5 - 10 mm	5,2
	AGRB: 10 - 20 mm	4,9
Rao <i>et al.</i> (2011)	AGP	1,1
	AGRB	3,9
Média		1,5
Desvio-padrão	AGP	0,6
Média		5,6
Desvio-padrão	AGRB	1,9

2.3.3. Forma das partículas

A forma das partículas exerce uma influência significativa nas propriedades do betão, principalmente na trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e todas as propriedades que dependem da quantidade de água de amassadura (Coutinho, 1988). De uma maneira geral, sabe-se que as partículas indesejáveis são as que apresentam uma forma alongada e lamelar, sendo preferíveis para o fabrico de betão partículas de elevada esfericidade e angulosas.

Comparando um agregado rolado com um britado, conclui-se que um betão produzido com agregados rolados apresenta uma maior trabalhabilidade e melhor arranjo das partículas. Isto deve-se ao facto de os agregados rolados possuírem faces arredondadas, ao contrário do que acontece com os agregados britados que têm faces planas e arestas vivas, resultando num ângulo de atrito interno menor nos betões produzidos com agregados rolados. No entanto, os betões produzidos com agregados britados apresentam uma resistência superior à dos betões fabricados com agregados rolados, para as mesmas quantidades dos seus constituintes, o que é justificado pela rugosidade da superfície dos agregados que contribui para uma melhor aderência entre estes e a pasta de cimento (Coutinho, 1988).

A procedência dos resíduos de construção destinados à produção de AR deve ser considerada um factor relevante, uma vez que, dependendo da sua origem, ao passarem por um determinado britador, estes resíduos dão origem a agregados com formas totalmente diferentes entre si (Levy, 2001). O autor refere que os AR utilizados na produção de betão devem ser seleccionados em função da sua origem, por exemplo provenientes de betão ou alvenaria, evitando-se a mistura, uma vez que possuem características diferentes.

Barra (1996), referida por Leite (2001), evidenciou a forma mais angular e irregular, porém menos lamelar, dos ARB relativamente aos AP usados no seu estudo.

Rocha e Resende (2004) citam Rashwan e Abourizk (1997) quando estes referem que, além da rugosidade, os ARB depois de britados, tendem a formas mais angulares, com valores de superfície específica maiores do que os AP, que possuem superfícies mais lisas e arredondadas.

Kikuchi *et al.* (1998), citados também por Rocha e Resende (2004), realizaram estudos com AGR provenientes de betões com níveis de resistência distintos e verificaram que as partículas dos AR tendiam a ser mais arredondadas à medida que a resistência do betão de origem diminuía.

A textura mais rugosa e a maior angulosidade dos ARB colaboram com a melhoria da aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Este facto, conjugado com a maior porosidade dos AR, e consequente elevada absorção de água, pode proporcionar uma maior quantidade de produtos de hidratação nos poros dos agregados, permitindo um maior adensamento da zona de transição, o que pode vir a melhorar o desempenho final dos betões (Leite, 2001). Como se verifica na Figura 2.5, no BR é possível distinguir um perfeito destacamento entre a pasta e o agregado, enquanto no betão com ARB a matriz e a zona de transição se confundem (análise microscópica realizada por Leite, 2001).

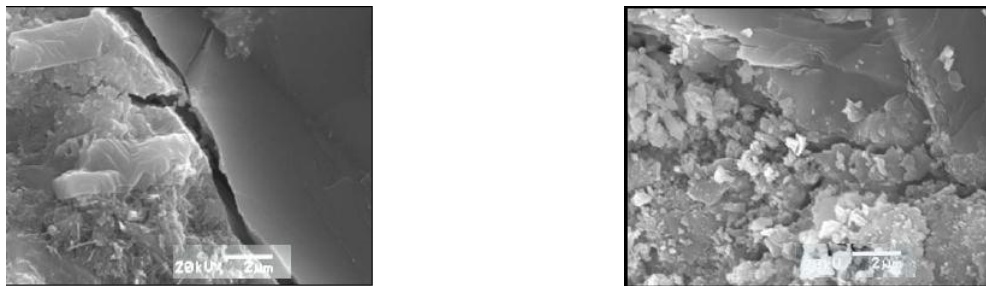


Figura 2.5 - Ligação agregado/pasta de cimento (zoom de 8000x): esquerda - AP; direita - ARB (Leite, 2011)

De modo a entender de que forma se processa a ligação entre os ARB e a pasta de cimento, Poon *et al.* (2004a) realizaram uma análise da mesma através de *scanner* microscópico electrónico. Os autores referem, por observação da Figura 2.6, que a zona de interacção entre os dois componentes do betão é mais densa nos ARB do que nos AP. No entanto, apenas no caso dos agregados provenientes da reciclagem de betões de elevado desempenho (HPC) esta ocorrência é realmente observada, sendo o volume total de poros existentes na ligação agregado / pasta de cimento bastante inferior aos demais casos analisados. Na zona de transição deste tipo de betão, ocorreu a formação de produtos de hidratação na superfície rugosa e porosa dos ARB, o que pode ser indicador de uma melhor aderência entre os agregados e a pasta. Com o intuito de confirmar este facto, os autores realizaram o ensaio de resistência à compressão, concluindo que, ao fim de 90 dias, o BR e o betão HPC apresentaram resistências semelhantes.

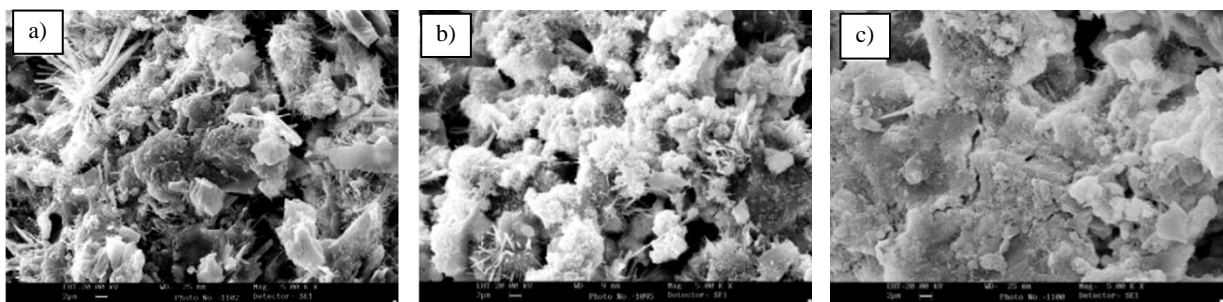


Figura 2.6 - Morfologia da zona da ligação agregado / pasta de cimento (zoom de 5000x): a - AP; b - ARB; c - ARB (HPC) (Poon *et al.*, 2004a)

A forma das partículas pode ser aferida recorrendo a variados ensaios, dos quais se destacam a determinação do índice de forma, índice volumétrico, índice de angulosidade e índice de achatamento.

Fonseca (2009) efectuou o ensaio de determinação do índice de forma para AGRB e AGP. Comparando os resultados alcançados, os AGRB são aqueles que apresentam maior índice de forma, o que se deve à sua forma mais alongada. O autor realça também que os AGRB utilizados na sua campanha sofreram uma trituração diferente

(britadeira de maxilas) à dos seus homólogos naturais (trituração industrial, com recurso a britagem primária e secundária). Os seus resultados e os obtidos por Larrañaga (2004) encontram-se expostos na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Índice de forma (levantamento bibliográfico)

Autor	Tipo de agregado	Índice de forma (%)
Fonseca (2009) / Amorim (2008)	Bago de arroz	8,6
	Brita 1	13,4
	Brita 2	11,1
	AGRB	24,3
Larrañaga (2004)	AGP: 6 - 12 mm	21
	AGP: 12 - 18 mm	24
	AGP: 18 - 25 mm	29
	AGRB: 6 - 12 mm	24
	AGRB: 12 - 18 mm	28
	AGRB: 18 - 25 mm	31

2.3.4. Resistência mecânica

O ensaio de desgaste de Los Angeles é utilizado para avaliar a resistência mecânica dos agregados grossos, naturais e reciclados, a eventual degradação dos mesmos devido aos efeitos da abrasão e do impacto.

Coutinho (1988) refere que, em geral, a resistência do betão só depende da pasta de cimento, uma vez que a tensão de rotura das rochas que originam AP é superior a 60 a 70 MPa. Deste modo, à medida que a dosagem de cimento do betão aumenta, a sua tensão de rotura tende para um valor constante, que depende da tensão de rotura das referidas rochas.

No que diz respeito aos AR, o valor do desgaste de Los Angeles está relacionado com a resistência do betão de origem, da quantidade de argamassa aderida e da qualidade dos AP presentes nos mesmos (Larrañaga, 2004).

Os resultados obtidos por Tabsh e Abdelfatah (2009) demonstram que os AGRB têm, em média, um desgaste 30% superior ao obtido pelos AP. Ao analisar a Figura 2.7, conclui-se que os agregados que perderam mais massa após o ensaio foram os AGR obtidos a partir de uma fonte de betão de resistência desconhecida e de betão produzido em laboratório com uma resistência à compressão de 30 MPa. Quer isto dizer que a resistência do betão de origem afecta a resistência mecânica dos agregados originados pelo processo da sua reciclagem. Por outras palavras, quanto maior for a resistência à compressão do betão reciclado, menor será a perda de massa por parte dos AR.

Barra (1996), citada por Leite (2001), estudou a abrasão em AGR provenientes da reciclagem de betão e de cerâmicos separadamente, encontrando valores variáveis entre 20 e 30% de perda por desgaste.

A Tabela 2.15, resultante do levantamento bibliográfico de Larrañaga (2004), apresenta o desgaste de Los Angeles para dois tipos de AGRB, provenientes de origens com resistências diferentes (16 e 40 MPa). Da sua análise, conclui-se, uma vez mais, que a resistência do betão de origem dos ARB pode ser determinante nesta propriedade.

Tabela 2.15 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles de dois tipos de AGRB (adaptado de Larrañaga, 2004)

Autor	Fracção granulométrica (mm)	Δ LA, 40 MPa (%)	Δ LA, 16 MPa (%)	Diferença (%)
Hansen e Narud (1983)	4 - 8	30,1	41,4	37,5
	8 - 16	26,7	37	38,6
	16 - 32	22,4	31,5	40,6
Hasaba (1981)	5 - 25	23	24,6	7,0
Yoshikane (2000)	5 - 13	20,1	28,7	42,8

Na sua campanha experimental, Larrañaga (2004) obteve um valor de perda por abrasão de 19,8% para AP. Por sua vez, os AGRB analisados tiveram um desgaste de 33,5%, o que é correspondente a um aumento de aproximadamente 70% em relação aos homólogos naturais.

Através dos resultados de Hansen e Narud (1983), reportados por Larrañaga (2004), é possível obter uma relação entre esta propriedade e a massa volúmica dos respectivos agregados (Figura 2.8). Foi obtido um coeficiente de correlação aceitável, igual a 0,66.

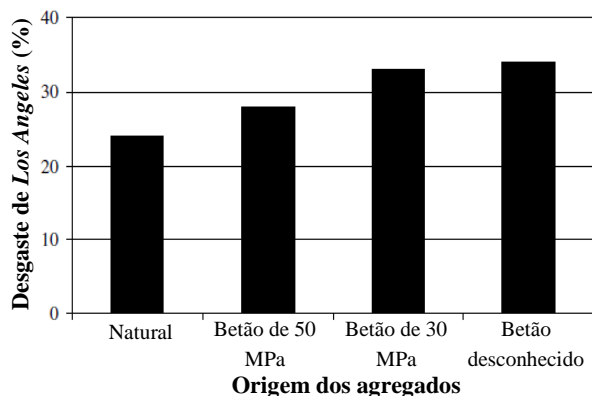


Figura 2.7 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles, para diferentes origens dos agregados (Tabsh e Abdelfatah, 2009)

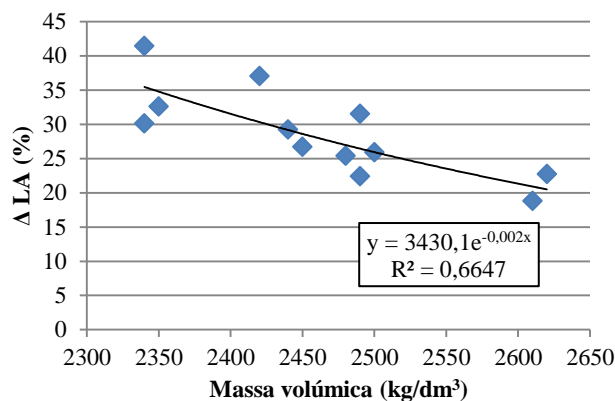


Figura 2.8 - Relação entre o desgaste de Los Angeles e a massa volúmica (adaptado de Larrañaga, 2004, citando Hansen e Narud, 1983)

O levantamento bibliográfico efectuado sobre esta propriedade dos agregados encontra-se presente na Tabela 2.16. São também apresentados a média e o desvio-padrão obtidos com os valores resultantes do levantamento bibliográfico. Conclui-se que os AGRB sofrem maior desgaste de Los Angeles, sendo que os resultados correspondentes a estes agregados apresentam maior variabilidade.

Como se conclui pelos dados apresentados, esta propriedade satisfaz, em geral, o requisito de 50% de desgaste máximo estipulado na norma LNEC E-373 (para agregados a serem utilizados na formulação de betões estruturais). Esta ilação encontra-se em conformidade com o concluído no levantamento bibliográfico realizado por Leite (2001).

Tabela 2.16 - Desgaste de Los Angeles (levantamento bibliográfico)

Autor	Tipo de agregado	Δ LA (%)
Fonseca (2009) / Amorim (2008)	Bago de arroz	28,3
	Brita 1	29,4
	Brita 2	30,7
	AGRB	42,7
Gomes (2007)	AGP	28,5
	AGRB	38
Juan e Gutiérrez (2009)	AGRB	38,9
Larrañaga (2004)	AGP	19,8
	AGRB	33,5
Malesev <i>et al.</i> (2010)	AGP: 4-8 mm	26,3
	AGP: 8-16 mm	29
	AGP: 16-31,5 mm	29,2
	AGRB: 4-8 mm	29,6
	AGRB: 8-16 mm	33,7
	AGRB: 16-31,5 mm	34
Média	AGP	27,0
Desvio-padrão		3,8
Média	AGRB	36,1
Desvio-padrão		4,2

2.4. Propriedades dos betões com agregados grossos reciclados de betão

Neste subcapítulo, descreve-se o conhecimento relativo às propriedades físicas, mecânicas e em termos de durabilidade do betão, nomeadamente as que serão alvo de ensaio. Deste modo, abordou-se o estado do conhecimento no que diz às várias propriedades com maior relevância em BAGRB no estado fresco e endurecido.

2.4.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a maior ou menor facilidade com que um betão é transportado, colocado, compactado e acabado, e também com que se desagrega ou segrega durante estas operações. Depende dos meios disponíveis para efectuar tais operações, porque um betão pode ser trabalhável com determinado equipamento e não o ser com outro

(Coutinho, 1988).

Esta propriedade condiciona fortemente o desempenho do betão, uma vez que envolve uma série de propriedades físicas, como o ângulo de atrito interno, a coesão, a viscosidade, a massa volúmica, a segregação e a exsudação (Brito, 2005). É, então, fundamental que esta característica seja mantida igual (com uma tolerância aproximadamente ± 10 mm de abaixamento no cone de Abrams) tanto na produção dos vários BAR como no BR.

O ensaio de abaixamento, através do cone de Abrams, é o ensaio mais comumente utilizado para aferir a trabalhabilidade de um betão. Neste, mede-se o grau de deformação de um tronco de cone de betão, após o molde ser retirado rapidamente.

Segundo Akroyd (1962), os seguintes factores afectam a trabalhabilidade do betão:

- angularidade da forma e textura da superfície dos agregados finos e grossos;
- quantidade de água por metro cúbico de betão;
- proporção entre os agregados grossos e finos e a as suas massas volúmicas;
- dimensão máxima dos agregados;
- capacidade de absorção de água por parte dos agregados.

Tal como se observa na Figura 2.9, os valores obtidos pelo abaixamento no cone de Abrams são influenciados pela massa volúmica dos agregados, e consequentemente pela massa volúmica do betão no estado fresco. Como a massa do betão é a única força actuante na deformação do mesmo durante o ensaio de abaixamento, são esperados abaixamentos crescentes relativamente a um aumento da massa volúmica do betão (Angulo, 2005).

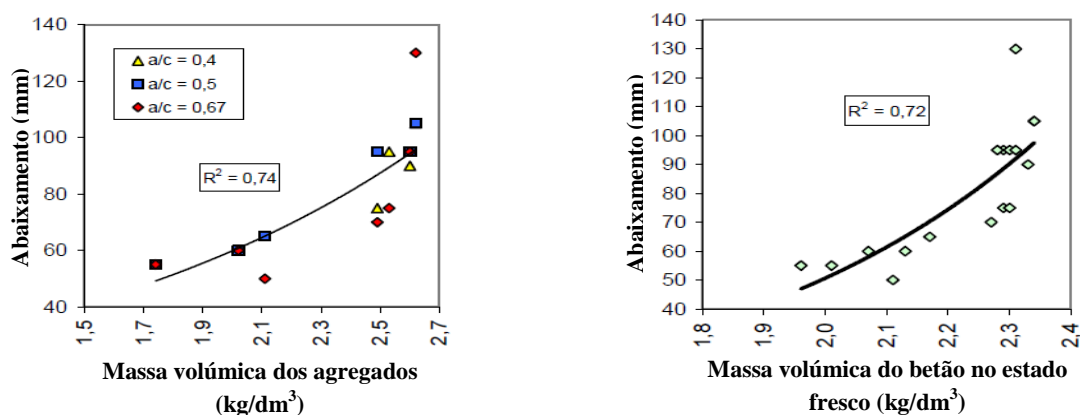


Figura 2.9 - Abaixamento medido no betão em função da massa volúmica dos seus agregados (esquerda) e da sua massa volúmica no estado fresco (direita) (Angulo, 2005)

Face à maior rugosidade e porosidade dos AR, é de prever uma redução ao nível da trabalhabilidade dos BAR. Assim, e de um modo geral, os betões produzidos AR devem apresentar uma menor trabalhabilidade do que os betões produzidos com AP, para uma mesma relação a/c e granulometria idêntica dos agregados.

Hansen e Narud (1983), citados por Leite (2001), compararam o abaixamento de BAGRB com o do BR e concluíram que os primeiros apresentaram uma trabalhabilidade inferior. A forma das partículas mais angular e a superfície mais áspera apresentada pelos AR é um dos motivos da necessidade de maior quantidade de água livre nas misturas dos betões.

Young e Teo (2009) analisaram na sua campanha experimental a trabalhabilidade de BAGRB. Foram estudadas, além do betão de controlo, três composições distintas: betão com 50% de incorporação de AGRB, betão com 100% de incorporação AGRB e uma última, também com uma taxa de 100%, em que os agregados se encontravam saturados com superfície seca (sss). Em todos os betões produzidos, foi mantida a relação a/c . O abaixamento obtido no betão com AP foi superior ao dos betões com taxas de 50% e 100% de substituição de AGP por AGRB, sendo que neste último se registou um abaixamento nulo. Esta redução do abaixamento foi causada pela elevada capacidade de absorção dos AGRB (6,4%), que absorveram água durante o processo de amassadura do betão. No entanto, no betão com AGRB saturados com superfície seca, não se registou diferença no abaixamento, concluindo-

se assim que é preferível utilizar os agregados na produção de betão nesta condição.

Assim, de forma a corrigir a menor trabalhabilidade por parte dos BAR, poder-se-ia recorrer à pré-saturação dos agregados. Outra via de ultrapassar este problema consiste na adição de água durante o processo de amassadura. Esta questão foi analisada na campanha experimental de Ferreira (2007), de acordo com o proposto por Leite (2001), da qual se concluiu que adicionar água durante a amassadura, compensando a maior absorção de água dos AGRB, é ligeiramente mais eficaz do que pré saturá-los. Semelhante conclusão foi obtida por Poon *et al.* (2004b), que referem que a utilização de agregados saturados com superfície seca tem um efeito nocivo nos BAGRB, sendo, por isso, aconselhável a utilização dos agregados quando secos ao ar.

Segundo o levantamento bibliográfico realizado por Larrañaga (2004), os betões com AGRB necessitam de uma quantidade adicional de água de 5% para obter a mesma trabalhabilidade de um betão convencional. Se os agregados finos forem também reciclados, seria necessário 15% de água adicional ao invés de 5%.

Tabsh e Abdelfatah (2009), pretendendo atingir um abaixamento de 100 mm, necessitaram de adicionar aproximadamente mais 10% de água aos BAGRB analisados (todos com 100% de incorporação de AR) comparativamente a um betão homólogo constituído somente por AP.

A utilização de superplastificantes tem também o objectivo de reduzir da água de amassadura, mantendo-se a mesma trabalhabilidade, o que, para a mesma dosagem de cimento, reduz a relação a/c e eleva as resistências mecânicas dos betões. Deste modo, com a sua utilização, consegue-se contrariar a perda de água efectiva, ou seja, aquela que realmente está disponível como água de amassadura, devido à maior absorção por parte dos AR, mantendo-se constante a água de amassadura total.

Poon *et al.* (2004b) avaliaram, através da sua campanha experimental, a trabalhabilidade obtida em BAGRB utilizando os agregados grossos em diferentes estados de humidade na produção de betão: secos ao ar, secos no forno e saturados com a superfície seca. Para as várias misturas do betão de controlo, o abaixamento obtido fixou-se entre 100 e 110 mm no instante inicial (entenda-se, imediatamente após a amassadura do betão). Nos BAGRB, esta gama de valores foi mais ampla, ou seja, verificou-se uma maior variabilidade nos resultados deste ensaio (tanto maior quanto maior a taxa de incorporação de AGRB no betão). Para os betões com agregados secos no forno, foi alcançada uma maior trabalhabilidade, sendo que no betão com uma taxa de 100% de AGR se observou uma tendência crescente no abaixamento com o decréscimo de humidade nos agregados. Os autores justificam este facto pela presença de uma quantidade de água superior neste tipo de betões (utilizada para compensar a elevada absorção de água dos AGRB). Para todos os betões com agregados saturados com superfície seca, a trabalhabilidade manteve-se constante. Deste modo, concluiu-se que o abaixamento após a amassadura é afectado pela quantidade de água livre presente na mistura (Figura 2.10).

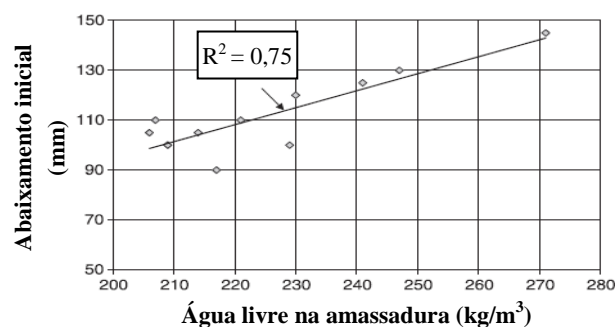


Figura 2.10 - Efeito da água livre na amassadura no abaixamento inicial dos betões (Poon *et al.*, 2004b)

Matias e Brito (2005) procuraram entender o efeito da forma das partículas grossas utilizadas no fabrico do betão na trabalhabilidade deste. Para o efeito, realizaram quatro amassaduras: duas com agregados alongados e duas com agregados de forma arredondada (para cada situação, uma amassadura corresponde a AGP e outra a AGRB). Através desta análise, foi possível verificar-se uma relação directa entre a forma dos agregados e o valor do abaixamento obtido (Figura 2.11). Observou-se que, apenas com a inclusão de partículas grossas mais arredondadas, ocorreu um incremento de cerca de 20 mm comparativamente aos agregados de forma alongada (tanto para os agregados naturais,

como para os reciclados). Contrariamente ao expectável, o abaixamento obtido para os AGP e os AGRB (com compensação de água na amassadura), para uma dada forma das suas partículas, foi semelhante.

Os autores concluíram ainda que a adição de uma quantidade extra de água na amassadura, para compensar a maior absorção dos agregados reciclados, foi efectuada com sucesso, uma vez que se obtiveram valores semelhantes de abaixamento. Com isto, a relação a/c alterou-se de 0,50 para 0,53 (correspondendo a um aumento aproximado de 6% da quantidade de água), sendo este último valor aparente, uma vez que o acréscimo de água será teoricamente absorvido. Através deste acréscimo de água, pretende-se manter constante ao longo das amassaduras a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento.

Os mesmos autores realizaram também amassaduras com incorporação de diferentes taxas de introdução de AGRB, não tendo introduzido, neste caso, uma quantidade adicional de água para prever a maior absorção de água por parte dos AR. Como se verifica na Figura 2.11, todos os BAGRB possuem menor trabalhabilidade do que o BR. Registaram-se reduções até 60% para 100% de AGRB incorporados. Para compensar este decréscimo de trabalhabilidade, os autores recorreram a plastificantes com uma dosagem até 0,5% da quantidade de cimento.

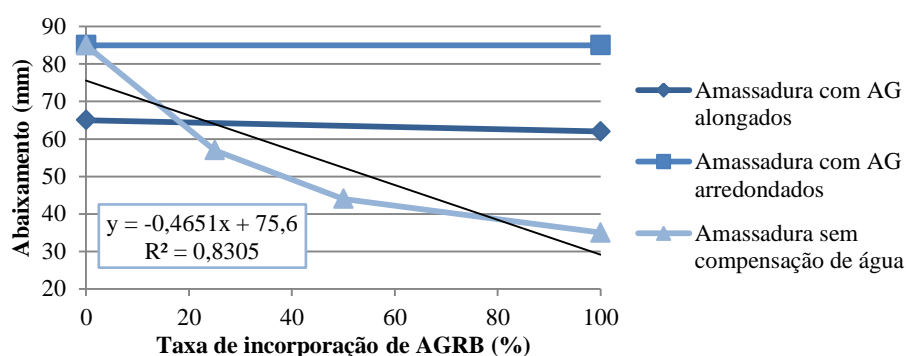


Figura 2.11 - Resultados do ensaio de abaixamento para diferentes tipos de amassaduras (Matias e Brito, 2005)

Com o intuito de manter a trabalhabilidade em todos os betões formulados, Gomes (2007) utilizou o método de compensação de água durante a amassadura do betão. O procedimento seguido para o efeito baseou-se no proposto por Leite (2001). O mesmo consiste em determinar rigorosamente a quantidade de água adicional a incorporar no interior da amassadura, correspondente à parcela da absorção de água dos agregados reciclados, sendo necessário saber qual o teor em água dos AGRB e o potencial de absorção aos 10 minutos (duração das amassaduras realizadas pelo autor). Deste modo, torna-se necessário fazer a distinção entre a relação a/c efectiva e a aparente. A primeira corresponde à que contribui para a hidratação do cimento e para a trabalhabilidade da mistura. Esta difere da relação a/c aparente ou total, que é a introduzida na mistura na totalidade, sendo esta tanto maior quanto a absorção de água dos agregados grossos. A expressão 2.1 permite determinar esta quantidade de água adicional.

$$\% \text{ Água adicional} = \text{valor absorção de água dos AGR} - \text{teor de humidade natural} \quad (2.1)$$

Os resultados do ensaio de abaixamento obtidos pelo autor são apresentados na Tabela 2.17. Constata-se que nem todos os betões tiveram o abaixamento desejado (80 ± 10 mm), não sendo verificada a perda de trabalhabilidade por parte dos BAR. O autor justifica esta situação pela aleatoriedade do processo de mistura dos agregados dentro do interior da betoneira e, sobretudo, pelo aumento da humidade relativa ambiente (grande parte das betonagens foram realizadas no inverno).

Tabela 2.17 - Resultados do ensaio de abaixamento e quantidade adicional de água nos BAGRB (Gomes, 2007)

Betão	Taxa de substituição (%)	Quantidade de água (kg/m^3)	Quantidade adicional de água (%)	Abaixamento (mm)
BR	0	192	0,0	85
B12.5B	12,5	194,5	1,3	96
B25B	25	197	2,6	72
B50B	50	202	5,2	92
B100B	100	212,3	10,6	80

2.4.2. Massa volúmica

A massa volúmica é uma propriedade intrínseca de um betão, dependendo directamente da massa volúmica dos seus elementos. Os agregados representam a maior parte do volume do betão e, como tal, a sua massa volúmica tem particular influência na massa volúmica do betão no estado fresco (Figura 2.12). Outro factor importante na definição desta característica é o grau de compactação do betão (Brito, 2005).

Deste modo, é de todo esperado que os BAR apresentem menor massa volúmica comparativamente a um betão produzido com AP, uma vez que os AR possuem, em geral, a massa volúmica inferior à dos homólogos naturais.

Levy (1997), citado por Leite (2001), afirma que pode existir uma redução de 5 a 10% na massa volúmica dos BAR em relação a um betão convencional, devida ao ar total incorporado nos primeiros, que aumenta com o teor de AR.

Leite (2001) procurou avaliar a influência da introdução de AFR (designação na figura: AMR) e AGR, para várias relações a/c, nos betões, estando os resultados alcançados na Figura 2.13. Pode ser visualizada uma redução de até 16 % da massa volúmica do betão com 100% de substituição integral dos AFP e AGP, em relação ao BR. Quanto maior o teor de substituição dos agregados e a relação a/c utilizada, maior é a redução dos resultados.

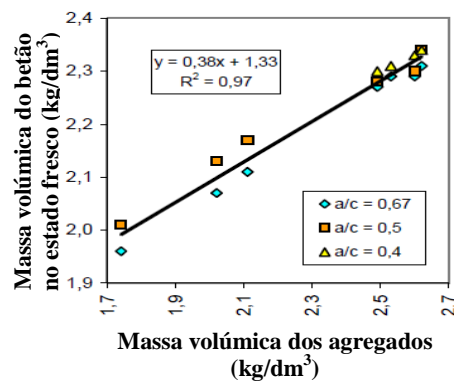


Figura 2.12 - Massa volúmica do betão no estado fresco em função da massa volúmica dos seus agregados (Angulo, 2005)

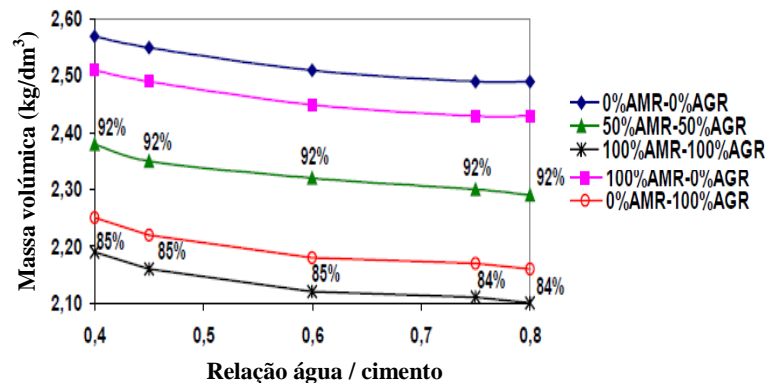


Figura 2.13 - Massa volúmica de betões com AGR e AFR, para várias relações a/c (Leite, 2001)

Fonseca (2009), Ferreira (2007) e Gomes (2007) chegaram a resultados bastante semelhantes nas suas campanhas. Foram obtidos valores entre 2230 e 2400 kg/m³ no ensaio de massa volúmica dos betões, tendo verificado uma diminuição nos BAGRB (na ordem de 4 a 5%) em comparação com os BR, o que está de acordo com a restante bibliografia consultada.

Os resultados de Malesev *et al.* (2010) confirmam a diminuição da massa volúmica do betão no estado fresco com a incorporação de AGRB, tal como se observa na Figura 2.14. A massa volúmica no betão com 100% de AGRB foi sensivelmente 3% inferior à do seu homólogo com AP. Semelhantes valores foram obtidos por Etxeberria *et al.* (2007), como se verifica na figura referida.

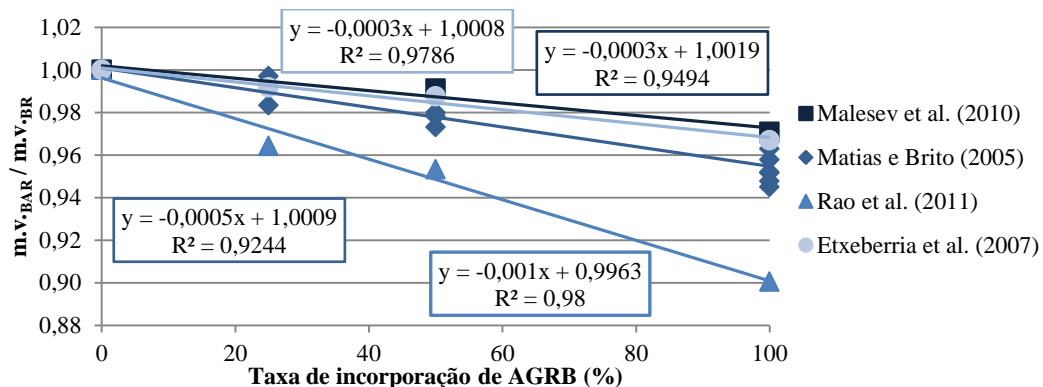


Figura 2.14 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB (levantamento bibliográfico)

Matias e Brito (2005) confirmaram a tendência das campanhas anteriores. A incorporação de agregados grossos reciclados influencia de forma directa a massa volúmica dos betões frescos, tal como se observa na Figura 2.14. A menor massa volúmica dos AGRB, quando comparados com os AGP, origina betões com menores massas volúmicas no estado fresco. Esta conclusão baseou-se no estudo da massa volúmica no estado fresco de vários betões, para uma dada percentagem de AGRB.

Os autores retiraram outras ilações deste estudo: a massa volúmica do betão produzido revelou-se um parâmetro independente da forma das partículas grossas (arredondadas ou alongadas) e a adição de superplastificantes, para compensar a maior absorção de água dos AR, não provocou alterações nesta propriedade.

A massa volúmica dos betões analisados por Rao *et al.* (2011) decresceu com o aumento de AGRB nas suas composições (Figura 2.14). Uma vez que a argamassa aderida aos AR provoca uma diminuição da massa volúmica dos agregados em relação aos AP, estes resultados eram esperados. A redução da massa volúmica foi entre 4 e 10%.

2.4.3. Resistência à compressão

Sendo o betão um material que tem como principal função resistir às tensões de compressão sem que ocorra rotura ou colapso, a resistência à compressão representa a sua característica mais importante. Uma vez que o endurecimento do betão se processa ao longo do tempo, a resistência à compressão, tal como outras características deste material, evolui também no tempo. Para caracterizar esta propriedade, considera-se que é aferida aos 28 dias de idade do betão.

Segundo Brito (2005), é de prever que o BAR e o BR correspondente apresentem resistências mecânicas semelhantes, desde que no seu fabrico seja mantida a curva granulométrica dos agregados e o betão no estado fresco tenha uma trabalhabilidade idêntica. Contudo, a substituição dos AGP por AGR pode ter influência significativa caso a classe do betão seja relativamente elevada ou os agregados grossos possuam uma resistência e massa volúmica não correntes. Mesmo não havendo praticamente influência dos AR na resistência à compressão, espera-se que os BAGR apresentem valores de ordem inferior.

Em betões com AP, densos e resistentes, esta propriedade é basicamente influenciada pela porosidade da matriz de cimento e da zona de transição. Já nos BAR a ruptura também ocorre pelos agregados e a resistência à compressão desses betões tende a ser inferior à dos convencionais (Altheman, 2002).

Larrañaga (2004), baseado nos estudos de Ravindrarajah (2000) e Gerardu e Hendricks (1985), refere que, aos 28 dias de idade, um betão com 50% de AGRB tem menos 5,4% de resistência do que o BR, aumentando esta redução para 8,9% caso sejam incorporados 100% de ARGB. Se agregados finos reciclados de betão (AFRB) forem adicionados à mistura, espera-se um decréscimo da resistência na ordem de 15%.

Di Niro *et al.* (1998), referenciados por Fonseca (2009), obtiveram uma diminuição de 20% em betões com AGR, para uma incorporação integral destes. Os autores realizaram amassaduras com várias taxas de substituição de AGP por AGR, tendo obtido um evidente declínio da resistência à compressão com o aumento da quantidade de AR. No entanto, para uma taxa de 30% de substituição, a redução foi de apenas 3%. Esta última taxa é a máxima aconselhada pelos autores para utilização de AGR em betões.

Tabsh e Abdelfatah (2009) citam Hansen e Narud (1983), referindo que estes estabeleceram uma forte relação entre a resistência dos BARB e a relação *a/c* do betão de origem, se os restantes factores forem mantidos constantes. Quando a relação *a/c* do betão de origem é a mesma ou menor do que a do BAR, a resistência deste último irá ser semelhante ou superior à do primeiro, e vice-versa.

Na sua campanha experimental, Tabsh e Abdelfatah (2009) procuraram quantificar a influência nesta propriedade de diferentes origens de AGRB. Foram analisados dois tipos de betão para os vários tipos de AR: um betão com resistência à compressão de 30 MPa (composição 1) e outro de 50 MPa (composição 2). O betão produzido com AGR de melhor qualidade (entenda-se, agregados obtidos de betão com resistência à compressão superior à dos demais)

atingiu praticamente a mesma resistência do que o seu correspondente com AP. No caso dos restantes AGR utilizados, obtidos através da reciclagem de betão produzido em laboratório com uma resistência de 30 MPa e de betão de fonte desconhecida, a resistência obtida ficou abaixo do pretendido. A resistência à compressão dos primeiros diminuiu 30 e 10% e a dos segundos 40 e 15%, para as composições 1 e 2, respectivamente. Deste modo, confirma-se que a resistência à compressão do betão é directamente influenciada pela resistência mecânica dos agregados.

Kou e Poon (2012) observaram um decréscimo de resistência com o aumento da taxa de AGRB em todas as idades do betão ensaiadas (Figura 2.15). Aos 28 dias, obtiveram reduções de 7%, 13% e 22%, para taxas de incorporação de AGRB de 20%, 50% e 100%, respectivamente. Este facto é justificado pela argamassa aderida aos AR e também pela presença de uma maior quantidade de água inicial, utilizada para compensar a absorção de água dos mesmos. Estas reduções foram as mais elevadas de entre as várias idades do betão, sendo que se atenuaram aos 90 dias. Pode ser observado o desenvolvimento, ao longo do tempo, da resistência à compressão dos vários betões na Figura 2.16. Foram obtidas evoluções semelhantes entre o BR e os betões com AGRB na sua composição.

Os autores concluíram também que a introdução de cinzas volantes numa percentagem de 25% da dosagem de cimento permite compensar a perda de resistência à compressão dos BAGRB aos 90 dias. Nas restantes idades do betão (1, 4, 7 e 28 dias), esta consequência não foi notória pelo efeito retardado das propriedades pozolânicas das cinzas.

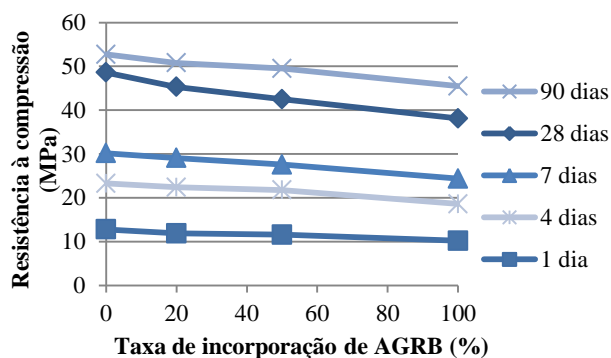


Figura 2.15 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB (Kou e Poon, 2012)

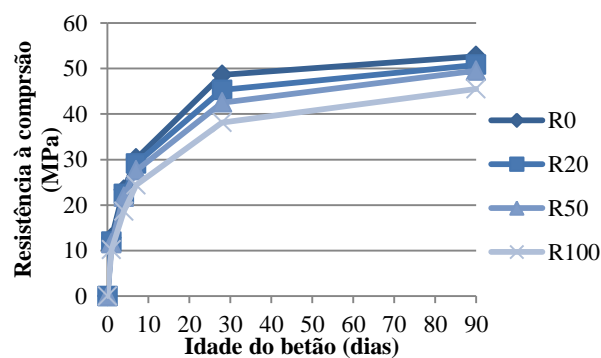


Figura 2.16 - Evolução da resistência à compressão de BAGRB ao longo do tempo (Kou e Poon, 2012)

Matias e Brito (2005) avaliaram esta propriedade para três tipos de amassaduras diferentes, cada uma correspondendo a uma fase da sua campanha experimental (Figura 2.17). Para o primeiro conjunto de amassaduras, em que o autor analisou dois BR e dois BAGRB com 100% de AR (um com agregados de forma alongada e outro arredondada), os resultados mostram uma tendência decrescente da resistência à compressão com a taxa de AGRB, mas as diferenças de resistência observadas foram ligeiras. Os autores concluíram também que a forma das partículas grossas não teve influência na resistência à compressão.

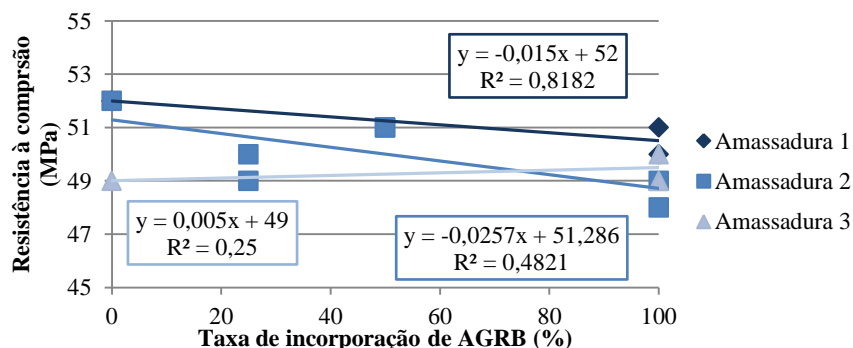


Figura 2.17 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB (Matias e Brito, 2005)

No entanto, para o terceiro tipo de amassadura, no qual os autores incorporaram plastificantes para obter a mesma trabalhabilidade entre os betões ao invés de utilizarem uma quantidade adicional de água, o resultado foi contrário (embora de forma não explícita). Analisando o segundo e o terceiro tipos de amassadura, os quais apresentam betões com a mesma composição, não se consegue definir nenhuma tendência para esta propriedade, concluindo-se

que o teor de incorporação de AGR não originou alterações significativas na resistência dos betões. Outro facto relevante foi a inexistência de incrementos nesta propriedade pela incorporação de plastificantes nos BAGRB, utilizado com o intuito de se obter semelhante trabalhabilidade à do BR.

Rao *et al.* (2011) observaram um aumento de 25 a 27% entre os 7 e os 28 dias de cura para os betões com 50 e 100% de AGRB, enquanto o BR registou um incremento de 42% (Figura 2.18). Significa isto que os BAGRB atingiram maiores resistências do que o BR nos primeiros dias de idade, possuindo no entanto uma taxa de crescimento da resistência, ao longo do tempo, inferior. Os autores afirmam que, com base no levantamento bibliográfico efectuado (Etxeberria *et al.*, 2007; Salem e Burdette, 1998), a elevada absorção de água da argamassa aderida aos AGRB e a textura rugosa destes, que proporcionam uma melhor ligação entre a nova pasta cimentícia e os AR, são os principais factores que provocam estas maiores resistências registadas nos BAGRB nos dias iniciais de cura.

Após 28 dias de idade, os BAR com 50 e 100% de AGRB não apresentaram incrementos significativos na sua resistência à compressão (até aos 90 dias de cura do betão). Por sua vez, o BR e o betão com 25% de AGRB tiveram aumentos de 12 e 8%, respectivamente. Os autores referem, citando Etxeberria *et al.* (2007), que estas conclusões são obtidas ao final de seis meses de idade dos betões. No entanto, esta conclusão difere da apresentada na campanha de Kou e Poon (2012).

Os resultados verificados aos 28 dias foram os que se observam na Figura 2.20. Rao *et al.* (2010) concluíram ainda que AGRB numa taxa até 25% podem ser incorporados na produção de novos betões. Resultados semelhantes foram obtidos por Gonçalves *et al.* (2004), como se verifica na figura referida.

Os autores procuraram relacionar a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões (Figura 2.19). Neste sentido, através de uma relação linear (2.2), obtiveram uma forte correlação entre os dois parâmetros ($R^2 = 0,983$). Como referido pelos autores, esta relação entre as duas propriedades foi confirmada também por Xiao *et al.* (2006).

$$f_{ck} = 0,026\rho - 13,85 \quad (2.2)$$

onde,

- f_{ck} - resistência à compressão aos 28 dias (MPa);
- ρ - massa volúmica (kg/m^3).

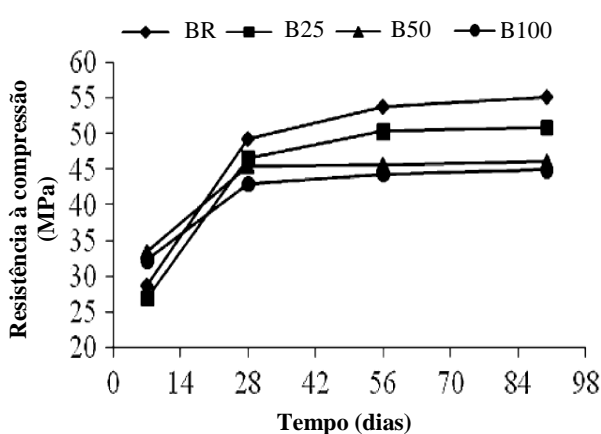


Figura 2.18 - Evolução da resistência à compressão de BAGRB ao longo do tempo (Rao *et al.*, 2011)

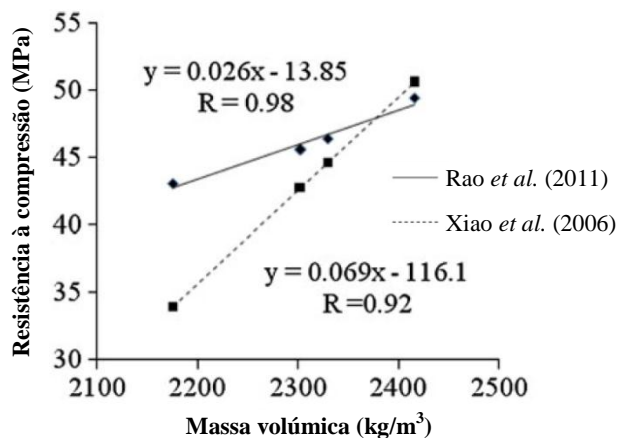


Figura 2.19 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões (Rao *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2006)

Malesev *et al.* (2010), contrariamente ao descrito em estudos anteriores, obtiveram resistências à compressão semelhantes em todos os betões produzidos (BR, B50 e B100), para uma mesma relação a/c efectiva (Figura 2.20). Por outras palavras, não foi detectada influência da incorporação de AGRB nos betões para esta propriedade (notando-se, no entanto, uma tendência crescente da resistência). Os autores desta campanha experimental defendem que a resistência à compressão dos betões depende mais da qualidade dos ARB do que da quantidade utilizada na sua formulação.

A resistência à compressão obtida por Limbachiya *et al.* (2000), correspondente às várias relações a/c estudadas, é apresentada na Figura 2.21. De um modo geral, não se verificou efeito da substituição de 30% dos AGP por AGR. No entanto, aos 28 dias de cura do betão, a resistência máxima atingida pelo betão com 100% de AGRB fixou-se em menos de 75 MPa, comparativamente ao betão com 30% de AGRB que obteve uma resistência superior a 80 MPa. Os resultados obtidos demonstram que elevados níveis de incorporação têm efeitos na resistência à compressão do betão. Com o objectivo de ultrapassar este facto, o próximo passo desta campanha consistiu em estabelecer os meios de produção dos BAGRB para atingir uma determinada resistência à compressão, igual à do BR correspondente. Foram analisadas três gamas diferentes de resistências: 50, 60 e 70 MPa. Para o efeito, os autores efectuaram modificações na relação a/c, alterando a quantidade de água ou a de cimento, ou mesmo as duas (com base nas relações entre a resistência à compressão aos 28 dias e as várias relações a/c).

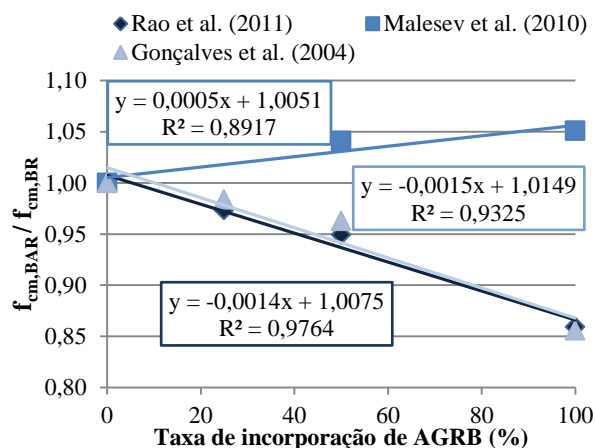


Figura 2.20 - Relação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB (levantamento bibliográfico)

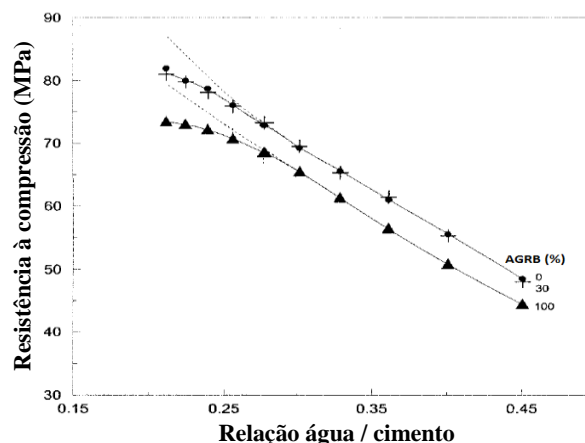


Figura 2.21 - Resistência à compressão consoante a relação água / cimento e a taxa de incorporação de AGRB (Limbachiya *et al.*, 2000)

2.4.4. Resistência à tracção por compressão diametral

A resistência à tracção, parâmetro fundamental na resposta dos betões aos Estados Limite de Utilização, é uma característica importante em fenómenos tais como a fendilhação e a aderência das armaduras.

Tal como na resistência à compressão, não é esperado que esta propriedade seja consideravelmente afectada pela introdução de AGR, desde que seja mantida a dosagem de cimento e a relação a/c (Brito, 2005). Contudo, podem ser registados valores inferiores devido a um aumento da relação a/c necessária para compensar a maior absorção de água dos AR, de modo a manter a trabalhabilidade pretendida. Relativamente a um aumento do teor de cimento, é expectável que a resistência à tracção aumente (Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001). De acordo o mesmo autor, a ausência de qualquer efeito negativo sobre a resistência à tracção pode ser indicativa de uma boa ligação entre os agregados reciclados e a pasta de cimento.

Mansur *et al.* (2000), citados por Leite (2001), avaliaram a resistência à tração de BAR e betões com AP, com quatro relações a/c variando entre 0,3 e 0,6. Os resultados mostraram que os BAR apresentaram um aumento de resistência de 9 e 12% para a resistência à tração por flexão e por compressão diametral, respectivamente, em relação ao BR. Os autores atribuem este comportamento à forma angular e textura rugosa dos agregados reciclados que proporcionam melhor aderência pasta / agregado.

De acordo com Larrañaga (2004), não existem diferenças significativas entre a resistência à tracção de betões com AGRB e de betões com AGP. Contudo, se forem incorporados AFRB, são esperadas diminuições até 20% em relação à resistência de um betão convencional.

Para as misturas de betão formuladas por Tabsh e Abdelfatah (2009), foi obtida a mesma resistência de tracção entre o BR e o BAGRB produzido com os agregados de melhor qualidade. Pelo contrário, foram encontradas diferenças para os restantes BAGRB. Na composição 1, o decréscimo de resistência fixou-se entre 25 e 30%. Por

sua vez, na composição 2, o decréscimo foi até 15%. Estes resultados (Figuras 2.22 e 2.23) foram em tudo semelhantes aos correspondentes ao ensaio de resistência à compressão, igualmente realizados pelos autores.

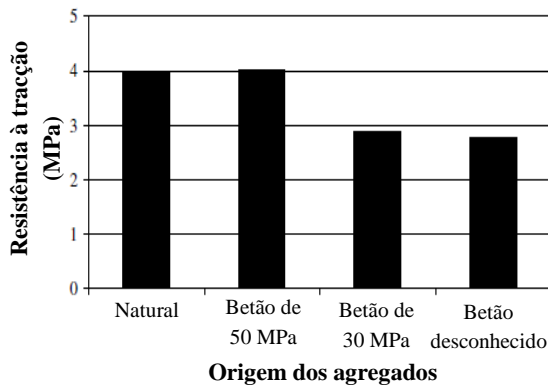


Figura 2.22 - Influência da origem de AGRB na resistência à tracção: composição 1 (Tabsh e Abdelfatah, 2009)

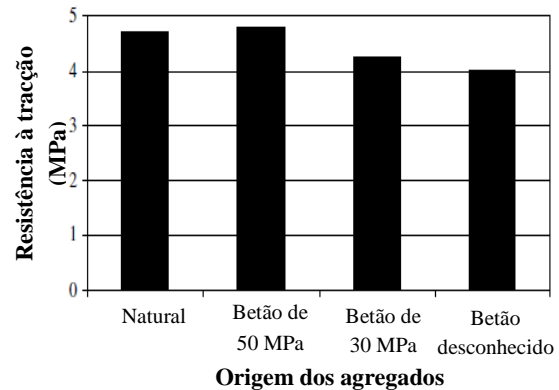


Figura 2.23 - Influência da origem de AGRB na resistência à tracção: composição 2 (Tabsh e Abdelfatah, 2009)

Matias e Brito (2005) registaram uma redução até 16% em BAGRB comparativamente com o seu homólogo natural. Os autores apenas formularam, para análise desta propriedade, dois BAGRB, ambos com 100% de incorporação de AGRB e com superplastificantes. Com o uso dos superplastificantes, que teve o objectivo de compensar a absorção de água por parte dos AR e não de reduzir a quantidade de água existente na amassadura dos betões, não se verificou um efeito benéfico com a utilização de AGRB.

Na campanha experimental de Rao *et al.* (2011), a incorporação de AGRB, provocou decréscimos na resistência à tracção até 24% em relação ao betão unicamente constituído por AP, como se observa na Figura 2.24. Os autores observaram que a rotura dos provetes ocorreu pelos AR, mais precisamente pela pasta de cimento aderida aos mesmos, ou seja, a antiga interface pasta / agregado foi preponderante face à nova pasta de cimento dos BAGRB. Consequentemente, a resistência à tracção de todos os BAR foi inferior à do BR.

Segundo Etxeberria *et al.* (2007), pode-se verificar um efeito positivo nesta resistência com a integração de AGR. No seu estudo, foram obtidos valores similares para as tensões de rotura à tracção, sendo superiores nos BAGRB. Como se pode observar na Figura 2.24, não existe uma lei de variação clara. A utilização de maior quantidade de cimento nos betões com AGR, para obter a mesma resistência à compressão entre os betões, aliada à maior rugosidade da superfície dos AGR face aos AGP (melhorando a aderência entre a nova pasta de cimento e os agregados), podem justificar este facto.

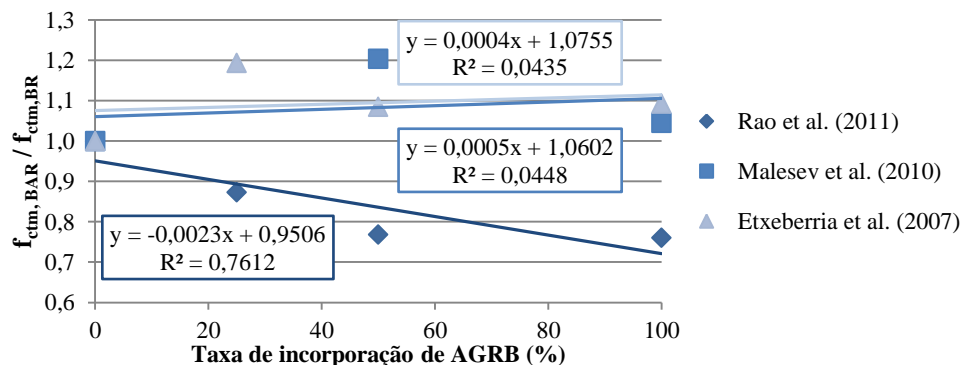


Figura 2.24 - Relação da resistência à tracção com a taxa de substituição de AGRB, aos 28 dias de idade (levantamento bibliográfico)

Malesev *et al.* (2010) mostraram que, para AGRB de boa qualidade (betões de origem com classe de resistência à compressão C30/37 e C40/50), não existe uma influência negativa dos mesmos nesta propriedade (Figura 2.24). Nos BAGRB, foram obtidas resistências maiores do que no seu homólogo natural. Os valores resultantes para estes betões fixaram-se em aproximadamente mais 20 e 5% que o valor do betão de controlo, respectivamente para taxas de

substituição de 50 e 100%. Tal como para a resistência à compressão, os autores afirmam que a resistência à tracção é principalmente afectada pela qualidade dos ARB e não pela quantidade dos mesmos presente nos betões.

2.4.5. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do betão mede a deformabilidade que este possui e que, directa ou indirectamente, afecta a forma como as estruturas respondem às solicitações impostas, quanto à deformação que apresentam e à forma como os esforços se distribuem.

Barra (1996), citada por Rocha e Resende (2004), refere que o comportamento elástico do betão é determinado pela proporção dos seus componentes na mistura, pela densidade e módulo de deformação dos principais constituintes e pelas características da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. A mesma autora menciona que a porosidade do agregado determina a sua rigidez, que por sua vez controla a capacidade do agregado resistir a deformações, sendo que os agregados densos têm módulos de elasticidade elevados.

De acordo com estudos realizados sobre esta matéria, existe uma tendência para a redução do módulo de elasticidade dos BAR, sendo que esta redução é tanto maior quanto maior for a taxa de substituição de AP por AR. Este facto explica-se, fundamentalmente, pela presença da pasta endurecida aderida aos AR que apresenta níveis de deformabilidade superiores aos dos AP (Brito, 2005).

As diferenças entre o módulo de elasticidade de BARB e de um betão convencional são crescentes com a taxa de substituição de AGP por AGRB e com a utilização também de AFRB na produção dos betões (Larrañaga, 2004).

Zagursskij e Zhadanoviski (1985), citados por Levy (2001), referem que os BAGR têm um módulo de elasticidade inferior em 10 a 30% ao de betões produzidos com agregados convencionais. Se a totalidade dos agregados for reciclada, tanto na fracção grossa como na fina, esta diferença aumenta para a faixa de 25 a 40%.

Corinaldesi (2010) apresentou reduções até cerca de 30% no módulo de elasticidade aos 28 dias de BAR com uma taxa de 30% de substituição de AGP por AGRB, para as várias relações a/c estudadas, em relação ao seu homólogo natural. Comparando betões com a mesma resistência à compressão, estas reduções são inferiores. O autor obteve um módulo de elasticidade aproximadamente 2 e 15% menor nos BAGRB, para as fracções granulométricas de 11-22 mm e 6-12 mm, respectivamente.

Etxeberria *et al.* (2007) determinaram o módulo de elasticidade para quatro taxas de substituição de AGP por AGRB (0, 25, 50 e 100%), cujos resultados são apresentados na Figura 2.25. O módulo de elasticidade aos 28 dias diminuiu com a percentagem de incorporação de AGR. Registou-se uma variação de 4% para uma incorporação de 25% de AGRB, de 12% para 50% e 15% para 100%. Estes resultados eram esperados, uma vez que os AR são mais susceptíveis a sofrer deformações do que os AP. Assim, e dependendo do módulo de elasticidade dos seus agregados, é expectável que os BAR apresentem menor módulo de elasticidade do que o respectivo BR.

Os autores verificaram que os seus resultados estão de acordo com a lei de variação sugerida por Kakizaki (1988), que relaciona o módulo de elasticidade de betões com a sua resistência à compressão e massa volúmica, presente na expressão 2.3.

$$E_c = 2,1 \times \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \times \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad (2.3)$$

em que,

- E_c - módulo de elasticidade (GPa);
- d_s - densidade (kg/m³);
- f_c - resistência à compressão (MPa).

O estudo levado a cabo por Malesev *et al.* (2010) confirmou, uma vez mais, que o módulo de elasticidade é afectado pela introdução de AGRB nos betões. Os autores obtiveram uma redução, tanto maior quanto a taxa de

substituição de AGP por AGRB, até 18% nos BAGRB face ao BR. Estes resultados encontram-se na Figura 2.25.

Como todos os betões obtiveram resistências à compressão semelhantes, era de esperar que o módulo de elasticidade fosse também idêntico. Contudo, registaram-se os decréscimos referidos. Deste modo, conclui-se que a rigidez dos AGRB, que é inferior à dos AGP, tem uma influência significativa nesta propriedade, prevalecendo sobre a resistência à compressão.

A Figura 2.25 apresenta, também, os resultados alcançados na campanha experimental de Rao *et al.* (2011). Verifica-se uma tendência para a redução deste parâmetro com o aumento da substituição de AGP por AGRB. O autor justifica esta tendência pelo menor módulo de elasticidade dos AR em relação aos AP. A máxima redução registada foi de 34,8% para o betão com 100% de AGR.

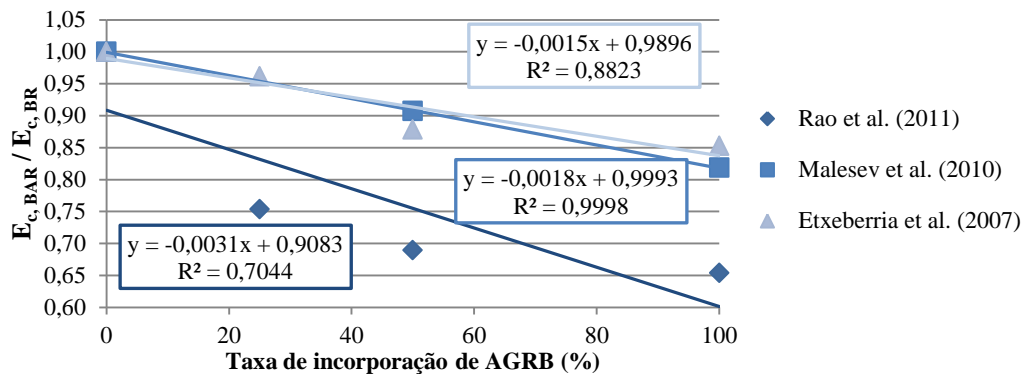


Figura 2.25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a taxa de substituição de AGRB (levantamento bibliográfico)

Levy (2001) verificou, na sua campanha experimental, diminuições até 7% do valor do módulo de elasticidade dos BAGRB face ao BR, para betões com a mesma classe de resistência à compressão. Estes resultados podem ser aferidos na Figura 2.26. Para os restantes betões analisados, com AR finos de betão e AR cerâmicos, foi obtida a mesma tendência mas de forma mais acentuada. O autor constatou que a resistência à compressão tem influência sobre o módulo de elasticidade dos betões, tendo registado uma redução de aproximadamente 20% entre as classes de resistência de 20 e 40 MPa, independentemente da taxa de incorporação de AGRB.

No seu estudo, Limbachiya *et al.* (2000) obteve para o módulo de elasticidade valores idênticos entre o BR e os vários BAGRB, em que as diferenças registadas foram todas abaixo de 4% (Figura 2.26). Ao avaliar betões com resistências semelhantes (50, 60 e 70 MPa), os autores não verificaram assertivamente a tendência decrescente desta propriedade com o aumento de AGRB, ao contrário das demais investigações.

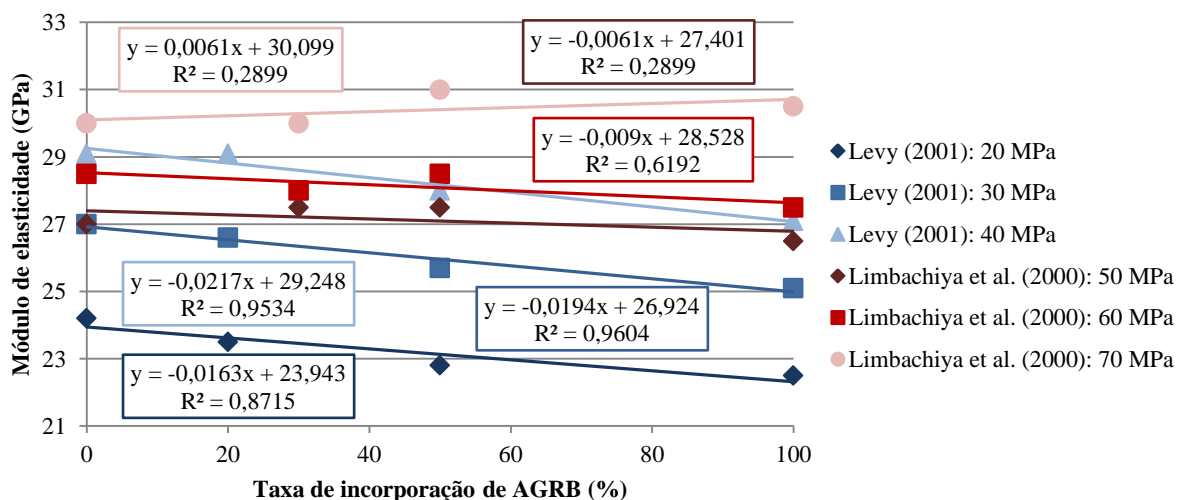


Figura 2.26 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB (Levy, 2001; Limbachiya *et al.*, 2000)

2.4.6. Resistência à abrasão

A abrasão pode ser definida como o processo que provoca desgaste, através de esfregamento, enrolamento, escorregamento ou fricção repetitiva, no betão (Ferreira, 2000). Assim sendo, esta característica apenas é condicionante em elementos de betão sujeitos ao contacto com agentes abrasivos, tais como estruturas hidráulicas e pavimentos.

Apesar de a dureza e a rugosidade dos agregados grossos influenciarem positivamente a resistência à abrasão de betões, são essencialmente a resistência da pasta constituída pelos agregados finos e pelo cimento e a ligação entre esta e os agregados grossos que condicionam essa propriedade. É expectável que não se registre uma diferença muito significativa entre os BAR e os BR; contudo, é necessário ter em atenção aspectos como a relação a/c efectiva, a porosidade / irregularidade da superfície dos agregados, bem como o teor em cimento (Brito, 2005).

Fonseca (2009) analisou a resistência à abrasão para diferentes condições de cura de BAGRB. Foram considerados quatro tipos de cura: cura em câmara húmida (WCC), cura em ambiente de laboratório (LCC), cura em ambiente exterior (OEC) e cura por imersão em água (WIC). Analisando os resultados (Figura 2.27), não é possível estabelecer uma correlação clara entre a percentagem de incorporação de AGRB e a resistência ao desgaste por abrasão. No entanto, o autor refere que todos os betões com substituição integral de AGP por AGRB apresentaram um valor de desgaste inferior ao BR, bem como às restantes composições analisadas (20 e 50% de incorporação de AGR). A justificação avançada pelo investigador para este facto é a possibilidade de existirem melhores ligações entre a matriz cimentícia e os AGRB.

Tal como a Figura 2.28 demonstra, o efeito dos AGRB na resistência à abrasão dos betões produzidos por Limbachiya *et al.* (2000) é mínimo. A diferença entre o BR e o betão com 100% de AGRB é de 0,03 e 0,04 mm para as resistências à compressão de 50 e 60 MPa, respectivamente. Tal sugere que, para uma dada classe de resistência à compressão, a resistência à abrasão é semelhante no BR e nos BAGRB, independentemente da taxa de incorporação de AGR.

A campanha experimental de Matias e Brito (2005) permitiu concluir que, no que concerne ao desgaste por abrasão, os betões produzidos com AGRB são mais resistentes, sofrendo por isso menor perda de secção e obviamente de massa em relação ao betão de referência. Por outras palavras, verificou-se um maior desgaste dos betões produzidos unicamente com AP, cifrando-se esse acréscimo em cerca de 25% (Figura 2.29). Segundo os autores, tal deve ter origem na melhor aderência entre a argamassa e os AGR. Em virtude da maior absorção de água (ocorre uma absorção de água e partículas de cimento durante a amassadura) e também rugosidade destes, a interface entre a argamassa e o agregado fica mais coesa, conferindo desta forma melhores resistências à abrasão para este tipo de betões. Outra conclusão obtida é a independência do tipo de superplastificante incorporado no desgaste por abrasão dos betões, tendo-se verificado o mesmo desgaste para os dois tipos de betões produzidos com AR mas com superplastificantes distintos (relembra-se que os superplastificantes foram utilizados neste estudo com o objectivo de compensar a maior absorção de água dos AR e não de reduzir a relação a/c).

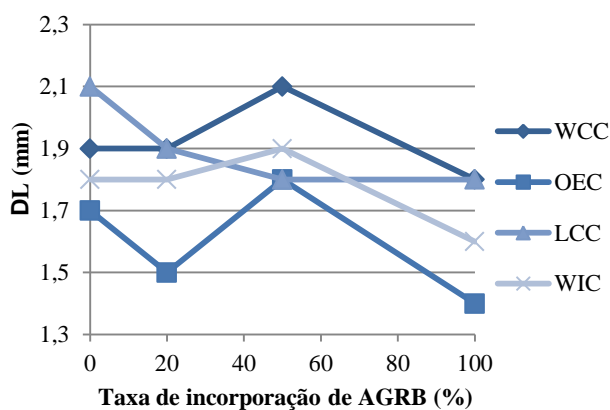


Figura 2.27 - Relação do desgaste por abrasão com a taxa de substituição de AGRB (Fonseca, 2009)

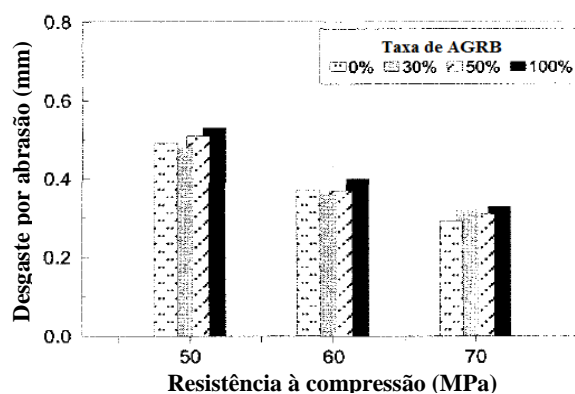


Figura 2.28 - Efeito dos AGRB na resistência à abrasão, para betões de igual resistência (Limbachiya *et al.*, 2000)

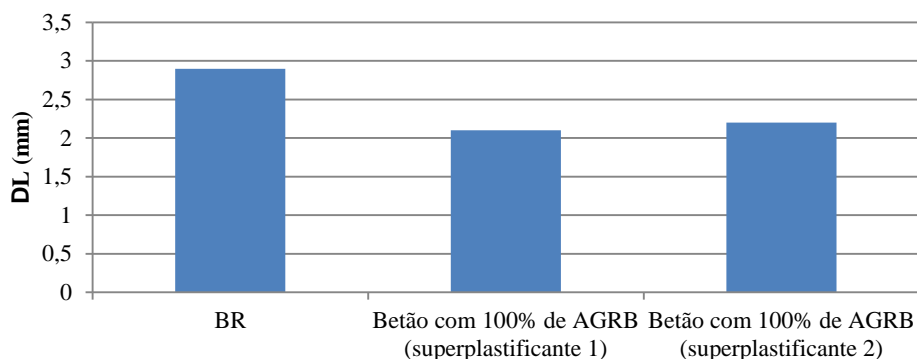


Figura 2.29 - Comparação da resistência à abrasão entre o BR e B100 (adaptado de Matias e Brito, 2005)

A campanha realizada por Konin (2012) centrou-se na temática da influência da quantidade de cimento no desempenho mecânico, e mais precisamente na resistência à abrasão, de BAGRB. Para o efeito, o autor analisou quatro BR e quatro betões com 100% de AGRB, variando a quantidade de cimento utilizada na formulação dos betões (entre 300 e 450 kg/m³). Os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 2.18. Como se pode observar, todos os BAGRB apresentam melhor comportamento face a esta propriedade e as diferenças entre os dois tipos de betão variam entre 8,6 e 15,6%, sendo que as maiores discrepâncias se registam nos betões com maior quantidade de cimento.

Tabela 2.18 - Resultados do ensaio de abrasão de Konin (2012)

Betão	Taxa de AGRB (%)	Quantidade de cimento (kg/m ³)	DL (mm)	Diferença (%)
N300	0	300	2,2	-
R300	100	300	2,01	-8,6
N350	0	350	2,04	-
R350	100	350	1,8	-11,8
N400	0	400	1,86	-
R400	100	400	1,57	-15,6
N450	0	450	1,65	-
R450	100	450	1,41	-14,5

Nas Figuras 2.30, 2.31 e 2.32, são apresentadas as relações entre as várias propriedades mecânicas analisadas (resistência à compressão, resistência à tracção e módulo de elasticidade, respectivamente) e a resistência à abrasão. Pode-se observar, em cada figura, a respectiva equação e coeficiente de correlação para os betões em estudo. Verificou-se que a relação exponencial foi a que se ajustou de melhor forma em todos os casos, tendo-se obtido correlações bastante aceitáveis (todos os coeficientes foram acima de 0,95). Deste modo, as várias relações podem ser obtidas através da expressão 2.4.

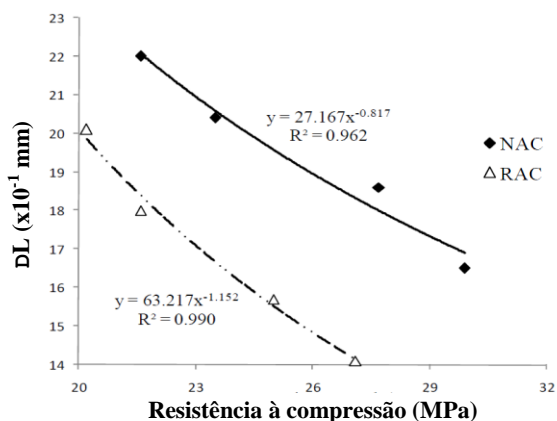


Figura 2.30 - Relação entre a resistência à compressão e a perda de espessura por abrasão (Konin, 2012)

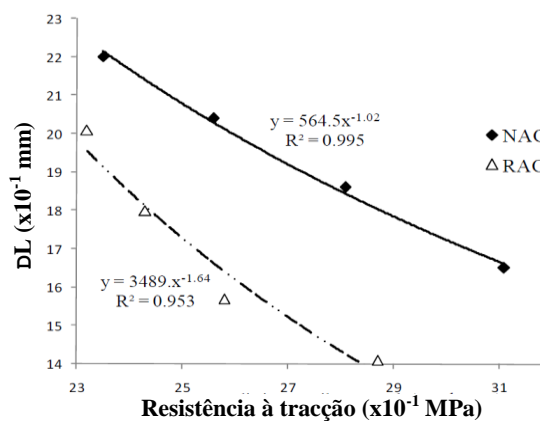


Figura 2.31 - Relação entre a resistência à tracção e a perda de espessura por abrasão (Konin, 2012)

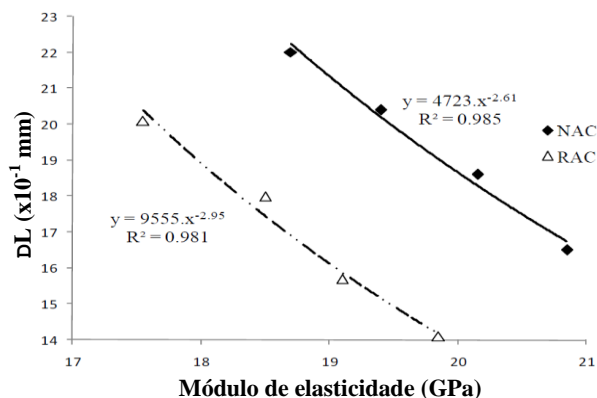


Figura 2.32 - Relação entre o módulo de elasticidade e a perda de espessura por abrasão (Konin, 2012)

$$DL = \alpha_i \cdot X^{-\beta_i} \quad (2.4)$$

onde,

- DL - perda por desgaste de abrasão (mm);
- X - propriedade mecânica em análise (resistência à compressão e tracção em MPa e módulo de elasticidade em GPa);
- α_i e β_i - coeficientes que dependem do tipo de agregado e da propriedade mecânica em análise.

2.4.7. Velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons é baseado na medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas longitudinais através dos betões em análise, tendo por base o princípio de que esta velocidade será tanto maior quanto mais favorável for o meio ao seu atravessamento. Assim, a velocidade de propagação de ondas de ultra-sons é uma característica do material e é maior em meios sólidos contínuos, do que em meios gasosos. A medição da velocidade de propagação destas ondas permite avaliar a homogeneidade e a qualidade do betão. Esta velocidade pode ser correlacionada com o seu módulo de elasticidade e com a sua resistência.

Sendo a velocidade de propagação de ultra-sons uma medida indirecta da porosidade de um betão, é expectável que sejam obtidas menores velocidades nos BAR do que no BR.

Ravindrajah *et al.* (1988), baseado nas pesquisas de Tam (1977) e Ravindrajah e Tam (1985), afirmam que a relação entre a resistência à compressão e a velocidade dos ultra-sons é influenciada por diversos factores intrínsecos e extrínsecos. Entre esses factores, o tipo de agregado e teor de humidade do betão têm um efeito significativo na correlação.

A Figura 2.33 demonstra a relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a relação a/c para um BAR e um BR, nas idades de cura de 7, 28 e 90 dias, produzidos por Ravindrajah *et al.* (1988). Pela análise dos resultados, constata-se que a velocidade decresce com o aumento da relação a/c , o que os autores referem poder ser devido a um aumento da porosidade capilar dos betões. A utilização de AR, ao invés de AP, originou decréscimos nesta propriedade, principalmente devido à sua maior porosidade. Os autores referem que, para uma argamassa de boa qualidade, a velocidade de propagação de ultra-sons está entre 3,50 e 3,95 km/s, enquanto para um AP é cerca de 4,60 km/s. Verifica-se ainda que a velocidade para todos os betões aumenta ao longo do tempo, o que era esperado visto o nível de hidratação do cimento aumentar com a idade, resultando numa menor porosidade capilar da pasta de cimento.

Kou *et al.* (2012) determinaram a velocidade de propagação de ultra-sons para quatro taxas de substituição de AGR: 0 (RA0), 20 (RA20), 50 (RA50) e 100% (RA100). Foram utilizados três tipos de AR, variando entre eles a quantidade de elementos de alvenaria. Um deles foi proveniente de uma unidade de reciclagem, tendo na sua composição apenas elementos de betão. Os outros tipos de agregados foram provenientes de resíduos de construção e demolição, possuindo até 16% de materiais cerâmicos (são apenas analisado, neste levantamento, os agregados em que esta percentagem é superior, já que os outros representam uma situação intermédia).

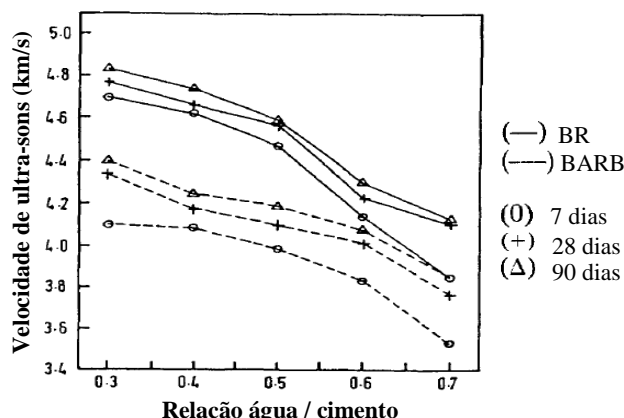


Figura 2.33 - Relação entre a velocidade dos ultra-sons e a relação a/c (Ravindrajah *et al.*, 1988)

Os resultados encontrados pelos autores são apresentados nas Figuras 2.34 (AGR com materiais cerâmicos) e 2.35 (AGRB). Foi observado que, para todas as idades de ensaio, a velocidade dos ultra-sons nos betões decresceu com o aumento do teor de AR. No entanto, este decréscimo foi inferior para os AGRB em relação aos AR que contêm alvenaria na sua composição. Aos 28 dias de cura do betão, a velocidade da mistura preparada com 100% de AGRB diminuiu 8% comparativamente ao BR, enquanto para a outra composição com AGR o decréscimo se fixou em 16,3%. Conclui-se, assim, que esta propriedade é afectada pela qualidade dos AR.

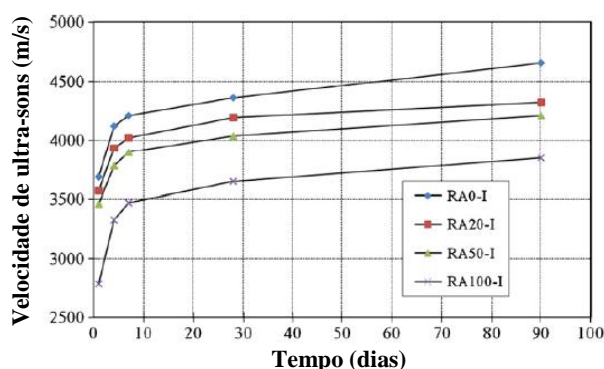


Figura 2.34 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGR (Kou *et al.*, 2012)

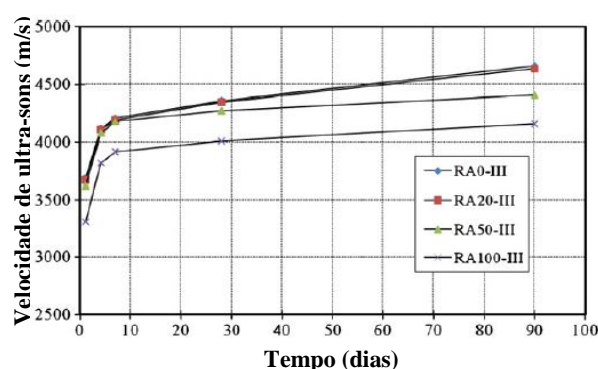


Figura 2.35 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB (Kou *et al.*, 2012)

Rao *et al.* (2011) concluíram, uma vez mais, que a velocidade de propagação dos ultra-sons diminui com o aumento da taxa de substituição de AGP por AGRB (Figura 2.36). A justificação avançada para esta tendência é referente à maior porosidade dos AR. Em comparação com o betão convencional, ocorreu uma redução de 1,9, 6,0 e 9,5% na velocidade de propagação dos ultra-sons nos betões com 25, 50 e 100% de incorporação de AGRB, respectivamente. Os autores procuraram relacionar esta propriedade com a resistência à compressão e com a massa volúmica dos vários betões, como se verifica na Figura 2.37. Foram obtidos coeficientes de correlação acima de 0,90, o que indicia uma forte relação entre as referidas propriedades.

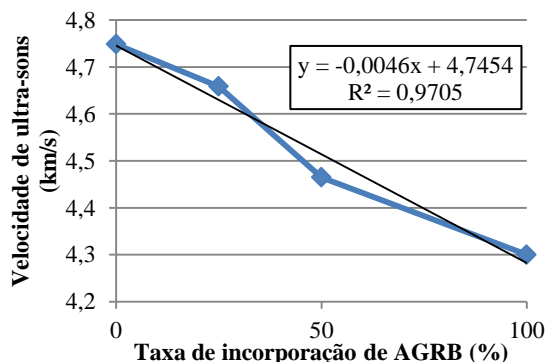


Figura 2.36 - Relação da velocidade de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB (Rao *et al.*, 2011)

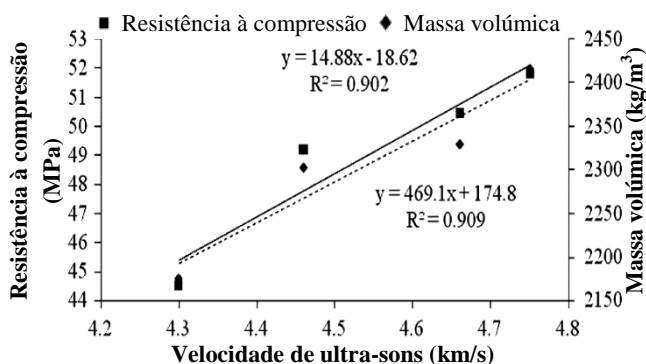


Figura 2.37 - Relação entre a velocidade de ultra-sons e a resistência à compressão e massa volúmica (Rao *et al.*, 2011)

2.4.8. Absorção de água

A absorção de água do betão endurecido é uma das propriedades directamente correlacionadas com a sua durabilidade, sendo medida através de ensaios de absorção por imersão e por capilaridade. É definida como o processo pelo qual a água é absorvida pelo betão, através dos seus poros, sob a acção de forças de capilaridade, dando-se do exterior para o interior do betão. Quanto maior for a absorção, maior será a facilidade de entrada de agentes agressivos, como os cloretos e os sulfatos.

A absorção de água é uma medida do volume total dos poros permeáveis existentes na estrutura de betão, enquanto o índice de vazios está relacionado com todos os poros existentes no betão. De uma forma indirecta, o conhecimento desta estrutura de poros permite prever a durabilidade de um betão, visto que possibilita o conhecimento da forma pelo qual os agentes agressivos se difundirão ou penetrarão através do betão e o tempo que estes agentes levarão a alcançar a armadura, desencadeando o processo de corrosão (Levy, 2001). Deste modo, a absorção de água do betão, por ser uma medida directa dos poros acessíveis à água (e, assim, dependente do volume de vazios), está correlacionada com a massa volúmica dos agregados, conforme se verifica na Figura 2.38, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento (Angulo, 2005).

Em face da maior absorção de água por parte dos AR em relação aos AP, é de todo esperada também uma absorção de água superior nos BAR relativamente ao BR. Por outras palavras, a quantidade de argamassa aderida presente nos AR utilizados no fabrico de betão dá origem a betões mais porosos e, conseqüentemente, com maior capacidade de absorção. Deste modo, como a porosidade dos betões aumenta com o teor de AGRB, é expectável que esta propriedade aumente proporcionalmente à taxa de substituição de AGP por AGRB.

Wirquin *et al.* (2000), citados por Levy (2001), realizaram um estudo sobre a absorção de água por capilaridade em BAR, cuja principal conclusão foi: o processo de absorção de água nos betões com AR e nos betões com AP é análogo e obedece às mesmas leis.

Como expectável, a absorção de água por capilaridade nos betões com AGRB ensaiados por Kou e Poon (2012) foi consideravelmente superior à do BR (Figura 2.39). Este facto é confirmado por várias investigações realizadas neste âmbito. Uma vez que os AGRB possuem uma absorção de água elevada quando comparados aos AP, é normal que os betões produzidos com os mesmos possuam também elevada absorção. Os investigadores concluíram, na sua campanha experimental, que a introdução de cinzas volantes no fabrico de betão produz um efeito benéfico nesta propriedade, ou seja, para os betões com cinzas volantes foram obtidos menores valores de absorção de água.

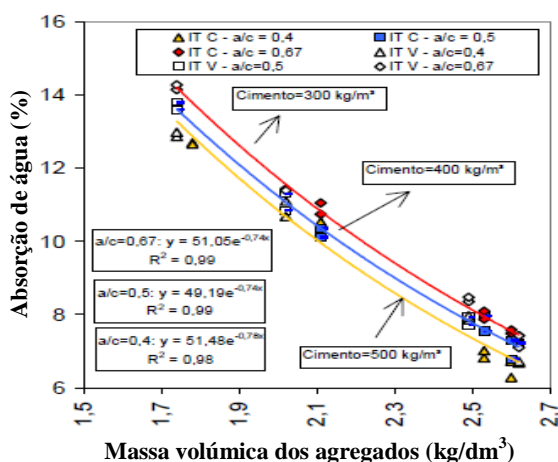


Figura 2.38 - Relação entre a absorção de água do betão com a massa volúmica dos seus agregados, em que IT C corresponde a AGRB e IT V a AGR de cerâmicos (Angulo, 2005)

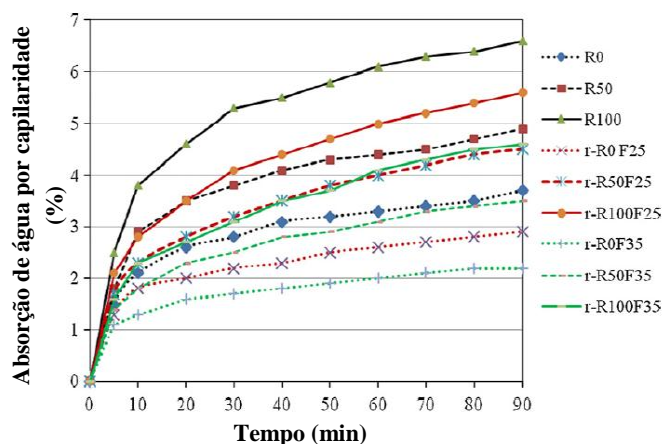


Figura 2.39 - Absorção de água por capilaridade (Kou e Poon, 2012)

Matias e Brito (2005) estudaram a absorção de água, tanto por imersão como por capilaridade, de vários betões com AP e outros com 100% de AGRB. Nas Figuras 2.40, 2.41 e 2.42, observam-se os resultados obtidos nesta

campanha. Estes foram bastantes conclusivos: todos os BAGRB apresentaram absorções de água superiores à do BR. O aumento de absorção por imersão foi cerca de 17% para todos os betões com AGRB. No entanto, o ensaio de absorção por capilaridade apresentou uma considerável dispersão de valores entre a primeira e a terceira fase experimental da campanha realizada pelos autores (na primeira o incremento na absorção fixou-se em 19% e na terceira em 80%). Os autores justificam este facto pela utilização de dimensões diferentes dos provetes entre as duas fases, verificando-se que os BAGRB foram sensíveis a esta alteração de dimensões.

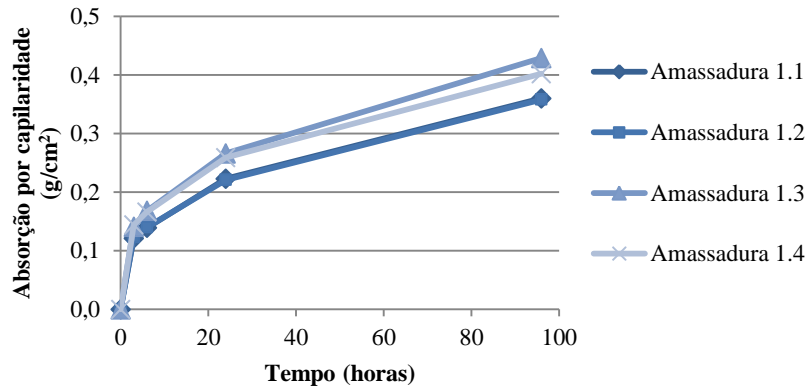


Figura 2.40 - Evolução da absorção de água por capilaridade em BAGRB, 1º ciclo de amassaduras (Matias e Brito, 2005)

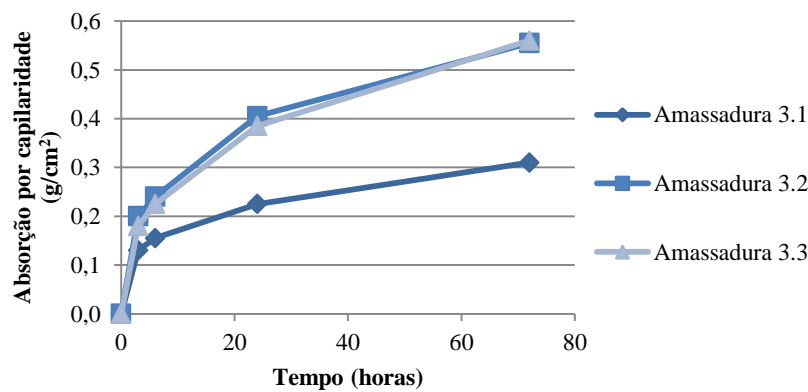


Figura 2.41 - Evolução da absorção de água por capilaridade em BAGRB, 3º ciclo de amassadura (Matias e Brito, 2005)

A pouca, ou mesmo nenhuma, influência da forma das partículas dos agregados grossos (tanto no BR como no BAR) e da incorporação e do tipo de superplastificante na absorção de água dos betões produzidos foram outras ilações retiradas deste estudo.

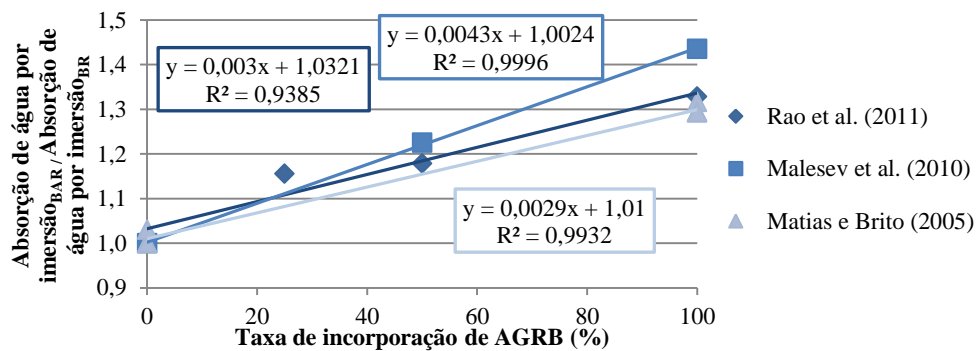


Figura 2.42 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB (levantamento bibliográfico)

Na sua investigação, Malesev *et al.* (2010) determinaram a absorção de água por imersão após 28 dias de cura, para betões com vários níveis de substituição de AGP por AGRP (0, 50 e 100%). Como se observa na Figura 2.42,

existe um incremento da absorção de água com a incorporação de AGRB. O betão com 100% de AGRB teve uma absorção cerca de 44% superior à do seu homólogo natural. Para uma substituição de 50%, a absorção de água excedeu em 22% a do betão de controlo.

A absorção de água aumentou proporcionalmente à taxa de substituição de AGP por AGRB, nos betões produzidos por Rao *et al.* (2011), tal como demonstrado pela Figura 2.42. Como os AGRB apresentaram uma absorção 3,5 vezes superior à dos seus homólogos naturais, era esperado que também a absorção dos BAR fosse consideravelmente superior à do BR.

Levy (2001), no estudo que desenvolveu, analisou a absorção de água de doze tipos de BAR e do seu homólogo natural para várias classes de resistência (Figura 2.43). Ao analisar os seus resultados, o autor constatou que a absorção variou mais em função do tipo de agregado utilizado do que da resistência à compressão. Observando-se o comportamento do BR, quando a resistência passa de 20 para 40 MPa, a absorção por imersão diminui de 7,4 para 6,1%. No entanto, à medida que os AP forem substituídos por 100% de AR, dependendo do agregado escolhido, o valor da absorção pode aumentar até cerca de 60% em relação ao BR. Mais concretamente em relação aos BAGRB, foi registado um aumento máximo de 36% da taxa de absorção de água, sendo esta taxa crescente com o aumento de AR (foram obtidos elevados coeficientes de correlação, todos acima de 0,80). Como seria expectável, as maiores absorções ocorreram para a classe de resistência mais baixa, independentemente do teor de incorporação de AGRB.

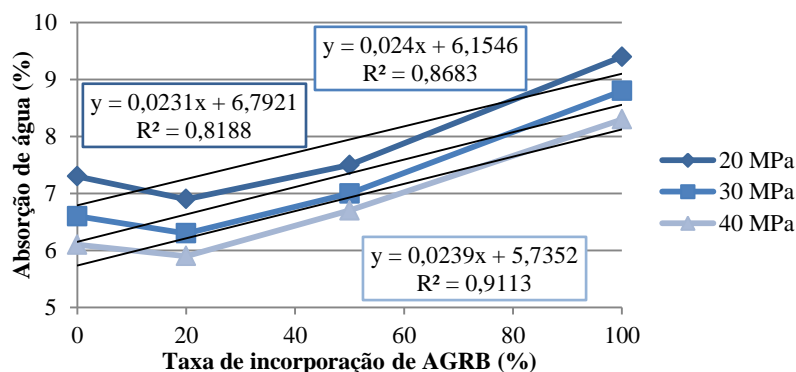


Figura 2.43 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de AGRB (Levy, 2001)

Gonçalves *et al.* (2004) observaram um crescimento global da absorção de água, por capilaridade e por imersão, com o aumento da taxa de substituição de AGP por AGRB. Na Figura 2.44, observa-se a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo (durante as 72 horas de duração do ensaio). É possível dividir os resultados em três grupos distintos: um betão com elevada capacidade de absorção (REC 250, correspondente ao betão com 100% de AGRB e para a mais reduzida quantidade de cimento utilizada), dois betões com pouca capacidade de absorção (REF 350 e REF 450, correspondentes aos BR com maior quantidade de cimento introduzida) e um grupo intermédio com as restantes composições de betão.

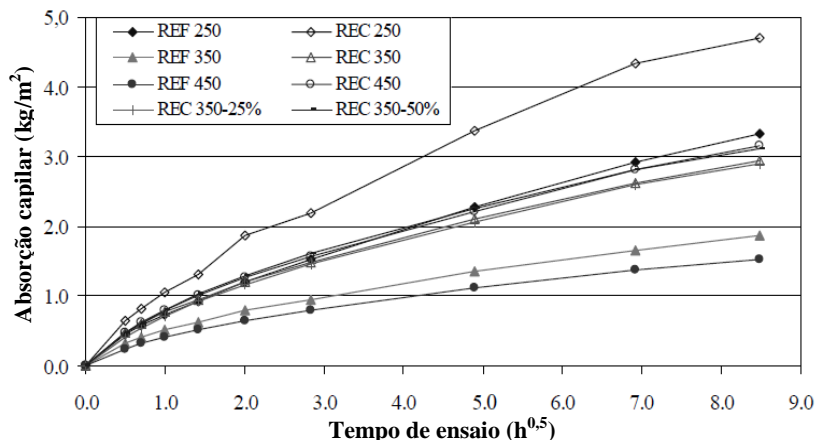


Figura 2.44 - Ensaio de absorção de água por capilaridade em BAGRB (Gonçalves *et al.*, 2004)

A Figura 2.45 apresenta a média dos coeficientes de absorção para as composições de betão analisadas. Os autores referem que os resultados similares entre os betões com quantidade de cimento de 350 e 450 kg/m³ podem ser devido a diferentes condições de humidade, uma vez que os betões foram produzidos em tempos diferentes. Apesar destes resultados, ao analisar betões produzidos com outro tipo de cimento, os autores obtiveram uma clara tendência entre o coeficiente de absorção capilar e a quantidade de cimento (tanto para o BR como para o betão com 100% de AGRB). Como se observa na Figura 2.46, quanto maior é a quantidade de cimento utilizada na formulação dos betões, menor é o coeficiente de absorção capilar, ou seja, mais duráveis são os betões.

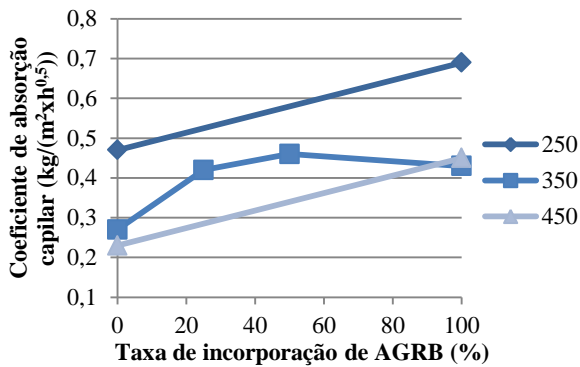


Figura 2.45 - Relação do coeficiente de absorção capilar com o teor de AGRB, para cimento tipo I 42,5R (Gonçalves *et al.*, 2004)

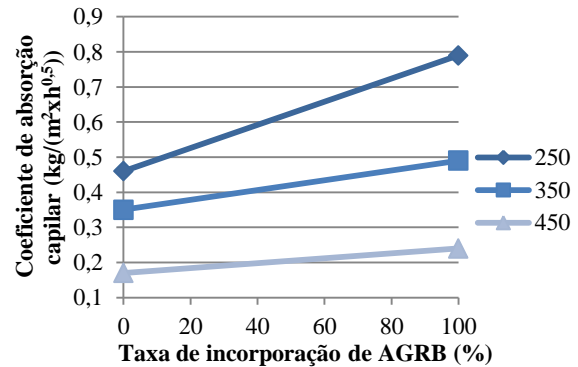


Figura 2.46 - Relação do coeficiente de absorção capilar com o teor de AGRB, para cimento tipo II-A/L 42,5R (Gonçalves *et al.*, 2004)

Deste modo, a presença de AR aumenta a absorção por capilaridade. No entanto, os autores concluem que a qualidade da matriz de cimento é o principal factor que influencia esta propriedade, tal como se confirma na Figura 2.47.

A absorção de água por imersão aumentou com o teor de AGRB nos betões, sendo assim, uma vez mais, evidente a maior porosidade por parte deste tipo de betões. A quantidade de AR foi o único parâmetro que influenciou esta propriedade, verificando-se na Figura 2.48 que, para todas as quantidades de cimento analisadas, os resultados foram semelhantes. O aumento máximo registado, aquando da substituição integral de AGP por AGRB, foi de 57,2%.

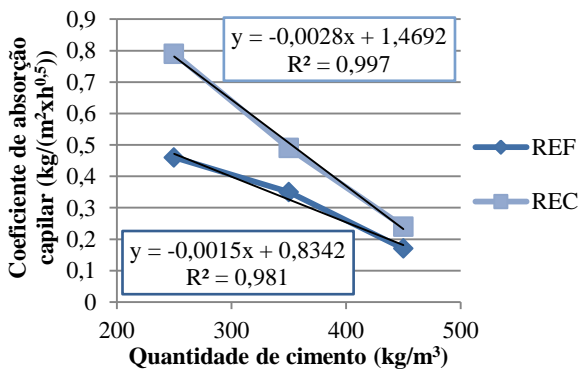


Figura 2.47 - Relação do coeficiente de absorção capilar com a quantidade de cimento (Gonçalves *et al.*, 2004)

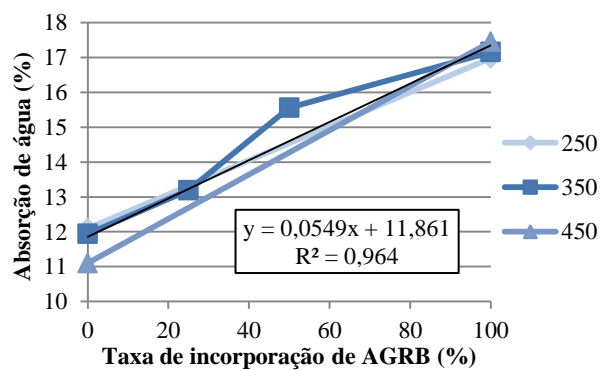


Figura 2.48 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de AGRB (Gonçalves *et al.*, 2004)

2.4.9. Retracção

A retracção, propriedade reológica do betão que, na ausência de variações de temperatura e de tensões aplicadas, consiste na diminuição das dimensões de um elemento de betão com o tempo, é das características mais afectadas pela incorporação de AR no betão.

Segundo Brito (2005), este efeito é tanto mais agravado quanto maior for o aumento da taxa de substituição de AP por AR (os AR apresentam menor rigidez e, conseqüentemente, menor capacidade de oposição ao fenómeno de retracção), o aumento da componente de AFR introduzida, o aumento do teor em cerâmicos ao invés de ARB e o recurso ao aumento da relação a/c, a maior dosagem de cimento em relação ao uso de adjuvantes para controlo da

trabalhabilidade do betão.

Assim, e uma vez que a substituição de AGP por AGRB se traduz num excesso de pasta de cimento e menor volume de AP nas misturas dos BAGRB, são expectáveis maiores deformações de retracção neste tipo de betões quando comparados a um betão análogo mas constituído somente por AP.

Rocha e Resende citam Sagoe-Crentsil *et al.* (2001) quando estes referem que registaram um aumento de 15% na retracção em betões com incorporação de 100% de AGR, comparativamente a um betão convencional.

Segundo Gómez-Soberón (2001), a retracção em betões não é praticamente influenciada para taxas de substituição, de AGP por AGRB, até 30%. Pelo contrário, foi registado um aumento de cerca de 25% nos betões com incorporação de 60% e 100% de AGRB. Estas constatações podem ser observadas na Figura 2.49, evidenciadas pela separação da evolução da retracção ao longo do tempo em dois grupos distintos: o primeiro constituído pelo betão de referência ($r = 0,00$) e pelos betões com percentagens de substituição de 15 e 30% ($r = 0,15$ e $r = 0,30$) e o segundo, com maiores retracções, do qual fazem parte os betões com percentagens de 60 e 100% ($r = 0,60$ e $r = 1,00$).

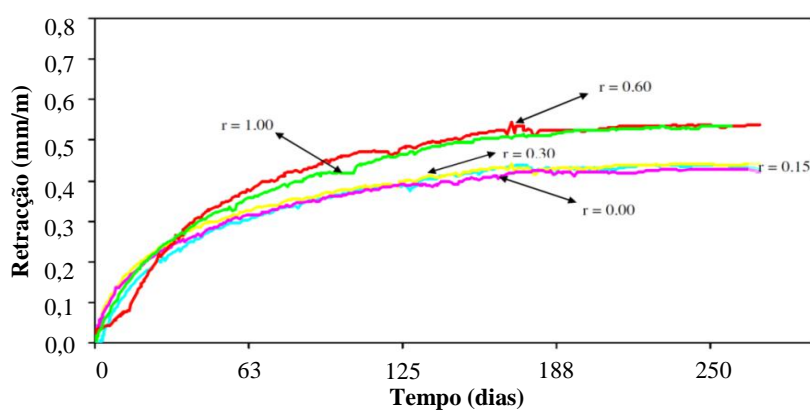


Figura 2.49 - Evolução ao longo do tempo da retracção em BAGR (Gómez-Soberón, 2001)

O autor, baseado na pesquisa bibliográfica efectuada, refere que a relação a/c do betão de origem, o seu nível de serviço e o período de vida, bem como o processo utilizado na produção dos agregados (a eliminação de parte da argamassa aderida aos AR traduz-se num decréscimo da retracção) estão entre os aspectos que influenciam a retracção nos BAR.

Kou e Poon (2012), através dos resultados da sua campanha experimental, constataram que a retracção do betão é claramente afectada pela introdução de AGRB na sua composição, verificando-se um aumento até 33% do seu valor. O excesso de argamassa presente nos BARG comparativamente ao BR contribui para o aumento do volume total da pasta de cimento, o que produz incrementos na retracção. Estes autores verificaram ainda que a introdução de cinzas volantes na composição do betão reduz a retracção, possuindo assim um efeito benéfico em relação a esta propriedade.

Os resultados obtidos por Matias e Brito (2005) confirmam a maior retracção em BAGRB. O efeito dos AGRB nesta propriedade prevaleceu sobre o uso de superplastificantes para compensar a sua absorção de água. Registaram-se incrementos de 23 e 52% nos betões com este tipo de agregados face ao BR. Estes valores correspondem a uma taxa de 100% de AGRB e à utilização de dois tipos de superplastificantes.

Considerando um BR e dois betões com incorporação de 30% de AGRB, com classes de resistência à compressão idênticas, Corinaldesi (2010) obteve menores retracções nos BAGRB (Figura 2.50). Este facto é justificado pela menor relação água/cimento dos BAGRB, de modo a obterem a mesma resistência que o BR. Por comparação dos resultados após 180 dias, observa-se que nos betões de AGRB as deformações de retracção são 23 e 14% inferiores à do betão com AP, para as fracções recicladas de 6-12 mm e 11-22 mm, respectivamente. Note-se que, para se obter a mesma classe de resistência do BR, o autor utilizou menores relações a/c nos BAGRB.

Malesev *et al.* (2010) avaliaram a retracção de BAGRB com taxas de substituição de 0, 50 e 100%. Os autores constataram, para um betão com 100% de incorporação de AGRB, um aumento de aproximadamente 20% em relação

ao betão convencional. No entanto, ao contrário do esperado, o betão com uma taxa de substituição de 50% registou um valor ligeiramente inferior. Esta tendência verificou-se em todas as idades analisadas (Figura 2.51). Na Figura 2.52, observa-se que a evolução desta propriedade ao longo do tempo é semelhante entre o BR e os dois BAGRB.

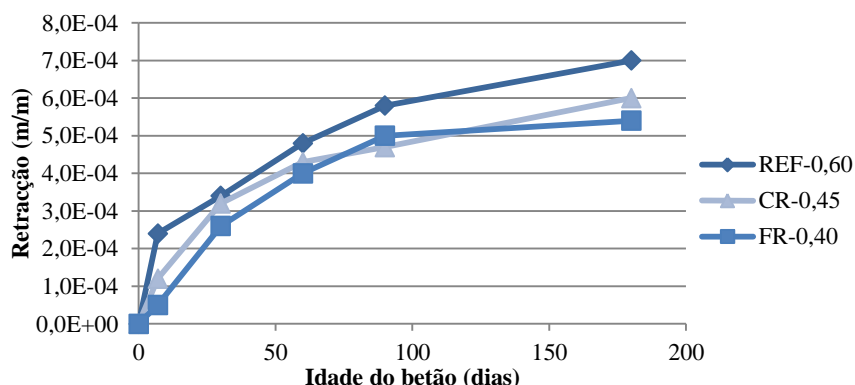


Figura 2.50 - Evolução da retracção nos betões ao longo do tempo para betões da mesma classe de resistência (Corinaldesi, 2010)

Contrariamente às outras propriedades analisadas na sua campanha experimental (resistência à flexão e módulo de elasticidade), Limbachiya *et al.* (2000) obtiveram uma clara tendência de aumento da retracção com o teor de AGRB, após 90 dias de cura, como se pode observar na Figura 2.53. Os autores justificam este facto pela maior quantidade de cimento presente nos BAGRB, e consequente redução da relação a/c para se obter a mesma resistência à compressão aos 28 dias nos vários betões. É também possível, neste caso, que a argamassa aderida aos AGRB tenha contribuído para um maior valor da retracção.

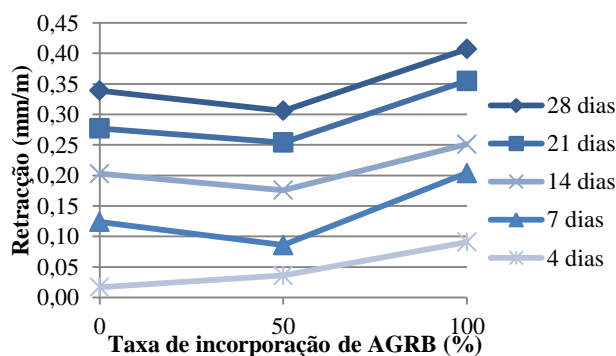


Figura 2.51 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB (Malesev *et al.*, 2010)

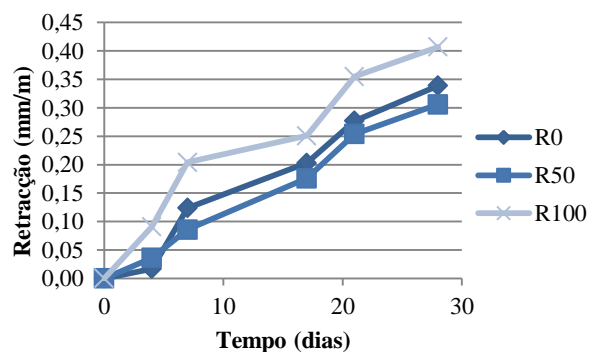


Figura 2.52 - Evolução da retracção ao longo do tempo em BAGRB (Malesev *et al.*, 2010)

Na campanha de Soberón (2002), citada por Robles (2007), foi também analisado o fenómeno de retracção (Figura 2.53). Nos resultados obtidos, verifica-se a tendência de aumento desta propriedade com a quantidade de AGRB utilizados na formulação dos betões, não sendo, no entanto, obtida uma correlação satisfatória. Robles (2007) refere que o valor de retracção para uma taxa de 30% de substituição de AGP por AGRB deve ser considerado anómalo, visto ser inferior ao do BR. Deste modo, o autor obteve um coeficiente de correlação superior, igual a 0,73.

2.4.10. Carbonatação

O dióxido de carbono e os iões de cloro são os principais responsáveis pela despassivação das armaduras, dando origem ao mecanismo de corrosão das mesmas, que tem como consequência principal a deterioração das estruturas de betão armado. Deste modo, os ensaios de carbonatação e de penetração dos cloretos são de importância vital para a avaliação do comportamento dos betões ao longo da sua vida útil. Ambos os fenómenos estão relacionados com a porosidade do betão e com a sua permeabilidade (Ferreira, 2000).

O ensaio de carbonatação permite aferir a maior ou menor facilidade com que o dióxido de carbono penetra em elementos de betão. Assim, este ensaio possibilita, em condições atmosféricas controladas, determinar a

profundidade atingida pela frente de carbonatação numa peça de betão. Quanto maior for esta profundidade de carbonatação, menos durável será o betão.

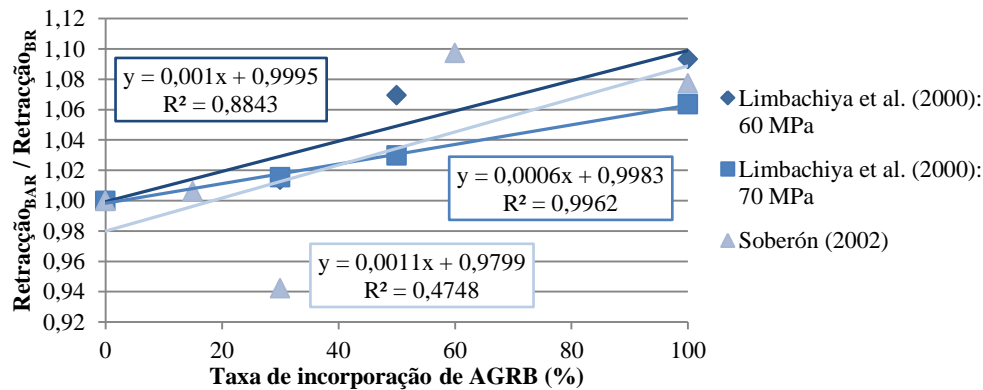


Figura 2.53 - Relação da retração com a taxa de substituição de AGRB (levantamento bibliográfico)

Hamada (1969), citado por Levy (2001), refere que os ensaios acelerados de carbonatação apresentam uma clara correlação com os resultados obtidos em condições normais de exposição.

É de todo expectável que, com a substituição de AP por AR, ocorra uma diminuição da resistência à carbonatação. Significa isto que, devido à maior porosidade dos AR em relação aos AP, conferida pela pasta de cimento aderida aos primeiros, a penetração de agentes exteriores no interior do betão fique mais facilitada.

Kikuchi *et al.* (1998), referidos por Rocha e Resende (2004), avaliaram a resistência à carbonatação de BARB e concluíram que estes apresentam maior profundidade de carbonatação do que os betões com AP quando submetidos, durante um mês, a uma concentração de dióxido de carbono de 5%, temperatura de 30 °C e 60% de humidade. Os autores relatam também que os betões com incorporação de agregados finos reciclados de betão (BAFRB) possuem maior profundidade da frente de carbonatação do que os BAGRB.

De um modo geral, segundo a pesquisa bibliográfica de Xiao *et al.* (2012), pode-se concluir que a resistência à carbonatação dos BARB é inferior à do BR, principalmente devido à influência da argamassa aderida aos ARB e da qualidade destes. O mesmo autor cita Sagoe-Crentsil *et al.* (2001), referindo que estes obtiveram um aumento de 10% na taxa de carbonatação quando substituíram a totalidade dos AGP por AGRB. A sua pesquisa bibliográfica encontra-se na Figura 2.54.

Kou e Poon (2012) obtiveram um aumento da profundidade de carbonatação com o incremento de AGRB na produção de betão (Figura 2.55). Este resultado era esperado, uma vez que os autores obtiveram a mesma tendência para a absorção de água (por capilaridade) e penetração de cloretos, encontrando-se de acordo com outras investigações.

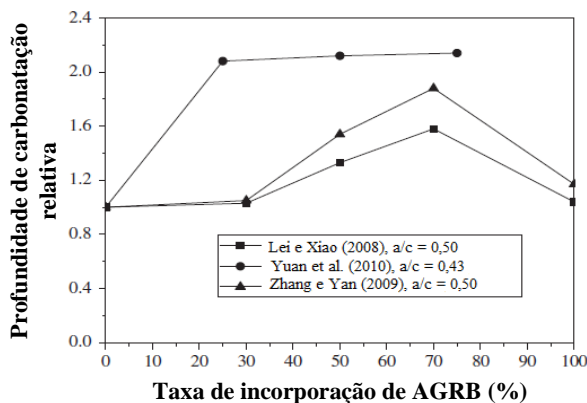


Figura 2.54 - Profundidade de carbonatação em função da taxa de substituição de AGRB (Xiao *et al.*, 2012)

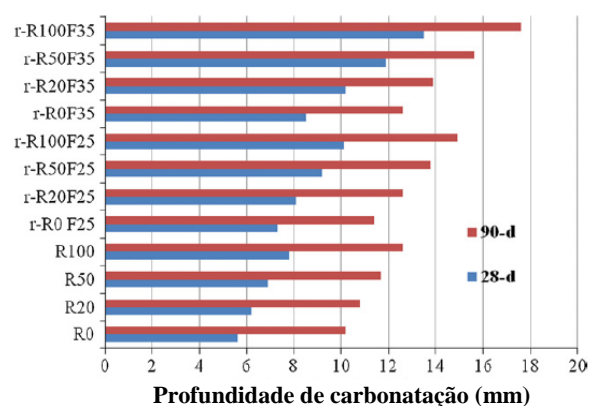


Figura 2.55 - Resultados do ensaio de carbonatação em BAGRB, com e sem introdução de cinzas volantes (Kou e Poon, 2012)

Os resultados alcançados por Matias e Brito (2005), presentes na Figura 2.56, não foram elucidativos. A profundidade da frente de carbonatação dos BAGRB, com uma taxa de substituição de 100% de AGP por AGR, foi semelhante à do betão de controlo. Nos tempos iniciais de exposição, chegou-se a registar maiores profundidades de carbonatação no BR. Os resultados dos BAR podem ter sido influenciados pela utilização de superplastificantes para compensar a perda de trabalhabilidade originada pelos AR, o que os autores justificam pelo facto de os plastificantes contribuírem para uma maior compacidade da pasta cimentícia. Os autores referem ainda que as discrepâncias de resultados registadas no BR podem colocar em causa a sua validade.

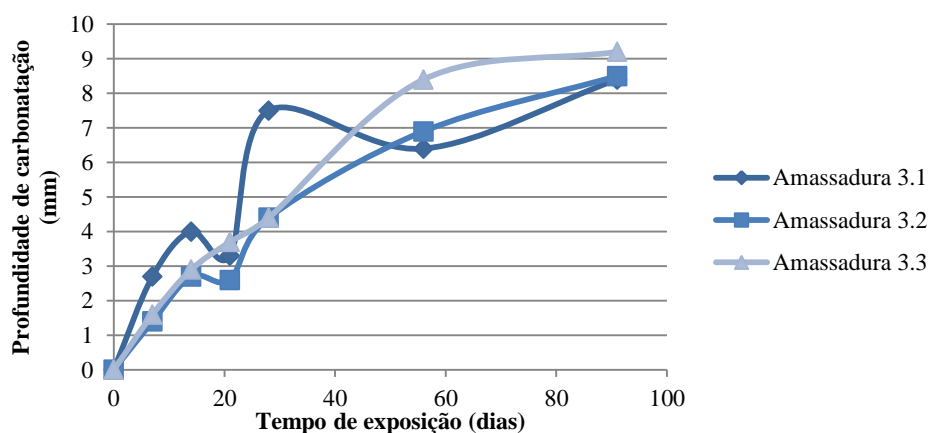


Figura 2.56 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo (Matias e Brito, 2005)

Contrariamente ao esperado, Levy (2001) obteve profundidades de carbonatação semelhantes ou inferiores nos BAR, tanto de ARB como AR de cerâmicos, em relação ao BR (Figura 2.57). Com a redução da relação a/c e consequente aumento da resistência à compressão, a diferença de resultados entre os BAGRB e o BR foi-se reduzindo, ou seja, foram obtidas profundidades de carbonatação idênticas entre os betões. O autor menciona que, à medida que se diminui a relação a/c , a influência exercida pela qualidade da pasta cimentícia nesta propriedade prevalece sobre a influência da qualidade e quantidade dos AR. Estes resultados podem ser justificados pela utilização de maior quantidade de cimento nos BAGRB, de modo a obter a mesma resistência à compressão do que no BR, o que se traduz numa redução da permeabilidade e dificuldade no avanço da frente de carbonatação.

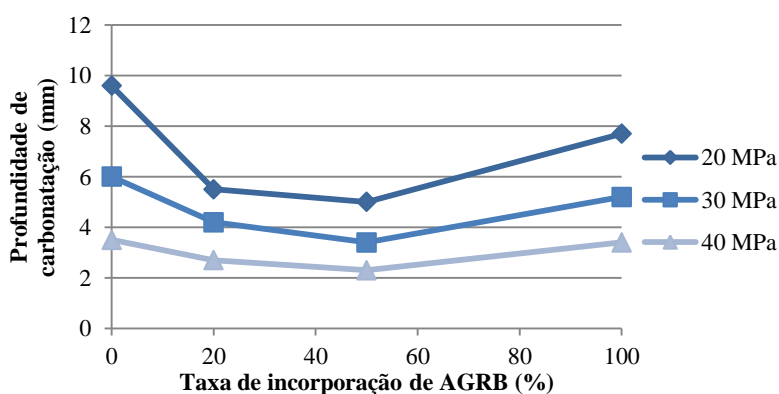


Figura 2.57 - Relação da resistência à carbonatação com a taxa de substituição de AGRB (Levy, 2001)

2.4.11. Penetração de cloretos

Tal como referido para a resistência à carbonatação, a avaliação da penetração de iões de cloro em elementos de betão é de extrema importância na caracterização da sua durabilidade.

Com a maior permeabilidade dos BAR relativamente ao betão convencional, que aumenta com a taxa de substituição, é esperado que a resistência à penetração dos cloretos diminua, devido à maior facilidade de penetração de agentes agressivos exteriores (como é o caso dos cloretos).

Olorunsogo e Padayachee (2002), além de terem estudado o efeito da substituição de AGP por AGRB no betão,

analisaram, ainda, a influência do tempo de cura (3, 7, 28 e 56 dias). Os autores observaram maiores difusões dos cloretos nos BAGRB face ao BR, com incrementos entre 41 e 87% em betões com substituição integral de AGP por AGRB. Constataram, ainda, que o desempenho dos betões melhora com o aumento do tempo de cura, tendo registado uma diminuição da penetração dos cloretos, ao aumentar o período de cura de 3 para 56 dias, de 69% e de 59,2% no BR e no BAGRB com taxa de substituição de 100%, respectivamente.

Para um aumento da taxa de AGRB, Kou e Poon (2012) obtiveram, tal como esperado, reduções na resistência à penetração dos cloretos. Por outras palavras, os iões de cloro penetram mais facilmente em betões com AGRB (R20, R50 e R100) do que em betões produzidos apenas com AP (R0). Aos 90 dias de cura do betão, em virtude de um maior volume de produtos hidratados, e conseqüente menor volume de vazios e permeabilidade do betão, os valores obtidos para esta propriedade foram melhores face aos obtidos para os 28 dias. Os investigadores concluíram, ainda, que a introdução de cinzas volantes no fabrico de betão produz um efeito benéfico nesta propriedade.

No estudo de Rao *et al.* (2011), a penetração dos cloretos aumentou com a incorporação de AGRB nos betões. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.58. A natureza mais porosa dos AR, conferindo-lhes maior permeabilidade, é avançada como justificação para o pior desempenho dos BAGRB relativamente a esta propriedade. A diferença registada entre o betão com 100% de AGRB e o BR foi de 0,7 mm, o que corresponde a um incremento de 14% na profundidade de penetração.

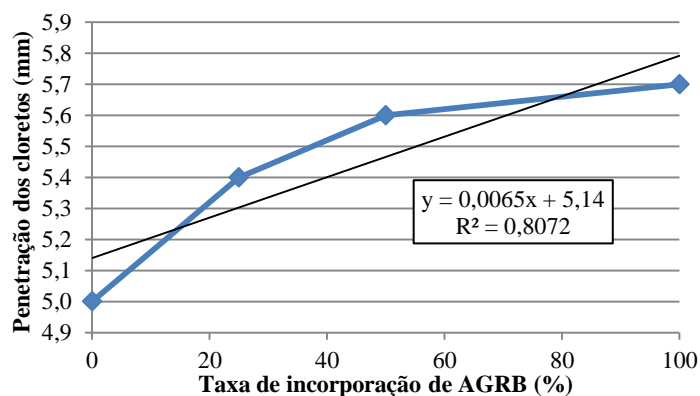


Figura 2.58 - Relação da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de AGRB (Rao *et al.*, 2011)

O estudo de Levy (2001) permitiu concluir que a penetração de iões de cloreto pode ser igualmente influenciada pela relação *a/c* e pela taxa de AR. A Figura 2.59 apresenta os resultados obtidos pelo autor para os BAGRB, sendo estes correspondentes apenas à camada superficial dos provetes (0-1 cm). Quando se passa de um betão de 20 MPa de resistência para um de 40 MPa, a concentração de cloretos passa de 0,50 para 0,35%, ou seja, há uma redução de 30%, constatada para o betão formulado apenas com AP. Em relação à substituição de AGP por AGRB, verificou-se que a mesma provocou um aumento da percentagem de cloretos presente nos betões, até a uma taxa de incorporação de 50%. No entanto, os betões com 100% de AGRB registaram um valor inferior ao do BR, contrariando a tendência apresentada pelos restantes betões. Desprezando estes últimos resultados, obtêm-se boas correlações entre o teor de cloretos e a percentagem de AGRB, como se verifica na Figura 2.60. Nas restantes camadas (1-2 e 2-3 cm), a percentagem de cloretos diminuiu, sendo a mesma semelhante para os vários tipos de betão.

Contrariamente ao esperado, Matias e Brito (2005) obtiveram, nos betões com 100% de AGRB analisados, resultados semelhantes e até melhores do que no BR (Figura 2.61). A tendência registada é inversa da ocorrida nas restantes campanhas, o que se poderá justificar pelo facto de nos BAR terem sido utilizados superplastificantes, ao contrário do que aconteceu no BR. A amassadura que melhor resistiu penetração de cloretos foi a produzida com AGRB e à qual foi adicionado superplastificante do tipo 2, onde ocorreu uma redução de aproximadamente 16%.

De um modo geral, e para todas as gamas de resistência previstas, a introdução até 100% de AGRB nos betões produzidos por Limbachiya *et al.* (2000) não teve nenhuma influência negativa na difusão de cloretos no betão (Figura 2.62). Por outras palavras, os resultados deste estudo indicam que os BAGRB têm um desempenho praticamente igual a um betão com a mesma classe de resistência e produzido totalmente com AP, em que a diferença de difusão de cloretos nos betões foi inferior a $1,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

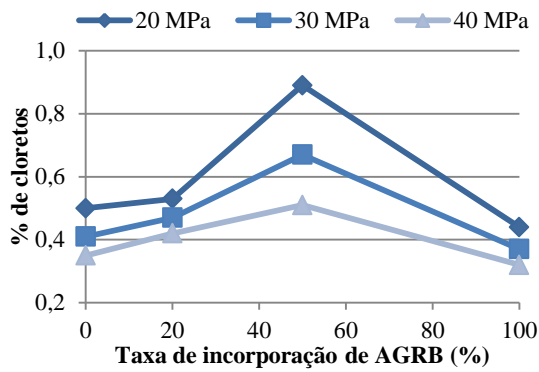


Figura 2.59 - Relação entre a percentagem de cloretos, na camada de 0-1 cm, e a taxa de substituição de AGRB (Levy, 2001)

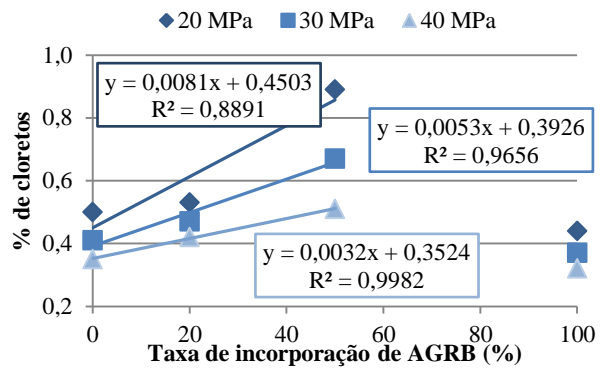


Figura 2.60 - Relação entre a percentagem de cloretos, na camada de 0-1 cm, e a taxa de substituição de AGRB, desprezando os resultados para a taxa de 100% (Levy, 2001)

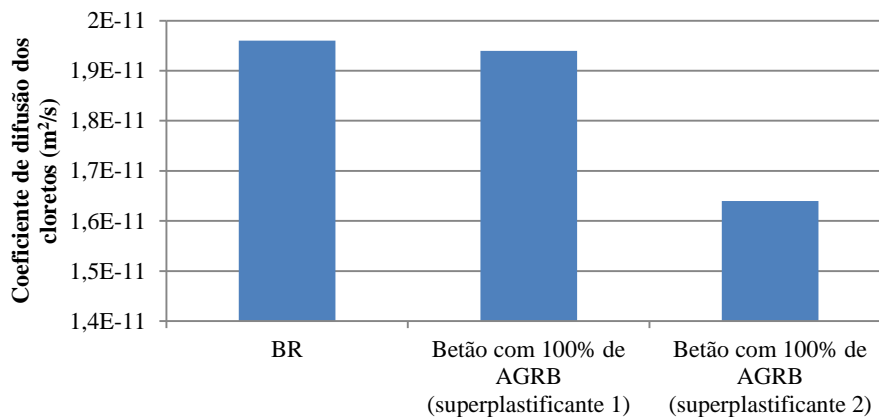


Figura 2.61 - Resultados da campanha de Matias e Brito (2005) para a penetração de cloretos

No seu estudo experimental, Gonçalves *et al.* (2004) obtiveram os resultados que são apresentados na Figura 2.63, para o ensaio de resistência aos cloretos. Os autores constataram que a penetração dos cloretos aumenta com a inclusão de AGRB, sendo maior a diferença nos betões com 350 kg/m³ de cimento. Os autores justificam esta diferença superior nos betões com menos dosagem de cimento com a menor densidade da ligação entre os agregados e pasta cimentícia que permite a participação da porosidade dos AR no processo de transporte dos cloretos. A ligeira distinção registada entre o betão REF 450 e o REC 450 demonstra que a influência da pasta de cimento nesta propriedade é superior à da porosidade dos AGRB. Deste modo, os investigadores concluíram que a utilização de maiores quantidades de cimento na formulação dos betões limita a influência dos AR no processo de transporte de agentes ambientais agressivos para o interior do betão.

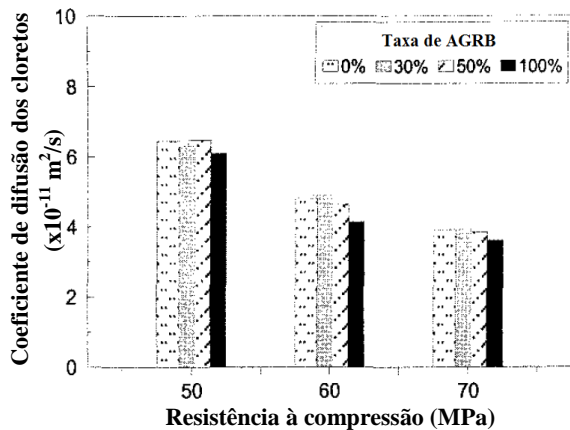


Figura 2.62 - Efeito dos AGRB na penetração de cloretos, para betões de igual resistência (Limbachiya *et al.*, 2000)

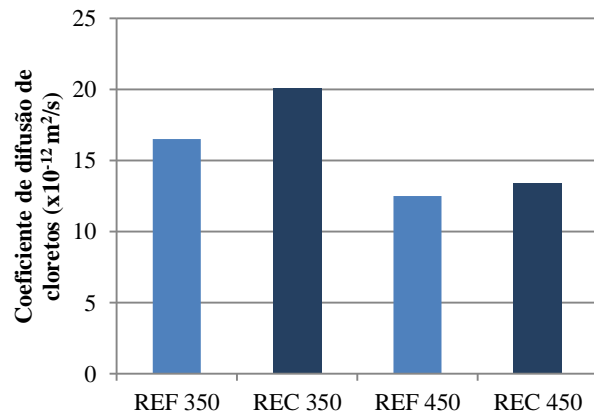


Figura 2.63 - Relação da penetração dos cloretos com a taxa de substituição de AGRB (Gonçalves *et al.*, 2004)

2.5. Conclusões gerais

No que diz respeito aos AGRB, é expectável que estes apresentem uma forma mais angulosa e com superfície rugosas, o que poderá conduzir a uma melhor aderência pasta / agregado. Este tipo de agregados é em geral menos denso e possui maior absorção de água comparativamente aos AP. A sua elevada taxa de absorção de água leva à necessidade de compensar a água absorvida de modo a que não se verifiquem valores inferiores de abaixamento, mantendo assim a trabalhabilidade constante.

Quanto às propriedades físicas dos betões, trabalhabilidade e massa volúmica, as conclusões obtidas indicam que existe influência da incorporação de AGRB nos betões. Em geral, a massa volúmica dos betões, sendo o resultado das ponderações dos vários materiais que os constituem, irá ser inferior, em consequência da menor massa volúmica dos AGRB, em comparação com o BR. A trabalhabilidade, além da referida influência da absorção de água dos agregados, pode ser afectada pela forma das partículas dos AGRB.

Com base no levantamento bibliográfico, verificou-se que o desempenho mecânico nem sempre é afectado pelos AGRB. De um modo geral, para a resistência à compressão e à tracção, quando mantida a trabalhabilidade e a curva granulométrica dos agregados, não se obteve uma clara tendência da influência da introdução de AGRB nos betões. Na primeira, existe uma variação considerável de resultados entre as várias investigações analisadas, sendo que numas a resistência decresceu com o teor de AGRB, enquanto noutras não existiu modificação da mesma. Para a resistência à tracção (por compressão diametral), os resultados encontrados indicam uma proximidade de valores entre os BAGRB e o BR. Pelo contrário, o módulo de elasticidade dos betões é influenciado significativamente, sendo o decréscimo desta propriedade proporcional ao aumento de AGRB, facto justificado principalmente pela maior deformabilidade da pasta aderida aos AR em relação aos AP.

No que se refere à resistência à abrasão, é esperado que a incorporação de AGRB aumente a resistência à abrasão dos betões. No entanto, algumas investigações sugerem a proximidade de resultados entre os BAGRB e o BR, existindo alguma variabilidade nos seus valores.

As referências bibliográficas relativas à velocidade de propagação dos ultra-sons foram bastante claras: a velocidade dos ultra-sons será tanto menor quanto maior for a taxa de incorporação de AGRB. Apesar de existir uma boa relação entre esta propriedade e a resistência à compressão, não se verificou a dispersão de resultados obtidos para esta última.

A utilização de ARB gera betões com menor desempenho relativamente às propriedades relacionadas com a sua durabilidade, principalmente devido à maior porosidade deste tipo de agregados. No que concerne à retracção, à resistência à penetração dos cloretos e à carbonatação, é expectável que ocorram perdas de desempenho com a inclusão de AGRB. No entanto, existem alguns estudos contraditórios em que não se verificou influências significativas por parte deste tipo de agregados.

Relativamente às absorções de água por imersão e capilaridade, as conclusões nas várias campanhas experimentais são semelhantes, indicando um aumento da taxa de absorção proporcional ao incremento dos AGRB nos betões. A porosidade, e consequente elevada capacidade de absorção de água dos ARB, são apontadas como principais razões para a redução de desempenho dos betões.

Analisando BAGRB com a mesma resistência à compressão que o BR, verifica-se que o efeito dos AGRB nas diversas propriedades é atenuado como consequência da utilização de relações a/c inferiores.

Deste modo, e através dos ensaios realizados nesta investigação, pretendeu-se dissipar as dúvidas relativamente à influência dos AGRB (em particular da indústria de pré-fabricação) em algumas propriedades do betão, uma vez que ainda existem incertezas sobre a mesma.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O objectivo da presente campanha experimental é o estudo da reciclagem de elementos de betão da indústria da pré-fabricação, os quais serão posteriormente analisados e utilizados na formulação de novos betões, após a sua trituração e transformação em agregados reciclados. Este estudo focou apenas a fracção grossa destes agregados (4 a 22,4 mm).

As composições de betão a analisar, num total de onze, são as apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composições de betão

Betão com totalidade de AP	Betão com incorporação de x% de AGRB (Bx)	Betão com incorporação total de AGRB	Betão com incorporação total AGRB e x% de SP (B100SPx)
BR	B10 - incorporação de 10%	B100	B100SP0.5 - 0,5% de SP
	B20 - incorporação de 20%		B100SP1.0 - 1,0% de SP
	B30 - incorporação de 30%		B100SP1.5 - 1,5% de SP
	B40 - incorporação de 40%		B100SP2.0 - 2,0% de SP
	B50 - incorporação de 50%		

Relativamente ao Bx e ao B100SPx, visto apresentarem várias formulações com diferentes taxas de substituição de agregados e quantidades introduzidas de plastificantes, respectivamente, optou-se pela composição que apresentasse propriedades mais próximas das do BR.

Assim, pretende-se entender o efeito da incorporação de AGRB, provenientes da indústria de pré-fabricação, no fabrico de novos betões. Além disto, a realização dos ensaios nos betões com SP tem como objectivo perceber-se de que forma a introdução de um SP permite compensar a expectável diminuição da qualidade dos BARGB. Desta forma, é possível avaliar a variação de desempenho dos betões face ao BR, em função das diferentes taxas de substituição dos AG e da utilização de um adjuvante.

No âmbito do projecto em que esta dissertação se encontra inserida, foram realizados diversos ensaios à escala real de estruturas porticadas de dois pisos em betão armado, com as quatro composições definidas. Estes ensaios incluem ensaios de caracterização do betão, ensaios não destrutivos de caracterização dinâmica das estruturas (Pacheco *et al.*, 2013c) e ensaios de carga vertical (Pacheco *et al.*, 2014a) e horizontal (Pacheco *et al.*, 2014c). O primeiro tipo de ensaios referido integra esta campanha experimental.

Neste capítulo, apresenta-se as várias fases desenvolvidas ao longo da campanha experimental. Descreve-se também os ensaios realizados em cada uma das fases experimentais, assim como a formulação das composições de betão analisadas. Apesar de as várias fases se encontrarem numeradas, não se procedeu de forma sequencial à realização das mesmas, com o intuito de que o caminho crítico das actividades fosse o mais curto possível.

3.2. Planeamento da campanha experimental

3.2.1. Primeira fase experimental

Numa primeira fase desta campanha experimental, analisou-se os AP (grossos e finos) e os AR (grossos), que foram empregues no fabrico das várias composições de betões analisados, através da realização de diversos ensaios normalizados.

A norma NP EN 12620 (2004) especifica as propriedades dos agregados naturais, processados mecanicamente, dos agregados reciclados ou de misturas de agregados para utilização em betão. É aplicável aos agregados para betão que possuam uma massa volúmica, após secagem em estufa, superior a 2000 kg/m³.

Relativamente aos AGP e AGR, a sua caracterização foi feita com base nos seguintes ensaios:

- **análise granulométrica** - normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999);

- **massa volúmica e absorção de água** - norma NP EN 1097-6 (2003);
- **baridade** - norma NP EN 1097-3 (2002);
- **desgaste de Los Angeles** - especificação LNEC E 237 (1970);
- **teor de humidade** - norma NP EN 1097-5 (2011);
- **índice de forma** - norma NP EN 933-4 (2002).

Além destes ensaios, determinou-se a absorção de água por parte dos AGRB, através de um processo baseado no descrito por Leite (2001).

Quanto aos AFP, os ensaios a realizar foram:

- **análise granulométrica** - normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999);
- **massa volúmica e absorção de água** - norma NP EN 1097-6 (2003);
- **baridade** - norma NP EN 1097-3 (2002).

Na Tabela 3.2, é possível aferir as variáveis envolvidas nestes ensaios, assim como o respectivo resultado.

Tabela 3.2 - Variáveis e resultados dos ensaios aos agregados

Ensaio	Variáveis	Resultado
Análise granulométrica	$R_{i\%}$, percentagem da massa retida no peneiro i (%); R_i , massa retida no peneiro i (g); M_1 , massa original seca (g); M_2 , massa seca, após lavagem, do material com granulometria superior a 0,063 mm (g); f , percentagem de finos que passa no peneiro 0,063 mm; P , massa do material peneirado retido no recipiente do fundo (g)	$R_{i\%} = \frac{R_i}{M_1} \times 100$ $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1}$
Massa volúmica e absorção de água	ρ_a , massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3); ρ_{rd} , massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3); ρ_{ssd} , massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm^3); ρ_w , massa volúmica da água (kg/dm^3); WA_{24} , absorção de água após imersão em água durante 24 h (%); M_1 , massa do agregado saturado com superfície seca (g); M_2 , massa do picnómetro contendo o agregado imerso na água (g); M_3 , massa do picnómetro apenas com água (g); M_4 , massa do agregado seco em estufa (g)	$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$ $\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$ $\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$ $WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$
Massa volúmica aparente	ρ_b , massa volúmica aparente do provete de ensaio (kg/dm^3); M_1 , massa do recipiente vazio (kg); M_2 , massa do recipiente com o provete de ensaio (kg); V_r , volume do recipiente (dm^3); v , percentagem de vazios (%)	$\rho_b = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 100$ $v = \frac{\rho_{rd} - \rho_b}{\rho_{rd}} \times 100$
Desgaste de Los Angeles	LA , coeficiente de desgaste de Los Angeles (%); M_1 , massa da amostra (g); M_2 , massa do material retido no peneiro de malha 1,6 mm	$LA = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$
Teor de humidade	w , teor de humidade do agregado (%); M_1 , massa da amostra (g); M_2 , massa constante da amostra seca (g)	$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
Índice de forma	SI , índice de forma (%); ΣM_{1i} , somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g); ΣM_{2i} , somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g)	$SI = \frac{\Sigma M_{2i}}{\Sigma M_{1i}} \times 100$

3.2.2. Segunda fase experimental

Foram estudadas, nesta fase, as 11 composições de betões previstas no ponto 3.1, com o objectivo de determinar quais as composições a estudar na fase seguinte. À partida, duas das composições estavam definidas: BR e B100. Para os betões com várias composições, Bx e B100SPx, definiu-se nesta fase quais seriam alvo de estudo na próxima fase. Relativamente ao Bx, foi definida qual a taxa de substituição máxima de AGP por AGRB que permite manter a resistência à compressão do betão, ou seja, a máxima quantidade de AGRB que não influencia negativamente a resistência. Quanto ao B100SPx, definiu-se qual o teor de SP a incorporar num betão com substituição da totalidade dos AG. Pretendeu-se escolher o teor óptimo de SP que permite compensar a perda de resistência originada pela incorporação de AR.

Foi também objectivo desta fase obter uma correcta trabalhabilidade em todos os betões, ou seja, uniformizar os resultados obtidos pelo abaixamento do cone de Abrams.

Para tal, foram efectuados os seguintes ensaios sobre o betão fresco:

- **abaixamento (cone de Abrams)** - norma NP EN 12350-2 (2009);
- **massa volúmica** - norma NP EN 12350-6 (2009).

Na Tabela 3.3, é possível aferir as variáveis envolvidas nos ensaios ao betão no estado fresco, assim como o respectivo resultado.

Tabela 3.3 - Variáveis e resultados dos ensaios ao betão no estado fresco

Ensaio	Variáveis	Resultado
Abaixamento (cone de Abrams)	H , abaixamento do cone de Abrams (mm); H_1 , altura do cone (300 mm); H_2 , altura do ponto mais alto do provete após desmoldagem (mm)	$H = H_1 - H_2$
Massa volúmica	D , massa volúmica do betão fresco (kg/m^3); M_1 , massa do recipiente (kg); M_2 , massa do recipiente com o provete de betão fresco no seu interior (kg); V , volume do recipiente (m^3)	$D = \frac{M_2 - M_1}{V}$

O betão no estado endurecido foi submetido ao ensaio de **resistência à compressão** aos 7 e aos 28 dias de idade, segundo a norma NP EN 12390-3 (2011).

3.2.3. Terceira fase experimental

A terceira fase da campanha experimental teve como objectivo avaliar as propriedades mecânicas e em termos de durabilidade dos BAGRB, cujos agregados provêm da indústria de pré-fabricação. Nesta fase, analisou-se apenas 4 tipos de betão:

- BR;
- B100;
- B25 (com a taxa de substituição definida na fase anterior);
- B100SP1.0 (com o teor de superplastificante definido na fase anterior).

Os ensaios realizados ao betão no estado fresco foram os mesmos da segunda fase. Relativamente ao desempenho mecânico do betão, determinou-se as seguintes propriedades:

- **resistência à compressão** - norma NP EN 12390-3 (2011);
- **resistência à tracção por compressão diametral** - norma NP EN 12390-6 (2011);
- **resistência à abrasão** - norma Alemã DIN 52108 (2007);
- **módulo de elasticidade** - especificação LNEC E 397 (1993);
- **velocidade de propagação de ultra-sons** - norma NP EN 12504-4 (2007).

Ao nível da durabilidade, foram efectuados os seguintes ensaios:

- **retracção** - especificação LNEC E 398 (1993);
- **absorção por imersão** - especificação LNEC E 394 (1993);
- **absorção por capilaridade** - especificação LNEC E 393 (1993);
- **resistência à carbonatação** - especificação LNEC E 391 (1993);
- **resistência à penetração dos cloretos** - especificação LNEC E 463 (2004).

Resumidamente, os diferentes ensaios realizados na segunda e terceira fase aos betões endurecidos, assim como os provetes (forma e dimensões de acordo com a norma NP EN 12390-1, 2012) e as idades de ensaio, são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Ensaio realizados em laboratório

Fase	Ensaio	Idade (dias)	N.º de provetes	Forma e dimensões
2ª	Resistência à compressão	7	2	Cubos, 150 mm de aresta
		28	4	Cubos, 150 mm de aresta
3ª	Resistência à compressão	7	3	Cubos, 150 mm de aresta
		28	5	Cubos, 150 mm de aresta
		56	3	Cubos, 150 mm de aresta
	Resistência à tração (por compressão diametral)	28	3	Cilindros, Φ150 x 300 mm
	Módulo de elasticidade	28	2	Cilindros, Φ150 x 300 mm
	Velocidade de propagação de ultra-sons	28	5	Cubos, 150 mm de aresta
	Resistência à abrasão	91	3	Prismas, 71 x 71 x 50 mm
	Retracção	0-90	2	Prismas, 100 x 100 x 450 mm
	Absorção de água por imersão	28	4	Cubos, 100 mm de aresta
	Absorção de água por capilaridade	28	4	Cilindros, Φ150 x 100 mm
Resistência à carbonatação	7, 28, 56, 90	3	Cilindros, Φ100 x 40 mm	
Resistência à penetração dos cloretos	28, 90	3	Cilindros, Φ100 x 50 mm	

3.2.4. Quarta fase experimental

Como referido no subcapítulo 3.1, foram realizados diversos ensaios à escala real de estruturas porticadas de dois pisos em betão armado, com as quatro composições definidas. Na presente dissertação, abordou-se os ensaios de caracterização do betão *in situ*, os quais se inserem na quarta e última fase experimental. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- **resistência à compressão em provetes cúbicos** - norma NP EN 12390-3 (2011);
- **resistência à compressão em carotes** - normas NP EN 12504-1 (2009) e NP EN 12390-3 (2011);
- **velocidade de propagação de ultra-sons** - norma NP EN 12504-4 (2007);
- **dureza superficial (esclerómetro de Schmidt)** - NP EN 12504-2 (2012).

Tabela 3.5 - Ensaio *in situ* realizados nas estruturas

Ensaio	Idade (dias)	Elementos ensaiados
Resistência à compressão em provetes cúbicos	7	3 provetes cúbicos por piso com 150 mm de aresta
	28	5 provetes cúbicos por piso com 150 mm de aresta
Resistência à compressão em carotes	28	3 carotes de pilar (base, centro, topo); 2 carotes de viga; 2 carotes de lajes (1 por piso)
Velocidade de propagação de ultra-sons	28	8 medições em pilares por piso (base, centro e topo de 2 pilares e centro dos outros 2 pilares); 3 medições em viga por piso (extremidades e centro)
Dureza superficial (esclerómetro de Schmidt)	28	10 medições com disparo horizontal em pilares por piso (base, centro e topo de 2 pilares e base e centro dos outros 2 pilares); 2 medições com disparo horizontal em vigas por piso (extremidades); 2 medições com disparo vertical descendente em vigas por piso (extremidades); 3 medições com disparo vertical descendente em lajes (extremidades e centro)

Na Tabela 3.6, é possível aferir as variáveis envolvidas nos ensaios ao betão no estado endurecido, para a terceira e quarta fases experimentais, bem como o respectivo resultado.

A descrição detalhada dos procedimentos de todos os ensaios referidos neste capítulo, tal como dos aparelhos e utensílios necessários para a sua realização, pode ser consultada em Soares *et al.* (2013c), para os ensaios realizados na segunda e terceira fases da campanha experimental, e em Soares *et al.* (2014c), para a quarta fase.

3.3. Produção dos agregados reciclados de betão

Os AGRB foram produzidos a partir da demolição e posterior trituração de elementos de betão provenientes da indústria da pré-fabricação, os quais tinham sido produzidos pelo grupo Opway.

Tabela 3.6 - Variáveis e resultados dos ensaios ao betão no estado endurecido

Ensaio	Variáveis	Resultado
Resistência à compressão	f_c , resistência à compressão do provete (MPa); F , carga máxima à rotura (N); A_c , área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada (mm^2)	$f_c = \frac{F}{A_c}$
Resistência à tracção	f_{ct} , resistência à tracção por compressão diametral (MPa); F , carga máxima (N); L , comprimento da linha de contacto do provete (mm); d , dimensão da secção transversal (mm)	$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$
Módulo de elasticidade	E_c , módulo de elasticidade em compressão (GPa); σ_i , tensão inicial aplicada (MPa); σ_f , tensão máxima aplicada (MPa); ε_i , extensão correspondente à tensão σ_i ; ε_f , extensão correspondente à tensão σ_f	$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \times 10^{-3}$
Velocidade de propagação de ultra-sons	V , velocidade de propagação de ultra-sons (km/s); L , distância percorrida pela onda entre o emissor e o receptor (mm); T , intervalo de tempo que a onda demora do emissor ao receptor (μs)	$V = \frac{L}{T}$
Resistência à abrasão	Δl , perda média de espessura (mm); $l_{i,j}$, espessura inicial do provete, medida no ponto j (mm); $l_{f,j}$, espessura final do provete, medida no ponto j (mm); n , número de pontos marcados no provete	$\Delta l = \frac{\sum_{j=1}^n (l_{i,j} - l_{f,j})}{n}$
Retracção	ε , retracção (mm/mm); d_i , distância entre os pontos de referência após a colocação das pastilhas metálicas (mm); d_f , distância, após um determinado tempo relativamente ao início do ensaio, entre os pontos de referência (mm)	$\varepsilon = \frac{d_f - d_i}{d_i}$
Absorção de água por imersão	A_i , absorção de água por imersão (%); m_1 , massa do provete saturado no ar (g); m_2 , massa hidrostática do provete saturado (g); m_3 , massa do provete seco (g)	$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100$
Absorção de água por capilaridade	A_c , absorção de água por capilaridade, no instante t_i (g/mm^2); M_0 , massa do provete seco em estufa (g); M_i , massa do provete, no momento t_i (g); A_s , área da face do provete que esteve em contacto com a água (mm^2)	$A_c = \frac{M_i - M_0}{A_s}$
Resistência à carbonatação	-	Média simples das profundidades de carbonatação, medidas em milímetros, dos vários provetes
Resistência à penetração dos cloretos	D_{nssm} , coeficiente de migração em regime não estacionário (m^2/s); R , constante dos gases perfeitos (8,314 J/(K·mol)); T , temperatura média entre o início e o fim do ensaio na solução anódica (K); z , valor absoluto de valência do ião cloreto ($z = 1$); F , constante de Faraday (9,648 x 10 ⁴ J/(V·mol)); x_d , valor médio da profundidade de penetração (m); t , tempo de duração do ensaio (s); U , voltagem aplicada no circuito (V); L , espessura do provete (mm); erf^{-1} , inverso da função erro; c_d , concentração de cloretos para a qual a prata reage ($c_d = 0,07 \text{ N}$); c_0 , concentração de cloretos no cátodo ($c_0 = 2 \text{ N}$)	$D_{nssm} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \sqrt[\alpha]{x_d}}{t}$ $E = \frac{U - 2}{L}$ $\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E}} \times \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$
Dureza superficial	-	Mediana de todas as leituras

3.3.1. Procurement dos elementos pré-fabricados

A procura, por parte do Grupo Opway, dos materiais a reciclar, incidiu nas diversas empresas de pré-fabricação. Estas produzem quantidades consideráveis de resíduos de betão, sendo muito relevante encontrar um destino ecologicamente sustentável e economicamente vantajoso em relação à habitual deposição dos resíduos em aterros.

Numa fase inicial, estava prevista a utilização de provetes cúbicos com origem nas fábricas do Grupo Pavicentro (Pavicentro, Pavilis e Prepor). No entanto, quando se procedeu ao levantamento destes mesmos provetes, constatou-se que não estaria disponível mais de um terço da quantidade necessária para a realização deste projecto (seriam necessários cerca de 11800 provetes para obter 40 m³ de agregados reciclados).

Seguiu-se então a procura de alternativas. A primeira equacionada foi a reciclagem de lajes alveolares, por se tratar de peças muito pouco armadas e com grande utilização no mercado, aspectos favoráveis a esta alternativa.

Com o intuito de avaliar a viabilidade desta alternativa, recolheu-se uma amostra de material resultante da britagem das lajes alveolares. Com base nesta amostra, realizou-se o ensaio de análise granulométrica. Através dos resultados obtidos, verificou-se que a fracção granulométrica aproveitável (4 a 22,4mm) representava apenas cerca de 36% do total da amostra. Dos restantes 64% (fracção não aproveitável), grande parte correspondia a agregados mais finos do que os pretendidos, perfazendo aproximadamente 84% destes.

Estando estas percentagens de aproveitamento desenquadradas das expectativas (valor muito baixo de aproveitamento), prosseguiu-se com a procura de outras alternativas, pelo que foi equacionada a utilização de lajes PI. Contudo, não se realizou a sua demolição visto as peças não se encontrarem acessíveis (estavam bloqueadas no estaleiro da empresa fabricante entre outros pré-fabricados, um edifício e uma linha de média tensão).

Por fim, avançou-se para a reciclagem de maciços de betão (Figura 3.1), os quais serviam de apoio para vigas pré-fabricadas. O volume de betão demolido destes elementos foi de 49,1 m³. Outros elementos, como os pilares e separadores do tipo *New Jersey* (Figura 3.2), foram também demolidos, correspondendo o seu volume a 4,7 m³.

Através da extracção de carotes nestes elementos e posterior ensaio de resistência à compressão, foi possível determinar a classe de resistência dos betões. Obteve-se maioritariamente classes de resistência C35/45 e C40/50, sendo assim de esperar que os AR sejam de boa qualidade. Este aspecto pode ser visto em Soares *et al.* (2013a).



Figura 3.1 - Maciços demolidos



Figura 3.2 - Outros elementos demolidos

3.3.2. Reciclagem dos elementos pré-fabricados

Para obter os ARB, foi necessário recorrer a dois processos distintos: em primeiro lugar, ocorreu a demolição dos elementos; seguidamente, procedeu-se à britagem dos resíduos de betão originados pela demolição.

A actividade de demolição foi realizada com recurso a uma giratória com três acessórios distintos: balde, martelo pneumático e tesoura de maxilas (Figura 3.3).

Este processo dividiu-se em duas fases. A primeira consistiu no fraccionamento do betão através de um martelo pneumático (Figura 3.4), da qual resultaram blocos de betão fragmentados com variadas dimensões juntamente com armaduras. Numa segunda fase, e de modo a remover as armaduras presentes nos elementos pré-fabricados, fez-se a passagem de uma tesoura de maxilas sobre os resíduos produzidos na fase anterior (Figura 3.5). O recurso ao balde apenas serviu para mover, num instante inicial, os elementos da sua posição inicial para um local com condições favoráveis à realização da demolição.

Deste modo, o resultado final são fragmentos de betão (Figura 3.6), idealmente não contendo varões de aço. No entanto, foi impossível a separação de todo o aço presente nos vários elementos.

A principal dificuldade no decorrer desta operação resultou da grande quantidade de armadura presente nos elementos pré-fabricados (Figura 3.7), o que originou uma perda considerável de rendimento, tornando o processo mais lento. A observação da Figura 3.8 permite confirmar este facto, sendo visível o aço separado pela tesoura de maxilas. Desta circunstância advém também a perda de material (preso ao aço) que poderia ser encaminhado para a britagem. Caso não existisse esta armadura, o recurso à tesoura de maxilas não seria necessário e, assim, a actividade resumir-se-ia à utilização do martelo pneumático.



Figura 3.3 - Acessórios (balde, tesoura de maxilas e martelo pneumático)



Figura 3.4 - Primeira fase: Giratória com martelo pneumático



Figura 3.5 - Segunda fase: Giratória com tesoura de maxilas



Figura 3.6 - Resíduos resultantes da segunda fase do processo de demolição



Figura 3.7 - Armadura contida nos elementos de betão



Figura 3.8 - Resíduos de aço produzidos pela operação

Finalizada a demolição, seguiu-se a britagem do material resultante da mesma. O processo de britagem envolveu a passagem do material por uma britadeira de mandíbulas e dois moinhos de martelos, com transporte do mesmo por meio de tapetes rolantes. Na Figura 3.9, apresenta-se uma vista geral de todo o equipamento de britagem. Mais em pormenor, encontram-se, nas Figuras 3.10 a 3.13 os principais constituintes do sistema.



Figura 3.9 - Equipamento de britagem



Figura 3.10 - Britadeira de maxilas (primária)

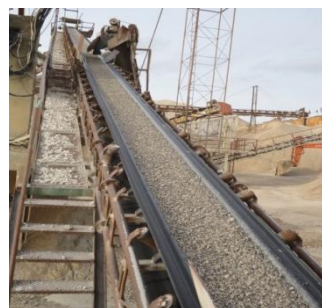


Figura 3.11 - Tapete rolante



Figura 3.12 - Moinho de martelos (secundário)

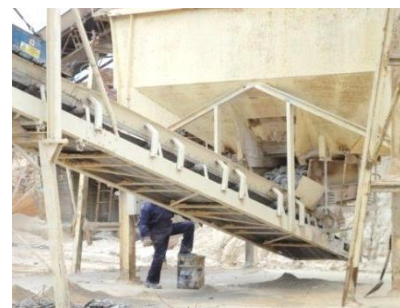


Figura 3.13 - Moinho de martelos (terciário)

Após a descarga dos blocos de betão a britar, os mesmos foram encaminhados para a britadeira de mandíbulas (primária) com abertura de 60 mm. Seguidamente, fez-se a passagem do material pelo moinho de martelos

(secundário) com abertura fixada em 40 mm. Por fim, o material resultante passou por outro moinho de martelo (terciário) de abertura de 20 mm e foi posteriormente encaminhado para dois depósitos distintos (um para a granulometria de 4/10 mm e outro para a de 10/20 mm).

O resultado final são agregados reciclados de betão de várias fracções granulométricas: brita 4/10 mm; brita 10/20 mm; areia grossa; areia fina. No âmbito deste estudo, apenas se aproveitaram as duas primeiras gamas.

3.4. Composição e produção dos betões

3.4.1. Introdução

O presente subcapítulo tem por objectivo apresentar a formulação, composição e processo de produção dos betões, a analisar na segunda, terceira e quarta fase experimental.

O betão é um material constituído por uma mistura devidamente ponderada de agregados, finos e grossos, cimento e água, resultante do endurecimento da pasta de cimento. Além destes elementos, pode ainda fazer parte da sua composição a utilização de adjuvantes e adições, sendo a sua incorporação destinada a fins diversos.

Em cada caso de estudo, surge a necessidade de definir a composição do betão, de modo a compreender o seu comportamento em termos de desempenho mecânico e de durabilidade, bem como a trabalhabilidade pretendida.

Dando continuidade aos trabalhos realizados no Instituto Superior Técnico, entre os quais campanhas experimentais sobre a incorporação de agregados reciclados em betões, optou-se por utilizar neste estudo a formulação de betões baseada nas curvas de referência de Faury.

3.4.2. Composição do betão de referência

O betão utilizado como referência apresenta uma composição tradicional, com agregados calcários naturais, sem aditivos ou adições. Este betão foi formulado de acordo com as directivas da norma NP EN 206-1 (2007) e especificação LNEC E 464 (2007), seguindo-se a formulação preconizada por Nepomuceno (1999a) através das curvas de referência de Faury.

Os restantes betões a serem produzidos têm por base a composição do BR. Por outras palavras, a proporção dos seus vários constituintes é igual à utilizada no BR, mantendo-se a quantidade de cimento e a curva granulométrica dos agregados. Outro aspecto mantido constante nos betões é a trabalhabilidade, sendo assim possível realizar uma adequada comparação entre as propriedades dos diferentes betões. Deste modo, definiu-se um intervalo de valores de abaixamento entre 125 ± 15 mm, os quais estão dentro da classe de abaixamento S3.

As principais características do BR são seguidamente enunciadas:

- **classe de resistência:** C25/30;
- **classe de consistência:** S3 (100 a 150 mm);
- **classe de exposição:** XC3 (moderadamente húmido);
- **ligante:** CEM I 42,5 R, fornecido pela empresa Secil (cimenteira de Outão, Setúbal); ficha técnica no Anexo A;
- **tipo de agregados:** agregados grossos britados e areias roladas de origem calcária, fornecidos pelas empresas Cimpor e Soarvamil, respectivamente; fichas técnicas no Anexo B;
- **máxima dimensão do agregado:** 22,4 mm;
- **água de amassadura:** potável, obtida a partir da rede de abastecimento pública;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico;
- **adições e adjuvantes:** nenhuns.

Além destas características, foram considerados os seguintes parâmetros para o dimensionamento do betão:

- **nível de controlo de produção:** bom;
- **método de compactação:** vibração média com recurso a agulha vibratória;
- **medição dos componentes:** por pesagem.

Segundo a especificação LNEC E 464 (2007), a mínima classe de resistência para uma classe de exposição XC3 é de C30/37, o seja, a classe de resistência definida (C25/30) não se encontra de acordo esta especificação. No entanto, atendendo à classe de consistência pretendida e à inexistência de qualquer adjuvante no betão, para obter uma classe C30/37 seria necessário empregar elevadas dosagens de cimento na composição do betão, sendo as mesmas incompatíveis com o objectivo de minimizar os impactos ambientais de produção do betão. Deste modo, optou-se por manter a classe de resistência estipulada.

3.4.2.1. Máxima dimensão do agregado

Um factor importante na definição da composição do betão é a máxima dimensão do agregado, uma vez que quanto maior for o seu valor, menor será o índice de vazios. Pelo contrário, o efeito de parede e a dificuldade de vibração do betão serão maiores.

O efeito de parede consiste numa atracção de partículas finas para junto das armaduras ou das superfícies que fazem o limite entre o betão e as faces das cofragens. Este efeito provoca alterações na compacidade do betão, originando vazios na superfície dos elementos que estiverem em contacto com a cofragem. Segundo Faury, o efeito de parede é desprezável, para peças correntes de betão, caso se verifique a seguinte condição (Nepomuceno, 1999a):

$$D_{m\acute{a}x} \leq \frac{4}{3}R \quad (3.1)$$

em que,

- $D_{m\acute{a}x}$ - máxima dimensão do agregado;
- R - raio médio do molde.

O raio médio do molde é definido por:

$$R = \frac{\text{volume a encher de bet\~{o}}}{\text{superf\~{i}cie confinante do volume de bet\~{o}}} \quad (3.2)$$

De modo a verificar a ocorrência ou a ausência do efeito de parede, apresenta-se na Tabela 3.7 os valores do raio médio do molde correspondente aos provetes dos vários ensaios a realizar, assim como a dimensão máxima admissível do agregado para cada caso.

Pela análise da tabela, conclui-se que o caso mais condicionante são os provetes cúbicos com 100 mm de aresta, aos quais corresponde um valor de 22,2 mm para a máxima dimensão do agregado. Este valor encontra-se ligeiramente abaixo do diâmetro máximo dos agregados utilizados nesta campanha experimental (22,4 mm). Por estes dois valores serem próximos, e sendo os moldes mais utilizados os cubos de 150 mm de aresta, optou-se por desprezar os aspectos relativos ao efeito de parede e não alterar o valor de 22,4 mm.

Tabela 3.7 - Dimensão máxima admissível do agregado

Forma e dimensões dos provetes	Volume (cm ³)	Superfície confinante (cm ²)	R (mm)	D _{máx} (mm)
Cubos, 100 mm de aresta	1000,0	600,0	16,7	22,2
Cubos, 150 mm de aresta	3375,0	1350,0	25,0	33,3
Cilindros, ø100 x 250 mm	1963,5	942,5	20,8	27,8
Cilindros, ø150 x 300 mm	5301,4	1767,1	30,0	40,0
Prismas, 100 x 100 x 450 mm	4500,0	2000,0	22,5	30,0

3.4.2.2. Dosagem de cimento

O cimento é o componente da matriz do betão que, juntamente com a água (formando uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reacções e processos de hidratação), funciona como elemento aglutinador das areias e

britas. O tipo de cimento utilizado, a sua classe de resistência e a sua dosagem influenciam directamente o desempenho do betão produzido.

A especificação LNEC E 464 (2007) estabelece limites para a dosagem de cimento e para a relação água/cimento. Para uma classe de exposição XC3 e um tipo de cimento CEM I 42,5 R, resulta uma dosagem de cimento mínima de 300 kg/m³ e uma relação a/c máxima de 0,55.

De modo a estabelecer a dosagem de cimento, uma vez que nem a referida especificação do LNEC nem o método de Faury apresentam correlações entre a mesma e a resistência à compressão do betão, seguiu-se a metodologia adoptada noutras investigações realizadas no Instituto Superior Técnico (tal como apresentado por Pereira (2010) e Cartuxo (2013)). Este método baseia-se na fórmula de Bolomey, a qual resulta nos valores apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Dosagem de cimento pela fórmula de Bolomey (Pereira, 2010, adaptado de Gomes e Pinto, 2009)

Classe do cimento	Dosagem de cimento (kg/m ³)				
	Classe de resistência do betão				
	C15/20	C20/25	C25/30	C30/37	C45/55
32,5	320	360	400	440	510
42,5	280	310	350	380	440
52,5	250	280	310	340	390

Com base nos valores presentes no referido quadro, conclui-se que, para um betão de classe de resistência C25/30 e um cimento de classe 42,5, a dosagem de cimento adequada é de 350 kg/m³ (sendo superior ao mínimo de 300 kg/m³ estipulado na especificação LNEC E 464 (2007)).

3.4.2.3. Volume de vazios (VV)

Nepomuceno (1999a) refere que o volume de vazios (volume de ar que fica retido na amassadura) é difícil de determinar, sendo que, em geral, varia entre 10 e 30 l/m³, consoante a composição do betão. O autor sugere que, de acordo a norma 613 do American Concrete Institute, o volume de vazios pode ser determinado em função da máxima dimensão dos agregados, como se observa na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Relação entre o volume de vazios e a máxima dimensão dos agregados (Nepomuceno, 1999a, citando a norma ACI 613, 1945)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Volume de vazios (l/m ³)
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Como o valor de D_{máx} adoptado nesta investigação (22,4 mm) não se encontra na referida tabela, é necessário realizar uma interpolação entre os valores mais próximos:

$$V_v = 15 - (15 - 20) \times \frac{(25,4 - 22,4)}{(25,4 - 19,1)} = 17,38 \text{ l/m}^3 \quad (3.3)$$

3.4.2.4. Índice de vazios (IV)

Por índice de vazios entende-se a soma dos volumes de água e vazios por unidade de volume de betão logo após a sua colocação, ou seja, é correspondente ao volume de materiais não sólidos que constituem o betão. A seguinte expressão permite o cálculo deste índice:

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

em que,

- I_V - índice de vazios;
- K e K' - parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de compactação utilizados;
- R - raio médio do molde que contém o betão (mm);
- D - máxima dimensão do agregado (mm).

Na Tabela 3.10, são apresentados os valores utilizados no método de Faury para caracterizar os diferentes graus de consistência do betão fresco, dos quais dependem os valores de K e K' . Como se pretende um abaixamento na ordem de 125 ± 15 mm, a trabalhabilidade correspondente é a mole e o meio de compactação é o apiloamento.

Tabela 3.10 - Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Abaixamento do cone de Abrams (mm)	Meios de compactação
Terra húmida	-	Vibração muito potente e possível compressão
Seca	-	Vibração potente
Plástica	0 a 40	Vibração média
Mole	40 a 150	Apiloamento
Fluida	> 150	Sem nada

Os valores de K e K' são obtidos por consulta da Tabela 3.11. Consoante a natureza dos agregados, areia rolada e agregados grossos britados, e a trabalhabilidade considerada, mole, obtém-se o valor de 0,37 para a constante K e de 0,003 para a constante K' .

Tabela 3.11 - Valores dos parâmetros K e K' (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Meios de compactação	Valores de K			Valores de K'
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada e agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	$\leq 0,24$	$\leq 0,25$	$\leq 0,27$	0,002
Seca	Vibração potente	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
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Sem nada	$\geq 0,36$	$\geq 0,38$	$\geq 0,40$	0,004

Deste modo, e considerando a hipótese conservativa de que o raio médio do molde é igual à máxima dimensão do agregado (Nepomuceno (1999a) refere que esta adopção pode ser feita para agregados com dimensão máxima de 25,4 mm, que é o caso dos agregados utilizados neste estudo), resulta da expressão 3.5 o seguinte índice de vazios:

$$I_V = \frac{0,37}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{1 - 0,75} = 0,211 \quad (3.5)$$

3.4.2.5. Dosagem de água de amassadura (A) e relação água/cimento (a/c)

Conhecido o índice de vazios e o volume de vazios, é possível determinar a quantidade de água de amassadura para a produção de 1 m^3 de betão. Assim, a dosagem de água de amassadura é dada pela expressão 3.6:

$$A = I_V - V_V \quad (3.6)$$

onde,

- A - dosagem de água de amassadura (l/m^3);
- I_V - índice de vazios de Faury (l/m^3);
- V_V - volume de vazios do betão (l/m^3).

Substituindo na expressão os valores obtidos nos pontos 3.4.2.3 e 3.4.2.4, resulta:

$$A = 210,68 - 17,38 = 193,30 \text{ l/m}^3 \quad (3.7)$$

Determinados os valores das dosagens de cimento e água, é possível calcular a relação a/c correspondente aos mesmos:

$$\text{relação a/c} = \frac{\text{dosagem de água (l)}}{\text{dosagem de cimento (kg)}} = \frac{193,30}{350} = 0,55 \quad (3.8)$$

3.4.2.6. Volume das partículas sólidas (VS)

O volume do total das partículas sólidas do betão inclui os volumes correspondentes aos agregados e ao cimento. Sabendo-se o valor do índice de vazios, é possível proceder ao seu cálculo de acordo com a expressão 3.9:

$$V_s = 1 - I_v = 1 - 0,211 = 0,789 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.9)$$

3.4.2.7. Volume das partículas de cimento (VC)

O volume que as partículas de cimento ocupam, num metro cúbico de betão, resulta do quociente entre a dosagem de cimento (C) e a sua massa volúmica (δ_c). Considerando uma massa volúmica igual a 3100 kg/m^3 , o valor do volume das partículas de cimento é o seguinte:

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} = \frac{350}{3100} = 0,133 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.10)$$

3.4.2.8. Percentagem do volume de cimento relativamente ao volume sólido total (C%)

A percentagem do volume de cimento em relação ao total das partículas sólidas do betão é determinada de acordo com a expressão 3.11:

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 = \frac{0,133}{0,789} \times 100 = 14,3\% \quad (3.11)$$

3.4.2.9. Curva de referência de Faury e proporção dos agregados

A granulometria condiciona a compacidade do betão e, desta forma, as suas propriedades no estado fresco e endurecido. Deste modo, a composição granulométrica deverá ser tal que se obtenha a maior compacidade. Para tal, a distribuição do tamanho das partículas pode efectuar-se recorrendo a curvas granulométricas de referência, sendo as mais importantes as de Bolomey, Faury e Joisel (Costa e Appleton, 2002).

Chama-se curva granulométrica à linha contínua que une os pontos que representam o resultado da análise granulométrica, isto é, os pontos em que as abcissas correspondem às aberturas das malhas dos peneiros e as ordenadas à percentagem de material que passa em cada peneiro. No que diz respeito ao eixo das abcissas, este inicia-se na dimensão $0,0065 \text{ mm}$ (menor dimensão das partículas de cimento), tem como valor máximo a dimensão máxima dos agregados e a sua escala é proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas.

Neste estudo, recorreu-se à curva de referência de Faury para determinar as quantidades de cada um dos agregados utilizados. Esta curva é referente apenas às partículas sólidas do betão, pelo que as percentagens resultantes da mesma são relativas ao volume ocupado pelas partículas sólidas e não ao volume total de betão. A curva de Faury é composta por dois segmentos de recta, sendo os mesmos definidos pelos pontos que constam da Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Pontos pertencentes à curva de referência de Faury

Ponto	Abcissa (mm)	Ordenada (%)
1	0,0065	0,0
2	$D_{\text{máx}}/2 = 11,2$	$P_{D/2}$
3	$D_{\text{máx}} = 22,4$	100

Relativamente ao ponto 2, é necessário definir o valor da sua ordenada. Para o efeito, recorre-se à expressão 3.12:

$$P_{D/2} = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D_{\max}} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (3.12)$$

em que,

- **A, B** - parâmetros que dependem da natureza dos agregados, do meio de colocação e da consistência do betão, os seus valores são os apresentados na Tabela 3.13; para as características definidas para o betão em estudo, o parâmetro A toma o valor de 30 e o B o de 2;
- **R** - raio médio do molde que contém o betão (mm);
- **D** - máxima dimensão do agregado (mm).

Tabela 3.13 - Valores dos parâmetros A e B para determinação do ponto 2 da curva de referência de Faury (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Meios de compactação	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
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Sem nada	32	34	38	2

Deste modo, resulta o seguinte valor:

$$P_{D/2} = 30 + 17 \cdot \sqrt[5]{22,4} + \frac{2}{1 - 0,75} = 69,7\% \quad (3.13)$$

Com base nos valores obtidos, é possível traçar a curva de referência de Faury (Figura 3.44). Esta pode ser considerada com ou sem as partículas de cimento, recorrendo-se à percentagem de cimento em relação ao volume sólido total para efectuar o seu cálculo, como se pode conferir na Tabela 3.14.

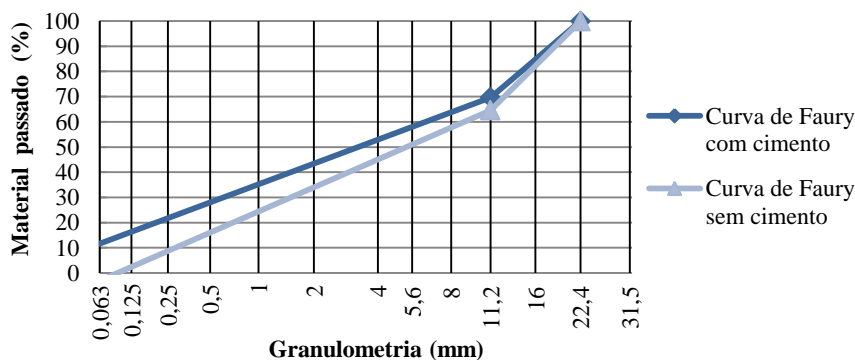


Figura 3.14 - Curvas de referência de Faury

Tabela 3.14 - Pontos da curva de referência de Faury

Ponto	Granulometria (mm)	Raiz quinta (mm)	Material passante (%)		
			Curva de Faury com cimento	Cimento reduzido da curva de Faury	Curva de Faury sem cimento
1	0,0065	0,37	0,0	-14,3	-16,7
2	11,2	1,62	69,7	55,4	64,6
3	22,4	1,86	100,0	85,7	100,0

A curva granulométrica que conduz à máxima compactidade do betão é aquela que coincide com a curva de referência de Faury. No entanto, a utilização de uma curva real não conduz ao referido valor máximo de

compacidade, uma vez que irão existir pontos em que esta curva se afasta da curva de Faury. Assim, optou-se por peneirar todos os AG, tanto naturais como reciclados, separando-os nas diferentes gamas granulométricas, minimizando-se a diferença entre as referidas curvas. Quanto aos AF, ajustou-se as suas curvas granulométricas à curva de Faury pelo método tradicional. Na Figura 3.15, observa-se as percentagens resultantes para os AF e para as várias gamas granulométricas dos AG.

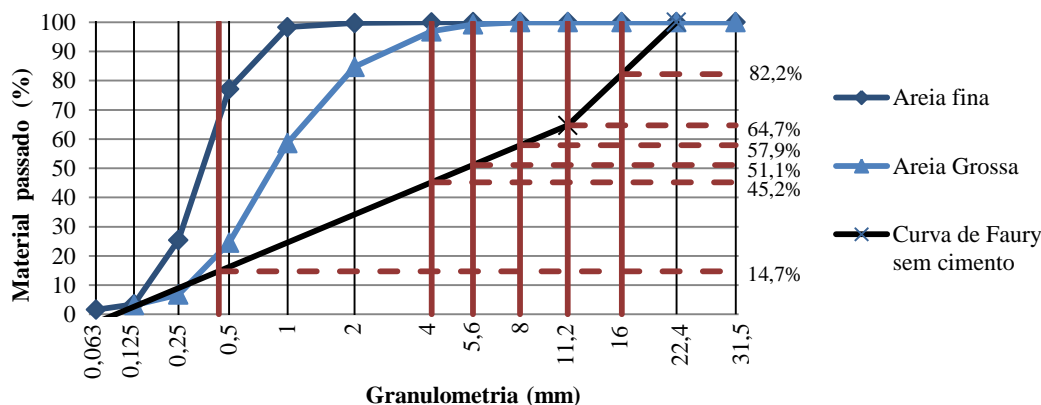


Figura 3.15 - Determinação das percentagens dos agregados e gamas granulométricas

Uma vez que o método da curva de Faury fornece as proporções de cada agregado em relação ao volume de partículas sólidas, é necessário proceder ao seu ajuste, de modo a corresponderem ao volume total de betão. Para tal, recorreu-se à expressão 3.14:

$$V_{agg} = (V_s - V_c) \times pp_i \quad (3.14)$$

onde,

- V_{agg} - volume do agregado num m^3 de betão (%);
- V_s - volume das partículas sólidas (m^3/m^3);
- V_c - volume das partículas de cimento (m^3/m^3);
- pp_i - proporção do agregado i em relação à curva de Faury (%).

Na Tabela 3.15, são apresentados sucintamente os resultados obtidos através deste método.

Tabela 3.15 - Resultados do método de Faury

Agregado	Percentagem resultante da curva de Faury (%)	Percentagem em relação ao volume total do betão (%)	
	4 - 5,6 mm	51,1 - 45,2 = 5,9	4,1
	5,6 - 8 mm	57,9 - 45,2 = 6,7	4,6
Agregados grossos	8 - 11,2 mm	64,7 - 57,9 = 6,8	4,7
	11,2 - 16 mm	82,2 - 64,7 = 17,6	12,1
	16 - 22,4 mm	100 - 82,2 = 17,8	12,2
Areia grossa	45,2 - 14,7 = 30,5	21,0	
Areia fina	14,7	10,1	

O procedimento referido apenas foi realizado na segunda fase da campanha experimental. Na terceira fase, ajustou-se simplesmente as curvas granulométricas dos agregados à curva de referência de Faury, de modo a que a composição dos betões fosse idêntica à utilizada nas estruturas à escala real. Esta alteração foi necessária visto não haver condições no estaleiro (onde as estruturas foram construídas) para se proceder à peneiração dos AG.

O método gráfico para ajustar a curva real à de referência baseia-se no traçado de uma linha vertical que atravesse duas curvas granulométricas contínuas, para que as áreas limitadas por esta linha e pelas curvas granulométricas sejam iguais. A diferença entre as ordenadas dos pontos onde ocorre a intersecção das linhas verticais com a curva de referência fornece a percentagem de um dado agregado. Concluindo o traçado de todas as linhas verticais, obtém-se as percentagens que estão presentes nas Figuras 3.16 (AP) e 3.17 (AFP e AGR).

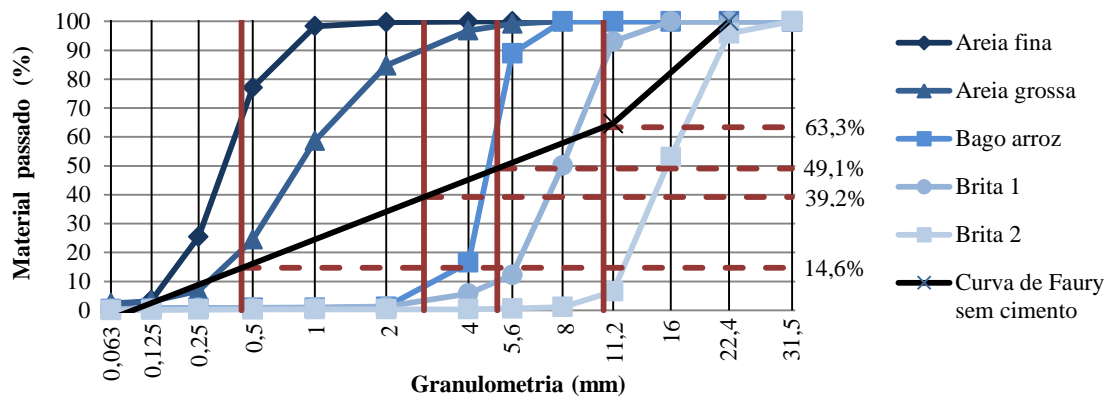


Figura 3.16 - Determinação das percentagens dos agregados: AP

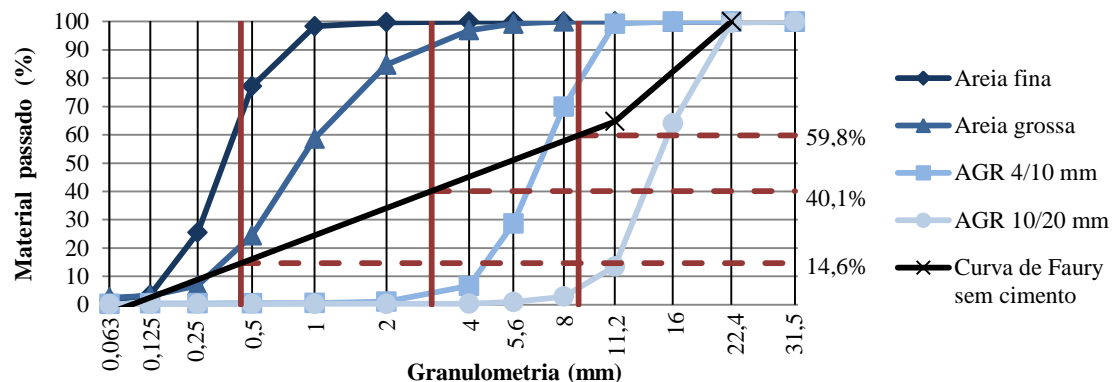


Figura 3.17 - Determinação das percentagens dos agregados: AFP e AGR

Neste método, a diferença entre as curvas é maior do que peneirando os agregados. Assim, convém comparar o módulo de finura da curva real com o da curva de Faury, pois a construção gráfica só tem em conta o início e o fim da curva granulométrica de cada agregado, ignorando o que se passa entre os extremos da curva (Nepomuceno, 1999a). Deste modo, as quantidades de cada agregado deverão sofrer um ligeiro acerto para se aproximar, o mais possível, o módulo de finura da curva de referência com o da mistura proposta.

Na Tabela 3.16, estão presentes as percentagens de material passante e retido da curva de referência de Faury. Através destes valores, é possível determinar o módulo de finura desta curva:

$$MF_{faury} = \frac{97,5 + 91,1 + 83,9 + 75,5 + 65,9 + 54,8 + 42,2 + 17,8}{100} = 5,286 \quad (3.15)$$

Tabela 3.16 - Curva de referência de Faury

Peneiro (mm)	Percentagem passante (%)	Percentagem retida (%)
22,4	100,0	0,0
16	82,2	17,8
11,2	64,7	35,3
8	57,8	42,2
5,6	51,1	48,9
4	45,2	54,8
2	34,1	65,9
1	24,5	75,5
0,5	16,1	83,9
0,25	8,9	91,1
0,125	2,5	97,5
0,063	-2,9	-

Nas Tabelas 3.17 e 3.18, são apresentados os cálculos efectuados para o acerto do módulo de finura. A proporção de cada agregado é relativamente ao volume total de partículas sólidas e não ao volume de agregados, pois o

módulo de finura é referente ao conjunto de partículas sólidas, incluindo o cimento, cujo módulo de finura é nulo (Nepomuceno, 1999a). Nestes quadros, é também apresentada a proporção de cada tipo de agregado em relação ao volume total do betão.

Tabela 3.17 - Resultados do método de Faury e acerto do módulo de finura: AP

Agregado	Inicial			Acerto		Porcentagem em relação ao volume total do betão (%)
	pp _i (%)	MF _i	MF _i x pp _i /100	pp' _i (%)	MF _i x pp' _i /100	
Areia fina	14,6	1,96	0,287	14,4	0,282	9,9
Areia grossa	24,6	3,25	0,799	25,3	0,823	17,3
Bago de arroz	9,9	5,79	0,572	9,6	0,556	6,6
Brita 1	14,3	6,40	0,914	14,2	0,908	9,7
Brita 2	36,7	7,44	2,727	36,5	2,716	25,0
			$\Sigma = 5,299$		$\Sigma = 5,286$	

Tabela 3.18 - Resultados do método de Faury e acerto do módulo de finura: AFP e AGR

Agregado	Inicial			Acerto		Porcentagem em relação ao volume total do betão (%)
	pp _i (%)	MF _i	MF _i x pp _i /100	pp' _i (%)	MF _i x pp' _i /100	
Areia fina	14,6	1,96	0,287	14,5	0,284	9,9
Areia grossa	25,5	3,25	0,830	25,4	0,827	17,4
AGR 4-10	19,7	6,20	1,220	19,8	1,228	13,5
AGR 10-20	40,2	7,31	2,939	40,3	2,948	27,6
			$\Sigma = 5,276$		$\Sigma = 5,287$	

3.4.3. Betões com AGRB

Foram analisados vários tipos de betões com AGRB ao longo de toda a campanha experimental. Foram analisadas taxas de substituição de 10, 20, 30, 40, 50 e 100% de AGP por AGR, na segunda fase da campanha experimental, e de 25 e 100%, na terceira e quarta fase. A substituição dos AGP por AGR foi efectuada por volume, resultando numa menor massa de AGR a incorporar nos betões comparativamente aos AGP.

Este tipo de agregados caracteriza-se por terem uma elevada capacidade de absorção de água, ao invés dos AP, em que a mesma é desprezável. Esta elevada absorção de água é propícia a que os AGRB tenham variações do teor de humidade ao longo do tempo. Deste modo, os agregados foram armazenados dentro do laboratório em contentores estanques (Figura 3.18). Na Figura 3.19, observam-se os *big bags* que foram transportados para o laboratório com os AGRB e onde estes permaneceram antes de passarem para os contentores.



Figura 3.188 - Contentores com agregados



Figura 3.199 - Big bags com AGRB

Deste modo, torna-se essencial compensar a capacidade de absorção de água por parte dos AGRB, de modo a que não ocorram consequências ao nível da trabalhabilidade e desempenho do betão. Para o efeito, pode-se recorrer a dois processos distintos. Um destes processos consiste na saturação dos AR antes de serem introduzidos na amassadura do betão (pré-saturação). O outro método corresponde à compensação de água durante a amassadura, a qual assenta na adição de uma quantidade adicional de água equivalente à absorção dos AGRB. Ferreira (2007), no estudo que desenvolveu, analisou ambos os processos em BAGRB (com taxas de substituição de 0, 20, 50 e 100% de AGP por AGRB), realizando uma comparação de diversas propriedades dos mesmos. Os resultados obtidos pelo autor demonstram que existe uma influência negativa por parte da pré-saturação dos AR nas propriedades do betão,

em especial na durabilidade, sendo por isso preferível a produção de betões com incorporação de AGRB segundo o processo de compensação de água de amassadura. Assim, optou-se por este último procedimento para compensar a absorção de água dos AGRB.

O método para determinar a quantidade de água adicional a adicionar na amassadura baseou-se no descrito por Leite (2001). A autora descreveu a absorção de água de AGR ao longo do tempo através da medição da variação da sua massa hidrostática.

A absorção dos AGRB foi determinada com o auxílio de um recipiente no qual o fundo é impermeável e o topo permeável (peneiro de malha inferior às partículas mais finas dos agregados), conseguindo-se, assim, que a água entre no recipiente e os agregados permaneçam no seu interior. A amostra utilizada no ensaio foi composta pelas várias fracções granulométricas dos AGRB, consoante a sua proporção na composição do betão. O recipiente, com os agregados no seu interior, foi submerso em água e, a partir desse instante, mediu-se o ganho de massa do material com o auxílio de uma balança dotada de um dispositivo para medida hidrostática da massa com precisão de $\pm 0,1$ g. Leite (2001) sugere que as medições sejam realizadas ao longo de 24 horas, nos seguintes intervalos de tempo:

- nos 10 minutos iniciais: uma leitura a cada minuto;
- entre 10 e 30 minutos: uma leitura a cada 5 minutos;
- entre 30 e 60 minutos: uma leitura a cada 10 minutos;
- entre 1 e 2 horas: uma leitura a cada 15 minutos;
- entre 2 e 9 horas: uma leitura a cada hora;
- às 24 horas: última leitura.

Nesta campanha, fez-se alguns ajustes. Nos primeiros minutos, os valores são instáveis pelo que se torna difícil efectuar uma correcta leitura dos mesmos. A partir das duas horas, não se realizaram as leituras previstas pois não se mostrou relevante efectuar as mesmas (evolução lenta da absorção de água). No instante de submersão do recipiente (instante inicial), também não se conseguiu realizar a respectiva leitura, pelo que se calculou a massa inicial segundo a expressão 3.19. As expressões 3.17 a 3.19 foram, também, necessárias para o cálculo da absorção de água em cada instante.

$$m_{00:00} = \frac{m_{24:00}}{1 + \frac{WA_{24}}{100}} \quad (3.16)$$

$$A_i = m_i - m_{00:00} \quad (3.17)$$

$$A_t = m_{24:00} - m_{00:00} \quad (3.18)$$

$$WA_i = \frac{A_i}{A_t} \times 100 \quad (3.19)$$

em que,

- $m_{00:00}$ - massa hidrostática no instante inicial (g);
- $m_{24:00}$ - massa hidrostática às 24 horas (g);
- m_i - massa hidrostática no instante i (g);
- WA_{24} - absorção de água após imersão em água durante 24 horas (%);
- A_i - quantidade de água absorvida no instante i (g);
- A_t - quantidade total de água absorvida às 24 horas (g);
- WA_i - absorção de água no instante i (%).

A absorção de água ao longo do tempo é expressa em percentagem da capacidade total de absorção dos AGRB, a qual pode ser aferida pelo ensaio de massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097-6, 2003). Na Figura 3.20, são apresentados os resultados obtidos com este ensaio, os quais podem ser conferidos no Anexo C.

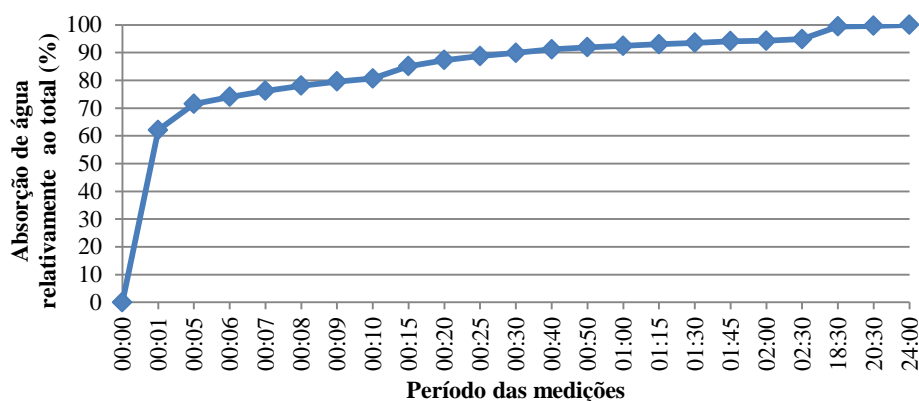


Figura 3.20 - Evolução da absorção de água de AGRB ao longo do tempo

Ao analisar os valores presentes nesta figura, constata-se que aos 10 minutos, período correspondente à duração da amassadura, os AGR absorveram 80,7% da sua capacidade total de absorção de água. Verifica-se, assim, que a evolução da absorção de água ocorre muito rapidamente nos primeiros minutos, evoluindo de forma bastante mais lenta a partir dos 5 minutos.

Com base nesta informação, é possível calcular a quantidade adicional de água, a qual é determinada pela seguinte expressão:

$$A_a = Q_{AGR} \times (0,807 \times WA_{24} - w) \quad (3.20)$$

onde,

- A_a - quantidade de água adicional (kg/m^3);
- Q_{AGR} - quantidade de agregados grossos reciclados (kg/m^3);
- WA_{24} - absorção de água após imersão em água durante 24 horas;
- w - teor de humidade dos agregados grossos reciclados.

O valor correspondente ao teor de humidade deverá ser verificado perto da altura das betonagens, de modo a aferir-se correctamente a quantidade adicional de água.

3.4.4. Betões com superplastificante

Um adjuvante é uma substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionada durante a amassadura, com o fim de modificar certas propriedades do betão, quer no estado fresco quer no endurecido (NP EN 934-2, 2009). Plastificantes, superplastificantes, introdutórios de ar, hidrófugos, aceleradores de presa, entre outros, são exemplos de tipos de adjuvantes que existem.

No caso deste estudo, utilizou-se um SP em algumas amassaduras de betão. Segundo a norma NP EN 934-2 (2009), um SP é considerado um forte redutor de água, ou seja, permite reduzir fortemente a dosagem de água de um dado betão, sem modificar a sua consistência. Por outro lado, mantendo a dosagem de água, aumenta consideravelmente o abaixamento do betão.

Deste modo, a utilização do SP teve o objectivo de diminuir a quantidade de água utilizada nos BAGRB e, conseqüentemente, diminuir a relação a/c. Com isto, manteve-se a mesma trabalhabilidade nos betões com a utilização de uma menor quantidade de água. O SP empregue foi o SikaPlast 898, que é um SP de alto desempenho, com base química numa combinação de policarboxilatos modificados em solução aquosa (ficha técnica presente no Anexo D). O adjuvante foi adicionado à amassadura em diferentes proporções da massa de cimento: 0,5, 1, 1,5 e 2%. Estes valores foram definidos tendo por base a máxima dosagem recomendada pelo fabricante (correspondendo a 25, 50, 75 e 100% da dosagem máxima). Este produto apenas foi empregue no betão com 100% de AGRB, com o objectivo atenuar o efeito dos AR nas propriedades do mesmo e, deste modo, perceber-se até que ponto é benéfica a sua utilização por comparação com o BR.

Esta redução de água provoca uma alteração no traçado da curva de referência de Faury; no entanto, optou-se por manter a mesma igual à do BR, para que todas as misturas possuíssem a mesma curva granulométrica. Manteve-se, assim, a proporção de cada tipo de agregado utilizado, alterando-se apenas as quantidades dos mesmos, uma vez que o volume de partículas sólidas é superior em resultado da redução da relação a/c.

Foi necessário realizar betonagens experimentais de forma a determinar a relação a/c que resultasse num abaixamento dentro dos valores pré-definidos.

3.4.5. Amassadura (laboratório)

Para poder-se realizar as várias amassaduras previstas, é necessário perceber qual o volume que será necessário produzir em cada uma e, assim, efectuar-se o cálculo das quantidades de cada constituinte do betão. Nas Tabelas 3.19 e 3.20, encontram-se resumidos os dados necessários para o efeito.

Tabela 3.19 - Provetes e cofragens necessárias por amassadura

Fase	Ensaio	Forma e dimensões (mm) dos provetes	N.º de provetes	Forma e dimensões (mm) das cofragens	Cofragens necessárias
2ª	Resistência à compressão	Cubos, 150	6	Cubos, 150	6
	Resistência à compressão + velocidade de ultra-sons	Cubos, 150	11	Cubos, 150	11
	Resistência à tracção + módulo de elasticidade	Cilindros, $\Phi 150 \times 300$	3	Cilindros, $\Phi 150 \times 300$	3
	Resistência à abrasão	Prismas, $71 \times 71 \times 50$	3	Cubos, 100	3
3ª	Retracção	Prismas, $100 \times 100 \times 450$	2	Prismas, $100 \times 100 \times 450$	2
	Absorção de água por imersão	Cubos, 100	4	Cubos, 100	4
	Absorção de água por capilaridade	Cilindros, $\Phi 150 \times 100$	4	Cilindros, $\Phi 150 \times 300$	2
	Resistência à carbonatação	Cilindros, $\Phi 100 \times 40$	4	Cilindros, $\Phi 100 \times 250$	3
	Resistência à penetração dos cloretos	Cilindros, $\Phi 100 \times 50$	3	Cilindros, $\Phi 100 \times 250$	2

Tabela 3.20 - Volume por amassadura e total

Fase	Forma e dimensões das cofragens	Cofragens necessárias	Volume cofragem (dm ³)	Volume amassadura (dm ³)	Volume amassadura majorado (dm ³)	Volume total (dm ³)
2ª	Cubos, 150 mm	6	3,38	20,25	26,33	289,58
	Cubos, 150 mm	11	3,38	37,13	48,26	193,05
	Cubos, 100 mm	7	1	7	9,1	36,4
3ª	Prismas, $100 \times 100 \times 450$ mm	2	4,5	9	11,7	46,8
	Cilindros, $\Phi 150 \times 300$ mm	5	5,3	26,51	34,46	137,84
	Cilindros, $\Phi 100 \times 250$ mm	5	1,96	9,82	12,76	51,05
Σ 3ª Fase = 116,28						$\Sigma = 754,71$

Na Tabela 3.19, são apresentadas a forma, as dimensões e a quantidade dos provetes a utilizar em cada tipo de ensaio. Nesta tabela, apresenta-se também a informação relativa às cofragens a utilizar, visto não existirem cofragens com as mesmas dimensões de todos os tipos de provetes. Neste caso específico, procedeu-se à serragem de provetes de maior dimensão para obter provetes com as dimensões pretendidas.

Na Tabela 3.20, observa-se o cálculo do volume por amassadura e o volume total a betonar ao longo de toda a campanha experimental. Efectuou-se uma majoração de 1,3 ao volume das amassaduras para ter em conta eventuais perdas ocorridas durante a amassadura, prevenindo-se a escassez de material. No entanto, o valor do volume total presente nesta tabela não corresponde ao real, uma vez que houve amassaduras que não foram aproveitadas. Tal ocorreu devido à necessidade de correcção da relação a/c (para se obter um abaixamento uniforme em todas as amassaduras), especialmente no caso dos betões com SP.

Deste modo, foram efectuadas amassaduras de 30 l, na segunda fase da campanha experimental, e duas de 60 l, na terceira fase, para cada tipo de betão.

Antes de se iniciar o processo de betonagem, é necessário efectuar a medição de todos os constituintes do betão. As medições foram realizadas por massa, e não por volume, pelo seu carácter mais rigoroso. O cimento e a água devem ser os últimos a pesar-se, pois são elementos sensíveis no que toca a variações da sua massa, evitando-se o aumento de humidade no cimento e a evaporação da água. De seguida, prepara-se os moldes a serem enchidos, aplicando-se óleo desmoldante nos mesmos (Figura 3.21).

O processo de amassadura (Figuras 3.22 e 3.23) divide-se em três fases distintas (duração total de 10 minutos), que assentam nos seguintes pontos:

- após a humedificação da betoneira, introduz-se os AG, naturais e reciclados, juntamente com 2/3 da quantidade de água prevista para a amassadura e com o total da água destinada a compensar a absorção dos AGRB; esta primeira fase tem uma duração de 4 minutos;
- numa segunda fase, adiciona-se os agregados finos (areia fina e grossa), tendo 2 minutos de duração;
- por fim, adiciona-se o cimento e a restante água (1/3 da quantidade de água de amassadura), deixando-se homogeneizar a mistura durante 4 minutos.



Figura 3.21 - Lubrificação dos moldes



Figura 3.22 - Betoneira de eixo inclinado (primeira fase do processo de amassadura)



Figura 3.23 - Introdução dos componentes na betoneira

Nos casos em que ocorreu a introdução de SP na mistura, a mesma foi realizada durante a terceira fase diluída na água.

Finalizado o processo de amassadura, efectuou-se, para todas as misturas, o ensaio de abaixamento do cone de Abrams com o intuito de validar ou rejeitar as mesmas, através da verificação do intervalo de abaixamento estabelecido. Procedem-se de seguida à execução do ensaio de massa volúmica.



Figura 3.243.24 - Enchimento dos moldes



Figura 3.25 - Vibração do betão



Figura 3.26 - Aspecto final após nivelamento da superfície do betão

A última etapa foi constituída pelo enchimento dos moldes (Figura 3.24) e vibração do betão (Figura 3.25), com auxílio de um vibrador agulha, de forma a garantir a sua compactação e a expulsão do ar ocluído. Convém, com uma colher de pedreiro, alisar a superfície do betão, de modo a que fique nivelada (Figura 3.26). A desmoldagem ocorre após 24 ± 4 horas, seguindo-se a cura dos provetes consoante o ensaio a que se destinam. A cura dos provetes variou consoante o ensaio a que os provetes se destinavam, correspondendo a dois tipos diferentes: cura em câmara húmida, com temperatura de aproximadamente 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$, e cura em câmara seca, com temperatura aproximada de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$.

3.4.6. Composição final dos betões

Nas Tabelas 3.21, para a segunda fase experimental, e 3.22, para a terceira e quarta fases, encontram-se presentes as composições finais dos vários betões em análise. Repare-se que a relação a/c não é a que advém do método de Faury. Esta relação a/c é meramente indicativa, uma vez que o intervalo de abaixamento considerado pelo método de Faury (40 a 150 mm) é bastante mais amplo do que o pretendido (125 ± 15 mm), podendo, assim, a composição resultante deste método ter uma trabalhabilidade diferente da desejada.

Foi, então, necessário realizar betonagens experimentais para se obter a relação a/c que se traduz no abaixamento pretendido, tendo-se obtido uma relação a/c igual a 0,52. Esta alteração da relação a/c (o valor inicialmente previsto era 0,55), resulta numa modificação das quantidades das partículas sólidas (menor relação a/c traduz-se numa maior quantidade de agregados, para a mesma quantidade de cimento) e da curva de referência de Faury. Deste modo, foi necessário realizar um novo estudo da composição do betão.

Tabela 3.21 - Composição dos betões: segunda fase experimental

Componentes		Massa dos componentes (kg/m ³)										
		BR	B10	B20	B30	B40	B50	B100	B100SP			
									0.5	1.0	1.5	2.0
Agregados grossos naturais	4 - 5,6 mm	109,3	98,4	87,4	87,4	65,6	54,7	-	-	-	-	-
	5,6 - 8 mm	124,7	112,2	99,7	99,7	74,8	62,3	-	-	-	-	-
	8 - 11,2 mm	126,0	113,4	100,8	100,8	75,6	63,0	-	-	-	-	-
	11,2 - 16 mm	322,5	290,3	258,0	258,0	193,5	161,3	-	-	-	-	-
	16 - 22,4 mm	326,1	293,5	260,9	260,9	195,6	163,0	-	-	-	-	-
Agregados grossos reciclados	4 - 5,6 mm	-	10,0	20,1	20,1	40,1	50,2	100,3	105,7	105,4	105,7	105,9
	5,6 - 8 mm	-	11,4	22,8	22,8	45,6	57,0	114,0	120,1	119,8	120,1	120,4
	8 - 11,2 mm	-	11,6	23,1	23,1	46,3	57,9	115,7	121,9	121,6	121,9	122,2
	11,2 - 16 mm	-	30,0	59,9	59,9	119,8	149,8	299,6	315,6	314,8	315,6	316,3
	16 - 22,4 mm	-	30,3	60,6	60,6	121,1	151,4	302,9	319,1	318,3	319,1	319,8
Areia grossa		543,3	543,3	543,3	543,3	543,3	543,3	543,3	572,3	570,9	572,3	573,7
Areia fina		249,6	249,6	249,6	249,6	249,6	249,6	249,6	263,0	262,3	263,0	263,6
Cimento		350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0
Água		182,0	183,1	184,2	185,1	186,9	189,9	193,3	155,7	157,9	154,4	148,0
Relação a/c efectiva		0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,41	0,41	0,40	0,39
Relação a/c aparente		0,52	0,52	0,53	0,53	0,53	0,54	0,55	0,44	0,45	0,44	0,42
Superplastificante		0	0	0	0	0	0	0	1,8	3,5	5,3	7,0

Tabela 3.22 - Composição dos betões: terceira e quarta fases experimentais

Componente		Massa dos componentes (kg/m ³)			
		BR	B25	B100	B100SP1.0
Agregados grossos naturais	Bago de arroz	176,0	132,0	-	-
	Brita 1	261,4	196,0	-	-
	Brita 2	666,8	500,1	-	-
Agregados grossos reciclados	AGRB 4-10	-	83,3	333,3	352,0
	AGRB 10-20	-	171,0	683,8	722,3
Areia grossa		448,4	448,8	450,1	475,5
Areia fina		243,4	243,8	245,1	258,8
Cimento		350,0	350,0	350,0	350,0
Água		185,5	194,8	206,4	159,2
Relação a/c efectiva		0,54	0,54	0,54	0,40
Relação a/c aparente		0,54	0,55	0,59	0,45
Superplastificante		0	0	0	3,5

Na terceira fase experimental, a relação a/c para a trabalhabilidade pretendida foi 0,54. Esta modificação poder-se-á justificar pela alteração da quantidade de cada amassadura, entre a segunda (30 l) e a terceira fase (60 l), o que poderá provocar alterações na forma como se processa a mistura dos vários componentes do betão dentro da

betoneira. A ausência de peneiração dos agregados nesta fase também poderá ter influência neste aspecto.

3.5. Estruturas à escala real

As estruturas foram dimensionadas, como descrito no relatório de Pacheco *et al.* (2013a), no âmbito do projecto no qual a presente dissertação se encontra inserida. As fundações são constituídas por blocos de betão armado de grandes dimensões e o seu tamanho garante uma ligação completa com os pilares. As lajes têm espessura de 0,10 m e são reforçadas, na parte inferior, por uma malha de varões de 8 mm com espaçamento de 20 cm em ambas as direcções. Os varões presentes nos pilares têm um diâmetro de 2,5 cm e no resto da estrutura de 2,0 cm. O aço das armaduras utilizado foi um A500, com a classe de ductilidade B. Para uma melhor percepção do seu dimensionamento, consulte-se o relatório referido. A Figura 3.27 mostra a estrutura-tipo a ensaiar.

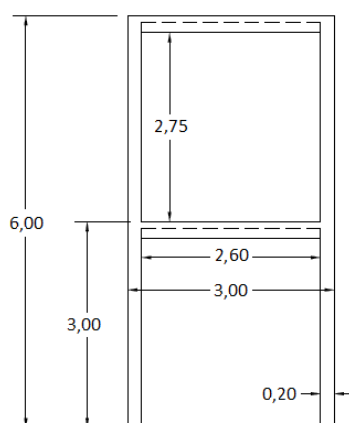


Figura 3.27 - Estrutura-tipo (geometria de projecto e simetria ortogonal)

Dadas as reduzidas dimensões dos elementos estruturais, desvios na sua geometria podem ter alguma importância. Deste modo, efectuou-se um levantamento geométrico das dimensões das estruturas após a sua execução. A espessura das lajes foi considerada igual ao comprimento de carotes extraídas do seu centro, variando entre 10,5 e 11,6 cm. Por sua vez, as dimensões das secções dos pilares foram obtidas através da média das medições efectuadas na base e no topo destes, variando entre 19,4 e 21,8 cm.

As composições dos betões referentes às estruturas ensaiadas foram as formuladas para a terceira fase da campanha experimental (Tabela 3.22). Ao contrário do sucedido em laboratório, estes betões não foram obtidos através de produção própria. A execução das estruturas ficou a cargo da empresa Mestretor, a qual foi subcontratada pelo grupo Opway para o efeito, sendo que o betão BR foi produzido em fábrica (betão pronto) e os restantes produzidos *in situ*.

O processo de amassadura foi o mesmo adoptado em laboratório, de modo a manter-se uniformidade entre os betões produzidos em laboratório e *in situ*. A título de exemplo, as Figuras 3.28 a 3.31 ilustram a betonagem do primeiro piso do pórtico B25.



Figura 3.28 - Amassadura do betão



Figura 3.29 - Elevação do betão



Figura 3.30 - Colocação do betão no pórtico

Além das quatro estruturas, foram executados provetes cúbicos para realização do ensaio de resistência à compressão em vigas e pilares (sem armadura) para efeito de extração de carotes. Na Figura 3.32, são visíveis exemplos de provetes cúbicos e de uma viga e, na Figura 3.33, mostra-se um dos pilares executados. Estes elementos tiveram uma cura semelhante à das estruturas, de modo a serem o mais representativos possível das mesmas.



Figura 3.31 - Vibração do betão



Figura 3.32 - Provetes cúbicos e viga



Figura 3.33 - Pilar

4. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

Neste capítulo, faz-se a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo de toda a campanha experimental. Faz-se também uma análise comparativa com os resultados obtidos por outros autores nas suas investigações, os quais foram descritos no capítulo 2. Estuda-se o efeito de AGRB, através da sua incorporação no betão em diferentes taxas de substituição, e quantifica-se o incremento no desempenho originado pela utilização de SP num betão com substituição integral da fracção grossa dos agregados. Pretende-se chegar a conclusões que permitam aumentar o conhecimento relativamente a estes aspectos.

O presente capítulo encontra-se dividido em seis subcapítulos (à excepção do actual), para melhor compreensão dos resultados alcançados. Primeiramente, são tratados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados. Em segundo lugar, foca-se as propriedades dos betões no estado fresco. O terceiro e quarto subcapítulos são referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade dos betões no estado endurecido, respectivamente. Seguidamente, são apresentados os resultados alcançados nos ensaios de caracterização do betão *in situ*. Por último, são apresentadas conclusões baseadas nos resultados dos subcapítulos anteriores.

4.2. Ensaio de identificação dos agregados

O presente subcapítulo tem como principal objectivo apresentar de forma sucinta os resultados obtidos nos ensaios aos agregados empregues no BR e nos vários BAGRB. Estes ensaios têm o intuito analisar algumas propriedades dos AP e AR e, assim, poder-se compará-las, tendo em vista a percepção do quanto estes agregados diferem entre si. Alguns dos ensaios (análise granulométrica, massa volúmica e teor de humidade), servem ainda para realizar o cálculo da composição do betão. Além disto, a análise das propriedades dos agregados reveste-se de extrema importância para se perceber a sua influência nas características do betão no estado fresco e endurecido, uma vez que estes são os principais constituintes do betão.

4.2.1. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica seguiu a metodologia e princípios descritos nas normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999). Este ensaio foi realizado para todos os agregados envolvidos neste estudo (areia fina, areia grossa, bago de arroz, brita 1, brita 2, AGRB 4-10 mm e AGRB 10-20 mm). Para cada tipo de agregado, foram ensaiadas três amostras, correspondendo o resultado final à média dos resultados das amostras. Os resultados apresentados neste subcapítulo incluem a curva granulométrica, a percentagem de finos e o módulo de finura.

Com as várias curvas granulométricas e módulos de finura dos agregados, é possível deduzir, através da curva de referência de Faury, a proporção dos mesmos em relação ao volume total de betão. Deste modo, através deste ensaio, determinou-se as várias composições dos betões a formular. Na segunda fase da campanha experimental, apenas eram relevantes as curvas dos AF, uma vez que os AG, tanto naturais como reciclados, foram peneirados e separados nas diferentes fracções granulométricas e, deste modo, ajustados directamente à curva teórica de Faury. Já na terceira fase experimental, as curvas granulométricas foram utilizadas para calcular as quantidades necessárias de todos os agregados.

Os agregados naturais e reciclados analisados têm o aspecto visível nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Na Tabela 4.1, são apresentados os resultados médios obtidos pela realização deste ensaio para os vários agregados, podendo os valores referentes a cada amostra ser consultados no Anexo E.

A curva granulométrica dos agregados é apresentada na Figura 4.3, na qual se lê, em abcissas, a dimensão de abertura dos peneiros (numa escala correspondente à sua raiz quinta) e, em ordenadas, a percentagem de material que passou em cada peneiro. Os valores obtidos encontram-se dentro dos intervalos estabelecidos pelo fornecedor.

Os AGRB 4-10 mm assemelham-se à brita 1, quer em termos da sua curva granulométrica quer do seu módulo de finura. Por sua vez, é possível verificar que os AGRB 10-20 mm são idênticos à brita 2.



Figura 4.1 - Agregados naturais



Figura 4.2 - Agregados reciclados

Tabela 4.1- Resultados do ensaio de análise granulométrica

Peneiro (mm)	Massa média acumulada passada (%)						
	Areia fina	Areia grossa	Bago de Arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	95,9	100,0	99,6
16	100,0	100,0	100,0	100,0	53,6	100,0	54,5
11,2	100,0	100,0	100,0	90,0	8,1	99,1	8,1
8	100,0	99,9	100,0	63,3	0,9	66,0	1,1
5,6	100,0	98,7	89,4	30,4	0,4	25,8	0,5
4	100,0	96,5	18,5	4,2	0,3	5,6	0,2
2	99,8	87,4	2,2	0,6	0,3	0,7	0,2
1	98,7	64,7	1,4	0,4	0,3	0,2	0,2
0,5	80,0	30,4	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2
0,25	25,1	5,8	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
0,125	1,1	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
0,063	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1
Refugo	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0
Módulo de finura	1,95	3,15	5,77	6,31	7,44	6,27	7,43
f (%)	0,71	1,06	1,08	1,35	0,53	0,17	0,07

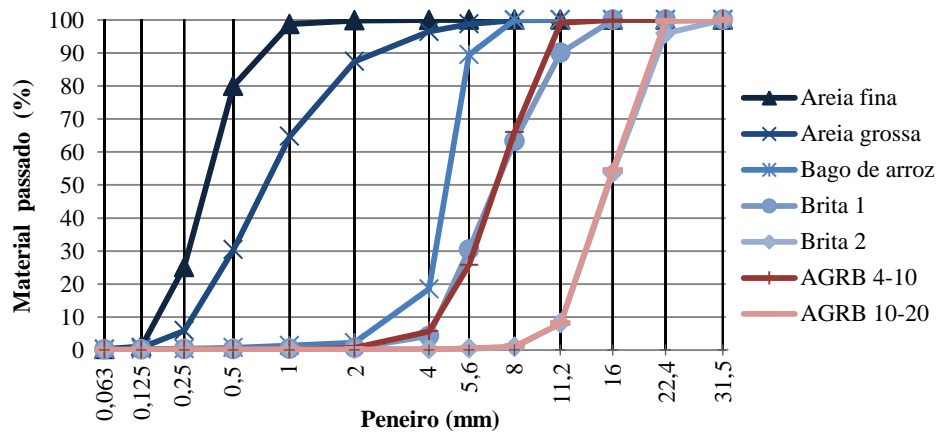


Figura 4.3 - Curva granulométrica dos vários agregados

4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

A determinação da massa volúmica e absorção de água teve por base a metodologia e princípios descritos na norma NP EN 1097-6 (2003). Este ensaio foi realizado para todos os agregados envolvidos neste estudo (areia fina, areia grossa, bago de arroz, brita 1, brita 2, AGRB 4-10 mm e AGRB 10-20 mm). Para cada tipo de agregado, foram ensaiadas três amostras, correspondendo o resultado final à média dos resultados das amostras. Os valores referentes a cada amostra analisada, para cada tipo de agregado, encontram-se no Anexo F.

Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados alcançados. Os valores obtidos para as massas volúmicas dos AP

estão próximos dos fornecidos pelas empresas que disponibilizaram os agregados (Anexo B), os quais se situam entre 2620 e 2770 kg/m³, à excepção da areia fina, cujos valores são mais reduzidos. O mesmo se constata para os valores de absorção de água dos AP, que se encontram bastante próximos dos valores fornecidos (entre 0,2 e 1,9%). Os AGRB cumprem os requisitos da especificação LNEC E 471 (2009), a qual refere que os agregados devem possuir uma massa volúmica superior a 2200 kg/m³ e uma absorção de água inferior a 7%.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de massa volúmica e absorção de água

Propriedade	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
ρ_a (kg/m ³)	2537	2622	2708	2756	2717	2654	2665
ρ_{rd} (kg/m ³)	2511	2590	2634	2623	2621	2367	2370
ρ_{sss} (kg/m ³)	2522	2602	2661	2671	2657	2475	2481
WA ₂₄ (%)	0,41	0,46	1,04	1,84	1,34	4,57	4,66

Analisando a referida tabela, verifica-se, como seria de esperar, que os AGRB possuem massa volúmica inferior aos AGP. Tal deve-se, essencialmente, às características das suas matérias-primas, em particular a pasta de cimento aderida aos AR, uma vez que são menos densas do que os AP. A redução de massa volúmica variou aproximadamente entre 2,5%, para a massa volúmica do material impermeável, e 10%, para a massa volúmica do material seco. Em relação à absorção de água, a mesma é superior nos AGRB, sendo justificada pelo mesmo motivo referido para a massa volúmica (a argamassa aderida aos AR possui elevada porosidade).

Esta maior capacidade de absorção de água por parte dos AGRB obriga a que a mesma tenha que ser considerada na formulação do betão, para se obter a mesma trabalhabilidade que num betão convencional. Deste modo, juntamente com o teor de humidade, foi calculada uma quantidade de água adicional a acrescentar na amassadura (como descrito no capítulo 3).

Na Tabela 4.3, faz-se uma comparação entre o levantamento bibliográfico efectuado e os valores obtidos neste estudo. Verifica-se que os resultados obtidos na presente campanha experimental estão de acordo com as demais investigações. No caso das massas volúmicas, os valores correspondentes aos AGRB são superiores à média registada para as outras investigações. Para a absorção de água, verificam-se valores inferiores à média, e até bastante inferiores aos agregados utilizados nas campanhas de Gomes (2007) e Juan e Gutiérrez (2009), onde a absorção se fixou em 8,5 e 8,6%, respectivamente. Estes factos podem ser indicadores de uma boa qualidade dos AGRB utilizados neste estudo, uma vez que, tal como evidenciado por Juan e Gutiérrez (2009), agregados com maior massa volúmica e menor absorção de água tendem a possuir menos pasta de cimento aderida aos mesmos. De realçar ainda que as absorções de água resultantes das campanhas de Limbachiya *et al.* (2000), Matias e Brito (2005) e Rao *et al.* (2011), nas quais foram utilizados agregados provenientes de elementos de betão pré-fabricados, se fixaram entre 3,9 e 5,1%, valores próximos do obtido neste estudo.

Tabela 4.3 - Comparação dos resultados obtidos no ensaio de massa volúmica e absorção de água nas diversas investigações

Autor	ρ_a (kg/dm ³)		ρ_{sss} (kg/dm ³)		ρ_{rd} (kg/dm ³)		WA ₂₄ (%)	
	AGP	AGRB	AGP	AGRB	AGP	AGRB	AGP	AGRB
Corinaldesi (2010)	-	-	-	-	-	-	3,00	7,80
Ferreira (2007)	2,70	2,66	2,66	2,44	2,63	2,30	0,95	5,80
Fonseca (2009)	2,65	2,69	2,59	2,45	2,55	2,31	1,50	6,10
Gomes (2007)	2,62	2,66	2,58	2,53	2,55	2,45	2,25	8,50
Juan e Gutiérrez (2009)	-	-	-	2,33	-	2,14	-	8,60
Kou e Poon (2012)	-	-	-	-	-	-	1,12	3,89
Larrañaga (2004)	2,71	2,59	2,67	2,43	2,65	2,33	0,89	4,45
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	-	-	2,60	2,41	-	-	2,50	5,05
Matias e Brito (2005)	2,69	2,61	2,65	2,45	2,63	2,36	0,79	4,12
Rao <i>et al.</i> (2011)	-	-	-	-	-	-	1,13	3,92
Yong e Teo (2009)	2,63	2,30	2,56	2,14	2,55	2,09	-	-
Média	2,67	2,59	2,62	2,41	2,59	2,31	1,42	5,49
Soares (2014)	2,73	2,66	2,66	2,48	2,63	2,37	1,41	4,61

Angulo (2005) e Juan e Gutiérrez (2009) referem que existe uma dependência entre a absorção de água dos AGRB e a sua massa volúmica. Deste modo, procurou-se estabelecer uma relação entre estas duas propriedades, com base nos valores encontrados no levantamento bibliográfico, como se constata nas Figuras 4.4 e 4.5 para a massa volúmica dos agregados secos e saturados com superfície seca, respectivamente. A relação descrita por uma curva polinomial foi a que melhor se ajustou aos valores, o que está de acordo com Hansen (1992), citado por Pereira (2010), que refere que existe uma relação parabólica entre a massa volúmica do material seco e a sua capacidade de absorção de água.

Considerando todas as campanhas pesquisadas com dados suficientes para efectuar tal relação, não se encontrou nenhuma relação entre as propriedades referidas (coeficientes de correlação abaixo de 0,1). No entanto, excluindo-se a campanha de Gomes (2007), obtém-se uma forte correlação entre a absorção de água e a massa volúmica das partículas secas ($R^2 = 0,97$) e uma correlação satisfatória entre a absorção de água e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ($R^2 = 0,779$).

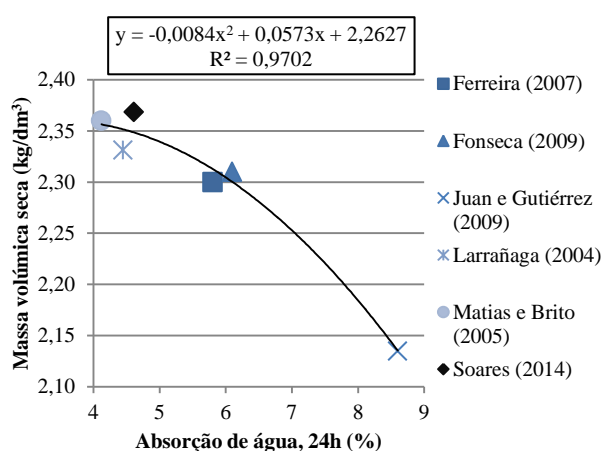


Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água dos AGRB

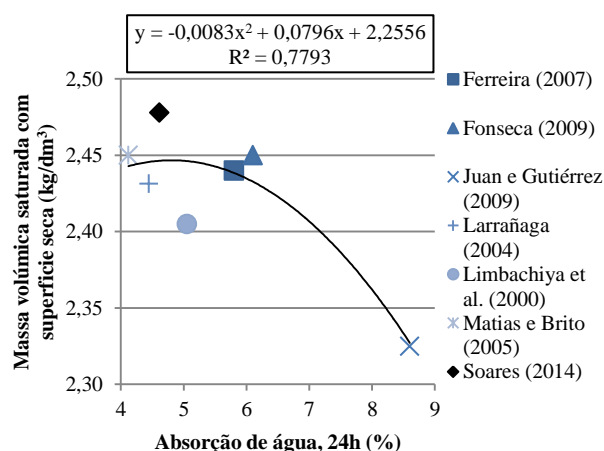


Figura 4.5 - Relação entre a massa volúmica saturada com superfície seca e a absorção de água dos AGRB

4.2.3. Massa volúmica aparente

O ensaio de massa volúmica aparente, ou baridade, seguiu a metodologia e princípios descritos na norma NP EN 1097-3 (2002). Este ensaio foi realizado para todos os agregados envolvidos neste estudo (areia fina, areia grossa, bago de arroz, brita 1, brita 2, AGRB 4-10 mm e AGRB 10-20 mm). Para cada tipo de agregado, foram ensaiadas três amostras, correspondendo o resultado final à média dos resultados das amostras. Além da baridade, é possível determinar o volume de vazios, estando as duas propriedades interligadas, uma vez que a primeira será tanto maior quanto menor for a segunda. No Anexo G, encontram-se os valores referentes a cada amostra analisada para cada tipo de agregado.

Os resultados obtidos através da realização deste ensaio são apresentados na Tabela 4.4. Por análise desta tabela, observa-se uma tendência de diminuição da baridade com o aumento da granulometria dos agregados e, por sua vez, um aumento do volume de vazios. Por outras palavras, está-se perante uma baridade maior nos AF do que nos AG. Tal pode ser justificado pela granulometria mais contínua dos primeiros em relação aos segundos, o que gera uma melhor ocupação dos espaços dentro do recipiente resultando, assim, num menor volume de vazios (Cartuxo, 2013).

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de massa volúmica aparente

Propriedade	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
ρ_b (kg/m ³)	1583	1536	1407	1434	1368	1285	1248
% de vazios	37,0	40,7	46,6	45,3	47,8	45,7	47,3

Como expectável, acompanhando a tendência da massa volúmica, os AGRB possuem uma massa volúmica aparente inferior à dos seus homólogos naturais, sendo a redução na ordem de 10%. Sendo o volume de vazios

praticamente igual entre os dois tipos de agregados, a menor baridade nos AR deve-se, principalmente, à pasta de cimento aderida aos mesmos.

Os valores de baridade resultantes deste ensaio enquadram-se nos resultados das várias investigações analisadas, como se verifica nas Figuras 4.6 (AGP) e 4.7 (AGRB). A massa volúmica aparente dos AGRB desta investigação é superior à média das restantes campanhas experimentais.

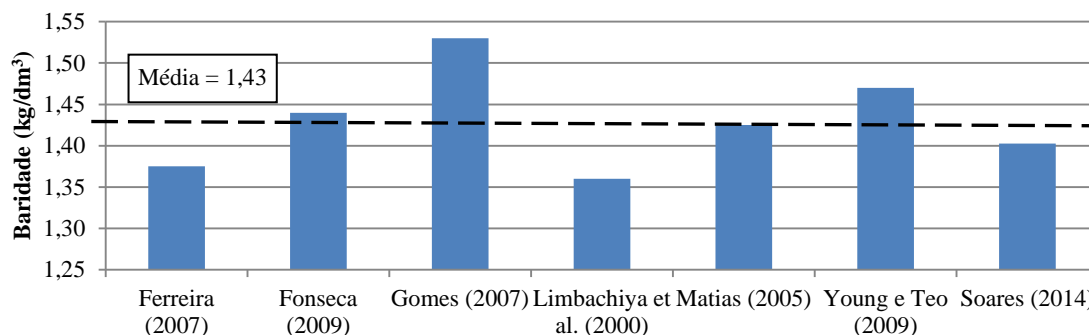


Figura 4.6 - Comparação dos resultados da baridade de AGP das diversas investigações

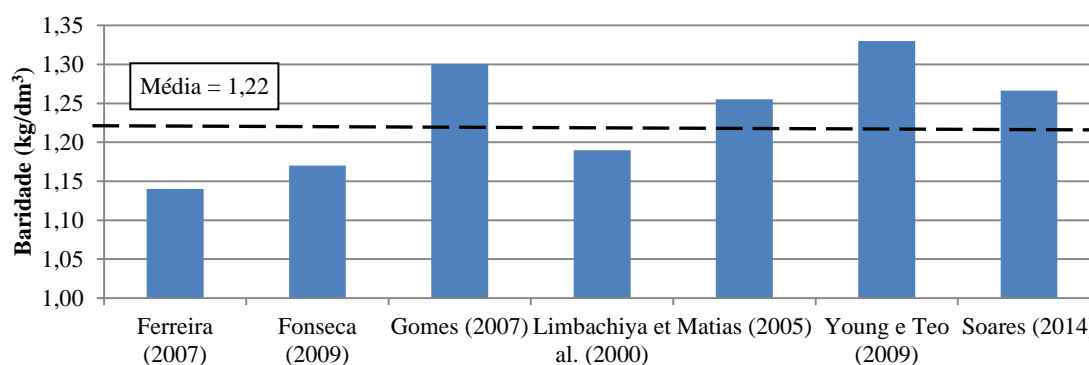


Figura 4.7 - Comparação dos resultados da baridade de AGRB das diversas investigações

4.2.4. Desgaste de Los Angeles

A determinação do desgaste de *Los Angeles* teve por base a metodologia e princípios descritos na especificação LNEC E 237 (1970). Este ensaio foi realizado apenas para os AG envolvidos neste estudo (bago de arroz, brita 1, brita 2, AGRB 4-10 mm e AGRB 10-20 mm), uma vez que a especificação referida não inclui procedimentos para os AF. Para cada tipo de agregado, foi ensaiada uma amostra. Os cálculos auxiliares à realização deste ensaio estão presentes no Anexo G.

Os resultados obtidos, tanto para os agregados naturais como para os reciclados, são apresentados na Tabela 4.5. Por análise dos seus valores, observa-se que existe um desgaste superior nos AGRB face aos AGP, o que se deve principalmente à menor capacidade resistente da argamassa aderida aos primeiros em relação ao material pétreo. No entanto, os AGRB de granulometria entre 4 e 10 mm tiveram um desgaste não muito distinto do da brita 2 (diferença de cerca de 5,4%). Os AGRB 10-20 mm registaram um desgaste 24 e 34% superior ao da brita 1 e brita 2, respectivamente, o que se encontra de acordo o referenciado por Tabsh e Abdelfatah (2009). Refira-se, ainda, a tendência crescente desta propriedade com a granulometria do agregado, ou seja, quanto maior a dimensão máxima do agregado maior será o desgaste de *Los Angeles*.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de desgaste de *Los Angeles*

Propriedade	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
Δ LA (%)	22,3	27,2	31,5	33,3	41,2

Como se conclui pelos dados apresentados, esta propriedade satisfaz, o requisito de 50% de desgaste máximo estipulado na norma NP EN 12620 (2004), para agregados a serem utilizados na formulação de betões estruturais. De acordo com esta norma, os AGRB 10-20 mm enquadram-se na categoria LA₅₀ (categoria limite), os AGRB 4-10

mm e a brita 2 na LA₃₅, a brita 1 na LA₃₀ e o bago de arroz na LA₂₅.

Nas Figuras 4.8, para os AGP, e 4.9, para os AGRB, é feita uma comparação entre o levantamento bibliográfico efectuado e os valores obtidos neste estudo. Em ambos os casos, verifica-se que os resultados obtidos na presente campanha experimental estão de acordo com as demais investigações. Apesar de os AGRB 4-10 mm terem um desgaste inferior à média, o desgaste dos AGRB 10-20 mm é superior ao valor médio. Estes dois agregados situam-se praticamente nos extremos dos valores presentes em outras investigações.

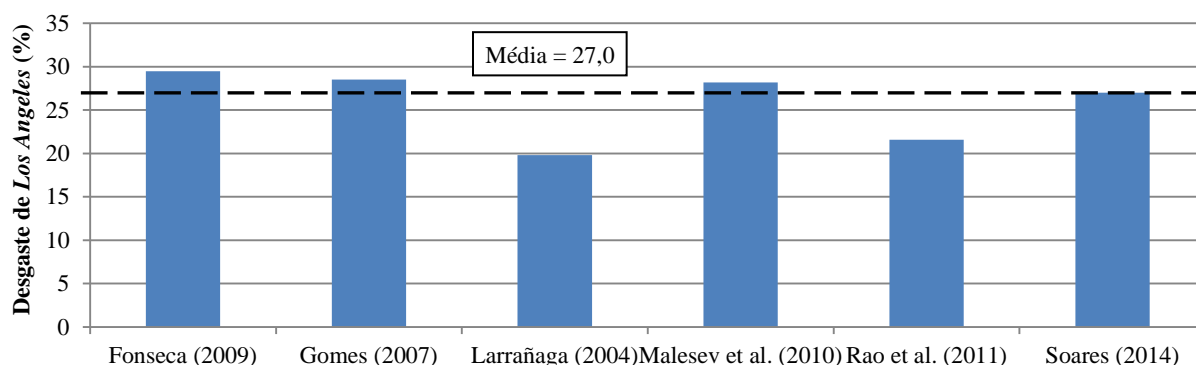


Figura 4.8 - Comparação dos resultados do desgaste de Los Angeles de AGP das diversas investigações

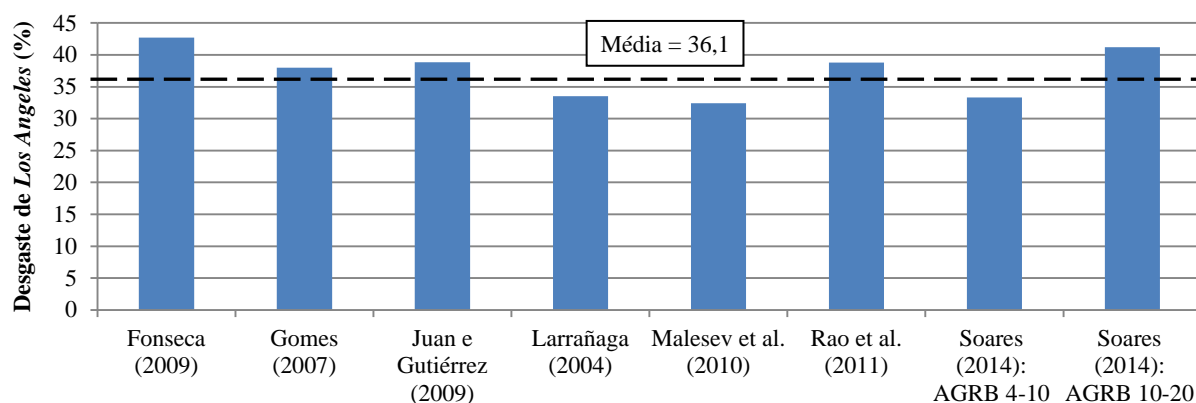


Figura 4.9 - Comparação dos resultados do desgaste de Los Angeles de AGRB das diversas investigações

Não se obteve, através dos dados da presente campanha e do levantamento bibliográfico, qualquer tipo de relação entre o desgaste de Los Angeles e a massa volúmica dos AGRB. No entanto, analisando apenas os agregados, tanto naturais como reciclados, envolvidos neste estudo, verificou-se correlações razoáveis da massa volúmica das partículas secas ($R^2 = 0,652$) e da absorção de água ($R^2 = 0,676$) com esta propriedade, como é indiciado nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

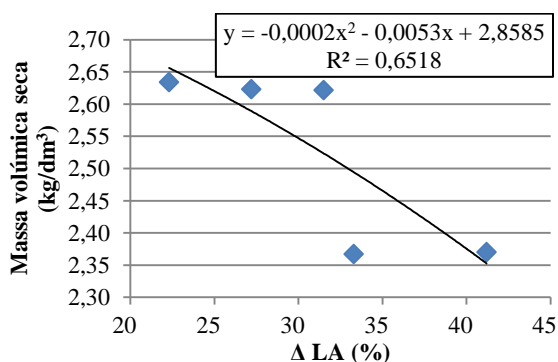


Figura 4.10 - Relação entre a massa volúmica seca e o desgaste de Los Angeles

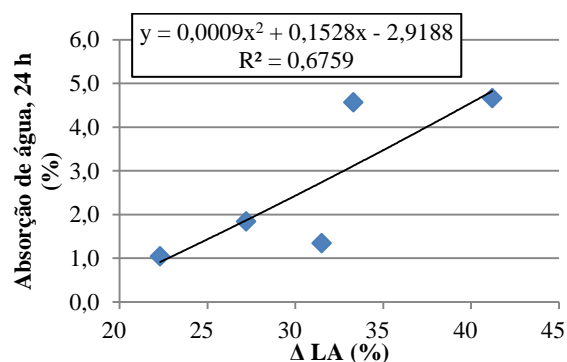


Figura 4.11 - Relação entre a absorção de água e o desgaste de Los Angeles

4.2.5. Teor de humidade

A determinação do teor de humidade teve por base o descrito na norma NP EN 1097-5 (2011). Este ensaio apenas foi realizado nos AGRB, uma vez que o teor de humidade nos AP é considerado desprezável. Tal deve-se à elevada capacidade de absorção de água por parte dos AR (como referido no subcapítulo 3.4.3), o que os torna susceptíveis a variações na quantidade de água que possuem na sua constituição. Apesar de não se ter tido em conta o teor de humidade nos AP, tanto grossos como finos, teve-se o cuidado de realizar a secagem das areias antes das amassaduras, visto apresentarem um aspecto bastante húmido.

Os resultados deste ensaio tiveram como principal função auxiliar o cálculo da quantidade adicional de água necessária a adicionar na amassadura do betão, para compensar a absorção dos AGRB, permitindo, assim, obter níveis de abaixamento semelhantes em todos os betões analisados.

O teor de humidade foi aferido próximo das datas em que tiveram lugar as betonagens previstas na campanha experimental, de modo a que o seu valor fosse o mais representativo possível do teor de humidade dos agregados na altura da amassadura. A média do teor de humidade em cada semana foi calculada com base na percentagem de cada uma das fracções granulométricas dos agregados, correspondentes a 1 m³ de betão. Por outras palavras, o valor final do teor de humidade corresponde ao modo como os AGRB incorporaram o betão.

Os resultados alcançados pela realização deste ensaio são apresentados na Tabela 4.6. No Anexo H, encontram-se os valores referentes a cada amostra analisada.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de desgaste de teor de humidade

Fase experimental	Semana	w (%)
2 ^a	25 de Março de 2013	3,45
	01 de Abril de 2013	3,48
	15 de Abril de 2013	3,11
	29 de Abril de 2013	2,56
	06 de Maio de 2013	2,68
	13 de Maio de 2013	2,68
3 ^a	09 de Setembro de 2013	1,61
	23 de Setembro de 2013	1,64

Como se constata por análise da referida tabela, o teor de humidade variou entre 2,56 e 3,48%, no decorrer da segunda fase da campanha experimental, e, na terceira fase, fixou-se em aproximadamente em 1,6%. Os valores da segunda fase experimental representam entre 55 e 75% do total de absorção de água dos AGRB e o da terceira fase cerca de 35%.

Eram esperados valores iniciais de humidade elevados, uma vez que, durante os processos de demolição e britagem dos elementos pré-fabricados, os AR estiveram sujeitos à acção da chuva. Após estes processos, os agregados foram armazenados em *big bags* e posteriormente peneirados e colocados em contentores estanques. Deste modo, e com o aumento da temperatura média registada em Lisboa no decorrer da campanha experimental (Anexo H), o teor de humidade dos AGRB diminuiu, correspondendo a diferença entre o valor máximo e o mínimo registados a aproximadamente 54%. O teor de humidade é, assim, função do local de armazenamento dos agregados e das condições climáticas do local.

Os valores alcançados nesta campanha ficaram abaixo dos registados por Fonseca (2009). Este autor obteve teores de humidade nos AGRB entre 3,8 e 4,0%. No entanto, como a capacidade total de absorção de água dos seus agregados (6,1%) foi mais elevada comparativamente à deste estudo, é natural que o teor de humidade presente nos mesmos possa ser superior. De facto, os valores de teor de humidade do autor representam cerca de 65% do total de absorção de água, o que se enquadra com o obtido na segunda fase deste estudo.

4.2.6. Índice de forma

O ensaio de índice de forma seguiu a metodologia e princípios preconizados na norma NP EN 933-4 (2002). Este

ensaio foi realizado apenas para os AG envolvidos neste estudo (bago de arroz, brita 1, brita 2, AGRB 4-10 mm e AGRB 10-20 mm), uma vez que a norma referida não inclui procedimentos para os AF. Para cada tipo de agregado, foi ensaiada uma amostra. Os cálculos auxiliares à realização deste ensaio estão presentes no Anexo I.

Os resultados obtidos através da realização deste ensaio estão presentes na Tabela 4.7. Por análise desta tabela, verifica-se que os AGRB possuem um índice de forma inferior ao dos seus homólogos naturais. O bago de arroz e a brita 2 apresentam índices de forma ligeiramente superiores aos dos AR. Já o valor determinado para brita 1 é superior aos dos restantes AP. Deste modo, os AGP apresentam uma forma ligeiramente mais alongada, quando comparados com os AR. De acordo com a norma NP EN 12620 (2004), a brita 1 enquadra-se na categoria SI₄₀, o bago de arroz na SI₂₀ e os restantes agregados na SI₁₅.

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de índice de forma

Propriedade	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
SI (%)	16,4	21,7	14,5	11,5	12,2

Analisando as várias investigações consultadas, na Tabela 4.8, constata-se que a ordem de grandeza dos valores obtidos está de acordo com as mesmas. No entanto, em todas as investigações, os AGRB apresentam um índice de forma superior aos AP. Significa isto que, ao contrário do obtido nesta campanha experimental, os AR dos demais autores, tendem a formas mais angulares e alongadas. Porém, no estudo de Larrañaga (2004), encontram-se valores de algumas fracções granulométricas dos AGRB inferiores ao da maior fracção dos AGP.

Tabela 4.8 - Comparação dos resultados obtidos no ensaio de índice de forma nas diversas investigações

Autor	Tipo de agregado	Índice de forma (%)	Média		Diferença (%)
			AGP	AGRB	
Fonseca (2009)	Bago de arroz	8,6			
	Brita 1	13,4			
	Brita 2	11,1	11,0	24,3	120,2
	AGRB	24,3			
Larrañaga (2004)	AGP: 6-12 mm	21,0			
	AGP: 12-18 mm	24,0			
	AGP: 18-25 mm	29,0	24,7	27,7	12,2
	AGRB: 6-12 mm	24,0			
	AGRB: 12-18 mm	28,0			
Etxeberria <i>et al.</i> (2007)	AGP	25,0	25,0	28,0	12,0
	AGRB	28,0			
Soares (2014)	Bago de arroz	16,4			
	Brita 1	21,7			
	Brita 2	14,5	17,5	11,9	-32,3
	AGRB: 4-10 mm	11,5			
	AGRB: 10-20 mm	12,2			

Como se sabe, um factor que pode apresentar influência na forma das partículas é o processo de britagem. Fonseca (2009) refere que a significativa diferença registada entre os AGP e os AGRB pode dever-se ao facto de terem sofrido uma trituração diferente (britagem primária e secundária, no caso dos primeiros, e britagem *in situ* com uma britadeira de maxilas, para os segundos). Tal foi confirmado por Matias e Brito (2005), tendo os autores obtido índices volumétricos distintos para dois métodos de trituração diferentes. Nas investigações de Larrañaga (2004) e Etxeberria *et al.* (2007) e neste estudo, o processo de britagem entre os agregados foi semelhante, pelo que se nota uma menor diferença entre os resultados obtidos para os agregados reciclados e naturais.

Matias e Brito (2005) concluíram ainda que, para o mesmo processo de britagem, as partículas dos AR tendem a formas mais arredondadas do que as dos AP. Para os resultados deste estudo, esta justificação é bastante plausível: como a pasta de cimento é menos resistente do que a pedra natural, as arestas dos AGR são mais propícias a arredondar do que as dos AGP para o mesmo processo de trituração.

A forma menos alongada dos AGRB da presente campanha experimental, aliada à textura rugosa e porosa dos mesmos, que proporciona uma melhor aderência entre os agregados e a pasta de cimento (originada pela existência

de uma maior quantidade de produtos de hidratação nos poros dos agregados), pode vir a melhorar o desempenho final dos betões.

4.3. Ensaio ao betão no estado fresco

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (imediatamente após a amassadura): abaixamento e massa volúmica. As propriedades do betão no estado fresco são importantes sobretudo durante a fase construtiva de uma dada obra, enquanto as propriedades no estado endurecido possuem relevância durante toda a vida útil do betão. No entanto, nenhuma podem ser consideradas individualmente, uma vez que se afectam mutuamente (Akroyd, 1962). Deste modo, a caracterização do betão no estado fresco constitui uma ferramenta fundamental de controlo da produção dos betões

4.3.1. Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi realizado de acordo com a metodologia presente na norma NP EN 12350-2 (2009), tanto na segunda fase experimental (uma amostra) como na terceira (duas amostras). Esta propriedade foi determinada imediatamente após o término da amassadura. O abaixamento traduz-se pela distância medida entre a altura do cone e o ponto mais alto do betão após o processo de remoção do cone.

A trabalhabilidade dos betões foi um parâmetro fixado *a priori*, ou seja, antes da formulação dos mesmos, com o intuito de se efectuar uma adequada e válida comparação entre os betões em estudo. Pretendeu-se obter amassaduras com um abaixamento situado no intervalo de 125 ± 15 mm, de modo a pertencerem à classe de consistência S3 (100 a 150 mm), tendo sido rejeitadas aquelas em que esta exigência não se cumpriu.

Nas Tabelas 4.9 (segunda fase da campanha experimental) e 4.10 (terceira fase experimental), observa-se os valores resultantes da realização deste ensaio, sendo os mesmos relativos ao abaixamento obtido e às relações a/c efectiva e aparente que advêm da formulação do betão. Relembre-se, como referido no capítulo 3, que nos betões com AGRB teve-se o cuidado de considerar a sua capacidade de absorção de água e o seu teor de humidade, tendo-se adicionado uma quantidade adicional de água na amassadura.

Tabela 4.9 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento: 2ª fase da campanha experimental

Betão	Taxa de substituição (%)	SP (% da dosagem de cimento)	Abaixamento (mm)	Relação a/c efectiva	Relação a/c aparente
BR	0	0	124	0,52	0,52
B10	10	0	127	0,52	0,52
B20	20	0	122	0,52	0,53
B30	30	0	109	0,52	0,53
B40	40	0	117	0,52	0,53
B50	50	0	112	0,52	0,54
B100	100	0	116	0,52	0,55
B100SP0.5	100	0,5	127	0,41	0,44
B100SP1.0	100	1	119	0,41	0,44
B100SP1.5	100	1,5	118	0,40	0,44
B100SP2.0	100	2	128	0,39	0,42

Tabela 4.10 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento: 3ª fase da campanha experimental

Betão	Taxa de substituição (%)	SP (% da dosagem de cimento)	Abaixamento (mm)	Relação a/c efectiva	Relação a/c aparente
BR	0	0	119	0,54	0,54
B25	25	0	123	0,54	0,55
B100	100	0	126	0,54	0,59
B100SP1.0	100	1	132	0,4	0,45

Como se conclui por análise dos resultados, o limite de abaixamento estabelecido foi satisfeito em todos os betões, à excepção do B30. Este betão registou um abaixamento de 109 mm, ligeiramente abaixo do limite inferior (110 mm), mas considera-se que o mesmo é bastante próximo deste limite. Contudo, foram obtidos betões com abaixamentos inválidos, especialmente no caso dos betões com superplastificante (por dificuldades no acerto da relação a/c efectiva que traduzisse um abaixamento semelhante), pelo que houve necessidade de repetir algumas

amassaduras na segunda fase experimental.

Hansen e Narud (1983), citados por Leite (2001), referem que a forma angular e a textura rugosa dos AGRB podem ser motivos da maior necessidade de água nos BAR, tendo estes betões obtido, no seu estudo, uma trabalhabilidade inferior à do BR. Tal não se verificou na presente campanha experimental. No entanto, a relação a/c efectiva constante observada no BR e nos BAGRB é condizente com os estudos de Poon *et al.* (2004b) e Matias e Brito (2005). Os primeiros autores referem que o abaixamento inicial depende da quantidade de água livre presente na amassadura, a qual é superior nos BAR. Matias e Brito (2005) concluíram que, para uma mesma forma das partículas dos agregados, o abaixamento entre o BR e um betão com 100% de AGRB (com compensação de água na amassadura) é semelhante. De facto, tendo em conta o apresentado no subcapítulo 4.2.6, os AGRB utilizados neste estudo possuem uma forma semelhante à dos AGP.

A introdução de SP num betão com 100% de AGRB originou, como esperado, um decréscimo na relação a/c efectiva para uma mesma trabalhabilidade. Relacionando as diferentes percentagens SP utilizadas com as relações a/c obtidas (Figura 4.12), verifica-se uma correlação razoável ($R^2 = 0,663$). Esta correlação não foi melhor uma vez que o efeito provocado pela incorporação de SP, em percentagens variáveis da dosagem de cimento, foi semelhante (relações a/c efectivas idênticas nos betões com SP). Por outras palavras, o poder redutor de água do SP foi independente da dosagem empregue na formulação do betão. A capacidade redutora do SP fixou-se entre 21 e 26%, como é possível confirmar na Tabela 4.11. A ordem de grandeza desta redução está de acordo com os estudos de Pereira (2010) e Cartuxo (2013), que utilizaram o mesmo tipo de SP em BAFRB, tendo obtido uma relação a/c efectiva cerca de 25% inferior com a utilização de uma dosagem de SP de 1% da quantidade de cimento.

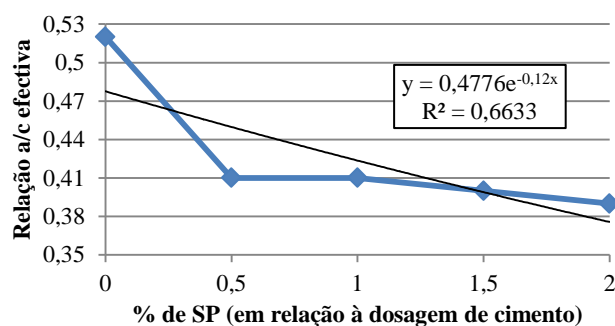


Figura 4.12 - Relação da relação a/c efectiva com a percentagem de SP

Tabela 4.11 - Influência da incorporação de SP num betão com 100% de AGRB

Fase experimental	Betão	Relação a/c efectiva	D (%)
2ª	B100	0,52	-
	B100SP0.5	0,41	-21,2
	B100SP1.0	0,41	-21,2
	B100SP1.5	0,4	-23,1
	B100SP2.0	0,39	-25,0
3ª	B100	0,54	-
	B100SP1.0	0,4	-25,9

4.3.2. Massa volúmica

A massa volúmica dos vários betões em análise foi determinada consoante o especificado na norma NP EN 12350-6 (2009). Este ensaio foi realizado tanto na segunda fase experimental (uma amostra) como na terceira (duas amostras). Esta propriedade foi determinada imediatamente após o término da amassadura.

Os resultados alcançados por este ensaio são apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13, para a segunda e terceira fases da campanha experimental, respectivamente. Nestas tabelas, encontram-se os valores da massa volúmica para as várias composições de betão em estudo, a variação desta propriedade em relação ao BR e, para os betões com 100% de AGRB e com SP, a variação face ao B100. Os cálculos intermédios estão presentes no Anexo J. Todos os betões produzidos se encontram dentro do intervalo estabelecido na norma NP EN 206-1 (2007) para betões normais, o qual tem por limites os valores 2000 e 2600 kg/m³.

Verifica-se que a massa volúmica do betão fresco diminui com o aumento da taxa de incorporação de AGRB, sendo as reduções máximas registadas cerca de 3,5%, na segunda fase experimental, e 4,2%, na terceira fase, para o betão com substituição integral de AGP por AGRB. Como a massa volúmica do betão depende directamente da massa volúmica dos seus elementos, tal era esperado (os AGRB possuem menor massa volúmica do que os seus homólogos naturais, devido à pasta de cimento aderida aos primeiros, como se concluiu no subcapítulo 4.2.2). A ordem desta redução está de acordo com as investigações de Matias e Brito (2005), Fonseca (2009), Malesev *et al.* (2010) e Etxeberria (2007), em que foram obtidas diminuições da massa volúmica na ordem de 4 a 5%, no caso dos

dois primeiros, e de aproximadamente 3%, nos restantes.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica: 2ª fase da campanha experimental

Betão	Taxa de substituição (%)	SP (% da dosagem de cimento)	Massa volúmica (kg/m ³)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	0	0	2367,8	-	-
B10	10	0	2353,8	-0,6	-
B20	20	0	2348,6	-0,8	-
B30	30	0	2342,4	-1,1	-
B40	40	0	2326,4	-1,7	-
B50	50	0	2322,1	-1,9	-
B100	100	0	2284,2	-3,5	-
B100SP0.5	100	0,5	2340,8	-1,1	2,5
B100SP1.0	100	1	2384,3	0,7	4,4
B100SP1.5	100	1,5	2370,6	0,1	3,8
B100SP2.0	100	2	2380,1	0,5	4,2

Tabela 4.13 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica: 3ª fase da campanha experimental

Betão	Taxa de substituição (%)	SP (% da dosagem de cimento)	Massa volúmica (kg/m ³)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	0	0	2376,5	-	-
B25	25	0	2344,2	-1,4	-
B100	100	0	2277,7	-4,2	-
B100SP1.0	100	1	2410,3	3,1	5,8

Na Figura 4.13, observa-se que existe uma forte relação entre esta propriedade e a quantidade de AGRB introduzidos no betão, constatando-se que a diminuição da primeira variável com o aumento da segunda é aproximadamente linear. Foi obtido um excelente coeficiente de correlação, igual a 0,982. Tal vai ao encontro das demais investigações analisadas, em que foram obtidos coeficientes de correlação sempre superiores a 0,90 (veja-se o apresentado no capítulo 2).

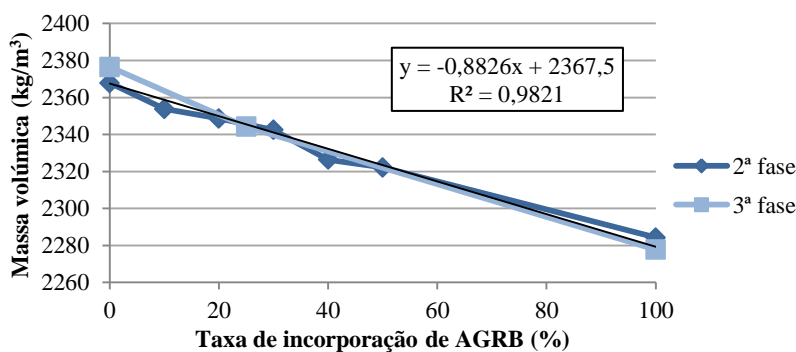


Figura 4.13 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB

Analisando os resultados deste estudo juntamente com as diversas investigações analisadas, obteve-se uma correlação razoável ($R^2 = 0,694$). O decréscimo do coeficiente de correlação deve-se ao facto de os materiais e as composições dos betões serem distintas entre as investigações. Ainda assim, excluindo a campanha de Rao *et al.* (2010), visto ser a que apresenta valores mais díspares relativamente ao presente estudo, verifica-se uma melhoria da correlação anteriormente estabelecida ($R^2 = 0,893$). Estes aspectos são apresentados na Figura 4.14.

Relativamente aos betões com 100% de AGRB e SP, constata-se que ocorreu um aumento da massa volúmica em relação ao B100. Este incremento fixou-se entre 2,5 e 4,4%, na segunda fase da campanha experimental, e em 5,8% na terceira fase. A utilização do SP teve o objectivo de diminuir a quantidade de água utilizada no B100, mantendo-se a mesma trabalhabilidade do que nos restantes betões. Deste modo, como demonstrado no subcapítulo anterior, houve uma redução da relação *a/c* efectiva. Consequentemente, o volume de partículas sólidas no betão é superior (sendo tanto maior quanto menor for a relação *a/c*) e, por isso, a sua massa volúmica será maior do que a de um

betão em que não se empregue qualquer tipo de AP.

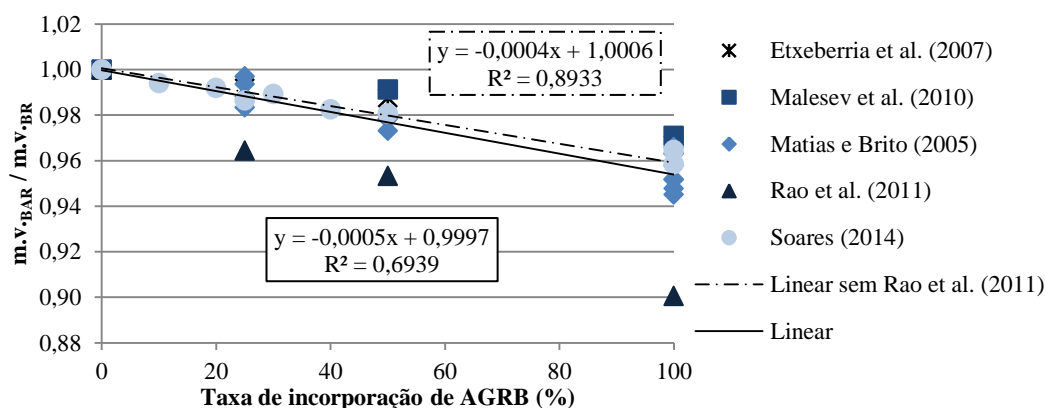


Figura 4.14 - Relação da massa volúmica com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Na Figura 4.15, apresenta-se a relação entre esta propriedade a percentagem de SP utilizada, em relação à quantidade de cimento. Obteve-se uma correlação de 0,712, considerada satisfatória. Não tendo ocorrido uma variação significativa do poder redutor de água do SP pela utilização de diferentes quantidades do mesmo, seria expectável que a massa volúmica destes betões fosse semelhante. Tal ocorreu à excepção do B100SP0,5, para o qual se obteve um valor inferior aos restantes betões com SP empregue na sua formulação.

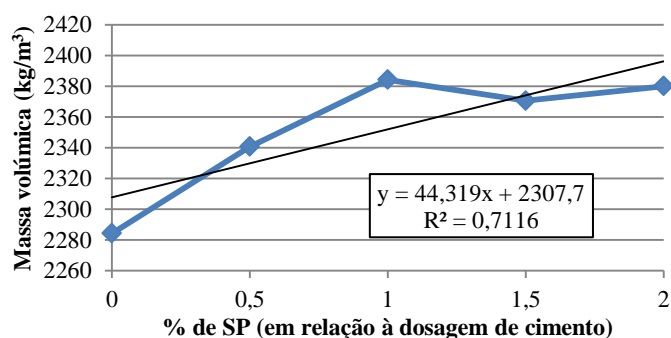


Figura 4.15 - Relação da massa volúmica com a percentagem de SP

4.4. Ensaios mecânicos ao betão no estado endurecido

No presente subcapítulo, são expostos os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado endurecido, no que diz respeito às suas características mecânicas: resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade, velocidade de propagação dos ultra-sons e resistência à abrasão. Efectuou-se uma análise aos mesmos, bem como uma comparação com as investigações presentes no levantamento bibliográfico realizado. Os ensaios foram realizados ao longo de vários períodos de cura, previamente estabelecidos.

4.4.1. Resistência à compressão

A capacidade resistente sob tensão uniforme de compressão dos vários betões em análise foi determinada segundo o procedimento descrito na norma NP EN 12390-3 (2011). Este ensaio foi realizado tanto na segunda fase experimental, após 7 e 28 dias de cura do betão, como na terceira fase, após 7, 28 e 56 dias. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo K.

Os valores médios da resistência à compressão, para as diferentes idades ($f_{cm 7}$, $f_{cm 28}$), correspondentes aos betões analisados na segunda fase experimental, encontram-se na Tabela 4.14. O principal objectivo foi determinar quais as composições a analisar na fase seguinte. Em primeiro lugar, importa verificar se os valores obtidos estão de acordo com a formulação do betão adoptada. Para tal, é necessário determinar-se a resistência característica à compressão dos betões, a qual é determinada segundo a expressão 4.1. Para os betões sem SP, obteve-se uma classe

C35/45, superior à classe prevista (C25/30), o que pode ser justificado pelas diferenças na relação a/c e condições de cura relativamente às preconizadas no método de Faury. Nos BAGRB com SP, foram obtidas classes de resistência superiores: C40/50, para o B100SP1.5, C45/55, para o B100SP0.5, e C50/60, para os restantes.

Tabela 4.14 - Resultados obtidos no ensaio resistência à compressão: 2ª fase da campanha experimental

Betão	f_{cm7} (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)	f_{cm28} (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	40,9	-	-	48,0	-	-
B10	35,4	-13,4	-	46,9	-2,3	-
B20	38,1	-6,8	-	47,7	-0,5	-
B30	43,2	5,7	-	50,8	6,0	-
B40	37,8	-7,6	-	48,0	0,1	-
B50	40,8	-0,3	-	49,5	3,3	-
B100	39,4	-3,5	-	50,3	4,9	-
B100SP0.5	57,3	40,1	45,3	63,8	32,9	26,7
B100SP1.0	58,5	43,2	48,4	67,6	40,9	34,4
B100SP1.5	57,8	41,4	46,6	60,8	26,7	20,8
B100SP2.0	59,0	44,3	49,6	70,3	46,6	39,7

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \times S_n \quad (4.1)$$

onde,

- f_{ck} - valor característico de resistência à compressão (MPa);
- f_{cm} - valor médio de resistência à compressão (MPa);
- λ - parâmetro estatístico que depende do número de amostras; adoptou-se um valor de 1,64 para este parâmetro, o qual é proposto por Nepomuceno (1999);
- S_n - desvio padrão (MPa).

Constata-se que a introdução de AGR no betão não teve uma influência expressiva na resistência à compressão, tanto aos 7 como aos 28 dias de cura. Aos 28 dias de idade, os betões com 10 e 20% de substituição de AGP por AGRB tiveram uma resistência ligeiramente inferior à do BR (redução máxima de 2,3%), enquanto, para as taxas de 30, 40, 50 e 100%, as resistências foram superiores (incremento da resistência até 6%). A diferença máxima entre estes betões não ultrapassou 4 MPa, como ocorre entre os betões B10 e B100, pelo que se considera que não é significativa. Nota-se que esta diferença entre as resistências foi superior aos 7 dias de idade, onde se registou maior dispersão de valores, tendo ocorrido diferenças nos BAGRB até 13,4% face ao BR. O valor do B30, o qual é superior aos restantes, pode ser justificado pelo facto de que foi a amassadura que obteve menor abaixamento. A variação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB é apresentada na Figura 4.16. Face aos resultados obtidos, não foi possível estabelecer nenhuma relação entre a resistência à compressão e a incorporação de AGRB nos betões.

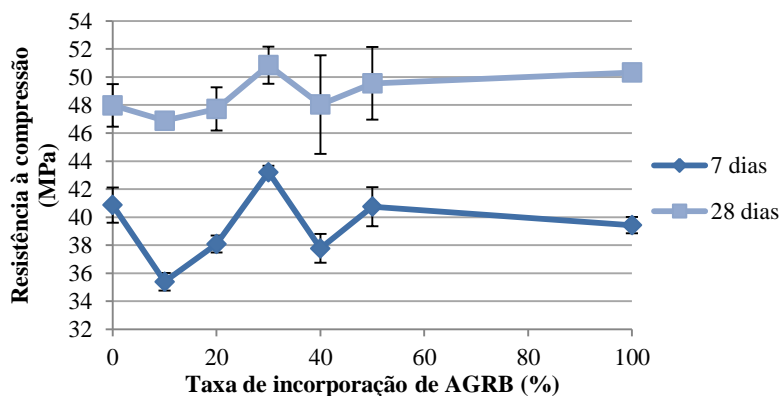


Figura 4.16 - Variação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB: 2ª fase experimental

De acordo com Brito (2005), pode-se obter resistências mecânicas semelhantes, entre os BAGRB e o BR, desde que se mantenha a curva granulométrica dos agregados e a mesma trabalhabilidade (para AGR de resistência e

massa volúmica correntes e desde que a classe do betão não seja elevada). Estes factores foram mantidos no presente estudo, pelo que os resultados estão de acordo com o referido pelo autor. Tabsh e Abdelfatah (2009) registaram a mesma tensão de rotura à compressão entre estes dois tipos de betão, quando incorporaram AGRB originados por um betão de elevada resistência (50 MPa), confirmando que a resistência à compressão é directamente influenciada pela resistência mecânica dos betões de origem. Tal pode justificar os resultados da presente campanha experimental, uma vez que os AGRB foram provenientes de elementos de betão pré-fabricados de classe C35/45 e C40/50. Por outras palavras, os AR foram obtidos a partir de betões com resistência média superior a 50 MPa.

Outros factores que podem ter influência nesta propriedade são a forma dos agregados e a sua aderência à pasta de cimento. Relativamente ao primeiro, constatou-se, nos ensaios dos agregados, que o índice de forma é semelhante entre os AGP e os AGRB utilizados neste estudo. Quanto ao segundo factor, vários autores (Leite, 2001; Poon *et al.*, 2004a) referem que a textura rugosa dos AGRB, aliada à sua elevada porosidade, pode proporcionar a formação de maior quantidade de produtos de hidratação nos poros dos agregados, melhorando, consequentemente, a ligação agregado / pasta cimentícia. Estes factos podem, também, justificar a resistência idêntica entre os BAGRB e os seus homólogos naturais.

Em relação aos betões com SP, e como era expectável, a resistência à compressão dos mesmos foi superior à dos demais betões analisados, ou seja, houve um aumento considerável no desempenho mecânico deste tipo de betões. Este aumento de resistência foi provocado pela redução da relação a/c efectiva, resultante da introdução de SP nas misturas de betão, com o intuito de se obter a mesma trabalhabilidade. Obteve-se incrementos até 49,6%, aos 7 dias de cura do betão, e 39,7%, aos 28 dias, face ao betão composto exclusivamente por AGR sem SP. A maior diferença de resistências aos 7 dias permite concluir que o SP possui um efeito acelerador de presa. Segundo Cartuxo (2013), citando Neville (1995), a adição de substâncias plastificantes traduz-se numa hidratação mais rápida e eficaz, resultante de uma melhor dispersão das partículas de cimento. Este efeito notou-se em todos os betões com SP, mas de forma mais vincada nos betões B100SP0.5 e B100SP1.5.

Na Figura 4.17, encontra-se a relação entre a resistência à compressão, aos 7 e aos 28 dias de idade, e a percentagem de SP, em relação à quantidade de cimento, utilizada. Apesar do aumento desta propriedade pela introdução de SP no betão, as correlações obtidas foram na ordem de 0,55, consideradas pouco satisfatórias. Como a relação a/c não sofreu alterações significativas entre os betões com diferentes percentagens de SP, o incremento de resistência entre as taxas de 0,5 e 2% de SP (10,3%) foi inferior ao aumento entre 0 e 0,5% (26,7%). Além disto, e contrariamente ao esperado, o betão B100SP1.5 obteve menor resistência do que o B100SP0.5, após 28 dias de cura. Perante estes factos, conclui-se que não existe uma lei clara de variação da resistência à compressão com a percentagem de SP.

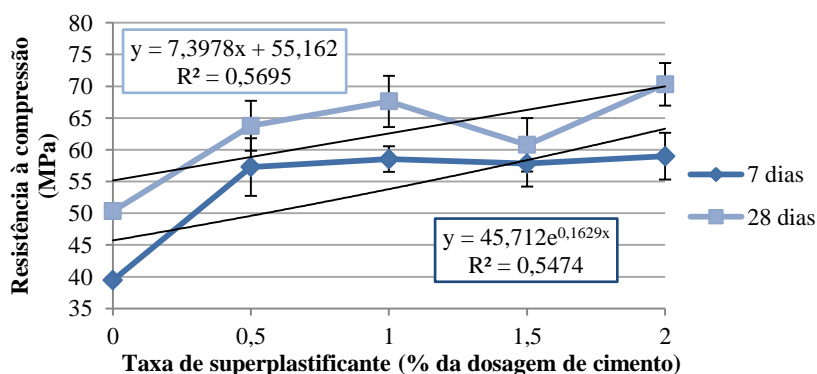


Figura 4.17 - Variação da resistência à compressão com a percentagem de SP: 2ª fase experimental

Através destes resultados, foi possível definir os betões que foram alvo de análise na terceira e quarta fases da campanha experimental (relembre-se que já se encontravam definidas duas composições: BR e B100). Foram definidas as composições B25, correspondente a um betão com 25% de incorporação de AGRB, e B100SP1.0, a qual corresponde a um betão com 100% de AGRB e 1% de SP.

A primeira composição referida, apesar de não ter sido analisada na segunda fase experimental, foi definida tendo por base a especificação LNEC E 471 (2009). A taxa de 25% é definida nesta especificação como a proporção limite para aplicação em betão armado, no caso de agregados com mais de 90% de betão antigo ou de AP sua constituição. Dada a inexistência de influência por parte dos AGRB utilizados neste estudo na resistência à compressão, optou-se por analisar, além da composição B100 (a qual serve para verificar até que ponto os AGR têm influência nas várias propriedades do betão), uma composição de betão que possuísse o máximo teor deste tipo de agregados permitido na referida especificação.

A percentagem de SP escolhida foi a comumente utilizada em betões. Como não se encontrou influência significativa da introdução de várias percentagens de SP (relações a/c semelhantes, como constatado no subcapítulo 4.3.1) e não existiu um incremento considerável na resistência à compressão entre as mesmas, optou-se por utilizar a taxa usual de SP nos ensaios seguintes da campanha experimental. Além disso, para os 28 dias de cura, o patamar de resistência é atingido para a taxa de 1%, visto existir apenas um aumento da resistência à compressão de 4% entre esta taxa e 2% de SP (e a percentagem de 1,5% apresentou uma resistência inferior).

Na Tabela 4.15, pode-se conferir os resultados alcançados na terceira fase experimental. Nesta fase, as resistências do BR, B25 (comparativamente ao B20 e ao B30, uma vez que a composição B25 não foi analisada na fase anterior) e B100 foram menores e a do B100SP1.0 foi superior, relativamente à fase anterior (Tabela 4.16). Os menores valores obtidos nos três primeiros betões mencionados podem ser justificadas pela maior relação a/c (0,54 ao invés da relação de 0,52 utilizada na segunda fase) e pelo facto de os AGRB não terem sido peneirados. A maior resistência à compressão registada no B100SP1.0 deve-se fundamentalmente ao decréscimo, ainda que de forma não acentuada, da relação a/c (de 0,41 para 0,40). Além destes factores, existem aspectos referentes ao processo de fabrico do betão que não são controláveis: aleatoriedade do processo de mistura dos materiais durante a amassadura (volume betonado diferente da segunda para a terceira fase experimental) e humidade relativa do ar (amassaduras ocorreram em diferentes alturas do ano). Deste modo, as classes de resistência à compressão dos betões nesta fase são as seguintes: C30/37, para o BR, B25 e B100, e C50/60, para o B100SP1.0.

Tabela 4.15 - Resultados obtidos no ensaio resistência à compressão: 3ª fase da campanha experimental

Betão	$f_{cm\ 7}$ (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)	$f_{cm\ 28}$ (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)	$f_{cm\ 56}$ (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	39,2	-	-	43,1	-	-	50,7	-	-
B25	38,1	-2,7	-	44,6	3,5	-	50,0	-1,3	-
B100	37,5	-4,2	-	46,4	7,7	-	48,4	-4,6	-
B100SP1.0	60,5	54,6	61,4	71,2	65,3	53,6	71,0	40,1	49,2

Tabela 4.16 - Variação da resistência à compressão entre a 2ª e a 3ª fase experimental

Betão	$D_{3^a\ fase / 2^a\ fase}$	
	7 dias	28 dias
BR	-0,7	-10,2
B25 (B20)	0,1	-6,5
B25 (B30)	-11,8	-12,3
B100	-5,9	-7,8
B100SP1.0	7,4	5,3

Uma vez mais, não se obteve uma tendência clara da influência da incorporação de AGRB no betão. Como se verifica na Figura 4.18, aos 7 e 56 dias de idade, existiu uma redução da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGP por AGR, enquanto aos 28 dias ocorreu um aumento da mesma. A variação das tensões de rotura entre os betões foi reduzida, sendo a variação máxima de 7,7% em relação ao betão convencional. Além disso, quando se verificou a tendência decrescente desta propriedade com os AGRB, a diminuição máxima observada foi de apenas 4,6%.

Como se pode observar na Figura 4.19, existe uma proximidade entre os valores obtidos no presente estudo (aos 28 dias de cura do betão) e os da campanha de Malesev *et al.* (2010). Analisando o conjunto das investigações, sem se considerar os betões com adjuvante, não se consegue estabelecer uma relação entre a resistência à compressão e a

taxa de incorporação de AGRB, sendo o coeficiente de correlação praticamente nulo. Tal pode ser justificado pelas diferenças nas composições dos betões, bem como nos materiais, em cada uma das investigações e pela qualidade dos agregados utilizados. A influência destes factores foi verificada na campanha experimental de Tabsh e Abdelfatah (2009), que analisaram duas composições de BAR com agregados provenientes de betões com diferentes resistências. A variação dos resultados face ao BR encontra-se no intervalo de -15,6% (campanha de Gonçalves *et al.*, 2004) a +7,7% (presente estudo).

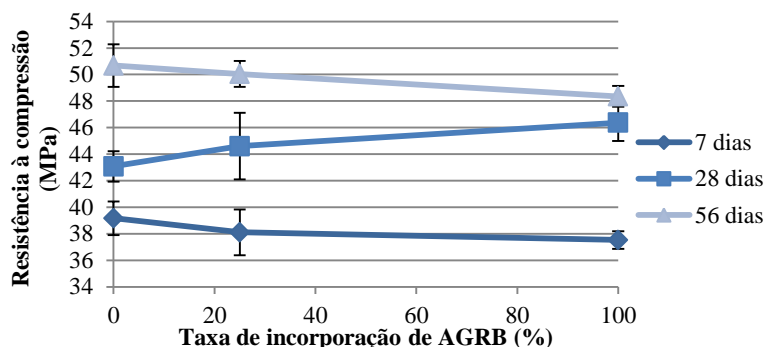


Figura 4.18 - Variação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB: 3ª fase experimental

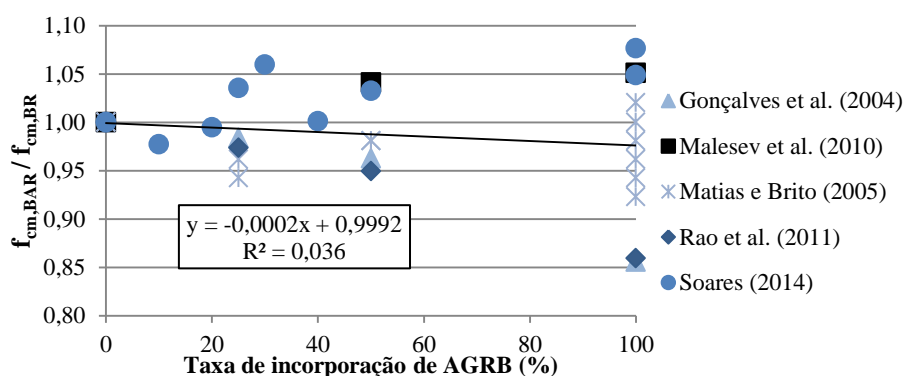


Figura 4.19 - Relação da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

A análise gráfica da evolução da resistência à compressão ao longo do tempo (vários períodos de cura: 7, 28 e 56 dias) é apresentada na Figura 4.20. Pode-se, de um modo geral, agrupar as evoluções (observando o andamento das curvas de resistência) em dois grupos: BR/B25, B100/B100SP1.0. Os dois primeiros betões referidos registam um aumento da resistência após 28 dias de cura (incrementos de 12,2 e 17,7%, respectivamente para o B25 e BR), e o andamento das curvas sugere que a hidratação do cimento tenha sido mais lenta do que no B100 e B100SP1.0, pelo que o valor da resistência aos 56 dias poderá não corresponder a uma resistência próxima da final. Em relação aos betões B100 e B100SP1.0, os mesmos registaram uma estabilização da resistência entre os 28 e 56 dias, notando-se um aumento de 4,3% para o B100 e uma mesma resistência do B100SP1.0 (a variação de 0,2 MPa pode-se considerar desprezável). Estes resultados estão de acordo com os de Rao *et al.* (2010), que registaram a mesma resistência, entre 28 e 90 dias, para os betões com 50 e 100% de AGRB, e aumentos de 8 e 12%, para um betão com uma taxa de substituição de 25% e um betão convencional, respectivamente.

Tal como na fase experimental anterior, a utilização de SP aumentou consideravelmente a resistência do betão. Consta-se que a incorporação do SP resultou numa melhoria de desempenho de 61,4% aos 7 dias, face ao B100, sendo a sua eficácia reduzida em idades posteriores, já que se observam melhorias de 53,6 e 49,2%, aos 28 e 56 dias, respectivamente. Estes resultados confirmam o referido, isto é, o SP possui um efeito acelerador de presa, resultando, assim, numa influência superior nos primeiros dias de cura do betão. Tal pode ser confirmado na Figura 4.21.

Por fim, com o intuito de confirmar a influência que a relação a/c possui na resistência à compressão dos betões, estabeleceu-se uma relação entre as duas propriedades (Figura 4.22). Obteve-se um coeficiente de correlação excelente ($R^2 = 0,973$), confirmando-se que existe uma estreita relação entre os parâmetros, sendo que, quanto

maior for a relação a/c efectiva do betão, menor será a sua capacidade resistente.

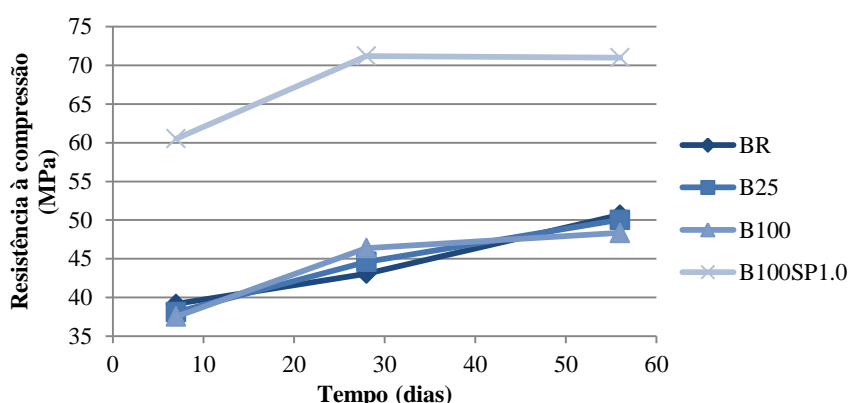


Figura 4.20 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo

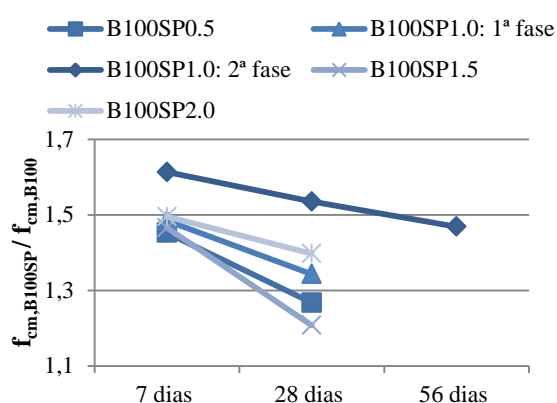


Figura 4.21 - Evolução da resistência à compressão nos betões com SP

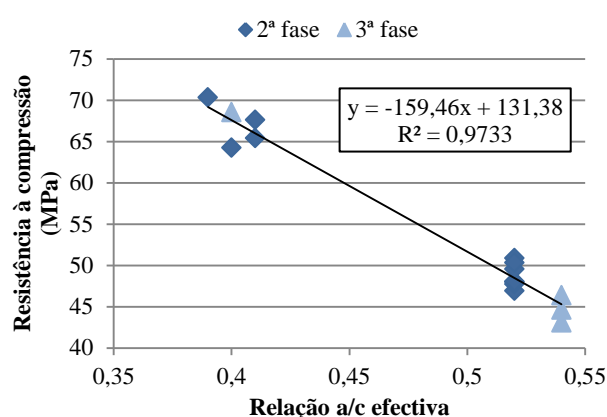


Figura 4.22 - Relação da resistência à compressão aos 28 dias com a relação a/c efectiva

4.4.2. Resistência à tracção (por compressão diametral)

A determinação da resistência à tracção por compressão diametral teve por base os procedimentos da norma NP EN 12390-6 (2011). O ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 28 dias de cura do betão. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo L.

Os valores resultantes deste ensaio estão presentes na Tabela 4.17. Existiu alguma variabilidade nos valores obtidos, principalmente no BR e no B100SP1.0, a qual é relativamente recorrente neste tipo de ensaio (Brito e Robles, 2010), tendo-se desprezado um provete do BR por apresentar um valor bastante superior aos outros dois provetes ensaiados.

Tabela 4.17 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Betão	Resistência à tracção (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	3,1	-	-
B25	2,9	-4,2	-
B100	3,1	0,0	-
B100SP1.0	4,3	39,0	39,1

Verifica-se que o betão B100SP1.0 foi o que obteve o maior valor e o B25 o que registou o valor mais reduzido. Os resultados obtidos (entre 2,9 e 4,3 MPa) encontram-se dentro da gama de valores registada nos vários estudos analisados relativos a este tipo de agregados (entre 2,0 e 4,2 MPa). Além disso, estão de acordo com o preconizado no Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), pelo que se considera que o ensaio é válido. Neste regulamento, são mencionados os valores de 3,2, 3,5 e 4,4 MPa para a resistência à tracção, correspondentes a valores de resistência à compressão de 43, 48 e 68 MPa, respectivamente. Os betões BR, B25 e B100 registaram valores médios de resistência entre 43,1 e 46,4 MPa, verificando-se, assim, que as resistências à tracção são semelhantes às referidas

no Eurocódigo 2. A mesma conclusão é alcançada para o B100SP1.0 ($f_{cm} = 71,2$ MPa).

Ambos os betões com AGRB (sem SP) registaram valores de resistência à tracção semelhantes à do betão convencional, pelo que não se obteve nenhuma tendência desta propriedade com o aumento da taxa de substituição de AGP por AGRB (Figura 4.23). Para o betão com 100% de AGRB obteve-se a mesma tensão de rotura à tracção do que para o BR e o betão com uma taxa de substituição 25% registou um valor cerca de 4% inferior ao deste último. Esta redução encontra-se bastante aquém da obtida por algumas investigações analisadas, como é o caso de Matias e Brito (2005) e Rao *et al.* (2011), nas quais os BAGRB tiveram uma resistência 16 e 24% inferior à do BR, respectivamente. Esta redução não acentuada e a não linearidade obtida (em função da taxa de substituição) podem ser justificadas pela melhor ligação entre os agregados e a pasta cimentícia no caso dos BAGRB, como consequência da maior rugosidade e porosidade dos seus agregados (como referido no caso da resistência à compressão). Malesev *et al.* (2010) referem que a resistência à tracção é afectada, principalmente, pela qualidade dos ARB e não pela quantidade dos mesmos presente nos betões, o que se enquadra nos resultados do presente estudo. Deste modo, conclui-se que os AGRB utilizados neste estudo, os quais são de boa qualidade, não possuem influência nesta propriedade.

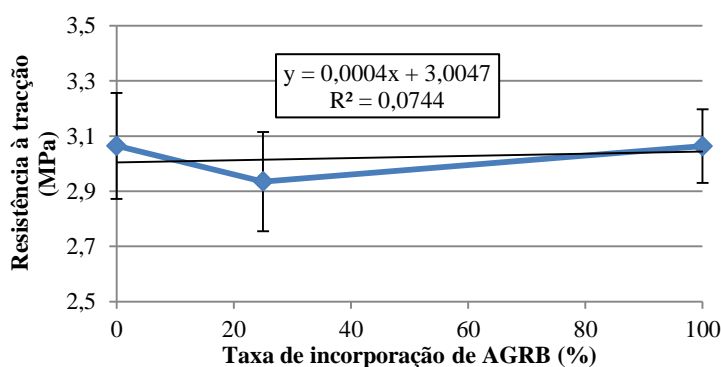


Figura 4.23 - Relação da resistência à tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AGRB

Analisando as demais investigações presentes no levantamento bibliográfico (Figura 4.24), constata-se que, tal como na resistência à compressão, não existe uma tendência capaz de definir a influência dos AGRB ao nível desta propriedade. Existe uma considerável dispersão dos resultados entre os vários estudos, existindo valores da resistência à tracção dos BAGRB tanto superiores como inferiores à do seu homólogo natural. Os factores referidos no subcapítulo anterior que podem ter influência nos valores da resistência à compressão aplicam-se também às tensões de rotura à tracção, conforme verificado por Tabsh e Abdelfatah (2009). No caso das investigações de Malesev *et al.* (2010) e Etxeberria *et al.* (2007), em que os BAR tiveram resistências à compressão semelhantes ou superiores à do BR, a resistência à tracção foi superior nos BAGRB. Por sua vez, Rao *et al.* (2011) obtiveram resistências à compressão e à tracção inferiores nos BAGRB.

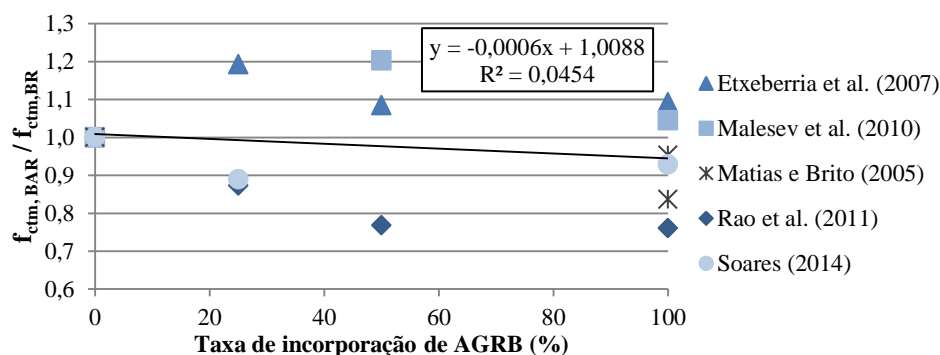


Figura 4.24 - Relação da resistência à tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Com a introdução de SP no betão, conseguiu-se obter um incremento na resistência à tracção, sendo o aumento de aproximadamente 39%. Conclui-se, assim, que a utilização de um SP é benéfica para esta propriedade, resultando num aumento considerável da mesma e numa compensação mais do que integral do efeito dos AGRB. Verifica-se,

no entanto, que este acréscimo ficou aquém do obtido na resistência à compressão.

4.4.3. Módulo de elasticidade

O cálculo do módulo de elasticidade dos vários betões foi efectuado segundo a especificação LNEC E-397 (1993). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 28 dias de cura do betão.

A Tabela 4.18 apresenta os resultados deste ensaio. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo M. Os valores obtidos encontram-se dentro dos preconizados pelo Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), sendo por isso válidos os resultados obtidos. Esta regulamentação sugere os seguintes valores para o módulo de elasticidade: 34, 35 e 39 GPa correspondentes a valores de resistência média à compressão de 43, 48 e 68 MPa, respectivamente. Os betões BR, B25 e B100 registaram valores médios de resistência entre 43,1 e 46,4 MPa, verificando-se, assim, que os seus módulos de elasticidade são semelhantes aos referidos no Eurocódigo 2. A mesma conclusão é alcançada para o B100SP1.0 ($f_{cm} = 71,2$ MPa).

Tabela 4.18 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade

Betão	Módulo de elasticidade (GPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	36,2	-	-
B25	34,1	-5,9	-
B100	32,1	-11,3	-
B100SP1.0	39,5	9,2	23,0

Como esperado, o módulo de elasticidade foi inferior nos BAR, sendo proporcional à taxa de substituição de AGP por AGRB. Foi registada uma redução máxima de aproximadamente 11% nesta propriedade, correspondente à total substituição dos agregados. A capacidade dos agregados de resistir a deformações é controlada pela sua rigidez, a qual é influenciada pela porosidade. Deste modo, os AR apresentam níveis de deformabilidade superiores aos dos AP, como consequência da elevada porosidade da pasta de cimento. Uma vez que o módulo de elasticidade do betão depende das deformações dos seus constituintes, é natural que o mesmo seja inferior nos BAGRB face ao BR (Brito, 2005; Hansen, 1992). De facto, constata-se que existe uma relação praticamente linear ($R^2 = 0,91$) entre estas duas variáveis (Figura 4.25).

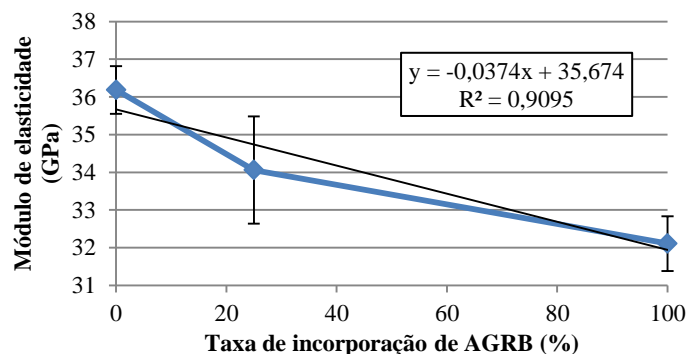


Figura 4.25 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB

Na Figura 4.26, são apresentados os resultados obtidos nas demais investigações analisadas, para o ensaio de módulo de elasticidade. A correlação obtida ($R^2 = 0,312$, considerado um coeficiente insatisfatório) mostra que os resultados dos diversos estudos são díspares. Foi possível incrementar esta correlação para 0,676 (correlação razoável) com a exclusão dos resultados de Rao *et al.* (2010), visto serem bastantes distintos dos das restantes investigações. Apesar de as relações obtidas não serem excelentes, é patente uma tendência decrescente do módulo de elasticidade com o teor de AGRB em todos os estudos. Além disso, não existiu nenhum BAGRB com módulo de elasticidade superior ao do seu homólogo natural, independentemente da taxa de incorporação utilizada.

O decréscimo de desempenho neste estudo foi inferior a praticamente todas as campanhas experimentais analisadas (à exceção de Levy (2001); no entanto, o autor utilizou maiores quantidades de cimento para obter a mesma resistência entre os betões), que se fixaram entre 14 e 34%, confirmando a boa qualidade dos AGR provenientes de

elementos de betão pré-fabricados (como tinha sido constatado nos ensaios aos agregados).

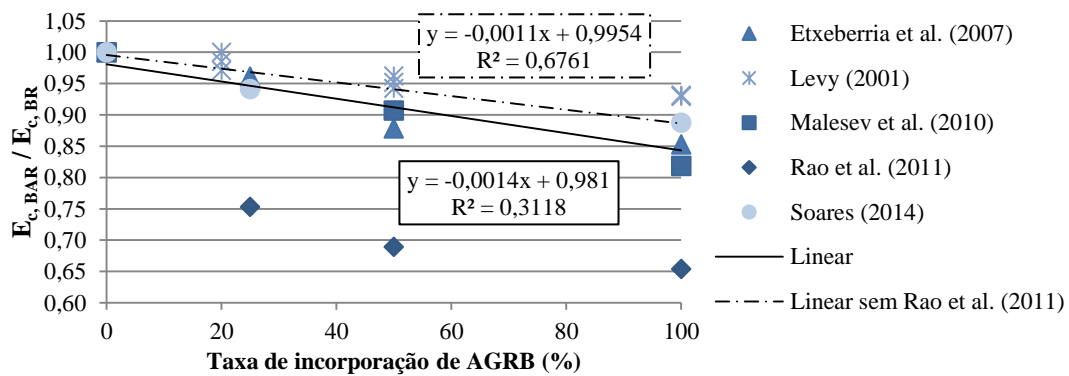


Figura 4.26 - Relação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Relativamente ao betão com 100% de AGR e SP, o mesmo possui um módulo de elasticidade superior aos demais betões analisados. Deste modo, consegue-se mais do que compensar a perda de desempenho desta propriedade nos BAGRB com a utilização de um SP no fabrico do betão. Os incrementos originados foram de 9,2 e 23,0% face ao BR e ao B100, respectivamente. Estes aumentos ficaram aquém dos alcançados nas resistências à compressão e tracção, o que provavelmente se justifica pela maior influência dos AGRB nesta propriedade.

Pereira (2010), baseado em Coutinho (1988), sugere uma estreita relação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica do betão, pelo que no presente estudo se procedeu à análise de tal relação, como é possível verificar na Figura 4.27. A excelente correlação ($R^2 = 0,915$) obtida confirma a forte relação entre as propriedades referidas.

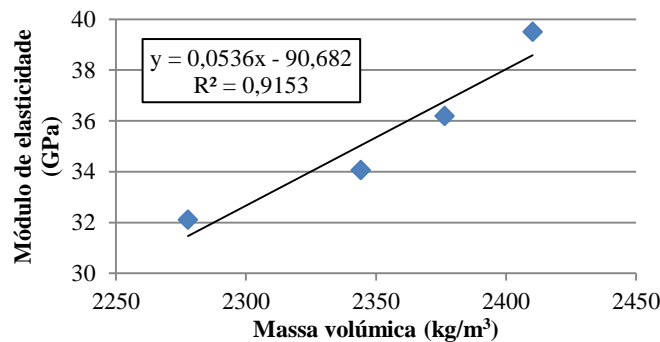


Figura 4.27 - Relação do módulo de elasticidade com a massa volúmica

4.4.4. Velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons foi realizado de acordo com a metodologia preconizada na norma NP EN 12504-4 (2007). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 28 dias de cura do betão.

Obteve-se, para o ensaio de determinação da velocidade de ultra-sons, os resultados presentes na Tabela 4.19. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo N.

Tabela 4.19 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Betão	Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	4,71	-	-
B25	4,65	-1,4	-
B100	4,42	-6,2	-
B100SP1.0	4,70	-0,3	6,2

Como a velocidade de propagação de ultra-sons é uma medida indirecta da porosidade de um betão, era expectável que fossem obtidas menores velocidades nos BAR do que no BR, como consequência da maior porosidade da pasta de cimento aderida aos AR face aos AP. Por análise dos resultados, este facto foi verificado, sendo a redução máxima na ordem de 6% para um betão com substituição integral de AGP por AGRB. Esta diminuição de

velocidade está de acordo com a obtida por Kou *et al.* (2012), que se fixou em cerca de 8%. Como se constata pela Figura 4.28, foi obtida uma forte relação, com um coeficiente de correlação praticamente igual a 1, entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a taxa de incorporação de AGRB.

A diminuição desta propriedade com a taxa de substituição de AGP por AGRB, obtida neste estudo, vai ao encontro do verificado na investigação de Rao *et al.* (2011), notando-se uma correlação evidente ($R^2 = 0,88$). Este facto é evidente na Figura 4.29.

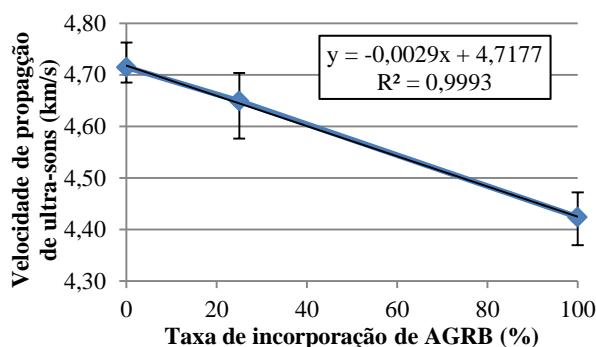


Figura 4.28 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB

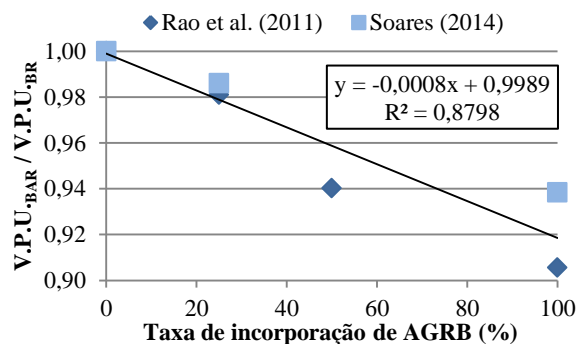


Figura 4.29 - Relação da velocidade de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

A adição de um SP à mistura de betão produziu, como esperado, uma diminuição do efeito dos AR, conseguindo-se compensar praticamente a perda de velocidade face ao BR. Por outras palavras, obteve-se uma velocidade de propagação de ultra-sons idêntica entre o B100SP1.0 e o betão composto exclusivamente por AP. Este fenómeno deve-se, essencialmente, ao poder redutor de água por parte do SP. Com a redução da relação a/c , o volume das partículas sólidas do betão aumenta e, conseqüentemente, o índice de vazios do betão diminui. Conclui-se, assim, que a redução do índice de vazios compensou a maior porosidade dos BAGRB. Porém, o incremento desta propriedade (6,2%) ficou bastante aquém do aumento ocorrido nas propriedades analisadas anteriormente (entre 23,0%, para o módulo de elasticidade, e 53,6%, para a resistência à compressão). O aumento da velocidade de ultra-sons com o decréscimo da relação a/c é confirmado pelo estudo de Ravindrajah *et al.* (1988).

Como se sabe, esta propriedade pode ser correlacionada com a resistência à compressão e com o módulo de elasticidade do betão. No entanto, não foi alcançada qualquer tipo de relação com a resistência. Tal justifica-se pela resistência à compressão semelhante entre os BAR e o BR, ao invés do sucedido na propriedade em análise neste subcapítulo. Relativamente ao módulo de elasticidade, foi obtido um bom coeficiente de correlação ($R^2 = 0,894$), para os betões sem SP (o resultado do B100SP1.0 não foi considerado uma vez que apresentou incrementos distintos nas propriedades em questão), como é possível verificar na Figura 4.30.

Rao *et al.* (2011) relacionou ainda esta propriedade com a massa volúmica dos betões, tendo obtido um coeficiente de correlação de 0,90. Através dos resultados deste estudo, obteve-se semelhante conclusão ($R^2 = 0,868$), como se observa na Figura 4.31. Se não se considerar o betão com SP nesta análise (ponto escuro na figura), por apresentar uma relação a/c distinta dos restantes e, conseqüentemente, uma composição diferente, a referida relação é melhorada ($R^2 = 0,988$).

4.4.5. Resistência à abrasão

A determinação da resistência à abrasão teve por base as especificações da norma DIN 52108 (2007). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 91 dias de cura do betão.

Os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 4.20, estando os valores correspondentes a cada provete e os cálculos auxiliares no Anexo O.

Na Figura 4.32, apresenta-se a regressão linear da resistência à abrasão com a taxa de substituição de AGP por AGRB, tendo-se obtido um coeficiente de correlação considerado insatisfatório ($R^2 = 0,404$).

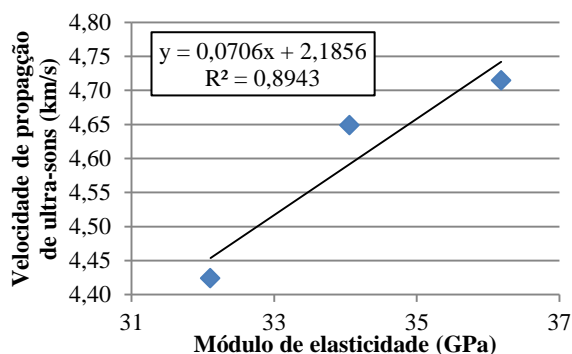


Figura 4.30 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com o módulo de elasticidade

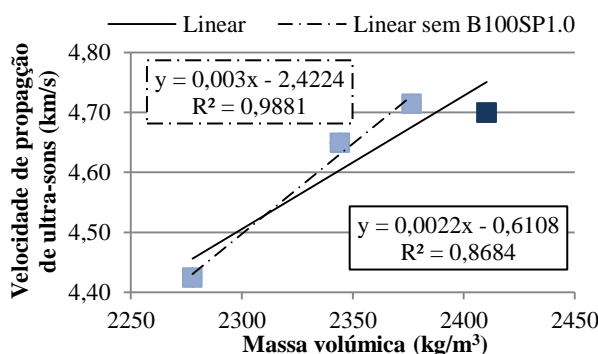


Figura 4.31 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a massa volúmica

Tabela 4.20 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão

Betão	Desgaste por abrasão (mm)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	4,21	-	-
B25	3,94	-6,5	-
B100	3,96	-5,9	-
B100SP1.0	3,30	-21,6	-16,6

Analisando os resultados obtidos, é visível que a resistência à abrasão aumenta com a incorporação de AGRB no betão. Por outras palavras, obteve-se menores valores de desgaste nos BAGRB, comparativamente a um betão homólogo constituído por AP. Neste tipo de betões, a perda de espessura foi inferior em aproximadamente 6% ao valor obtido pelo BR. Porém, não é de todo possível estabelecer uma boa correlação entre estas duas variáveis, em face do baixo coeficiente de correlação obtido. Esta ocorrência pode ser justificada pela maior aderência da pasta cimentícia aos AR, devido à sua maior rugosidade e porosidade, tal como referido por Leite (2001) e Poon *et al.* (2004). Sendo a pasta de cimento mais propícia a sofrer desgaste do que os AP, é natural que os betões que apresentem melhor ligação entre a mesma e os agregados possuam menor desgaste por abrasão.

Contudo, os BAGRB apresentam uma maior dispersão dos seus valores (desvio padrão de 0,65 e 0,36 mm para o B25 e B100, respectivamente) do que o BR (desvio padrão de 0,07 mm). Constata-se que, na investigação de Fonseca (2009), os resultados BAGRB também apresentaram maior dispersão. Deste modo, pode ser recorrente neste ensaio em específico uma maior incerteza nos valores correspondentes aos BAR, dado que os provetes são obtidos por serragem e, assim, a superfície de ensaio dos mesmos poderá conter mais AGP ou mais AGR.

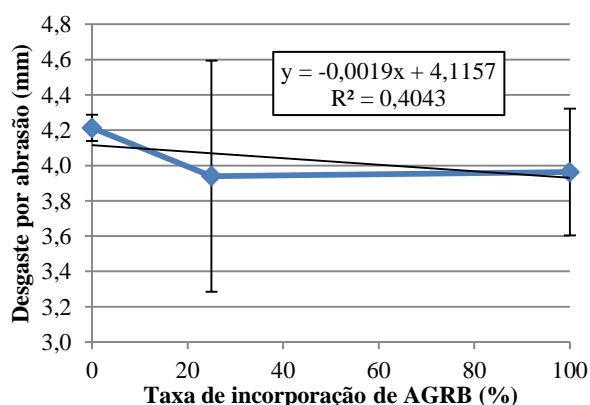


Figura 4.32 - Relação da resistência à abrasão com a taxa de substituição de AGRB

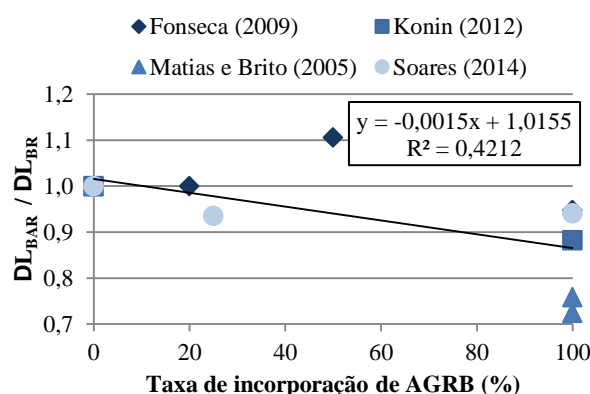


Figura 4.33 - Relação da resistência à abrasão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Estes resultados vão ao encontro de investigações anteriores, as quais sugerem que existe um melhor desempenho dos BAGRB relativamente a esta propriedade, embora não seja possível obter uma boa relação entre o desgaste por abrasão e a taxa de incorporação de AGRB ($R^2 = 0,421$). Este facto é visível na Figura 4.33.

Visto os BAGRB apresentarem melhor desempenho nesta propriedade comparativamente a um betão composto apenas por AP, a utilização de um SP no fabrico dos mesmos não possui relevância para o desgaste por abrasão. O

betão B100SP1.0 registou reduções de 21,6 e 16,6%, respectivamente face ao BR e ao B100, incrementando, ainda mais, o bom desempenho dos BAGRB face a esta propriedade.

4.5. Ensaios de durabilidade ao betão no estado endurecido

No presente subcapítulo, são expostos os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado endurecido, no que diz respeito ao seu desempenho em termos de durabilidade: retracção, absorção de água por imersão e por capilaridade, resistência à carbonatação e resistência à penetração dos cloretos. Efectuou-se uma análise aos mesmos, bem como uma comparação com as investigações presentes no levantamento bibliográfico realizado. Os ensaios foram realizados ao longo de vários períodos de cura, previamente estabelecidos.

4.5.1. Retraccção

O ensaio de retracção foi realizado de acordo com a metodologia proposta na especificação LNEC E 398 (1993). O ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, entre o instante imediatamente a seguir à desmoldagem dos provetes e 90 ± 1 dias de idade. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo P.

Os resultados relativos a este ensaio encontram-se expostos na Figura 4.34. Como esperado, uma vez que o ensaio foi realizado numa sala de condições controladas (temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$), as deformações por retracção aumentaram ao longo do tempo para todos os betões.

Como se observa na Figura 4.35, o aumento da deformação não seguiu uma tendência linear, o que é justificado pelo desenvolvimento mais elevado do fenómeno de retracção nas primeiras idades do betão, estagnando para períodos mais avançados. Deste modo, o melhor ajustamento aos valores da retracção ao longo do tempo foi conseguido através de regressões logarítmicas, verificando-se excelentes coeficientes de correlação (acima de 0,95).

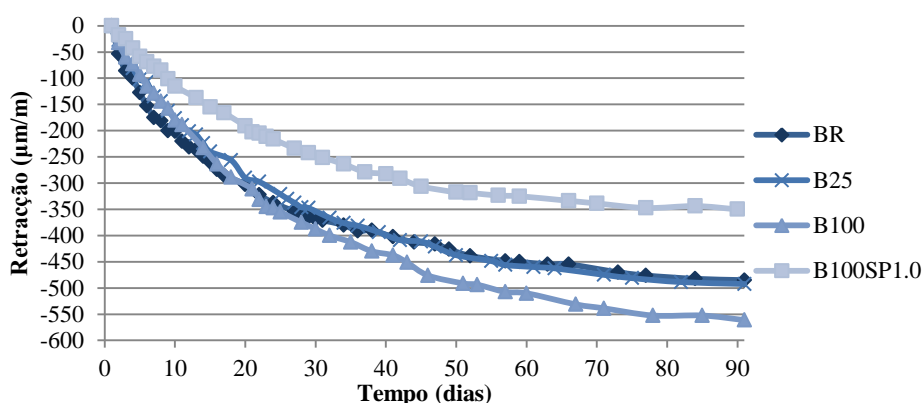


Figura 4.34 - Deformação devido a retracção ao longo do tempo

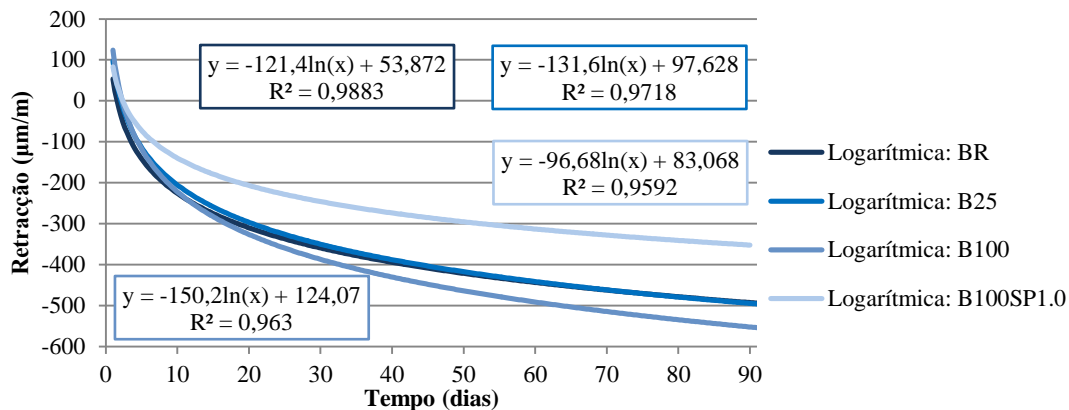


Figura 4.35 - Regressões logarítmicas da deformação devido a retracção ao longo do tempo

Relativamente à incorporação de AGRB, verifica-se que a mesma teve um efeito prejudicial no desempenho do betão.

Foram observados, aos 91 dias, aumentos de retracção de 1,5 e 15,7% face ao BR, para taxas de substituição de 25 e 100%, respectivamente. Tal pode ser justificado por dois factores: menor rigidez (como constatado pelo módulo de elasticidade dos betões) e maior quantidade de água dos BAGRB. No que diz respeito ao primeiro factor, a menor rigidez dos AGRB comparativamente aos AP, conferida pela pasta de cimento aderida aos mesmos, traduz-se numa menor rigidez dos betões produzidos com este tipo de agregados, conduzindo a uma diminuição da restrição às deformações. Por outro lado, a água adicionada na amassadura para compensar a absorção dos AR traduz-se numa maior quantidade de água disponível para evaporação nos BAR, resultando num aumento das deformações.

A Figura 4.36 confirma a influência dos AGRB nesta propriedade, tendo-se obtido uma relação praticamente linear entre as duas variáveis com um excelente coeficiente de correlação ($R^2 = 0,977$).

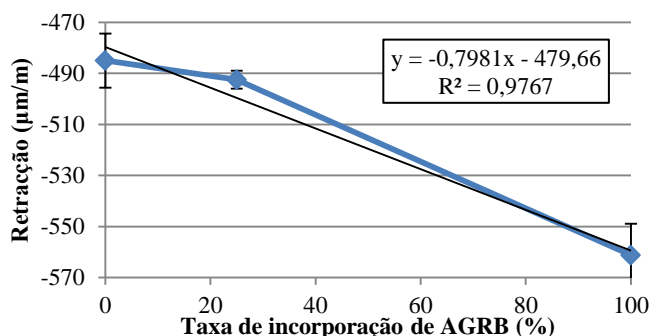


Figura 4.36 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB (aos 91 dias)

Estes resultados são condizentes com as demais investigações analisadas (Figura 4.37), as quais sugerem que existe uma diminuição de desempenho dos BAGRB relativamente a esta propriedade, embora não seja possível obter uma boa relação entre a mesma e a taxa de incorporação de AGRB ($R^2 = 0,434$). Esta correlação pode ser incrementada, resultando num coeficiente de 0,628, caso se despreze um dos valores do estudo de Matias e Brito (2005), assinalado a vermelho na referida figura, visto encontrar-se bastante distante da gama de valores registada nas outras investigações. Apesar de a correlação entre estas duas variáveis não ser excelente, praticamente todos os BAGRB possuíram deformações de retracções mais elevadas face a um betão convencional, confirmando-se, assim, a clara influência dos AGR na retracção do betão.

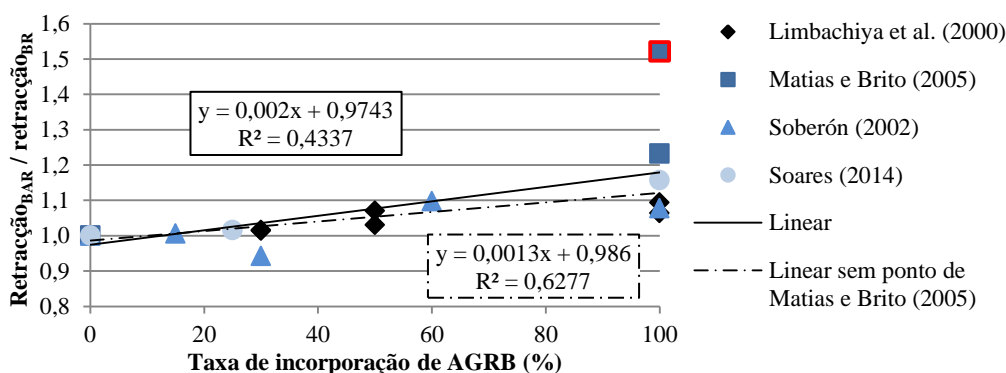


Figura 4.37 - Relação da retracção com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

São apresentados, na Tabela 4.21, elementos que permitem a avaliação da influência da incorporação de AGRB na retracção em diferentes idades do betão. Os períodos considerados correspondem a 7 e 91 dias. O primeiro permite estudar a referida influência em idades jovens, enquanto o período de 91 dias que corresponde à duração total do ensaio.

Por análise destes elementos, é possível concluir que os AGRB têm uma influência diferente consoante a idade do betão. Nos primeiros dias de idade, foram registadas deformações de retracção inferiores nos BAGRB, contrariando o aumento da retracção constatado para os 91 dias. As reduções obtidas aos 7 dias foram de 22,9 e 26,4%, respectivamente para o betão com 25 e 100% de AGR. Este fenómeno é explicado pelo processo de cura interna desencadeado pelos AGRB, no qual a água existente no interior destes agregados (absorvida durante a amassadura)

compensa a água que se liberta do betão por evaporação. Deste modo, enquanto existir água disponível nos AR, as variações dimensionais são mais reduzidas. Este facto é, também, visível na Figura 4.34, onde se verifica que as deformações de retracção no B100 são superiores às do BR só a partir dos 20 dias de idade. Semelhante conclusão foi obtida por Cartuxo (2013) para BAFRB.

Tabela 4.21 - Resultados obtidos no ensaio de retracção aos 7 e 91 dias

Betão	7 dias			91 dias		
	Retracção (µm/m)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Retracção (µm/m)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	-175,0	-	-	-485,0	-	-
B25	-135,0	-22,9	-	-492,5	1,5	-
B100	-128,8	-26,4	-	-561,3	15,7	-
B100SP1.0	-77,5	-55,7	-39,8	-350,0	-27,8	-37,6

Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), os SP influenciam as deformações de retracção caso sejam utilizados para aumentar a trabalhabilidade, provocando um aumento das mesmas, ou para obter resistências mais elevadas, resultando numa diminuição da retracção. Visto que a utilização do SP neste estudo corresponde ao segundo caso, eram expectáveis deformações de retracção inferiores às de um betão análogo sem SP (visto existir menos quantidade de água disponível para evaporação). Este facto foi verificado pelos resultados obtidos, onde se registaram diminuições da retracção de 27,8 e 37,6% relativamente ao BR e ao B100, respectivamente. Deste modo, confirma-se o efeito benéfico da utilização de SP, quando utilizados como redutores da relação a/c.

Como a retracção e o módulo de elasticidade são propriedades dependentes da rigidez dos agregados, é expectável que exista uma correlação entre ambas. Este facto é corroborado pelo excelente coeficiente de correlação obtido ($R^2 = 0,935$), como é possível verificar na Figura 4.38.

Por fim, apresenta-se, na Figura 4.39, a correlação obtida entre a massa volúmica e as deformações por retracção dos vários betões. O coeficiente obtido de 0,822 é indicador de que existe uma boa relação entre as duas propriedades, como anteriormente constatado em algumas propriedades mecânicas (como o módulo de elasticidade e velocidade de ultra-sons).

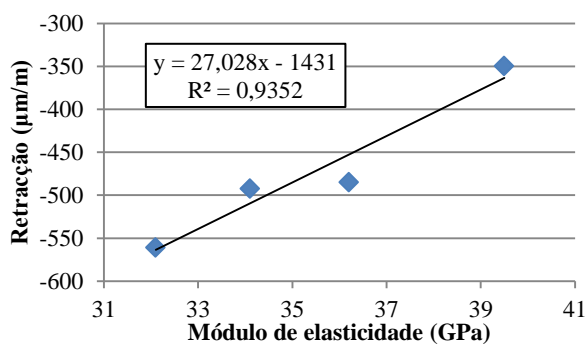


Figura 4.38 - Relação da retracção com o módulo de elasticidade

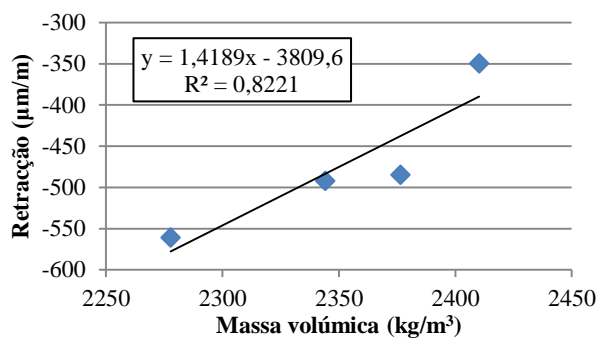


Figura 4.39 - Relação da retracção com a massa volúmica

4.5.2. Absorção de água por imersão

O cálculo da absorção de água por imersão dos vários betões foi efectuado segundo a especificação LNEC E 394 (1993). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 28 dias de cura do betão.

A Tabela 4.22 apresenta os resultados deste ensaio, podendo ser consultados os valores de cada provete e os cálculos auxiliares no Anexo Q. Verifica-se que a substituição de AGP por AGRB aumenta a absorção de água por imersão e que a utilização de SP no betão com 100% de AGRB teve um efeito benéfico nesta propriedade.

O ensaio de absorção de água permite avaliar a porosidade aberta dos betões. Estes poros ou vazios são originados, principalmente, pelo ar que surge aquando da mistura dos materiais e fica retido no interior do betão, pelo excesso de água empregue na amassadura (para além da necessária para a correcta hidratação do cimento) que permanece livre e ao sair por evaporação deixa vazios no seu lugar e pela estrutura porosa dos agregados (Coutinho e

Gonçalves, 1994). Como tal, devido aos dois últimos factores apresentados, era expectável que a absorção de água seja superior nos BAGRB, o que é confirmado pelos resultados obtidos.

Tabela 4.22 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão

Betão	Absorção por imersão (%)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	14,21	-	-
B25	15,51	9,1	-
B100	18,04	26,9	-
B100SP1.0	13,73	-3,4	-23,9

Registaram-se aumentos de absorção de água por imersão de 9,1 e 26,9% para as taxas de substituição de 25 e 100%, respectivamente. Este aumento justifica-se, de acordo com o parágrafo anterior, pela maior quantidade de água presente nos BAR (necessária para manter a trabalhabilidade constante) e elevada capacidade de absorção de água dos AGR. O aumento máximo relativo a esta propriedade encontra-se ligeiramente abaixo do obtido por outros investigadores, os quais obtiveram incrementos entre 29 e 44%.

A Figura 4.40 permite analisar o aumento da absorção de água por imersão com a variação da taxa de substituição dos agregados. O elevado valor do coeficiente de correlação da aproximação linear efectuada ($R^2 = 0,991$) comprova que este aumento se processa de forma aproximadamente linear.

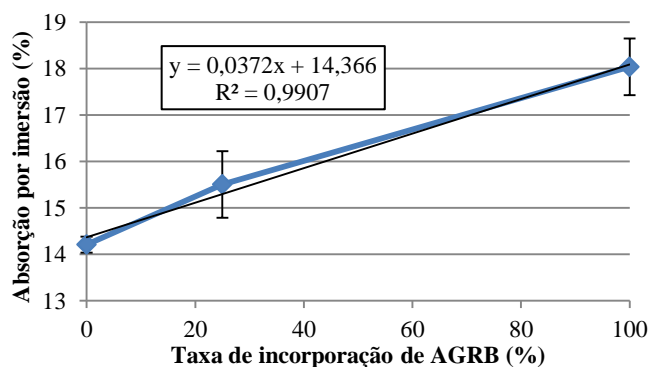


Figura 4.40 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB

Foram comparados os valores registados nas demais investigações (Figura 4.41) com os valores determinados para os betões sem adjuvante. Existe uma correlação boa entre a absorção de água por imersão dos BAR e a taxa de AGRB incorporada ($R^2 = 0,874$). Deste modo, confirma-se a clara influência deste tipo de agregados na propriedade em análise.

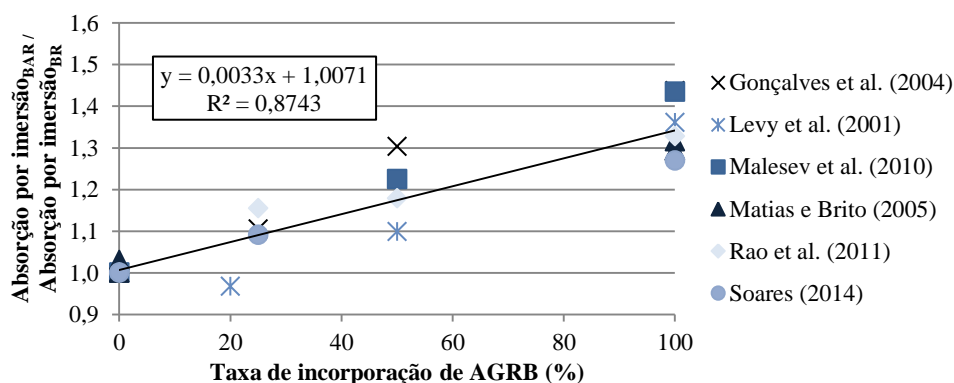


Figura 4.41 - Relação da absorção de água por imersão com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Através da redução da relação a/c, e conseqüente diminuição do índice de vazios, originada pela introdução de SP no betão, conseguiu-se obter uma diminuição da absorção de água. Foram registadas reduções de 3,4 e 23,9% face ao BR e B100, respectivamente. Conclui-se, assim, que a utilização de um SP é benéfico para esta propriedade, resultando numa completa atenuação do efeito dos AGRB.

Por último, apresenta-se, na Figura 4.42, a correlação obtida entre a propriedade em análise neste subcapítulo e a massa volúmica. O excelente coeficiente de correlação obtido ($R^2 = 0,977$) permite concluir que existe uma forte relação entre ambas as propriedades.

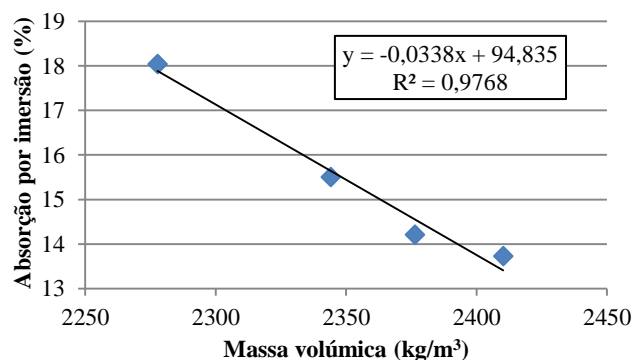


Figura 4.42 - Relação da absorção de água por imersão com a massa volúmica

4.5.3. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade dos vários betões em análise foi determinada consoante o procedimento descrito na especificação LNEC E 393 (1993). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 28 dias de cura húmida seguidos de 14 dias de secagem em estufa ventilada.

Os resultados obtidos neste ensaio são expostos na Tabela 4.23, da qual constam as absorções capilares por período de leitura após o início do ensaio (3, 6, 24 e 72 horas) e as diferenças da absorção capilar às 72 horas em relação ao BR e ao B100. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo R.

Tabela 4.23 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade

Betão	Absorção capilar (g/mm ²)					
	3 horas	6 horas	24 horas	72 horas	D _{BR, 72 h} (%)	D _{B100, 72 h} (%)
BR	1,80E-03	2,33E-03	3,95E-03	5,51E-03	-	-
B25	1,96E-03	2,53E-03	4,37E-03	6,11E-03	10,9	-
B100	2,58E-03	3,31E-03	5,63E-03	7,81E-03	41,8	-
B100SP1.0	1,25E-03	1,62E-03	2,58E-03	3,58E-03	-34,9	-54,1

Na Figura 4.43, apresenta-se a regressão linear da absorção de água por capilaridade com a taxa de substituição de AGP por AGRB, tendo-se obtido um coeficiente de correlação quase perfeito ($R^2 = 0,999$).

Analisando os resultados obtidos, é visível que a absorção capilar aumenta de forma linear com a percentagem de incorporação de AGRB no betão, tal como aconteceu no caso da absorção por imersão. Este incremento deve-se essencialmente aos mesmos factores apresentados no subcapítulo anterior (aumento da quantidade de água para compensar a perda de trabalhabilidade e maior porosidade dos betões com AGR).

Comparando os resultados obtidos no presente estudo com os de outras investigações, obteve-se uma correlação razoável com um coeficiente de 0,638, para uma regressão linear (Figura 4.44). Tal como constatado por Gonçalves *et al.* (2004), a absorção por capilaridade é mais afectada pela qualidade da matriz de cimento do que pelo teor de AGRB, ao contrário da absorção por imersão. De facto, verifica-se que o coeficiente de correlação obtido para a absorção por imersão é superior ao registado nesta propriedade. Deste modo, é possível existir alguma inconsistência dos resultados devido à variabilidade de materiais e composições entre as investigações. Ainda assim, todos os BAGRB registam absorções capilares superiores à do respectivo BR, confirmando o efeito prejudicial dos AGR nesta propriedade.

Na Figura 4.45, são apresentados os coeficientes de absorção capilar, os quais são representativos da evolução da capilaridade ao longo do tempo.

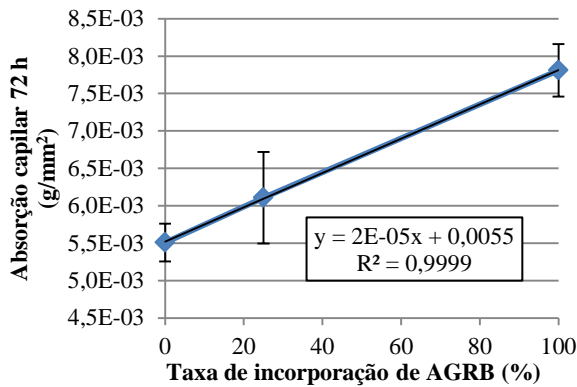


Figura 4.43 - Relação da absorção de água por capilaridade com a taxa de substituição de AGRB

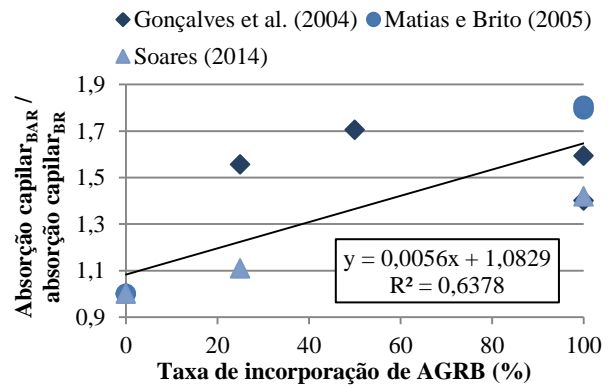


Figura 4.44 - Relação da absorção de água por capilaridade com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

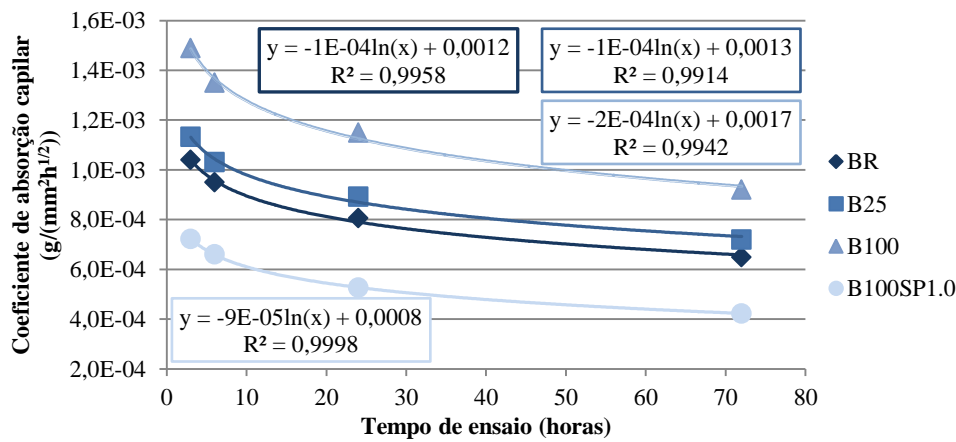


Figura 4.45 - Coeficientes de absorção capilar ao longo do tempo

A regressão logarítmica é a que melhor se ajusta ao andamento dos coeficientes obtidos, apresentando, em todos os betões, excelentes correlações (R^2 praticamente igual a 1). Verifica-se, tal como esperado, que o coeficiente de absorção capilar decresce de forma mais acentuada nas primeiras horas de ensaio, tendendo a estabilizar ao longo do tempo, ou seja, a absorção de água ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas em que os provetes estão em contacto com a água. O andamento semelhante das regressões dos vários betões e os resultados presentes na Tabela 4.24 (percentagens das absorções capilares ao longo do tempo em relação ao valor às 72 horas) são indicadores de que a evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo é idêntica nos BAGRB e no BR, sendo também idêntica no betão com SP. Tal é corroborado pelo estudo de Wirquin *et al.* (2000), reportado por Levy (2001).

Tabela 4.24 - Relações entre as absorções capilares ao longo do tempo com o valor relativo às 72 horas

Betão	$D_{3h/72h}$ (%)	$D_{6h/72h}$ (%)	$D_{24h/72h}$ (%)
BR	32,7	42,2	71,6
B25	32,1	41,3	71,6
B100	33,0	42,3	72,1
B100SP1.0	34,9	45,2	72,1

A adição de um SP à mistura de betão produziu, como esperado, uma diminuição do efeito dos AR, conseguindo-se compensar totalmente a maior absorção capilar dos betões constituídos por este tipo de agregados. Por outras palavras, obteve-se uma absorção de água por capilaridade no B100SP1.0 inferior (cerca de 35%) à do betão composto exclusivamente por AP. Em comparação com o betão análogo mas sem SP (B100), a redução fixou-se em aproximadamente 54%.

Comparando-se as reduções obtidas (35%) com as do ensaio de absorção por imersão (3,4%), verifica-se que são bastante mais acentuadas neste caso. Esta constatação pode ser justificada pelo facto anteriormente referido de a

absorção capilar ser mais influenciada pela qualidade da pasta cimentícia, ao invés da absorção por imersão que é mais afectada pelo teor de AGRB. Deste modo, o aumento de desempenho resultante da redução da relação a/c originada pelo SP (e conseqüente aumento da qualidade da pasta de cimento) tem maior preponderância na absorção por capilaridade.

Ferreira (2000) correlacionou, através de uma regressão logarítmica, a absorção de água por capilaridade com a absorção de água por imersão, obtendo um excelente coeficiente de correlação ($R^2 = 0,937$). Na presente investigação, obteve-se um coeficiente de 0,877, para a aproximação logarítmica realizada (Figura 4.46). Assim, confirma-se que existe uma boa relação entre as duas propriedades, corroborando o estudo deste autor.

Tal como para a absorção por imersão, procurou-se relacionar a absorção por capilaridade com a massa volúmica dos betões. A excelente correlação ($R^2 = 0,95$) obtida permite concluir que as duas grandezas estão estreitamente relacionadas. Esta relação encontra-se exposta na Figura 4.47.

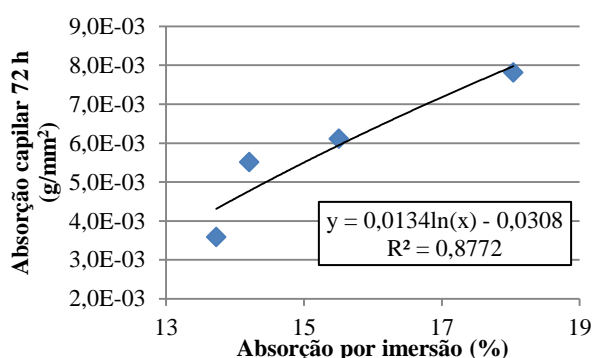


Figura 4.46 - Relação da absorção de água por capilaridade (72 horas) com a absorção por imersão

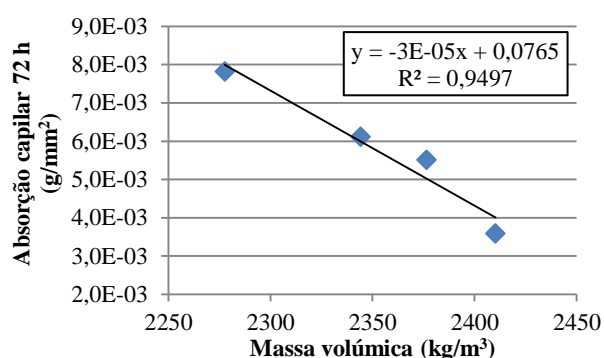


Figura 4.47 - Relação da absorção de água por capilaridade (72 horas) com a massa volúmica

4.5.4. Resistência à carbonatação

A metodologia seguida para a determinação da resistência à carbonatação foi a descrita na especificação LNEC E 391 (1993). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, após 7, 28, 56 e 91 dias de exposição acelerada dos betões numa câmara com 5% de teor de CO_2 .

Na Tabela 4.25, encontram-se expostos os resultados da profundidade de carbonatação medida nos diversos betões para as várias idades de ensaio, assim como a sua variação face ao BR e ao B100. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo S.

Betão	Profundidade carbonatação (mm)											
	7 dias	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	28 dias	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	56 dias	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	91 dias	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	3,00	-	-	4,51	-	-	8,27	-	-	10,44	-	-
B25	3,16	5,4	-	5,29	17,4	-	8,99	8,8	-	11,21	7,4	-
B100	3,68	22,7	-	5,67	25,8	-	8,95	8,3	-	10,61	1,7	-
B100SP1.0	1,14	-61,8	-68,9	1,89	-58,2	-66,8	3,38	-59,1	-62,2	4,21	-59,6	-60,3

Como se verifica na referida tabela, os BAGRB registaram, em todas as idades, profundidades de carbonatação semelhantes, ainda que ligeiramente superiores, às do seu homólogo composto exclusivamente por AP. A diferença entre estes betões fixou-se entre 0,2 e 1,2 mm, pelo que os desvios ocorridos podem ser inerentes à realização do ensaio. Deste modo, é possível concluir que este tipo de agregados não teve uma influência significativa na resistência à carbonatação do betão, à semelhança do que ocorreu na resistência à compressão. As rectas das correlações entre estas duas variáveis presentes na Figura 4.48 apresentam declives praticamente nulos (em todas as idades em análise), confirmando o referido.

Este facto é contraditório com a generalidade das várias investigações referentes a AGRB, tal como constatado por

Kou e Poon (2012), no seu estudo, e por Xiao *et al.* (2012), no levantamento bibliográfico que efectuou. No entanto, Levy (2001) também obteve profundidades de carbonatação nos BAGRB idênticas à do BR. Porém, o autor utilizou maior quantidade de cimento nos primeiros, o que poderá ter influenciado positivamente esta propriedade.

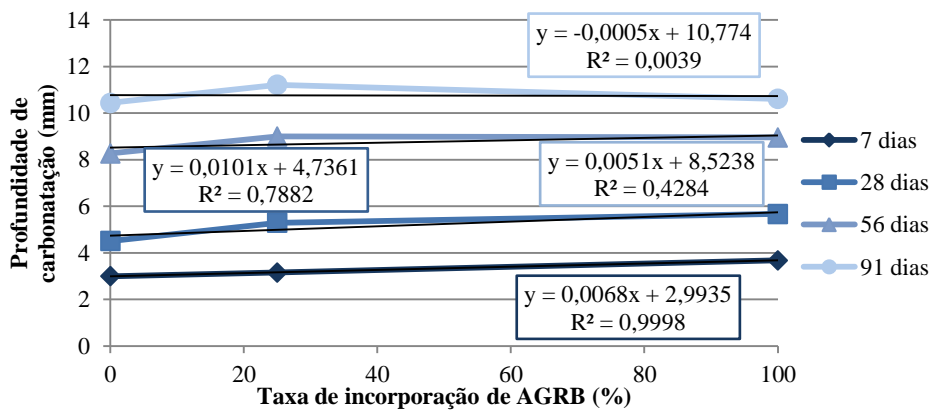


Figura 4.48 - Relação da profundidade de carbonatação com a taxa de substituição de AGRB, para os vários períodos de ensaio

Não se encontraram justificações plausíveis para o semelhante desempenho entre os BAR e o BR. No entanto, o mesmo poderá dever-se à muito boa qualidade dos AGRB utilizados neste estudo, os quais foram provenientes da reciclagem de elementos de betão pré-fabricados de elevada resistência. Como avaliado no subcapítulo 4.2, os AGRB possuem melhores propriedades face à maioria das investigações reportadas, principalmente ao nível da massa volúmica, baridade, desgaste de *Los Angeles* (para a fracção 4-10 mm) e absorção de água.

Uma vez que os resultados entre as diversas investigações presentes no levantamento bibliográfico apresentam elevada inconsistência, além de as mesmas terem procedimentos distintos dos do presente estudo, optou-se por comparar os resultados com investigações realizadas anteriormente no Instituto Superior Técnico. Apesar de se registar profundidades de carbonatação superiores nos BAGRB, não foi encontrada nenhuma correlação entre esta propriedade e a taxa de substituição de AGP por AGRB (Figura 4.49). Porém, enquanto nas outras investigações existe uma tendência crescente, no presente estudo tal não ocorre. Os AGR utilizados nas referidas investigações foram originários de um betão produzido em laboratório para o efeito, ao invés dos elementos pré-fabricados reciclados nesta campanha.

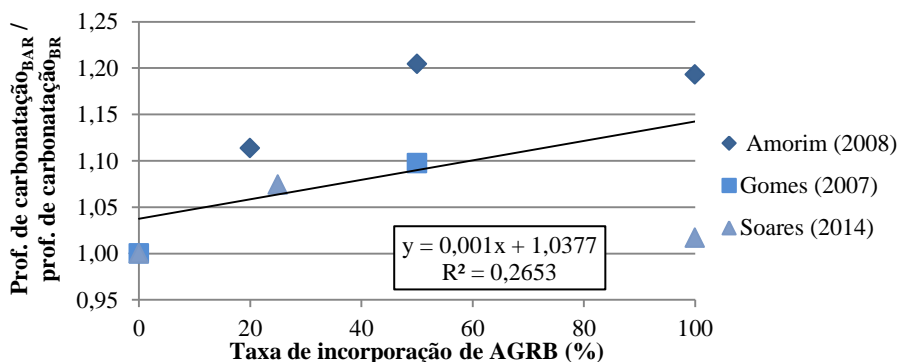


Figura 4.49 - Relação da resistência à carbonatação (aos 91 dias) com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Através dos resultados do betão B100SP1.0, é possível concluir que a utilização de SP origina melhorias no desempenho do betão nesta propriedade, uma vez que conduz à redução da relação *a/c* efectiva, o que resulta numa diminuição da porosidade e da permeabilidade aos gases. A incorporação de SP resultou em melhorias entre 58 e 62%, em relação ao BR, e entre 60 e 69%, face ao B100. Relativamente ao betão homólogo sem adjuvante, a eficácia do SP diminuiu ao longo do tempo, visto que o incremento de 69% correspondeu aos 7 dias e o de 60% aos 91 dias. Estes resultados confirmam o referido no subcapítulo referente à resistência à compressão, de que o SP possui um efeito acelerador de presa, resultando, assim, numa influência superior nos primeiros dias de cura do

betão.

A Figura 4.50 permite analisar a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo nos diversos betões em análise. Como esperado, ocorreu um aumento da mesma com o decorrer do tempo de ensaio. Pode-se verificar, através do declive das rectas, que o avanço da frente de carbonatação nos diversos betões ocorre de forma mais intensa nos primeiros 7 dias de ensaio.

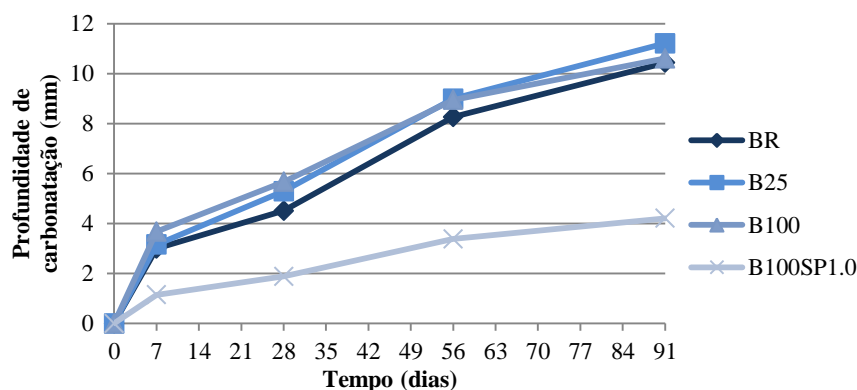


Figura 4.50 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo

Cartuxo (2003) sugere, com base nos resultados que obteve, que a resistência à carbonatação está estreitamente relacionada com a resistência à compressão (Figura 4.51) e com a absorção de água por capilaridade dos BAR (Figura 4.52). Em relação à resistência à compressão, obteve-se uma excelente correlação ($R^2 = 0,976$), a qual se deve principalmente ao resultado do betão com SP (a escuro na figura), visto que os BAR e o BR registaram semelhantes valores de resistência e profundidade de carbonatação. Por sua vez, a correlação com a absorção capilar é satisfatória ($R^2 = 0,788$), sendo a regressão logarítmica a que melhor se ajustou aos resultados obtidos.

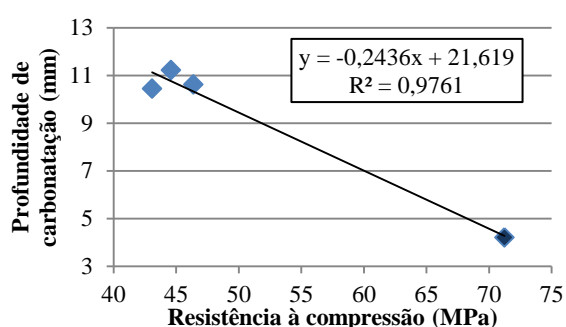


Figura 4.51 - Relação da resistência à carbonatação (91 dias) com a resistência à compressão (28 dias)

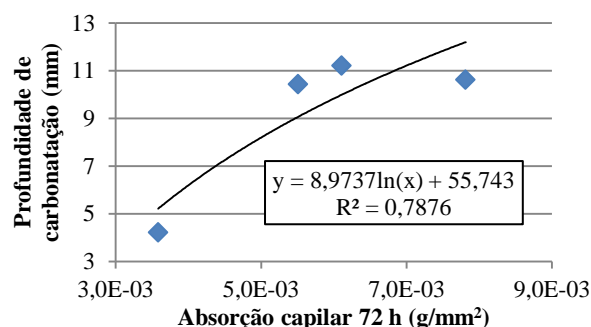


Figura 4.52 - Relação da resistência à carbonatação (91 dias) com a absorção de água por capilaridade

4.5.5. Resistência à penetração dos cloretos

A determinação da resistência à penetração de cloretos teve por base o processo descrito na especificação LNEC E 463 (2004). Este ensaio foi realizado apenas na terceira fase experimental, aos 28 e 91 dias de idade dos betões. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo T.

Esta propriedade é quantificada pelo coeficiente de difusão de iões cloreto, o qual pode ser observado na Tabela 4.26, para os vários betões e idades de ensaio. Através da análise desta tabela, verifica-se que os betões tendem a melhorar os seus desempenhos dos 28 para os 91 dias, observando-se uma diminuição dos coeficientes de difusão de cloretos, estando de acordo com o constatado por Kou e Poon (2012). Esta situação deve-se, principalmente, à maior quantidade de cimento hidratada em idades mais avançadas em virtude de um maior tempo de cura, conduzindo a um menor volume de vazios do betão. Registaram-se reduções de aproximadamente 8% para o B100SP1.0 e de 14% nos restantes betões. No entanto, segundo a especificação LNEC E 465 (2007), seriam expectáveis descidas mais significativas, devendo o valor do coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias ser da ordem de 60% do valor registado aos 28 dias.

Tabela 4.26 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração dos cloretos

Betão	28 dias			91 dias			$D_{0\text{méd } 91} /$
	$D_{0\text{méd}} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	$D_{\text{BR}} (\%)$	$D_{\text{B100}} (\%)$	$D_{0\text{méd}} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	$D_{\text{BR}} (\%)$	$D_{\text{B100}} (\%)$	$D_{0\text{méd } 28} (\%)$
BR	16,46	-	-	14,13	-	-	85,8
B25	17,67	7,3	-	15,14	7,1	-	85,7
B100	15,95	-3,1	-	13,77	-2,6	-	86,3
B100SP1.0	7,97	-51,6	-50,1	7,31	-48,3	-46,9	91,7

Na Figura 4.53, são apresentadas as regressões lineares da resistência à penetração de cloretos com a taxa de substituição de AGP por AGRB, tendo-se obtido, para cada uma das idades (28 e 91 dias), um coeficiente de correlação considerado insatisfatório (abaixo de 0,30).

Os resultados apresentados para as duas idades de ensaio são coerentes entre si, demonstrando que não existiu uma clara tendência da influência do teor de AGRB (como se conclui pelas correlações obtidas). Foram obtidas variações face ao BR de aproximadamente +7 e -3%, correspondentes a taxas de substituição de 25 e 100%, respectivamente. Estes resultados são condizentes com os obtidos para a resistência à carbonatação, em que se obteve variações entre cerca de 2 e 7% (aos 91 dias de idade). Estas ligeiras diferenças ocorridas entre os betões podem ser inerentes à realização do ensaio. Para melhor compressão deste facto, são apresentados na Tabela 4.27 os valores obtidos em cada provete de ensaio, no qual se observa que a diferença máxima entre os resultados dos provetes de um dado betão (entre 4 e 19%) é quase sempre superior à diferença registada entre betões distintos. Deste modo, é possível concluir que este tipo específico de AGR, provenientes da reciclagem de elementos de betão de elevada resistência, não afecta significativamente esta propriedade.

Tabela 4.27 - Resultados obtidos nos provetes dos vários betões

Betão	$D_{0\text{méd}} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ 28 dias			$D_{\text{máx provetes}} (\%)$	$D_{0\text{méd}} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ 91 dias			$D_{\text{máx provetes}} (\%)$
	Provete 1	Provete 2	Provete 3		Provete 1	Provete 2	Provete 3	
BR	14,88	16,95	17,57	18,1	14,65	15,05	12,69	18,7
B25	17,75	16,56	18,70	12,9	14,37	14,97	16,08	11,9
B100	16,38	15,77	15,71	4,2	12,76	13,96	14,59	14,3

Apresenta-se, na Figura 4.54, uma comparação dos valores obtidos no presente estudo com os registados nas demais investigações, relativamente aos betões sem SP. Dadas as significativas diferenças para as outras investigações consultadas, nomeadamente procedimentos distintos dos do presente estudo, decidiu-se introduzir apenas os valores de Gonçalves *et al.* (2004) e Matias e Brito (2005). Optou-se também por incluir as investigações comparadas na resistência à carbonatação (Amorim, 2008; Gomes, 2007). Como se verifica na referida figura, existe uma tendência crescente do coeficiente de difusão dos iões cloreto com a taxa de substituição de AGP por AGRB nas campanhas de Amorim (2008), Gomes (2007) e Gonçalves *et al.* (2004). Além destas, a maioria das investigações relativas à incorporação deste tipo de agregados no betão sugere que existe uma redução da resistência à penetração de cloretos, como é o caso dos estudos de Rao *et al.* (2011) e Kou e Poon (2012). Deste modo, verifica-se que os resultados deste estudo não se enquadram com a maioria das investigações reportadas no levantamento bibliográfico. No entanto, os estudos de Matias e Brito (2005) e Limbachiya *et al.* (2000) registaram desempenhos semelhantes nos BAGRB, sendo que nestes estudos também foram utilizados AGR obtidos de elementos de betão pré-fabricados. Assim, e com base no coeficiente de correlação obtido ($R^2 = 0,059$), é possível concluir que esta propriedade é mais influenciada pela qualidade do que pela quantidade utilizada de AGR.

Tal como para a resistência à carbonatação, conclui-se que a introdução de SP resulta numa melhoria de desempenho em relação à propriedade em análise neste subcapítulo. O estudo da composição B100SP1.0 teve como objectivo avaliar até que ponto é possível compensar o efeito dos AGRB; porém, como a utilização deste tipo particular de agregados não resultou num decréscimo da resistência à penetração dos cloretos, o efeito do SP em relação ao BR foi bastante elevado. Assim, o betão B100SP1.0 apresentou reduções no coeficiente de difusão dos iões cloreto entre 47%, para os 91 dias, e 52%, para os 28 dias.

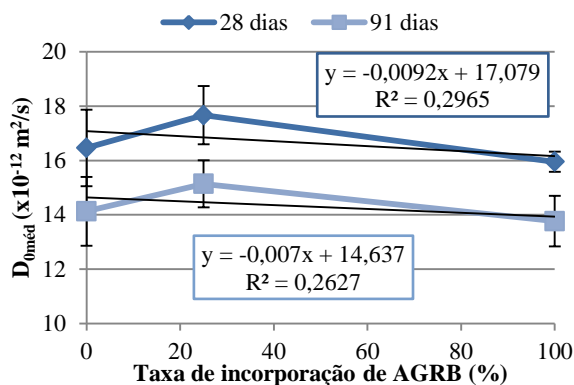


Figura 4.53 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a taxa de substituição de AGRB

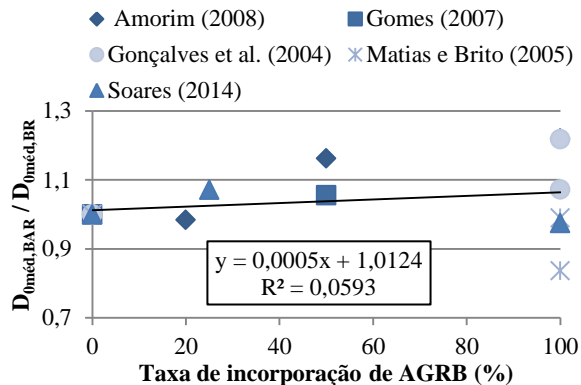


Figura 4.54 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos (aos 91 dias) com a taxa de substituição de AGRB das diversas investigações

Ferreira (2000), através da sua investigação, concluiu que o coeficiente de difusão dos íões cloreto e a absorção de água por capilaridade possuem uma relação linear, tendo obtido um excelente coeficiente de correlação ($R^2 = 0,931$). No entanto, como se verifica na Figura 4.55, esta relação não foi verificada de uma forma clara no presente estudo ($R^2 = 0,596$). Porém, adoptando uma regressão logarítmica, obtém-se um coeficiente de correlação igual a 0,716, o qual é considerado mais satisfatório.

Por último, apresenta-se, na Figura 4.56, a relação entre a resistência à penetração dos íões cloreto e a resistência à carbonatação aos 91 dias. A excelente correlação obtida ($R^2 = 0,993$) é indiciadora de que os resultados entre os dois ensaios estão em conformidade um com o outro.

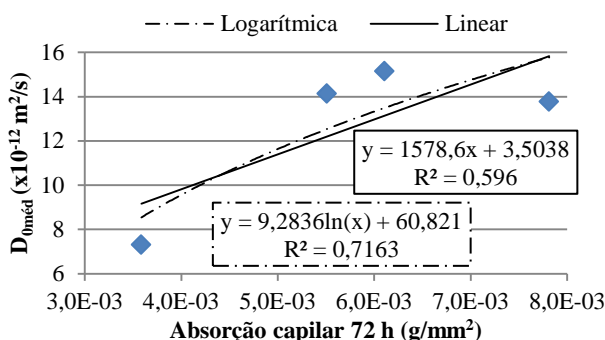


Figura 4.55 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a absorção de água por capilaridade (72 horas)

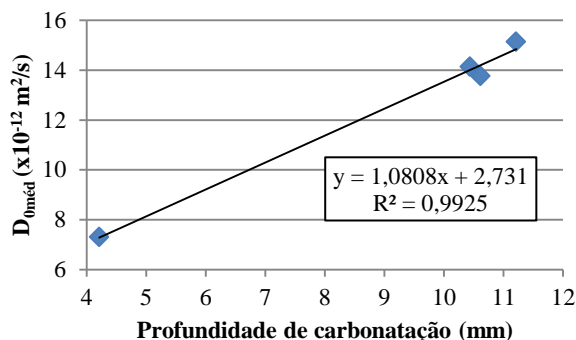


Figura 4.56 - Relação do coeficiente de difusão de cloretos com a profundidade de carbonatação

4.6. Ensaio de caracterização *in situ* do betão em pórticos à escala real

No presente subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização *in situ* do betão em estruturas à escala real: resistência à compressão em provetes cúbicos, resistência à compressão em carotes, velocidade de propagação dos ultra-sons e dureza superficial. Apresenta-se ainda uma comparação destes resultados com os obtidos na campanha experimental realizada em laboratório.

4.6.1. Resistência à compressão em provetes cúbicos

Como referido no subcapítulo 4.4.1, a metodologia seguida para a determinação da resistência à compressão foi a descrita na norma NP EN 12390-3 (2011). Este ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias de idade dos vários betões.

Na Tabela 4.28, são expostos os resultados obtidos nas duas idades, assim como a sua variação face ao BR e ao B100. As variações apresentadas são referentes à média dos valores dos betões do 1º e do 2º piso de cada estrutura. Os valores de cada provete e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo U.

Em primeiro lugar, importa verificar a classe de resistência dos betões. Para a maioria dos betões sem SP, obteve-se uma classe de C25/30, tal como inicialmente previsto. No entanto, o betão correspondente ao 1º piso da estrutura

B25 pertence à classe C20/25. Por sua vez, o betão B25 relativo ao 2º piso registou um valor de resistência inferior aos dos restantes betões, pertencendo à classe C16/20. Este valor poderá não reflectir com realidade a classe do betão produzido uma vez que os provetes cúbicos relativos a este betão se apresentavam bastante degradados, como se observa na Figura 4.57. Tal pode ter sido originado por diversos factores: deficiente vibração do betão, inexistência de óleo desmoldante nos moldes e ausência de molhagem durante a cura dos provetes. Desta forma, desprezou-se os valores referentes a este piso no âmbito desta análise.

Tabela 4.28 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em provetes

Betão	Piso	$f_{cm\ 7}$ (MPa)	Média	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)	$f_{cm\ 28}$ (MPa)	Média	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	1	27,7	27,7	-	-	31,3	31,3	-	-
	2	-				-			
B25	1	25,6	25,6	-7,5	-	28,8	28,8	-7,9	-
	2	19,7				22,4			
B100	1	27,6	26,5	-4,5	-	34,5	32,5	4,2	-
	2	25,3				30,8			
B100SP1.0	1	47,5	50,3	81,5	90,0	53,9	57,9	85,1	77,6
	2	53,1				61,9			

No B100SP1.0, obteve-se, como esperado, classes de resistência superiores: C40/50 e C45/55 para o 1º e o 2º piso, respectivamente. A diferença de classes entre pisos pode ser explicada pelas diferenças na execução dos mesmos (o processo de produção do betão não é tão rigoroso quanto o praticado em laboratório) e pela utilização de SP, pois as amassaduras com este produto são mais sensíveis à quantidade de água efectivamente adicionada às mesmas.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os AGRB não têm uma influência significativa nesta propriedade, em conformidade com o registado nos provetes efectuados em laboratório. Apesar de aos 7 dias de idade terem sido obtidas diminuições da resistência até 7,5% (correspondente ao betão B25), verifica-se que o betão referente ao 1º piso da estrutura B100 tem a mesma tensão de rotura à compressão do que o BR, pelo que as diferenças registadas não são conclusivas e podem dever-se às diferenças no processo construtivo de cada estrutura e à variabilidade inerente ao ensaio. Aos 28 dias, obteve-se variações de -7,9 e +4,2% para o B25 e B100, respectivamente, em relação ao betão homólogo composto apenas por AP.

A variação da resistência à compressão com a taxa de incorporação de AGRB é apresentada na Figura 4.58. Face aos resultados obtidos, não foi possível estabelecer nenhuma relação entre a resistência à compressão e a incorporação de AGRB nos betões.



Figura 4.57 - Aspecto geral dos provetes correspondentes ao segundo piso do B25

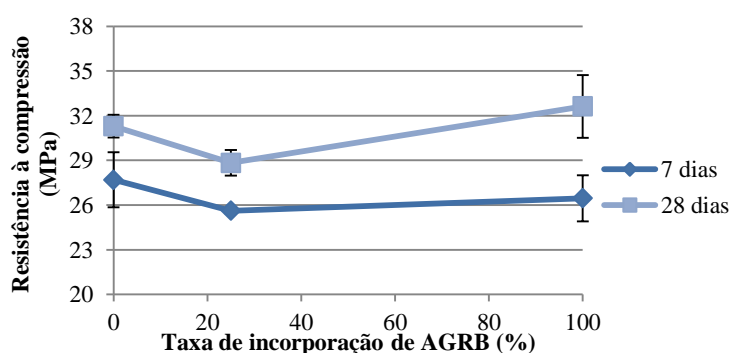


Figura 4.58 - Relação da resistência à compressão em provetes cúbicos com a taxa de substituição de AGRB

Desta forma, as variações obtidas são inconclusivas, pelo que se considera que os BAR constituídos por este tipo de AGRB em específico, proveniente de betões de elevada resistência, possuem resistência à compressão semelhante. Algumas justificações para este facto podem ser retiradas do subcapítulo 4.4.1, no qual se explica os resultados obtidos em laboratório.

Como esperado, o betão com SP registou uma resistência à compressão superior à dos demais betões analisados, ou

seja, houve um aumento considerável no desempenho mecânico deste tipo de betão. Em relação ao betão análogo sem SP, existiram incrementos de aproximadamente 90 e 78%, respectivamente aos 7 e aos 28 dias de idade.

4.6.2. Resistência à compressão em carotes

O ensaio de determinação da resistência à compressão das várias carotes extraídas foi realizado de acordo a norma NP EN 12504-1 (2011). A extracção das carotes ocorreu de acordo com a norma NP EN 12504-1 (2009). Este ensaio foi realizado após 28 dias de cura do betão.

Procurou-se uniformizar as dimensões entre todas as carotes de modo a não afectar os resultados deste ensaio, uma vez que o diâmetro das carotes e a relação entre este e o comprimento são factores que podem influenciar a resistência (Concrete Society, 1976; Tuncan *et al.*, 2008; Yi *et al.*, 2006). No entanto, nem sempre foi possível obter dimensões idênticas nas várias carotes. A menor espessura das lajes em relação aos restantes elementos não permitiu a extracção de carotes com o mesmo comprimento. Por outras palavras, as carotes das lajes possuem um comprimento mais reduzido, o qual se fixou entre 92 e 95 mm. Para os pilares e vigas, definiu-se uma relação altura / diâmetro igual a 2, tendo-se, para tal, obtido carotes com alturas compreendidas entre 131 e 140 mm (as ligeiras diferenças de comprimento resultaram do processo de rectificação das faces das carotes). Este aspecto apenas não foi cumprido para uma das carotes da viga do BR e para a carote do meio do pilar do B100, por motivos intrínsecos à extracção das mesmas (a carote partiu antes de se atingir o comprimento pretendido).

Os valores da resistência média à compressão de cada uma das carotes, bem como as suas dimensões (diâmetro e comprimento) e a sua massa, são apresentados na Tabela 4.29. Nesta tabela, encontra-se também a resistência das carotes convertida para cubos *in situ*. Entenda-se cubos *in situ* como provetes cúbicos sujeitos a uma cura semelhante à da respectiva estrutura.

Tabela 4.29 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em carotes

Betão	Carote	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)	Área da secção (mm ²)	Força (kN)	f _{cm} (MPa)	Altura / diâmetro	f _{cm, cubos in situ} (MPa)
BR	Viga	68	109	872,9	3631,7	85,2	23,4	1,60	27,6
	Viga	68	134	1063,3	3631,7	55,1	15,2	1,97	18,9
	Laje piso 1	68	92	-	3631,7	113,6	31,3	1,35	32,1
	Laje piso 2	68	94	748,4	3631,7	103,1	28,4	1,38	29,4
B25	Pilar - topo	69	138	1113,1	3739,3	78,7	21,1	2,00	26,3
	Pilar - meio	69	138	1134,9	3739,3	87,6	23,4	2,00	29,3
	Pilar - base	69	138	1151,0	3739,3	80,7	21,6	2,00	27,0
	Viga	68	136	1076,3	3631,7	80,1	22,0	2,00	27,6
	Viga	68	131	1052,0	3631,7	35,9	9,9	1,93	12,2
	Laje piso 1	69	93	786,6	3739,3	116,3	31,1	1,35	31,9
	Laje piso 2	69	92	779,3	3739,3	106,7	28,6	1,33	29,2
B100	Pilar - topo	69	138	1144,7	3739,3	85,8	22,9	2,00	28,7
	Pilar - meio	68	117	844,9	3631,7	106,8	29,4	1,72	35,3
	Pilar - base	69	140	1169,5	3739,3	100,8	27,0	2,03	33,8
	Viga	69	137	1130,7	3739,3	91,9	24,6	1,99	30,7
	Viga	68	135	1099,5	3631,7	42,6	11,7	1,99	14,6
	Laje piso 1	68	92	735,1	3631,7	113,6	31,3	1,35	32,1
	Laje piso 2	68	93	759,6	3631,7	98,3	27,1	1,37	27,9
B100SP1.0	Pilar - topo	69	137	1178,9	3739,3	156,5	41,8	1,99	52,2
	Pilar - meio	69	139	1193,9	3739,3	184,3	49,3	2,01	61,7
	Pilar - base	69	134	1184,7	3739,3	174,1	46,6	1,94	57,8
	Viga	69	138	1201,8	3739,3	166,7	44,6	2,00	55,7
	Viga	69	139	1208,6	3739,3	152,4	40,7	2,01	51,0
	Laje piso 1	69	92	820,9	3739,3	166,3	44,5	1,33	45,5
	Laje piso 2	69	95	836,9	3739,3	215,0	57,5	1,38	59,4

Na tabela, alguns resultados são apresentados a vermelho. Nestas carotes, o respectivo ensaio de compressão conduziu a roturas não satisfatórias (consoante o preconizado na norma de ensaio), como se verifica na Figura 4.59 para o caso da viga do betão B25. Desta forma, para a análise efectuada neste subcapítulo, desprezou-se estes valores uma vez que os mesmos são bastante inferiores aos restantes. Na Figura 4.60, é possível observar exemplos de roturas satisfatórias.



Figura 4.59 - Exemplo de rotura não satisfatória (B25 - viga)



Figura 4.60 - Exemplos de roturas satisfatórias

A resistência estimada em cubos *in situ* foi obtida através da seguinte equação, aplicável a carotes sem armadura (BS 1881, 1983; BS 6089, 1981; Concrete Society, 1976):

$$f_{cm,cubo} = \frac{D}{(1,5 + 1/\lambda)} \times f_{cm,carote} \quad (4.2)$$

onde,

- $f_{cm,cubo}$ - valor médio de resistência à compressão em cubos (MPa ou N/mm²);
- $f_{cm,carote}$ - valor médio de resistência média à compressão em carotes (MPa ou N/mm²);
- D - coeficiente com valor igual a 2,5, caso a carote seja extraída na horizontal em relação à direcção de betonagem (pilares e vigas), ou a 2,3, se for na vertical (lajes);
- λ - coeficiente dado pela relação entre o comprimento e a largura da carote.

Realizada a conversão para valores correspondentes a cubos *in situ*, procurou-se analisar as diferenças registadas entre os betões das várias estruturas. Esta análise pode ser feita nas Tabelas 4.30, que apresenta o valor médio de todas as carotes de um dado betão, e 4.31, que contém o valor médio de cada elemento em separado (pilares, vigas e lajes).

Tabela 4.30 - Resistência à compressão equivalente em cubos *in situ* (geral)

Betão	$f_{cm,cubos\ in\ situ}$ (MPa)	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)
BR	29,7	-	-
B25	28,5	-3,9	-
B100	31,4	5,8	-
B100SP1.0	54,8	84,4	74,3

Tabela 4.31 - Resistência à compressão equivalente em cubos *in situ* (pilares, vigas e lajes)

Betão	$f_{cm,cubos\ in\ situ}$ (MPa)								
	Pilares			Vigas			Lajes		
	D_{BR} (%)	D_{B100} (%)		D_{BR} (%)	D_{B100} (%)		D_{BR} (%)	D_{B100} (%)	
BR	-	-	27,6	-	-	30,7	-	-	
B25	27,5	-	27,6	-0,2	-	30,6	-0,6	-	
B100	32,6	-	30,7	11,1	-	30,0	-2,4	-	
B100SP1.0	57,2	-	53,4	93,4	74,1	52,4	70,5	74,7	

Por observação dos elementos apresentados, verifica-se que as resistências entre os BAGRB e o BR são semelhantes. Em termos dos valores médios, a diferença máxima entre estes betões não ultrapassou 3 MPa, pelo que se considera que não é significativa. Além disso, existiu uma sobreposição de valores entre carotes dos BAR e o BR, como se verifica na Tabela 4.29. Deste modo, a variação das tensões de rotura entre os betões foi reduzida,

sendo a variação máxima de 5,8% em relação ao betão convencional. Confirma-se, assim, o constatado pelos resultados do ensaio apresentado no subcapítulo anterior.

Analisando os resultados de cada elemento estrutural, confirma-se o referido no parágrafo anterior. Em relação às lajes, verifica-se que os BAGRB têm a mesma resistência à compressão do que o BR (diferença máxima de 2,4%). Para as vigas, a distinção entre o betão com 100% de AGRB e o BR foi superior, tendo-se fixado em 11%. Apesar de esta variação ser superior, corresponde a uma diferença de apenas 3 MPa.

Desta forma, não se obteve uma tendência clara da influência da incorporação de AGRB na resistência à compressão no betão. Este aspecto pode ser inferido das Figuras 4.61 e 4.62, onde se observa que, para as vigas e pilares, existiu um aumento da resistência com a taxa de substituição de AGP por AGR (no caso dos pilares, tal não pode ser realmente constatado visto não existir o valor do BR), enquanto nas lajes ocorreu uma redução da mesma. Em termos médios, os valores são semelhantes, como referido.

As diferenças registadas entre os vários elementos de um dado betão foram reduzidas, não sendo possível retirar ilações sobre qual o elemento que apresenta resistências superiores. A diferença máxima entre elementos de um mesmo betão foi de aproximadamente 11%, a qual é a mesma registada entre betões diferentes, confirmando-se uma vez mais a inexistência de influência dos AGRB.

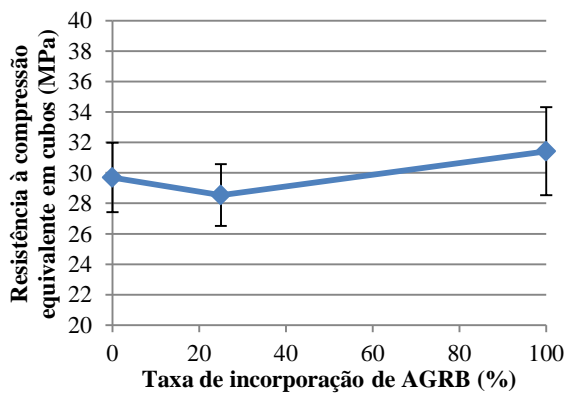


Figura 4.61 - Relação da resistência à compressão em carotes com a taxa de substituição de AGRB: geral

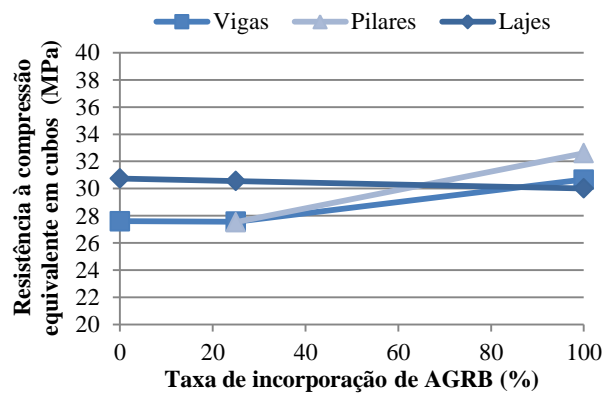


Figura 4.62 - Relação da resistência à compressão em carotes com a taxa de substituição de AGRB: vigas, pilares e lajes

Através da análise dos resultados do betão B100SP1.0, é possível concluir que a utilização de SP origina melhorias no desempenho do betão nesta propriedade, à semelhança do que sucedeu nos provetes cúbicos. A incorporação de SP resultou num incremento da resistência de cerca de 74% (valor médio) face a um betão homólogo sem adjuvante. A influência do SP foi semelhante entre os vários elementos estruturais, tendo-se os incrementos fixado entre 74,1 e 75,5%.

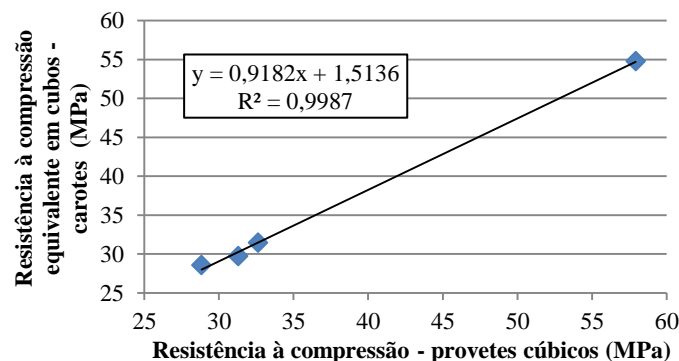


Figura 4.63 - Relação entre a resistência à compressão obtida em carotes e em provetes cúbicos

Por último, apresenta-se a relação entre a resistência à compressão obtida através dos provetes cúbicos e a resistência equivalente a cubos proveniente do ensaio em carotes. Como se verifica na Figura 4.63, o elevado coeficiente de correlação ($R^2 = 0,999$) comprova a conformidade entre os resultados dos dois ensaios. Os valores correspondentes às

carotes são ligeiramente inferiores aos resultantes do ensaio em provetes cúbicos, sendo as diferenças de resistência entre cerca de 1 e 5%.

4.6.3. Velocidade de propagação de ultra-sons

A velocidade de propagação de ultra-sons dos betões das várias estruturas em análise foi determinada segundo o procedimento descrito na norma NP EN 12504-4 (2007), como referido no subcapítulo 2.3. Este ensaio foi realizado aos 28 dias de idade de cada estrutura.

Os resultados obtidos neste ensaio estão expostos na Tabela 3.32, na qual são apresentadas as velocidades registadas nos pilares e vigas, bem como a média de todos os resultados (geral). São também apresentadas as diferenças nesta propriedade em relação ao BR e ao B100. Os valores de cada medição e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo V.

Tabela 4.32 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Betão	Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)								
	Pilares	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Vigas	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Geral	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	4,18	-	-	4,03	-	-	4,13	-	-
B25	4,07	-2,7	-	4,05	0,4	-	4,06	-1,8	-
B100	3,93	-5,9	-	3,88	-3,8	-	3,90	-5,4	-
B100SP1.0	4,37	4,7	11,3	4,38	8,6	12,9	4,38	6,0	12,1

Como se constata nos elementos apresentados, a velocidade de ultra-sons foi inferior nos BAR, sendo proporcional à taxa de substituição de AGP por AGRB. Face aos valores médios da totalidade das leituras, foi registada uma redução máxima de 5,4% nesta propriedade, correspondente à total substituição dos agregados, como consequência da maior porosidade da pasta de cimento aderida aos AR em relação aos AP. De facto, constata-se que existe uma relação praticamente linear ($R^2 = 0,994$) entre estas duas variáveis, como é possível observar na Figura 4.64.

Em relação aos elementos estruturais analisados (pilares e vigas), verifica-se, em ambos, a tendência de decréscimo da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de incorporação de AGR (Figura 4.65). Obteve-se coeficientes de correlação de 0,952 e de 0,898 para os pilares e vigas, respectivamente. Estas boas correlações confirmam que as duas variáveis estão estreitamente relacionadas. As diminuições registadas na velocidade de ultra-sons nos BAGRB face ao BR foram de 3,8% nas vigas e 5,9% nos pilares.

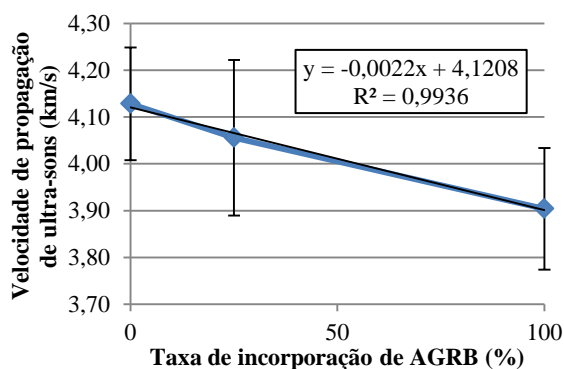


Figura 4.64 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB: geral

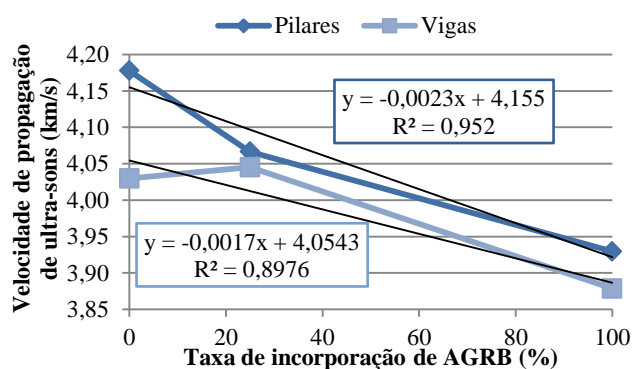


Figura 4.65 - Relação da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa de substituição de AGRB: pilares e vigas

A diferença registada entre os pilares e as vigas de um dado elemento é reduzida, sendo no máximo de 3,5% (correspondente ao BR). Deste modo, não é possível concluir qual dos elementos tende a apresentar maiores velocidades de ultra-sons.

A adição de um SP à mistura de betão conduziu, como esperado, a uma diminuição do efeito dos AR, conseguindo-se compensar totalmente a perda de velocidade dos BAR face ao BR. Por outras palavras, obteve-se uma velocidade de propagação de ultra-sons no B100SP1.0 superior à do betão composto exclusivamente por AP. Em termos médios, foram registados incrementos nesta propriedade de 6 e 12% em relação ao BR e B100,

respectivamente.

4.6.4. Dureza superficial (esclerómetro de Schmidt)

A determinação da dureza superficial com recurso ao esclerómetro de Schmidt teve por base as especificações da norma NP EN 12504-2 (2012). Este ensaio foi realizado aos 28 dias de idade de cada estrutura. Os valores correspondentes a cada medição e os cálculos auxiliares podem ser consultados no Anexo W.

Os resultados obtidos encontram-se expostos nas Tabelas 4.33 e 4.34, sendo apresentados os valores relativos à média de todas as medições (geral), aos vários elementos estruturais ensaiados (pilares, vigas e lajes) e aos diferentes modos de medição (horizontal e descendente). Os diferentes modos de medição conduzem a resultados distintos, pelo que não podem ser directamente comparados.

Tabela 4.33 - Resultados obtidos no ensaio de dureza superficial (geral)

Betão	Número de ressalto - horizontal		Número de ressalto - descendente	
	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	30,0	-	24,0	-
B25	32,5	8,3	22,5	-6,3
B100	34,0	13,3	25,0	4,2
B100SP1.0	42,0	40,0	37,0	54,2

Tabela 4.34 - Resultados obtidos no ensaio de dureza superficial (pilares, vigas e lajes)

Betão	Número de ressalto - horizontal						Número de ressalto - descendente					
	Pilares	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Vigas	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Vigas	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	Lajes	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)
BR	30	-	-	27	-	-	22	-	-	24	-	-
B25	32,5	8,3	-	31,5	16,7	-	24	9,1	-	20,5	-14,6	-
B100	34	13,3	-	34	25,9	-	25	13,6	-	25	4,2	-
B100SP1.0	42	40,0	23,5	42	55,6	23,5	35	59,1	40,0	38	58,3	52,0

Eram esperados valores díspares entre os BAGRB e o BR, uma vez que o tipo de AG utilizado no fabrico de betão possui influência na dureza superficial do mesmo (Nepomuceno, 1999b; Bungey *et al.*, 2006).

Por análise dos elementos apresentados, constata-se que, de um modo geral, os BAGRB possuem maior número de ressalto do que o betão homólogo composto exclusivamente por AP. Os resultados deste estudo estão em concordância com a investigação de Al Mufti e Fried (2012), na qual os autores obtiveram maiores números de ressalto nos betões com 100% de AGRB para as várias idades de ensaio (desde a mistura até aos 28 dias de idade). Os autores justificam os resultados com a maior absorção de água e textura superficial dos AGR, das quais resulta uma superfície de betão mais rija. De facto, conforme referido no capítulo 2, a textura rugosa dos AGRB aliada à sua elevada porosidade pode proporcionar a formação de maior quantidade de produtos de hidratação nos poros dos agregados, melhorando, conseqüentemente, a ligação agregado / pasta cimentícia. Estes factos podem ser justificativos dos resultados obtidos, além da boa qualidade dos AR utilizados neste estudo.

Analisando os valores correspondentes à generalidade dos elementos, foram registados aumentos até 4,2 e 13,3% para os modos de medição descendente e horizontal, respectivamente. A relação da dureza superficial (para os dois modos de medição) com a taxa de substituição de AGP por AGRB é apresentada na Figura 4.66. Apenas para o modo horizontal se obteve uma clara tendência do aumento do número de ressalto com a incorporação de AGR, no qual se registou um coeficiente de correlação de 0,831.

De um modo geral, as correlações obtidas nos vários elementos estruturais entre as duas variáveis confirmam que existe uma clara influência dos AGRB na dureza superficial dos betões (Figura 4.67). Apenas a aproximação linear efectuada para as lajes resultou num coeficiente de correlação insatisfatório. Esta ocorrência deve-se essencialmente ao valor referente à laje do pórtico B25 (-14,6% face ao BR), o qual é discordante com o valor registado nos outros elementos (entre +8,3 a 16,7% relativamente ao betão convencional). Este valor algo errático justifica a fraca correlação verificada na Figura 4.66 para o modo descendente. Os pilares apresentaram um desempenho

ligeiramente superior ao das vigas, tal como tinha sido constatado no subcapítulo anterior.

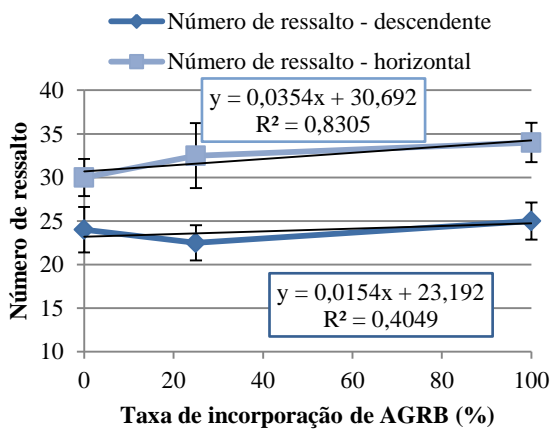


Figura 4.66 - Relação da dureza superficial com a taxa de substituição de AGRB (geral)

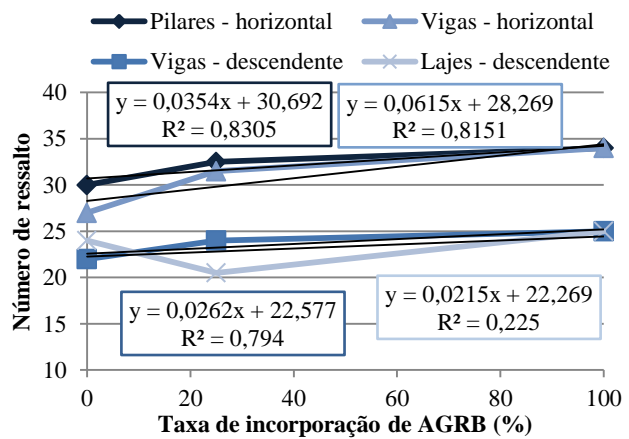


Figura 4.67 - Relação da dureza superficial com a taxa de substituição de AGRB (pilares, vigas e lajes)

Tal como para as restantes propriedades analisadas, conclui-se que a introdução de SP resulta numa melhoria de desempenho em termos da dureza superficial das estruturas. Assim, o betão B100SP1.0 apresentou aumentos (em termos médios) no número de resalto de 23,5 e 48%, respectivamente para os modos de medição horizontal e descende, em relação ao betão análogo sem SP. Verifica-se que, ao contrário do sucedido nas demais propriedades alvo de análise, o SP possuiu uma influência distinta nos vários elementos estruturais. No entanto, este facto pode estar relacionado apenas com os diferentes modos de medição utilizados. Para os pilares e vigas no modo horizontal, o incremento foi de 23,5%, enquanto nas lajes foi de 52% e nas vigas no modo descendente de 40%.

Verifica-se que, neste ensaio, a diferença dos valores dos BAGRB face ao BR variou bastante entre os vários elementos estruturais analisados. Esta ocorrência poder-se-á dever à menor precisão dos valores estimados neste ensaio comparativamente aos restantes e, além disso, ao facto de o número de resalto resultar de uma avaliação apenas do betão superficial numa espessura de cerca de 3 cm (Júlio *et al.*, 2004). O referido poderá também justificar os diferentes incrementos registados no betão com SP entre os dois modos de medição e elementos estruturais. Além disso, a maior rugosidade das lajes e vigas (na zona da laje) pode ter resultado em leituras do número de resalto menos precisas e, conseqüentemente, num coeficiente de correlação insatisfatório para o modo descendente.

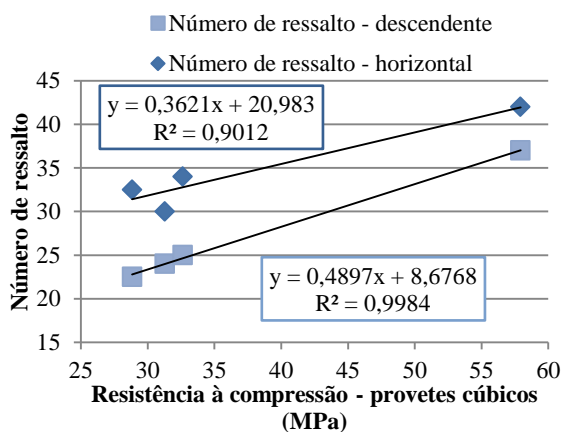


Figura 4.68 - Relação da dureza superficial com a resistência à compressão em provetes cúbicos

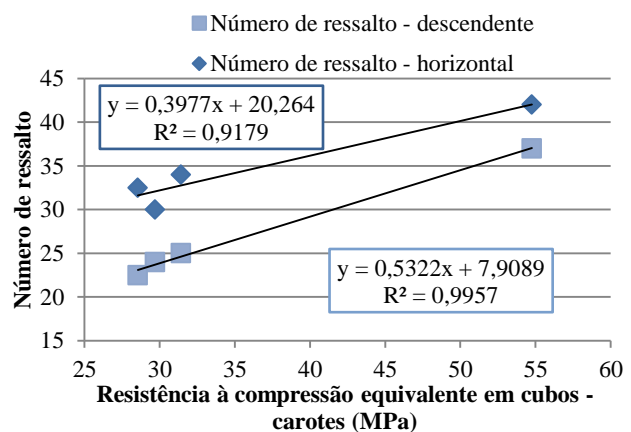


Figura 4.69 - Relação da dureza superficial com a resistência à compressão em carotes

Ravindrajah *et al.* (1988) correlacionaram, através de uma regressão exponencial, o número de resalto com a resistência à compressão, obtendo um excelente coeficiente de correlação ($R^2 = 0,968$). Na presente investigação, confirma-se que existe uma relação entre as duas propriedades, corroborando o estudo do autor referido. No entanto, a regressão que melhor se ajustou aos resultados obtidos foi a linear, tendo-se registado excelentes coeficientes de correlação (sempre acima de 0,90). As referidas correlações podem ser observadas nas Figuras 4.68

e 4.69 para a resistência à compressão em provetes cúbicos e em carotes, respectivamente.

Por último, são apresentadas, na Figura 4.70, as correlações obtidas entre esta propriedade e a resistência à abrasão, a qual foi ensaiada em provetes produzidos em laboratório. Os bons coeficientes de correlação registados, de 0,859 e 0,946, permitem concluir que existe uma estreita relação entre estas duas propriedades. Esta ocorrência era expectável visto que são propriedades que avaliam essencialmente a zona superficial do betão.

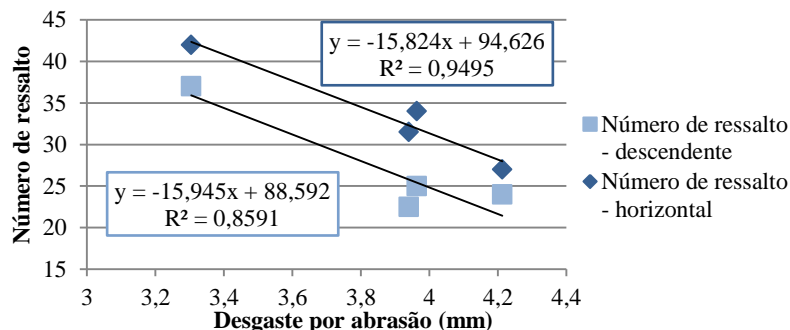


Figura 4.70 - Relação da dureza superficial com a resistência à abrasão

4.6.5. Comparação dos resultados *in situ* e em laboratório

4.6.5.1. Resistência à compressão em provetes cúbicos

Apresenta-se, na Tabela 4.35, uma comparação entre os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão efectuado com os provetes produzidos *in situ* e em laboratório.

Tabela 4.35 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão *in situ* (provetes cúbicos) e em laboratório

Idade	Betão	Resistência à compressão (MPa)						D <i>In situ</i> /Lab (%)
		Laboratório	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	<i>In situ</i>	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	
7 dias	BR	39,2	-	-	27,7	-	-	-29,3
	B25	38,1	-2,7	-	25,6	-7,5	-	-32,8
	B100	37,5	-4,2	-	26,5	-4,5	-	-29,5
	B100SP1.0	60,5	54,6	61,4	50,3	81,5	90,0	-17,0
28 dias	BR	43,1	-	-	31,3	-	-	-27,3
	B25	44,6	3,5	-	28,8	-7,9	-	-35,4
	B100	46,4	7,7	-	32,6	4,2	-	-29,7
	B100SP1.0	71,2	65,3	53,6	57,9	85,1	77,6	-18,7

Em primeiro lugar, observa-se que a diferença entre os BAGRB e o BR é semelhante nos ensaios *in situ* e em laboratório, ou seja, verifica-se em ambos que os AGRB utilizados neste estudo não possuem influência significativa na resistência à compressão do betão. Quer isto dizer que a influência dos AR é a mesma nos provetes produzidos *in situ* e em laboratório.

Por outro lado, os valores relativos aos betões *in situ* são consideravelmente inferiores aos obtidos nos betões preparados em laboratório. Esta ocorrência era esperada, uma vez os betões tiveram diferentes condições de cura e o processo de fabrico de betão *in situ* não é tão rigoroso quanto o praticado em laboratório. Registaram-se variações na resistência dos BAR e do BR entre aproximadamente 29 e 33%, aos 7 dias de idade, e 27 e 35%, aos 28 dias. Relativamente ao B100SP1.0, a variação foi inferior, tendo-se fixado em 17 e 19% aos 7 e aos 28 dias, respectivamente. Esta ocorrência poder-se-á justificar pelas diferentes condições climáticas a que as estruturas, e consequentemente os provetes, estiveram sujeitos até à idade de ensaio. De facto, as estruturas BR, B25 e B100 foram construídas em Julho e Agosto, enquanto a estrutura B100SP1.0 foi executada em Outubro, pelo que esteve sujeita à acção da chuva durante o período de cura. As diferenças registadas nas condições climáticas no local de execução das estruturas podem ser consultadas no Anexo X (Accuweather, 2014).

Bunney *et al.* (2006) referem que a diferença entre a resistência de cubos *in situ* e cubos normalizados varia entre

25 e 35%. Por sua vez, Petersons (1968) menciona valores entre aproximadamente 10 e 30%. Ergün e Kürklü (2012) chegaram a semelhantes conclusões no seu estudo. Deste modo, verifica-se que as reduções obtidas, entre a resistência obtida nos ensaios em laboratório e a registada nos ensaios *in situ*, se encontram de acordo com os autores mencionados.

Na Figura 4.71, encontra-se a relação entre os resultados *in situ* e em laboratório referentes a esta propriedade. As excelentes correlações obtidas (coeficientes acima de 0,98) são indicadoras de que os resultados entre os dois ensaios estão em conformidade uns com os outros.

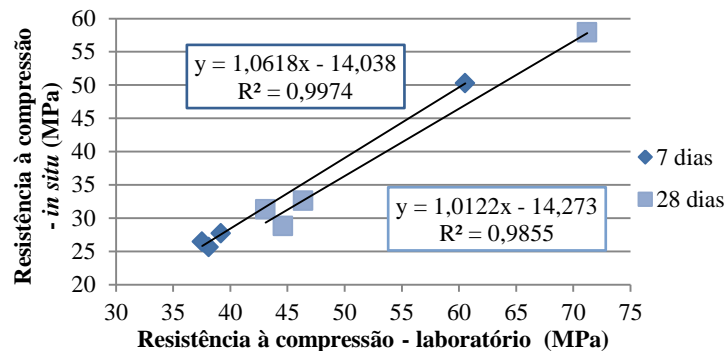


Figura 4.71 - Relação entre a resistência à compressão *in situ* (provetes cúbicos) e em laboratório

A comparação entre a evolução da resistência à compressão entre os 7 e os 28 dias de idade é apresentada na Tabela 4.36. Conclui-se que a evolução desta propriedade entre as idades referidas é semelhante nos betões produzidos *in situ* e em laboratório.

Tabela 4.36 - Relações entre as resistências dos betões nas duas idades de ensaio (*in situ* e laboratório)

Betão	$f_{cm\ 7} / f_{cm\ 28}$ (%)	
	Laboratório	<i>In situ</i>
BR	90,9	88,5
B25	85,4	88,8
B100	80,9	81,1
B100SP1.0	85,0	86,8

Tal como constatado pelos resultados laboratoriais, verifica-se que, no betão das estruturas, o SP possuiu também um efeito acelerador de presa, resultando, assim, numa influência superior nos primeiros dias de cura do betão. Como se pode conferir na Tabela 4.35, a incorporação do SP resultou numa melhoria de desempenho face ao B100 de 90% aos 7 dias de idade, sendo a sua eficácia reduzida aos 28 dias, já que se observa uma melhoria de cerca de 78%. Tal pode também ser observado na Figura 4.72.

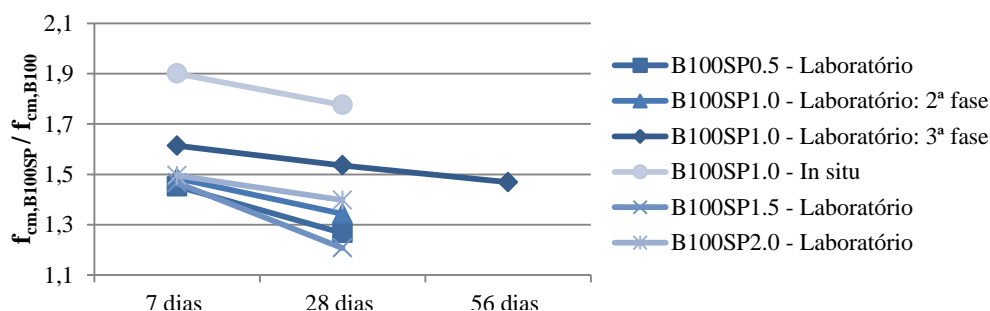


Figura 4.72 - Evolução da resistência à compressão nos betões com SP (*in situ* e laboratório)

4.6.5.2. Resistência à compressão em carotes

A comparação entre a resistência à compressão equivalente em cubos, obtida a partir do ensaio de carotes, e a resistência em provetes produzidos em laboratório para o efeito é efectuada na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão *in situ* (carotes) e em laboratório

Betão	Resistência à compressão (MPa)						D <i>In situ</i> /Lab (%)	$f_{cm\ lab} / f_{cm\ in\ situ}$
	Laboratório	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	<i>In situ</i>	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)		
BR	43,1	-	-	29,7	-	-	-31,1	1,45
B25	44,6	3,5	-	28,5	-3,9	-	-36,0	1,56
B100	46,4	7,7	-	31,4	5,8	-	-32,3	1,48
B100SP1.0	71,2	65,3	53,6	54,8	84,4	74,3	-23,1	1,30

Por análise desta tabela, as conclusões passíveis de ser obtidas são as mesmas que foram referidas no subcapítulo anterior (resistência à compressão em provetes cúbicos):

- a influência dos AGRB é idêntica no betão produzido *in situ* e em laboratório;
- os valores relativos aos betões *in situ* são consideravelmente inferiores aos obtidos nos betões formulados em laboratório;
- a variação entre os resultados *in situ* e em laboratório foi inferior no betão com SP (23%) em relação aos restantes (entre 31 e 36%).

A norma BS 6089 (1981) recomenda a utilização de um factor de 1,3 para se estimar a resistência de provetes sujeitos a uma cura normalizada a partir da resistência equivalente em cubos, de modo a ter em conta as melhores as condições de compactação e sobretudo de cura (húmida até aos 28 dias) em laboratório. Conforme apresentado na Tabela 4.37, apenas na estrutura B100SP1.0 não é ultrapassado o mencionado factor. Nas restantes estruturas, registam-se factores entre 1,45 e 1,58, pelo que podem ter sido alvo de uma cura deficiente, consoante o referido na norma.

Apresenta-se, na Figura 4.73, a relação entre os resultados *in situ* e em laboratório referentes a esta propriedade. A excelente correlação obtida ($R^2 = 0,993$) é indiciadora de que os resultados entre os dois ensaios são concomitantes uns com os outros.

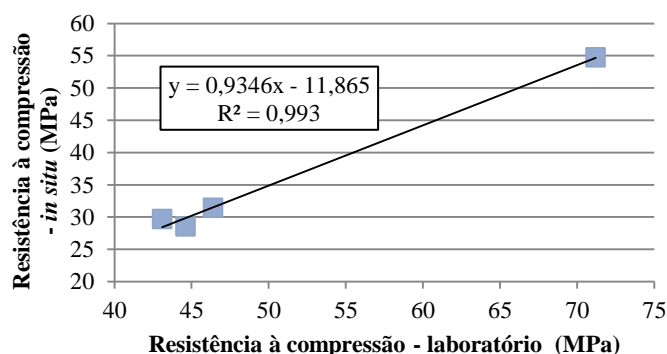


Figura 4.73 - Relação entre a resistência à compressão *in situ* (carotes) e em laboratório

4.6.5.3. Velocidade de propagação de ultra-sons

Na Tabela 4.38, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, realizado *in situ* nas estruturas e em laboratório em provetes cúbicos, com o intuito de se efectuar uma comparação entre ambos.

Tabela 4.38 - Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons *in situ* e em laboratório

Betão	Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)						Δ <i>In situ</i> /Lab (%)
	Laboratório	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	<i>In situ</i>	D _{BR} (%)	D _{B100} (%)	
BR	4,71	-	-	4,13	-	-	-12,4
B25	4,65	-1,4	-	4,06	-1,8	-	-12,8
B100	4,42	-6,2	-	3,90	-5,4	-	-11,8
B100SP1.0	4,70	-0,3	6,2	4,38	6,0	12,1	-6,9

Por análise dos resultados, as conclusões sobre esta propriedade são as referidas nos subcapítulos anteriores, relativas à resistência à compressão dos betões:

- a influência dos AGRB é semelhante no betão produzido *in situ* e em laboratório;
- os valores relativos aos betões *in situ* são inferiores aos obtidos nos betões formulados em laboratório;
- a variação entre os resultados *in situ* e laboratório foi inferior no betão com SP (7%) em relação aos restantes (entre 11,8 e 12,8%).

Apresenta-se, na Figura 4.74, a relação entre os resultados *in situ* e em laboratório referentes a esta propriedade. Obteve-se um razoável coeficiente de correlação de 0,602. Este coeficiente é incrementado para 0,989, se se desprezar na análise o valor correspondente ao betão com SP (a escuro na figura), uma vez que a utilização do adjuvante possuiu um comportamento distinto no betão da estrutura (provocou um incremento nesta propriedade face ao BR) e no betão de laboratório (resultou numa velocidade idêntica à do BR). Deste modo, confirma-se que os resultados entre os dois ensaios são concomitantes uns com os outros.

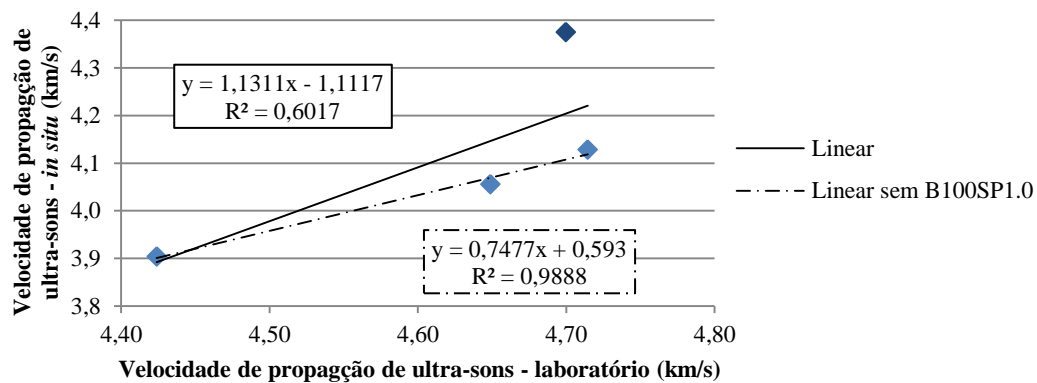


Figura 4.74 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons *in situ* e em laboratório

4.7. Conclusões

4.7.1. Propriedades dos agregados

Com as informações recolhidas no decorrer do levantamento bibliográfico, era esperado que os AGRB apresentassem um desempenho, em termos das suas várias propriedades, inferior ao dos seus homólogos naturais. Os AR obtidos a partir de elementos de betão são compostos por AP e por uma pasta endurecida, constituída por cimento e finos naturais, aderida entre eles. Esta pasta cimentícia é a principal responsável pelas diferenças registadas entre os dois tipos de agregados mencionados, uma vez que apresenta reduzida massa volúmica e elevada porosidade.

Neste estudo, os AGRB foram obtidos através da demolição e posterior britagem de elementos de betão da indústria de pré-fabricação. Da britagem resultaram duas fracções granulométricas, 4 a 10 mm e 10 a 20 mm. Por análise granulométrica efectuada, concluiu-se que a primeira fracção se aproxima, quer na sua curva granulométrica quer no seu módulo de finura, da brita 1 e a segunda fracção da brita 2.

A massa volúmica dos AGRB é ligeiramente inferior à dos AGP, correspondendo a diferenças de 2,5 a 10% da massa volúmica dos AP. Por sua vez, a absorção de água dos AGRB é elevada (4,61%) quando comparada à dos AGP (1,41%). No entanto, quando estes valores são comparados aos obtidos nas demais investigações analisadas, verifica-se que a massa volúmica dos AGRB se situa acima da média e a absorção de água abaixo da mesma.

A elevada capacidade de absorção de água dos AR obriga a que se tenha cuidados especiais na formulação dos betões, sendo a compensação de água na amassadura uma das formas de compensar a perda de trabalhabilidade dos betões. O teor de humidade foi também calculado para que fosse possível prever esta quantidade de água a adicionar em cada amassadura. O seu valor variou em função do local de armazenamento dos agregados e das condições climáticas do local.

Tal como a massa volúmica, a baridade dos AGRB é inferior à dos AGP (redução na ordem de 10%). Porém, o volume de vazios é igual nos dois tipos de agregados. Com isto, conclui-se que a ocupação dos espaços dentro de

um recipiente é praticamente igual sendo a baridade inferior devido à menor massa volúmica da argamassa aderida aos AR.

Relativamente ao desgaste de *Los Angeles*, os valores máximos registados ocorreram nos AGRB. Assim, este tipo de agregados apresenta um desgaste superior ao dos AGP, o que era expectável devido à menor capacidade resistente da pasta de cimento. Tal está de acordo com o registado nas investigações de outros autores. No entanto, notou-se uma diferença dos valores entre as duas fracções granulométricas dos AGRB, sendo que a menor fracção obteve um desgaste semelhante ao da brita 2.

A última propriedade analisada dos agregados foi o índice de forma. Contrariamente às várias investigações consultadas, foram obtidos valores inferiores nos AGRB comparativamente aos homólogos naturais. Em termos médios, a diferença registada foi de cerca de 32%. Isto significa que os AR têm uma forma mais arredondada. Este facto pode ser justificado pelo processo de britagem, o qual foi semelhante nos dois tipos de agregados. Para o mesmo processo de britagem, as suas partículas dos AR tendem a ser mais arredondadas do que as dos AP.

Constatou-se, em geral, uma menor qualidade nos AGRB relativamente aos naturais (excepção do índice de forma). Porém, a diminuição das várias características analisadas foi inferior à que ocorreu em estudos semelhantes de outros autores. De facto, o índice de forma mais baixo aliado à rugosidade e porosidade dos AR (que contribuem para melhores ligações entre estes e a matriz cimentícia), pode contribuir para um aumento da resistência dos betões.

4.7.2. Propriedades do betão no estado fresco

Conseguiu-se manter a trabalhabilidade dentro do intervalo pretendido (125 ± 15 mm). Para tal, foi necessário compensar a maior capacidade de absorção de água por parte dos AGRB através de uma quantidade adicional de água na amassadura. Neste estudo, os AGR não tiveram influência na relação a/c efectiva dos betões. A capacidade redutora do SP fixou-se entre 21 e 26%, ou seja, existiu uma diminuição acentuada da relação a/c (de 0,52 para 0,41 / 0,39). Porém, não se obteve uma redução significativa da mesma para as várias percentagens de SP analisadas.

A massa volúmica dos BAGRB acompanhou a tendência verificada nas demais investigações analisadas no levantamento bibliográfico, sendo inversamente proporcional à taxa de substituição de AGP por AGR. As reduções máximas registadas foram de 3,5 e 4,2% (as quais são relativas a um betão com substituição integral dos agregados), respectivamente para a segunda e terceira fase da campanha experimental. A redução da relação a/c, originada pela introdução de SP no betão, provocou um aumento do volume de partículas sólidas (ocupando o espaço anteriormente ocupado pela água) e, conseqüentemente, a massa volúmica aumentou. Assim, nos betões com SP, a massa volúmica foi superior até 5,8% à massa volúmica de um betão análogo sem SP.

4.7.3. Propriedades mecânicas do betão no estado endurecido

As tensões de rotura à compressão mostraram-se idênticas entre os BAGRB e o BR (variações máximas em relação ao BR de -4,6 e +7,7%, de entre todos os períodos de cura analisados). Não foi, assim, possível estabelecer qualquer tipo de correlação entre esta propriedade e a percentagem de AGRB. Como esperado, as resistências dos betões com SP foram bastantes superiores às dos restantes, não sendo, no entanto, significativamente diferentes entre as várias percentagens de SP. A análise da evolução da resistência ao longo do tempo (terceira fase experimental) mostrou que o B100 e o B100SP1.0 estabilizaram os valores após 28 dias de cura, enquanto o BR e o B25 registaram ganhos de resistência entre os 28 e os 56 dias, perspectivando-se, deste modo, uma hidratação mais rápida dos betões com maior percentagem de AGR.

O ensaio de resistência à compressão permitiu definir as composições a analisar na terceira fase da campanha experimental. Optou-se pela taxa de 25% de AGRB (referente à composição B25) visto ser a máxima taxa permitida para betões estruturais, consoante a especificação LNEC E 471 (2009), e por não ter existido influência negativa por parte dos AR nesta propriedade. A percentagem escolhida de 1% de SP é a adoptada usualmente pela indústria do betão, e o betão relativo a esta percentagem foi o que atingiu o patamar de resistência aos 28 dias.

Tal como a resistência à compressão, a resistência à tracção foi semelhante entre os BAGRB e o seu homólogo natural, pelo que não se obteve nenhuma tendência desta propriedade com o aumento da taxa de substituição de AGP por AGRB. A utilização de SP provocou um aumento de desempenho relativamente a esta propriedade, originando um aumento de aproximadamente 39% relativamente ao BR e B100. De acordo com os resultados obtidos e com o reportado no capítulo 2, conclui-se que a resistência à tracção é afectada principalmente pela qualidade dos AGRB e não pela quantidade dos mesmos incorporada no betão.

Como seria expectável, visto ser uma propriedade comumente afectada pela incorporação de AR no betão, o módulo de elasticidade dos BAGRB foi inferior ao do BR, tendo-se registado reduções até aproximadamente 11% (tanto maiores quanto maior a taxa de substituição de AGP por AGRB). No entanto, esta diminuição do módulo de elasticidade ficou abaixo da encontrada por outros investigadores (reduções até aproximadamente 34% do módulo de elasticidade de um betão convencional), muito provavelmente como consequência da muito boa qualidade dos AR utilizados no presente estudo. O SP teve um efeito positivo nesta propriedade, aumentando a mesma em 9,2%, face ao BR, e 23,0%, relativamente ao B100. Deste modo, a utilização do SP atenuou por completo o efeito prejudicial dos AGRB no módulo de elasticidade.

Em relação à velocidade de propagação de ultra-sons, concluiu-se que esta propriedade mecânica decresce com a incorporação de AGRB, registando-se uma redução máxima de 6,2%. Neste sentido, foi possível estabelecer uma relação linear excelente entre esta propriedade e a taxa de substituição dos agregados. Com a introdução de SP, obteve-se um aumento da velocidade de ultra-sons em relação ao betão homólogo sem SP (B100), conseguindo-se compensar a perda de desempenho originada pelos AGRB (valor do B100SP1.0 foi idêntico ao BR).

A resistência à abrasão foi superior nos BAGRB. Este tipo de betão apresentou um desgaste cerca de 6% inferior ao do BR, independentemente da taxa de incorporação de AGR. Uma vez que o desgaste foi idêntico entre as várias percentagens de AGRB, não se conseguiu obter uma boa correlação entre as duas variáveis. A introdução de SP no fabrico do betão incrementou o desempenho do mesmo nesta propriedade. Os ganhos fixaram-se em 16,6 e 21,6%, relativamente ao BR e ao B100, respectivamente.

4.7.4. Propriedades de durabilidade do betão no estado endurecido

No que diz respeito ao desempenho em termos de durabilidade dos betões, existiram propriedades que foram significativamente afectadas pela utilização de AGRB e outras que não registaram nenhuma diminuição de desempenho. Ao nível da retracção, observou-se uma relação praticamente linear com a taxa de substituição de AGP por AGR, tendo-se registado incrementos até cerca de 16% em relação ao BR. Concluiu-se que este tipo de agregados possui uma influência distinta consoante a idade do betão: ao contrário do que sucedeu aos 91 dias, as deformações por retracção nos primeiros dias de idade foram inferiores nos BAGRB, o que se justifica pelo processo de cura interna desencadeado pelos AGR. A adição de SP resultou numa melhoria de desempenho de 28 e 38%, respectivamente face ao BR e B100, como consequência da menor quantidade de água disponível para evaporação.

Relativamente à absorção de água dos betões, tanto por imersão como por capilaridade, constatou-se que a inclusão de AGRB foi prejudicial no desempenho dos betões, o que está de acordo com todas as investigações reportadas (embora neste estudo a perda de desempenho tenha sido inferior, devido à boa qualidade dos AR). Deste modo, foi possível estabelecer regressões lineares com excelentes correlações, o que indica que esta propriedade é afectada pela quantidade de AGR utilizada. Verificaram-se aumentos até 27 e 42%, respectivamente para a absorção por imersão e por capilaridade. A introdução de SP foi mais eficaz no caso da absorção capilar, onde se obteve uma redução de 54% em relação a um betão homólogo sem SP, enquanto na absorção por imersão a diminuição se fixou em 24%. Em ambos os casos, o betão com SP apresentou menores absorções do que o BR. Em relação à absorção capilar, verificou-se que ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas de ensaio e que a evolução ao longo do tempo é semelhante nos BAGRB e no BR. Por fim, no que diz respeito a estas propriedades, obteve-se uma boa correlação entre as mesmas.

Contrariamente ao esperado, uma vez que são propriedades frequentemente afectadas pela incorporação de AGRB, não foram encontradas diferenças significativas nas resistências à carbonatação e penetração de cloretos entre os

BAGRB e o BR. Não foram encontradas justificações para este facto. No entanto esta situação poderá dever-se à boa qualidade dos AR, como se constatou nos ensaios efectuados aos mesmos. A excelente correlação obtida entre estas duas propriedades é indiciadora de que os resultados dos seus ensaios estão em concordância um com o outro. A utilização de SP permitiu obter reduções de cerca de 60 e 48% na profundidade de carbonatação e no coeficiente de difusão dos iões cloreto, respectivamente.

Dada a boa qualidade dos AGRB, a perda de desempenho dos BAGRB neste estudo foi, em geral, inferior à que ocorreu na maioria das investigações de outros autores analisadas. É possível concluir que os AGR provenientes de elementos de betão pré-fabricados são passíveis de serem utilizados no fabrico de novos betões (com taxas até 100%) face às suas propriedades mecânicas. Recomenda-se a taxa de 25% como limite apenas em relação aos dois tipos de absorção de água.

Conclui-se que a incorporação de um adjuvante na amassadura do betão é benéfica em relação a todas as propriedades analisadas. Existiu um aumento de desempenho, quer em termos mecânicos quer de durabilidade, conseguindo-se compensar, quando existiu, o efeito prejudicial provocado pelos AGRB. Deste modo, é de todo aconselhável a utilização de um SP em BAGRB, conseguindo-se óptimos desempenhos deste tipo de betões.

Obteve-se excelentes correlações entre a massa volúmica e várias das propriedades do betão no estado endurecido, tais como o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação de ultra-sons, a retracção e a absorção de água, tanto por imersão como por capilaridade. Deste modo, confirma-se que a massa volúmica é um bom parâmetro para avaliar a qualidade do betão.

4.7.5. Propriedades do betão em pórticos à escala real

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão, em provetes cúbicos e carotes, são considerados bastante verosímeis. Em ambos os ensaios, não existiu influência por parte dos AGRB, confirmando-se o inferido nos ensaios laboratoriais. A utilização de SP, como esperado, conduziu a uma melhoria significativa no desempenho do betão.

Relativamente à velocidade de propagação de ultra-sons das estruturas, observa-se uma perda de desempenho desta propriedade com o aumento da incorporação de AGRB, registando-se uma redução máxima de 5,4% (condizente com o obtido em laboratório). Neste sentido, foi possível estabelecer uma excelente relação linear entre esta propriedade e a taxa de substituição dos agregados. Verifica-se que a incorporação de SP resulta num aumento da velocidade de ultra-sons de 6 e 12% em relação ao BR e ao B100, respectivamente.

A dureza superficial foi superior nos pórticos compostos por BAGRB. Por outras palavras, este tipo de betão apresentou números de ressalto mais elevados do que os de um betão convencional (incrementos médios até cerca de 13%). Em geral, conseguiu-se obter boas correlações entre esta propriedade a taxa de incorporação de AGR. Porém, para o número de ressalto medido no sentido descendente (principalmente devido aos resultados da laje da estrutura B25), verificou-se um coeficiente de correlação insatisfatório. Tal poder-se-á dever à menor precisão dos resultados deste ensaio face aos restantes e à rugosidade das lajes, originando, assim, alguma variabilidade. O betão com SP registou números de ressalto superiores a todas as outras composições de betão analisadas.

A comparação entre os valores registados *in situ* e em laboratório demonstrou ser bastante conclusiva. Em todos os ensaios analisados, é possível retirar as seguintes ilações: os valores relativos aos betões *in situ* são inferiores aos obtidos nos betões formulados em laboratório e os AGRB possuem uma influência semelhante em ambos.

Obteve-se excelentes correlações (R^2 entre 0,983 e 0,997) entre os valores registados *in situ* e em laboratório. Deste modo, é passível concluir que os AGRB possuem, pelo menos ao nível das propriedades analisadas, uma influência idêntica no betão existente nas estruturas produzido *in situ* e no formulado em condições laboratoriais. Assim, verifica-se que os ensaios efectuados em laboratório possuem excelente qualidade para avaliar a diferença qualitativa entre BAGRB e um betão homólogo composto exclusivamente por AP.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. Considerações finais

Na Sociedade actual, é patente uma preocupação crescente com os resíduos originados pelas actividades exercidas nas várias indústrias. Destas, a da construção é maior responsável pela produção de resíduos a nível europeu (EEA, 2009). Deste modo, tem-se fomentando a nível mundial a adopção de novas práticas e processos por parte deste sector que minimizem os impactes negativos no meio ambiente.

Sendo o betão o material mais comumente utilizado na actividade construtiva, grande parte dos resíduos de construção e demolição (RCD) é constituída pelo mesmo. Uma das formas de aproveitamento dos resíduos de betão é a demolição e britagem dos seus elementos para posterior utilização como agregados no fabrico de novos betões. Desta forma, é possível reduzir em grande parte a quantidade de recursos naturais consumida para satisfazer as necessidades de produção de betão, assim como a quantidade de resíduos depositados em áreas de aterro.

Neste contexto, a investigação desenvolvida procurou, de acordo com os objectivos expostos na introdução, aprofundar o conhecimento das propriedades de agregados reciclados de betão (ARB) e de betões constituídos pelos mesmos. O estudo incidiu na fracção grossa destes agregados, com origem em elementos de betão originários da indústria de pré-fabricação. Sendo, em geral, o betão pré-fabricado de boa qualidade, é de todo vantajoso efectuar-se o aproveitamento do mesmo. Além disto, procurou-se estudar também a influência de um superplastificante (SP) num betão com substituição integral da fracção grossa dos agregados.

Assim, pretendeu-se demonstrar a aplicabilidade deste tipo de agregados no fabrico de novos betões e comprovar a possibilidade de utilização de quantidades dos mesmos superiores às estabelecidas nos diversos regulamentos existentes, quer em Portugal (LNEC E 471, 2009) quer a nível mundial (Gonçalves, 2007).

A presente dissertação encontrou-se inserida no âmbito do projecto ADIST AD0054 “*BARPINP - Utilização de resíduos de betão da indústria de pré-fabricação como agregados reciclados na execução de estruturas de betão*”. Este projecto implicou a escrita de, para além da dissertação, onze relatórios e oito artigos científicos:

- **Relatório:** “*Tarefa 0: Aquisição de elementos de betão provenientes da indústria de pré-fabricação*” – 1º autor (Soares et al., 2013a);
- **Relatório:** “*Tarefa 1.1: Estado-da-Arte: Betões com incorporação de agregados grossos reciclados*” - 1º autor (Soares et al., 2013b);
- **Relatório:** “*Tarefa 1.2: Planeamento dos ensaios dos agregados e betões*” - 1º autor (Soares et al., 2013c);
- **Relatório:** “*Tarefa 1.3: Apresentação dos resultados experimentais dos ensaios aos agregados*” - 1º autor (Soares et al., 2014a);
- **Relatório:** “*Tarefa 1.4: Apresentação dos resultados experimentais dos ensaios aos betões*” - 1º autor (Soares et al., 2014b);
- **Relatório:** “*Tarefa 1.5: Ensaio de caracterização in situ do betão em estruturas com incorporação de agregados reciclados*” - 1º autor (Soares et al., 2014c);
- **Relatório:** “*Tarefa 2.1: Projecto das Estruturas a Ensaiar*” - co-autor (Pacheco et al., 2013a);
- **Relatório:** “*Tarefa 2.2: Estado-da-Arte: Ensaio em estruturas com agregados grossos reciclados*”- co-autor (Pacheco et al., 2013b);
- **Relatório:** “*Tarefa 2.3: Ensaio dinâmico em estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados*” - co-autor (Pacheco et al., 2013c);
- **Relatório:** “*Tarefa 2.4: Ensaio de carga vertical de estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados*” - co-autor (Pacheco et al., 2014a);
- **Relatório:** “*Tarefa 2.5: Ensaio de carga horizontal destrutivo em estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados*” - co-autor (Pacheco et al., 2014b);

- **Artigo científico:** “*Use of coarse recycled aggregates from precast rejects: mechanical and durability performance*” - autor (Soares et al., 2014d);
- **Artigo científico:** “*In situ characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures*” - autor (Soares et al., 2014e);
- **Artigo científico:** “*Utilização de agregados grossos reciclados de resíduos da pré-fabricação. Parte I - programa experimental, apresentação e análise dos resultados dos ensaios aos agregados*” - autor (Soares et al., 2014f);
- **Artigo científico:** “*Utilização de agregados grossos reciclados de resíduos da pré-fabricação. Parte II - apresentação e análise dos resultados dos ensaios ao betão no estado fresco e endurecido*” - autor (Soares et al., 2014g);
- **Artigo científico:** “*Dynamic characterization of full-scale structures made with recycled coarse concrete aggregates*” - co-autor (Pacheco et al., 2014c);
- **Artigo científico:** “*Vertical load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures*” - co-autor (Pacheco et al., 2014d);
- **Artigo científico:** “*Destructive horizontal load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures*” - co-autor (Pacheco et al., 2014e);
- **Artigo científico:** “*Caracterização dinâmica de estruturas à escala real produzidas com agregados grossos reciclados de betão*” - co-autor (Pacheco et al., 2014f).

Neste capítulo final, evidenciam-se as principais conclusões relacionadas com os resultados obtidos através dos ensaios realizados.

5.2. Conclusões gerais

Foram realizados vários ensaios com o intuito de estudar agregados reciclados (AR) provenientes de elementos de betão armado produzidos pela indústria de pré-fabricação. Estes ensaios incidiram nas propriedades dos agregados, dos betões no estado fresco e endurecido (propriedades mecânicas e de durabilidade) a nível laboratorial e dos betões constituintes de estruturas executadas à escala real.

A reciclagem dos elementos de betão englobou dois processos distintos: a demolição dos elementos e a britagem dos resíduos originados na demolição. Comparando os dois processos, concluiu-se que a demolição é mais complicada e morosa do que a britagem, tendo representado cerca de 75% do tempo total de todas as actividades desenvolvidas para obter os AR. Da britagem resultaram ARB de diversas fracções granulométricas: areia fina, areia grossa, brita 4-10 mm e brita 10-20 mm. Destas fracções apenas se aproveitaram as duas últimas referidas no contexto desta investigação.

Relativamente aos agregados, foram efectuados os ensaios de massa volúmica e absorção de água, massa volúmica aparente, desgaste de *Los Angeles*, índice de forma, análise granulométrica e teor de humidade (os dois últimos realizados apenas para efeitos da formulação do betão). Verificou-se que os agregados grossos reciclados de betão (AGRB) possuem menor qualidade do que os agregados grossos naturais ou primários (AGP), o que se deve essencialmente à pasta de cimento existente nos primeiros. Esta pasta de cimento confere aos agregados uma elevada porosidade, originando decréscimos na massa volúmica e baridade e aumentos na absorção de água e desgaste de *Los Angeles*. Contudo, a perda de qualidade dos AR utilizados neste estudo em relação aos homólogos naturais foi inferior à registada no levantamento bibliográfico efectuado, estando-se assim na presença de agregados com características superiores aos utilizados noutras campanhas experimentais. Este facto é justificado pela elevada resistência à compressão dos betões reciclados (classes C35/40 e C40/50). Ao nível do índice de forma, os AR registaram valores ligeiramente inferiores aos agregados naturais ou primários (AP), resultado de um mesmo processo de britagem utilizado na produção dos dois tipos de agregados. Na Tabela 5.1, são apresentados resumidamente os resultados obtidos para as propriedades dos agregados.

No estado fresco, analisou-se o abaixamento e a massa volúmica dos vários betões em estudo. A trabalhabilidade foi um parâmetro fixado *a priori*, tendo-se restringido o abaixamento dos betões no intervalo de 125 ± 15 mm.

Todos os betões cumpriram este aspecto. Quanto à massa volúmica, a mesma decresceu de forma praticamente linear com a taxa de substituição de AGP por AGRB, devido à menor massa volúmica dos últimos, e aumentou com a utilização de SP, como consequência do maior volume de partículas sólidas presente neste tipo de betão originado pela redução da relação água / cimento (a/c). No entanto, este aumento não foi proporcional à percentagem de SP empregue, uma vez que as diferentes percentagens resultaram numa redução idêntica da relação a/c.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos nas propriedades dos agregados finos e grossos

Propriedade		Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRB 4-10	AGRB 10-20
Massa	Material impermeável	2537	2622	2708	2756	2717	2654	2665
volúmica	Seca	2511	2590	2634	2623	2621	2367	2370
(kg/m ³)	Saturada com superfície seca	2522	2602	2661	2671	2657	2475	2481
Baridade (kg/m ³)		1583	1536	1407	1434	1368	1285	1248
Absorção de água, 24h (%)		0,41	0,46	1,04	1,84	1,34	4,57	4,66
Desgaste de Los Angeles (%)		-	-	22,3	27,2	31,5	33,3	41,2
Índice de forma (%)		-	-	16,4	21,7	14,5	11,5	12,2

As propriedades mecânicas analisadas foram a resistência à compressão, a resistência à tracção, o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação de ultra-sons e a resistência à abrasão. O desempenho dos betões com incorporação de agregados grossos reciclados de betão (BAGRB) foi semelhante ao do betão de referência (BR), sendo que apenas no módulo de elasticidade (como consequência da deformabilidade superior dos AR face aos AP) e na velocidade de propagação de ultra-sons (originada pela maior porosidade da pasta cimentícia aderida aos AR), se registou um ligeiro decréscimo de desempenho. Ainda assim, este decréscimo foi inferior ao ocorrido em investigações de outros autores no mesmo âmbito, confirmando-se a boa qualidade dos agregados utilizados neste estudo. A resistência a abrasão foi influenciada positivamente pela introdução de AGRB no betão. Desta forma, é possível a incorporação de AGRB no fabrico de novos betões sem consequências maiores em relação às propriedades mecânicas analisadas.

Em relação às propriedades de durabilidade do betão, analisou-se a retracção, a absorção de água por imersão e por capilaridade, a resistência à carbonatação e a resistência à penetração de cloretos. Face ao reportado no capítulo referente ao estado da arte, eram esperadas diminuições substanciais nas várias propriedades. Porém, tal só se verificou na retracção (e de forma menos acentuada) e na absorção de água por imersão e por capilaridade, nas quais se observou um aumento praticamente proporcional ao teor de AGRB. Mais uma vez, obteve-se decréscimos de desempenho inferiores à maior parte das demais investigações analisadas. A resistência à carbonatação e a resistência à penetração de cloretos mostraram-se insensíveis à incorporação de AGRB.

A caracterização do betão *in situ* nas quatro estruturas executadas à escala real seguiu as tendências registadas em laboratório. Por outras palavras, não se obteve influência na resistência à compressão dos betões por parte dos AGRB (tanto nos ensaios realizados em provetes cúbicos como em carotes) e a velocidade de propagação de ultra-sons diminuiu linearmente com a taxa de substituição da fracção grossa dos agregados. Por comparação com os resultados laboratoriais, verificou-se, como expectável, que os resultados obtidos *in situ* são inferiores aos primeiros. Em relação à dureza superficial, foram obtidos números de ressalto superiores nos BAGRB, registando-se boas correlações entre esta propriedade e a taxa de incorporação de AGRB.

O desempenho muito semelhante entre os BAGRB e o BR nas várias propriedades referidas deve-se principalmente à boa qualidade dos AGRB utilizados nesta investigação. Ainda assim, existem outros factores que podem influenciar positivamente o desempenho dos BAGRB tais como a forma dos AR e a sua aderência à pasta de cimento. Relativamente ao primeiro, constatou-se, pelos ensaios dos agregados, que o índice de forma é semelhante nos AGP e AGRB utilizados neste estudo, pelo que a relação a/c efectiva não foi alterada nos betões constituídos por agregados reciclados (BAR). Quanto ao segundo factor, alguns autores referem (consoante reportado no capítulo 2) que a textura rugosa dos AGRB, aliada à sua elevada porosidade, pode proporcionar a formação de maior quantidade de produtos de hidratação nos poros dos agregados, melhorando consequentemente a ligação

agregado / pasta cimentícia.

Um dos objectivos do emprego de SP no betão é a redução da água de amassadura mantendo-se a mesma trabalhabilidade, o que, para a mesma dosagem de cimento, reduz a relação a/c e aumenta a proporção de agregados existente nas misturas. Desta forma, o desempenho dos betões com este tipo de adjuvante é incrementado. Tal foi verificado em todas as propriedades analisadas, tanto em laboratório como *in situ*.

O propósito da utilização de SP, num betão com substituição integral de AGP por AGRB, foi mitigar o efeito destes últimos. Como na maioria das propriedades não se constatou uma influência negativa por parte dos AR, o betão B100SP1.0 registou elevados desempenhos, sempre superiores aos do BR.

Em forma de resumo, apresenta-se nas Tabela 5.2 e 5.3, os resultados obtidos e as variações registadas dos betões face ao BR para todas as propriedades analisadas em laboratório (terceira fase experimental) e *in situ*, respectivamente. Encontra-se também nas tabelas o coeficiente de correlação obtido entre as propriedades e a taxa de substituição de AGP por AGRB.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos nas diversas propriedades dos betões analisados em laboratório

Variável	BR	B25	B100	R ²	B100SP1.0
Massa volúmica (kg/m ³)	2377	2344 (-1,4%)	2278 (-4,2%)	0,98	2410 (3,1%)
Resistência à compressão, 28 dias (MPa)	43,1	44,6 (3,5%)	46,4 (7,7%)	-	71,2 (65,3%)
Resistência à tracção (MPa)	3,1	2,9 (-4,2%)	3,1 (0,0%)	0,07	4,3 (39,0%)
Módulo de elasticidade (GPa)	36,2	34,1 (-5,9%)	32,1 (-11,3%)	0,91	39,5 (9,2%)
Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)	4,71	4,65 (-1,4%)	4,42 (-6,2%)	0,99	4,70 (-0,3%)
Desgaste por abrasão (mm)*	4,21	3,94 (-6,5%)	3,96 (-5,9%)	0,40	3,30 (-21,6%)
Deformação por retracção, 91 dias (µm/m)*	-485	-493 (1,5%)	-561 (15,7%)	0,94	-350 (-27,5%)
Absorção de água por imersão (%)*	14,2	15,5 (9,1%)	18,0 (26,9%)	0,99	13,7 (-3,4%)
Absorção de água por capilaridade, 72 horas (x10 ⁻³ g/mm ²)*	5,51	6,11 (10,9%)	7,81 (41,8%)	0,99	3,58 (-34,9%)
Profundidade de carbonatação, 91 dias (mm)*	10,4	11,2 (7,4%)	10,6 (1,7%)	0,00	4,2 (-59,6%)
Coefficiente de difusão de cloretos, 91 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)*	14,1	15,1 (7,1%)	13,7 (-2,6%)	0,26	7,3 (-48,3%)

* Nestas propriedades, um sinal negativo na variação representa um ganho de qualidade.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos nas diversas propriedades dos betões analisados *in situ*

Variável	BR	B25	B100	R ²	B100SP1.0	
Resistência à compressão em provetes cúbicos, 28 dias (MPa)	31,3	28,8 (-7,9%)	32,5 (4,2%)	-	57,9 (85,1%)	
Resistência à compressão em carotes (MPa)	29,7	28,5 (-3,9%)	31,4 (5,8%)	-	54,8 (84,4%)	
Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)	4,13	4,06 (-1,8%)	3,90 (-5,4%)	0,99	4,38 (6,0%)	
Número de Ressalto	Modo horizontal	30	33 (8,3%)	34 (13,3%)	0,83	42 (40,0%)
	Modo descendente	24	22,5 (-6,3%)	25 (4,2%)	0,40	37 (54,2%)

Por último, são apresentadas as seguintes conclusões gerais, delineadas com base nos resultados da campanha experimental efectuada:

- os agregados provenientes dos resíduos gerados pela indústria de pré-fabricação são de excelente qualidade, sendo o seu desempenho em termos das suas várias propriedades superior a grande parte das investigações reportadas;
- em face disto, as tendências normais de desempenho mecânico e de durabilidade por parte de BAR face a um betão convencional anularam-se ou foram atenuadas, mantendo, no entanto, o seu sentido habitual;
- é possível concluir que os AGR provenientes de elementos de betão pré-fabricados são passíveis de serem utilizados no fabrico de novos betões (com taxas até 100%) face à maioria das suas propriedades; recomenda-se a taxa de 25% como limite apenas em relação aos dois tipos de absorção de água;
- deste modo, pode-se afirmar que poderia existir um aumento dos valores referentes em regulamentos de vários países como taxas limite de incorporação deste tipo de agregados, desde que comprovada a sua qualidade (como é o caso dos elementos pré-fabricados);
- a incorporação de um adjuvante na amassadura do betão é benéfica em relação a todas as propriedades analisadas; ocorreu um aumento de desempenho, quer em termos mecânicos quer de durabilidade,

conseguindo-se compensar, quando existiu, o efeito prejudicial provocado pelos AGRB; assim, é de todo aconselhável a utilização de um SP em BAGRB, conseguindo-se óptimos desempenhos deste tipo de betões;

- assim, os AGR gerados a partir de elementos pré-fabricados abrem novas perspectivas para a utilização de agregados reciclados em betões, tornando ainda possível, através da utilização de um SP na formulação do betão, a produção de betões de elevado desempenho.

5.3. Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho de investigação permitiu obter um conhecimento mais profundo e clarificar algumas das ideias previamente estabelecidas relativamente às propriedades dos AGRB e dos BAGRB. No entanto, este estudo deverá ser continuado com novas investigações neste âmbito, de modo a incentivar e a aumentar a prática de reciclagem de RCD. A principal lacuna ao nível de informação prende-se com os ensaios em estruturas à escala real, pelo que o projecto no qual se inseriu esta dissertação foi pioneiro em relação a esse aspecto.

Neste sentido, são apresentadas as seguintes propostas de futuros desenvolvimentos deste tema:

- influência da incorporação de AGR provenientes de elementos de betão pré-fabricados em betões auto-compactáveis;
- análise de várias fontes de AGRB e de diferentes processos de britagem no que diz respeito às propriedades dos agregados (com especial atenção no índice de forma) e às propriedades dos BAGRB;
- influência do SP no desempenho de BAR com incorporação simultânea de agregados finos reciclados de betão (AFRB) e AGRB;
- avaliação da utilização de várias percentagens de SP em betões com agregados grossos reciclados e em betões com agregados finos reciclados com incorporação de agregados provenientes de diferentes origens: betão leve, materiais cerâmicos, borracha, vidro, entre outros;
- estudo da viabilidade económica da utilização simultânea de AGRB e SP;
- realização de ensaios em estruturas à escala real constituídas por BAGRB com diferentes composições e com agregados provenientes de outros betões de origem;
- realização de ensaios em estruturas de betão à escala real com incorporação simultânea de AFRB e AGRB;
- realização de ensaios em estruturas de betão à escala real com agregados grossos reciclados provenientes de diferentes origens: betão leve, materiais cerâmicos, borracha, vidro, entre outros;
- realização de ensaios em estruturas de betão à escala real com agregados finos reciclados provenientes de diferentes origens: betão, betão leve, materiais cerâmicos, borracha, vidro, entre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accuweather (2014)** - página da internet: <http://www.accuweather.com>, visitada em 03/04/2014.
- Al Mufti, R.; Fried, A.N. (2012)** - *The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, Vol. 37, pp. 379-386.
- Altheman, D. (2002)** - *Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil*. Relatório Final das Actividades de Iniciação Científica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Alves, F. (2007)** - *Betões com agregados reciclados - Levantamento do "state-of-the-art" experimental nacional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Angulo, S. (2005)** - *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Amorim, P. (2008)** - *Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Akroyd, T. (1962)** - *Concrete: Properties and manufacture*. Pergamon Press, Londres, 336 p.
- Barra, M. (1996)** - *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona.
- Bazuco, R.S. (1999)** - *Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Brito, J. (2005)** - *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de síntese para provas de agregação, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Bungey, J.H.; Millard, S.G.; Grantham, M.G. (2006)** - *Testing of concrete in structures*. 4th edition, Taylor and Francis, Londres, 353 p.
- Cartuxo, F. (2013)** - *Betões com agregados finos provenientes da trituração de betão: Influência dos plastificantes no desempenho em termos de durabilidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Concrete Society (1976)** - *Concrete core testing for strength*. Technical Report No.11, The Concrete Society, Londres.
- Corinaldesi, V. (2010)** - *Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates*. Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 9, pp. 1616-1620.
- Costa, A.; Appleton, J. (2002)** - *Parte II - Materiais*. Cadeira de Estruturas de Betão I, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Coutinho, A. (1988)** - *Fabrico e propriedades do betão - Volume I e II*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Coutinho, A.; Gonçalves A. (1994)** - *Fabrico e propriedades do betão - Volume III*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Coutinho, J.S. (2002)** - *Ciência de materiais - 1ª Parte*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- Dessy, P.; Badalucco, C.; bignami, F.C. (1998)** - *Analysis of performances of concrete components made with recycled aggregates*. Materials and technologies for sustainable construction – cib world building congress, Suécia, Vol. 1, pp. 149-156.
- Di Niro, G.; Dolara, E.; Cairns, R. (1998)** - *Properties of hardened concrete RAC for structural purposes in sustainable construction: Use of recycled concrete aggregates*. ThomasTelford Pub., Londres, pp. 117-187.
- EEA: European Environment Agency (2009)** - *EU as a recycling society: Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU*. ETC/SCP working paper, Dinamarca, 73 p.
- EEA: European Environment Agency (2011)** - *Europe as a recycling society: European Recycling Policies in relation to the actual recycling achieved*. ETC/SCP working paper, Dinamarca k, 25 p.
- Ergün, A.; Kürklü, G. (2012)** - *Assessing the relationship between the compressive strength of concrete cores and molded specimens*. Gazi University Journal of Science, Vol. 25, No. 3, pp. 737-750.
- Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Mari, A.; Barra, M. (2007)** - *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 37, No. 5, pp. 735-742.
- Ferreira, L. (2007)** - *Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ferreira, R. M. (2000)** - *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*. Trabalho Final de Curso, Universidade do Minho, Guimarães.
- Fonseca, N. (2009)** - *Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão - Influência das condições de cura*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Gerardu J.J.A.; Hendriks C.F. (1985)** - *Recycling of road pavement materials in the Netherlands*. Rijkswaterstaat communications, The Hague, No. 38, Holanda.
- 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. V. (2001)** - *Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate*. ACI 5th International Conference, Cancun, 21 p.
- Gonçalves, A.; Esteves, A.; Vieira A.; (2004)** - *Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability*. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, pp. 554-562.
- Gonçalves, A. (2005)** - *Overview regarding construction and demolition waste in Portugal*. Use of Recycled Materials, Rilem TC 198-URM: Final Report, pp. 23-24.
- Gonçalves, P. (2007)** - *Betão com agregados reciclados: Análise comentada da legislação existente*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Hamada, M. (1968)** - *Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel*. International Symposium on Chemistry of Cement, 5 Proceedings II-3, pp. 343-382.
- Hansen, T.C. (1992)** - *Recycling of demolished concrete and masonry. Part one: recycled aggregates and recycled aggregate concrete*. RILEM Report 6, E&FN Spon, Londres, pp. 1-139.
- Hansen, T.C.; Narud, H. (1983)** - *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*. Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83.

IST (2014) - página da internet: <http://meteo.ist.utl.pt>, visitada em 27/02/2014.

Juan, M.S.; Gutiérrez, P.A. (2009) - *Study on the influence of attached mortar content on properties of recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 2, pp. 872-877.

Júlio, E; Fernandes, P; Veludo, J.P. (2004) - *Observação de estruturas de betão de elevados desempenhos através de ensaios in situ não destrutivos*. Encontro Nacional de Betão Estrutural 2004, Porto, pp. 1-8.

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, Thomas Telford Pub., Londres, pp. 55-68.

Konin, A. (2012) - *Mechanical and abrasion resistance of recycled aggregates concrete in relation to the cement content*. Modern Applied Science, Vol. 6, No. 1, pp. 88-96.

Kou, S.C.; Poon, C.S. (2012) - *Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate*. Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 69-76.

Kou, S.C.; Poon, C.S.; Wan, H.W. (2012) - *Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregate*. Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 881-889.

Larrañaga, M.E. (2004) - *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete*. Tese de Doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona.

Leite, M.B. (2001) - *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Levy, S.M. (1997) - *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Levy, S.M. (2001) - *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Limbachiya, M.C.; Dhir, R.K.; Leelawat, T. (2000) - *Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete*. Materials and Structures, Vol. 33, No. 9, pp. 574-580.

Malesev, M.; Radonjanin, V.; Marinkovic, S. (2010) - *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production*. Sustainability, Vol. 2, No. 5, pp. 1204-1225.

Mália, M. (2010) - *Indicadores de resíduos de construção e demolição*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Mansur, M.A.; Wee, T.H.; Cheran, L.S. (1999) - *Crushed bricks as coarse aggregate for concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 04, pp. 478-484.

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.

Nepomuceno, M. (1999a) - *Estudo da composição de betões*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Aula teórico-prática, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Nepomuceno, M. (1999b) - *Ensaios não destrutivos em betão*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Trabalho de síntese, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

- Oikonomou, N.D. (2005)** - *Recycled concrete aggregates*. Cement & Concrete Composites, Vol. 27, No. 2, pp. 315-318.
- Olorunsogo, F.T.; Padayachee, N. (2002)** - *Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*. Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 2, pp. 179-185.
- Pacheco, J.; Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013a)** - *Tarefa 2.1: Projecto das Estruturas a Ensaia*r. Relatório ICIST DTC 10/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Pacheco, J.; Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013b)** - *Tarefa 2.2: Estado-da-Arte: Ensaio*s em estruturas com agregados grossos reciclados. Relatório ICIST DTC 47/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Pacheco, J.; Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013c)** - *Tarefa 2.3: Ensaio*s dinâmicos em estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados. Relatório ICIST DTC 58/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Pacheco, J.; Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J. (2014a)** - *Tarefa 2.4: Ensaio*s de carga vertical de estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados. Relatório ICIST DTC 13/14 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Pacheco, J.; Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J. (2014b)** - *Tarefa 2.5: Ensaio*s de carga horizontal destrutivos em estruturas de betão com incorporação de agregados reciclados. Relatório ICIST DTC 14/14 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J.; Soares, D. (2014c)** - *Dynamic characterization of full-scale structures made with recycled coarse concrete aggregates*. Engineering Structures, submetido para publicação.
- Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J.; Soares, D. (2014d)** - *Vertical load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures*. Journal of Materials in Civil Engineering, submetido para publicação.
- Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J.; Soares, D. (2014e)** - *Destructive horizontal load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures*. ACI Materials Journal, submetido para publicação.
- Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J.; Soares, D. (2014f)** - *Caracterização dinâmica de estruturas à escala real produzidas com agregados grossos reciclados de betão*. Mecânica Experimental, submetido para publicação.
- Pereira, P. (2010)** - *Betões estruturais com incorporação de agregados finos reciclados de betão: Influência de superplastificantes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Petersons, N. (1964)** - *Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures?* Materials and Structures: Research and Testing, Vol. 1, No. 5, pp. 425-435.
- Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. (2004a)** - *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*. Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 6, pp. 461-468.
- Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L.; Fok, H.; Kou, S.C. (2004b)** - *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 1, pp. 31-36.
- Rao, M.C.; Bhattacharyya, S.K.; Barai, S.V. (2011)** - *Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete*. Materials and Structures, Vol. 44, No. 1, pp. 205-220.
- Rashwan, M.S.; Abourik, S. (1997)** - *The properties of recycled aggregate concrete*. Concrete International, Vol. 19, No. 7, pp. 56-60.

- Ravindrajah, R.; Loo, Y.H.; Tam, C.T. (1988)** - *Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests*. Materials and Structures, Vol. 21, No. 4, pp. 298-295.
- Ravindrajah, R.; Steward, M.; Greco, D. (2000)** - *Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties. A case study in Australia*. International Workshop on Recycled Concrete, University of Technology, Austrália.
- Robles, R. (2007)** - *Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados: levantamento do “state of the art” experimental internacional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rocha, B.; Resende, C., (2004)** - *Propriedades de betões fabricados com agregados reciclados*, Trabalho Final de Curso, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Sagoe-Crentsil, K.K.; Brown, T.; Taylor, A.H. (2001)** - *Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate*. Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 5, pp. 707-712.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013a)** - *Tarefa 0: Aquisição de elementos de betão provenientes da indústria de pré-fabricação*. Relatório ICIST DTC 09/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013b)** - *Tarefa 1.1: Estado-da-Arte: Betões com incorporação de agregados grossos reciclados*. Relatório ICIST DTC 46/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2013c)** - *Tarefa 1.2: Planeamento dos ensaios dos agregados e betões*. Relatório ICIST DTC 57/13 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2014a)** - *Tarefa 1.3: Apresentação dos resultados experimentais dos ensaios aos agregados*. Relatório ICIST DTC 07/14 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2014b)** - *Tarefa 1.4: Apresentação dos resultados experimentais dos ensaios aos betões*. Relatório ICIST DTC 12/14 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Pacheco, J.; Brito, J.; Ferreira, J. (2014c)** - *Tarefa 1.5: Ensaios de caracterização in situ do betão em estruturas com incorporação de agregados reciclados*. Relatório ICIST DTC 16/14 integrado no Projecto IDI - Parque Escolar “Utilização de Resíduos de Betão da Indústria de Pré-Fabricação com Agregados Reciclados”, Lisboa.
- Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J.; Pacheco, J. (2014d)** - *Use of coarse recycled aggregates from precast rejects: mechanical and durability performance*. Construction and Building Materials, submetido para publicação.
- Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J.; Pacheco, J. (2014e)** - *In situ characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures*. Construction and Building Materials, submetido para publicação.
- Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J.; Pacheco, J. (2014f)** - *Utilização de agregados grossos reciclados de resíduos da pré-fabricação. Parte I - programa experimental, apresentação e análise dos resultados dos ensaios aos agregados*. Betão, submetido para publicação.
- Soares, D.; Brito, J.; Ferreira, J.; Pacheco, J. (2014g)** - *Utilização de agregados grossos reciclados de resíduos da pré-fabricação. Parte II - apresentação e análise dos resultados dos ensaios ao betão no estado fresco e endurecido*. Betão, submetido para publicação.
- Tabsh, S.W.; Abdelfatah, A.S. (2009)** - *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 2, pp. 1163-1167.

Tam, C.T. (1977) - *Non-destructive testing of concrete - limitation and usefulness*. 2nd Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapura, pp. 29-43.

Tuncan, M.; Arioz, O.; Raymar, K.; Karasu, B. (2008) - *Assessing concrete strength by means of small diameter cores*. Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 5, pp. 981-988.

UEPG: European Aggregates Industry in Brussels (2013) - *European Aggregates Association: A sustainable industry for a sustainable Europe*. Annual review 2012-2013, Bélgica, 38 p.

Vázquez, E. (2005) - *Overview regarding construction and demolition waste in Spain*. Use of Recycled Materials, Rilem TC 198-URM: Final Report, pp. 24-25.

Wirquin, E. ; Hahdjeva-Zahaarieva, R.; Buyle-Bodin F. (2000) - *Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés*. Materials and Structures/ matériaux et Constructions, Vol. 33, pp. 403-408.

Xiao, J.; Li, W.; Fan, Y.; Huangm, X. (2012) - *An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)*, Construction & Building Materials, Vol. 31, No. 1, pp. 364-373.

Yi, S.; Yang, E.; Choi, J. (2006) - *Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 236, No. 2, pp. 115-127.

Yong, P.C.; Teo, D.C. (2009) - *Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete*. E-Journal of Civil Engineering, Vol. 1, No.1, pp. 1-6.

Zagurskij, V.A.; Zhadanovskij, B.V. (1985) - *Breaking reinforced concrete and recycled crushed materials*. Special Technical Report, Research Institute for Concrete (GISSTROY), Moscovo.

Regulamentação:

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

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

DIN 52108 (2007) - *Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme*. DIN, Berlin.

LNEC E 237 (1970) - *Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*, LNEC, Lisboa.

LNEC E 391 (1993) - *Betões: determinação da resistência à carbonatação*. LNEC, Lisboa.

LNEC E 393 (1993) - *Betões: determinação da absorção da água por capilaridade*. LNEC, Lisboa.

LNEC E 394 (1993) - *Betões: determinação da absorção da água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*. LNEC, Lisboa.

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

LNEC E 398 (1993) - *Betões: determinação da retracção e da expansão*. LNEC, Lisboa.

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

LNEC E 464 (2007) - *Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*. LNEC, Lisboa.

LNEC E 471 (2009) - *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. LNEC, Lisboa.

NP EN 206-1 (2007) - *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.* IPQ, Lisboa.

NP EN 934-2 (2009) - *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem.* IPQ, Lisboa.

NP EN 933-1 (2000) - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: análise granulométrica. Método de peneiração.* IPQ, Lisboa.

NP EN 933-2 (1999) - *Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.* IPQ, Lisboa.

NP EN 933-4 (2002) - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma,* IPQ, Lisboa.

NP EN 1097-3 (2002) - *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da baridade e do volume de vazios.* IPQ, Lisboa.

NP EN 1097-5 (2011) - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada.* IPQ, Lisboa.

NP EN 1097-6 (2003) - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.* IPQ, Lisboa.

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

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

NP EN 12390-1 (2012) - *Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes.* IPQ, Lisboa.

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

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

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

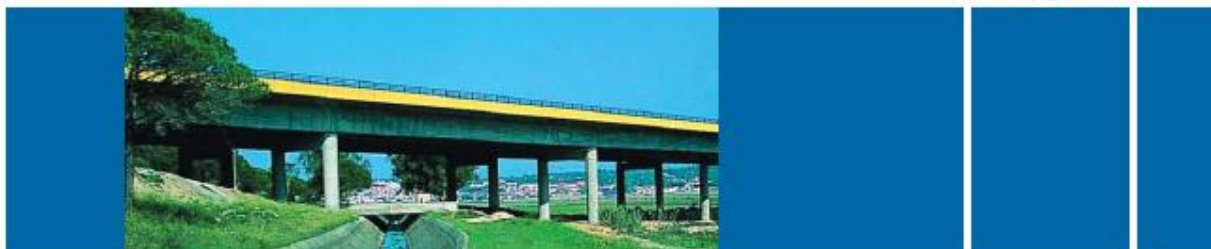
NP EN 12504-2 (2012) - *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico.* IPQ, Lisboa.

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

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% Clinker Portland 0% a 5% Outros Constituintes
Principais Aplicações	<p>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.</p> <p>As principais aplicações deste cimento são:</p> <ul style="list-style-type: none">- 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 préesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;- caldas de selagem e injeção.		
Principais Características	<p>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).</p>		
Advertências Específicas	<p>O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.</p> <ul style="list-style-type: none">- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente. <p>Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.</p> <p>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.</p>		
Informação de Segurança	<p>O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.</p> <p>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.</p> <p>Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.</p>		
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 ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

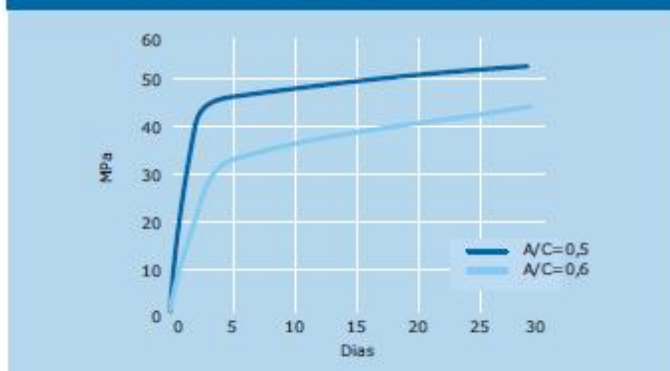
Características Mecânicas

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

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/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6ª
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
Site - www.secil.pt

ANEXO B - FICHAS TÉCNICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

Areia fina



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto: Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

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

¹⁾ Valores em percentagem de passados

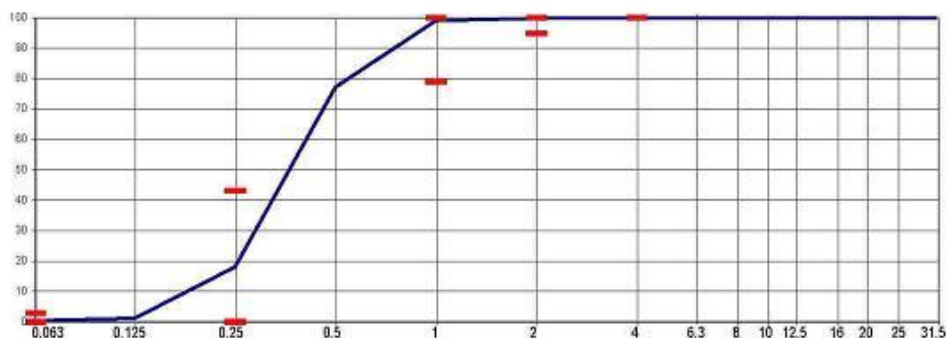
Controlo da produção

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 (d/D)	0/2	
Granulometria	G ₇₅	G ₇₅ -G ₁₂₅
Massa Volumica:		
-- Material impermeável	2,63 Mg/m ³	
-- Partículas secas em estufa	2,62 Mg/m ³	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
Absorção de água	0,2%	
Teor de finos	f ₃	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,8}	
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 alcali-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

NA-Não aplicável DND- Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

F 06.01 - 16/09/2005

Areia grossa



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:	Areia Lavada 0/4- P. Conde Cunha 4	Origem:	Pinhal Conde Cunha 4 - Seixal
Aplicação:	Betão (NP EN 12620) e Misturas betuminosas (NP EN 13043)		
Tipo:	Quartzo, quartzito, feldspato (partículas subangulosas a subarredondadas)		

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

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

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

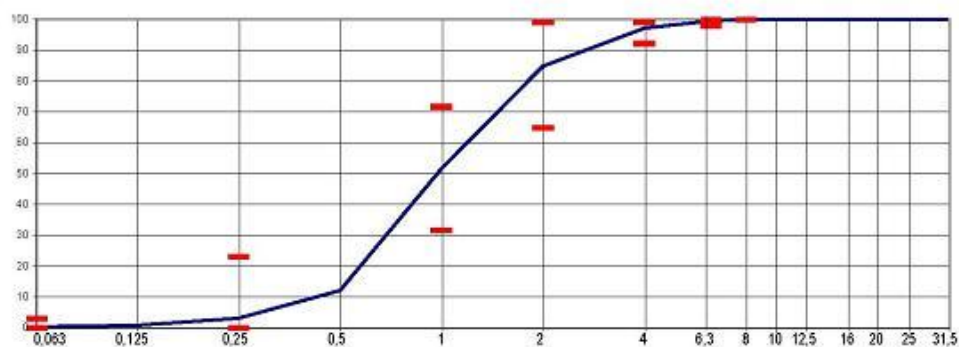
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,49	2,99	3,99
CF	3,81	3,31	4,31

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/4	
Granulometria	G ₈₅	G ₉₀ -G _{T020}
Massa Volúmica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m ³	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f ₃	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS ₀₂	
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 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:

F 06.01 - 16/09/2005

Bago de arroz

FP 120896-AGCA 2012-04-20

Pedreira de Origem: **Calhariz, Sesimbra**
Nome Comercial: **Bago de Arroz**



0866
Agrepur Agregados Extração de Inertes, S.A.
Rua Alexandre Herculano nº35 | 1250-009 Lisboa
04
0866 – CPD – 2004/CE.020

APLICAÇÃO

Agregados para betão;
Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

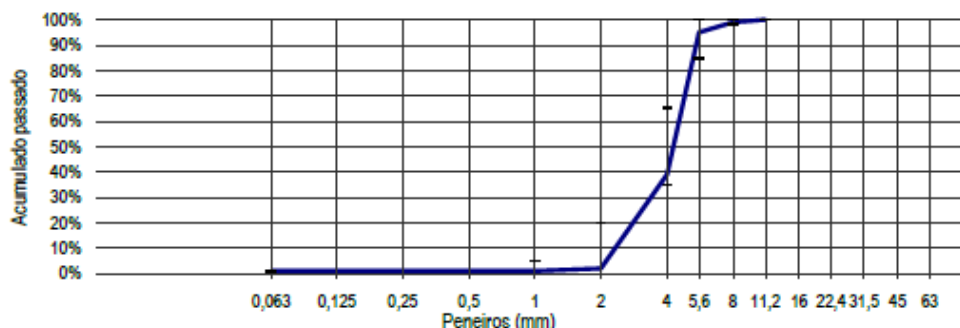
Designação de acordo com a EN 12620:2002 + A1:2008: 2/5

Designação de acordo com a EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004: 2/5

Propriedade	Método de ensaio	Valor	Notas (Norma de referência)
Descrição petrográfica	NP EN 932-3	Estrutura – Estratificada Superfície – Áspera Porosidade – Média a Baixa Rocha sedimentar quimiogénica - Calcário	—
Dimensão dos agregados	NP EN 933-1	2/5	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Categoria e tolerâncias nos peneiros intermédios		G ₀ 85/20	EN 12620:2002 + A1:2008
Teor de finos		G ₀ 85/20 G ₂₅ /15	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
		f _{1,5}	EN 12620:2002 + A1:2008
Absorção de água	NP EN 1097-6	0,7% - 1,4%	EN 12620:2002 + A1:2008
Massa volúmica (I/Se/Sa) (±0,05)		2,71/2,64/2,66Mg/m ₃	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Índice de Achatamento	NP EN 933-3	FI ₂₀	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Reatividade Alcalis Sílica ⁽¹⁾	ASTM C1260	Classe I	EN 12620:2002 + A1:2008
Retração por secagem ⁽¹⁾	EN 1367-4	0,042%	
Teor de Húmus ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	Isento	
Teor total de Enxofre ⁽¹⁾		0,18%	
Cloretos solúveis ⁽¹⁾		0,00%	

⁽¹⁾ Por extrapolação de resultados de outro agregado

GRANULOMETRIA DECLARADA



AGREPUR AGREGADOS- Extração de Inertes, S.A.
Centro de Exploração de Sesimbra | Pedreira de Calhariz - Santana
2970 – 578 Sesimbra | Tel 212888260 | Fax 212888269
Agrepur.calhariz@cimpor.com | www.cimpor-portugal.pt
NIPC 501755098



Brita 1

FP SZ 120901-AGS1 2012-04-04

Pedreira de Origem: **Sanchez, SA, Sesimbra**
Nome Comercial: **Brita 1**



0866
Sanchez, S.A.
Santana, 2979-908 Sesimbra
06
0866 - CPD - 2006/CE.0053

APLICAÇÃO

Agregados para betão;

Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

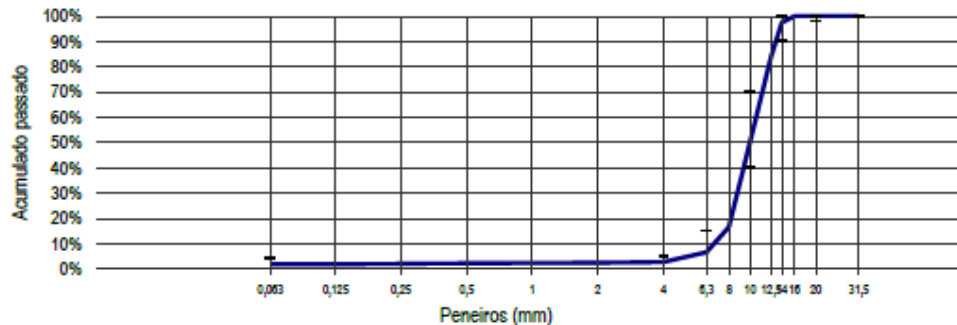
Designação de acordo com a EN 12620:2002 + A1:2008: 6/14

Designação de acordo com a EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004: 6/14

Propriedade	Método de ensaio	Valor	Notas (Norma de referência)
Descrição petrográfica	NP EN 932-3	Estrutura – Compacta Superfície – Compacta Porosidade – Média a Baixa Rocha sedimentar carbonatada - Calcário	—
Dimensão dos agregados	NP EN 933-1	6/14	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Categoria e tolerâncias nos peneiros intermédios		G _C 90/15 G _T 15	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Teor de finos		G _C 90/15 G _{25/15}	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Absorção de água	NP EN 1097-6	f ₄	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Massa volúmica (I/Se/Sa) (±0,07)		0,9% - 1,9%	
Equivalente de areia	NP EN 933-8	2,77/2,69/2,70Mg/m ₃	
Resistência à fragmentação ⁽²⁾	NP EN 1097-2	SE≥40	
Reactividade Alcalis Sílica ⁽¹⁾	ASTM C1260-1	LA ₃₀	
Retração por secagem ⁽¹⁾	EN 1367-4	Classe I	
Teor de Húmus ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	0,025%	
Teor total de Enxofre ⁽¹⁾		Isento	
Cloretos solúveis ⁽¹⁾		≤0,03%	
		≤0,02%	

⁽²⁾ Cálculo da Média dos ensaios

GRANULOMETRIA DECLARADA



Sanchez, S.A. Serra da Achada Apartado 1010 Santana
12970 908 Sesimbra | Tel 212681380 | Fax 212681763
Sanchez@cimpor.com | www.cimpor-portugal.pt
NIPC 501237283

Brita 2

FP 120911-AGS1 2012-04-04

Pedreira de Origem: **Sanchez, SA, Sesimbra**
Nome Comercial: **Brita 2**



0866
Sanchez, S.A.
Santana, 2979-908 Sesimbra
08
0866 - CPD - 2009/CE.0053

APLICAÇÃO

Agregados para betão;
Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

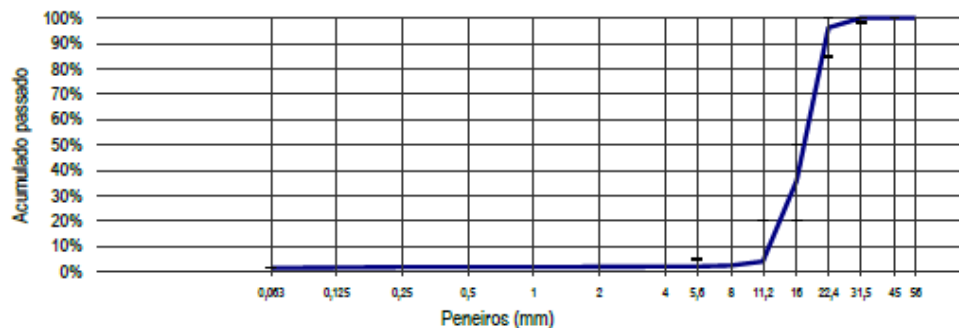
Designação de acordo com a EN 12620:2002 + A1:2008: 11/22
Designação de acordo com a EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004: 11/22

Propriedade	Método de ensaio	Valor	Notas (Norma de referência)
Descrição petrográfica	NP EN 932-3	Estrutura – Compacta Superfície – Compacta Porosidade – Média a Baixa Rocha sedimentar carbonatada - Calcário	—
Dimensão dos agregados	NP EN 933-1	11/22	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Categoria e tolerâncias nos peneiros intermédios		G _C 85/20	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Teor de finos		f _{1,5}	EN 12620:2002 + A1:2008
		f ₂	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Absorção de água	NP EN 1097-6	0,5% - 1,5%	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Massa volúmica (I/Se/Sa) (±0,05)		2,70/2,66/2,64Mg/m ₃	
Reactividade Alcalis Silica ⁽¹⁾	ASTM C1260-1	Classe I	
Resistência à fragmentação ⁽¹⁻²⁾	NP EN 1097-2	LA ₃₀	
Retracção por Secagem ⁽¹⁾	EN 1367-4	0,025%	
Teor de Húmus ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	Isento	
Teor total de Enxofre ⁽¹⁾		≤0,03%	
Cloretos solúveis		NP EN 1744-1	

⁽¹⁾ Por extrapolação de resultados de outro agregado

⁽²⁾ Cálculo da Média dos ensaios

GRANULOMETRIA DECLARADA




Sanchez, S.A. Serra da Achada Apartado 1010 Santana
12970 908 Sesimbra | Tel 212681360 | Fax 212681763
Sanchez@cimpor.com | www.cimpor-portugal.pt
NIPC 501237283

ANEXO C - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGRB

Tempo	m_i (g)	A_i (g)	W_{ai} (%)
00:00	1165,7	0,0	0,0
00:01	1199,4	33,7	62,1
00:05	1204,5	38,8	71,5
00:06	1205,9	40,2	74,0
00:07	1207,1	41,4	76,3
00:08	1208,1	42,4	78,1
00:09	1208,9	43,2	79,6
00:10	1209,5	43,8	80,7
00:15	1211,9	46,2	85,1
00:20	1213,1	47,4	87,3
00:25	1213,9	48,2	88,8
00:30	1214,5	48,8	89,9
00:40	1215,2	49,5	91,2
00:50	1215,6	49,9	91,9
01:00	1215,9	50,2	92,5
01:15	1216,2	50,5	93,0
01:30	1216,5	50,8	93,6
01:45	1216,8	51,1	94,1
02:00	1216,9	51,2	94,3
02:30	1217,2	51,5	94,8
18:35	1219,7	54,0	99,4
20:30	1219,8	54,1	99,6
24:00	1220,0	54,3	100,0

ANEXO D - FICHA TÉCNICA DO SUPERPLASTIFICANTE

Construction	Ficha de Produto Edição de Abril de 2011 Nº de identificação: 01.111 Versão nº 1 SikaPlast® 898	
	SikaPlast® 898 <i>Powered by ViscoCrete®</i>	
	Superplastificante de elevado desempenho	
	Descrição do produto	SikaPlast® 898 é um superplastificante forte redutor de água para betão.
	Utilizações	<p>SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.</p> <p>SikaPlast® 898 permite a fabricação de:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Betões plásticos a fluidos.■ Betões com diferentes razões A/C.■ Betão bombeado para longas distâncias.■ Betão com agregados britados.■ Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ. <p>Nos betões fluidos, SikaPlast® 898 confere à composição uma boa robustez às variações da água e dos diferentes constituintes e assim melhora a estabilidade, limitando os riscos de segregação, comparando com os adjuvantes inicialmente desenvolvidos à base de policarboxilatos.</p>
	Características/ Vantagens	<p>SikaPlast® 898 é um superplastificante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.■ Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compactidade elevada e de permeabilidade muito baixa.■ Boas resistências iniciais e finais.■ Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.■ Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.■ Bom aspecto da superfície na descofragem■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências. <p>SikaPlast® 898 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.</p>
	Certificados/ Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
	Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.	
Fornecimento	214 kg (200 litros); 1070 kg (1 m ³); granel.	



Armazenagem e conservação	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
Dados técnicos	
Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.
Massa volúmica	1,07 ± 0,02 kg/dm ³ (a +23 ±2 °C)
pH (23 ± 2°C)	5,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	32,0 ± 2,0 %.
Teor em iões cloreto	≤ 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo / Dosagem	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> ■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento. ■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de ² / ₃ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m ³ ; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.
Aplicação	SikaPlast [®] 898 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação, a cura do betão e validada a sua aplicabilidade às condições locais.
Compatibilidade	SikaPlast [®] 898 pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika[®] FerroGard[®] 901. ■ Sika[®] Pump. ■ Sika[®] Rapid ■ Sikacrete[®]. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

Importante	<ul style="list-style-type: none"> ■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição. ■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se. <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
Nota	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.
Risco e segurança	
Medidas de segurança	Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.
	<p><i>"O produto está seguro na C* Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018U05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".</i></p> <p>A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.</p>
Marcação CE	<p>A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.</p> <p>Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.</p>



Sika Portugal, SA
 R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
 4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12
 Portugal www.sika.pt



ANEXO E - ENSAIOS AOS AGREGADOS: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Areia fina

Amostra 1	M ₁ (g)	782,4	M ₂ (g)	774,9	Amostra 2	M ₁ (g)	808,7	M ₂ (g)	803,0	Amostra 3	M ₁ (g)	826,3	M ₂ (g)	823,7
Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada		Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada		Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	(%)	(%)		(g)	(%)	(%)	(%)		(g)	(%)	(%)	(%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0	125	0,0	0,0	0,0	100,0	125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0	63	0,0	0,0	0,0	100,0	63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0	22,4	0,0	0,0	0,0	100,0	22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0	16	0,0	0,0	0,0	100,0	16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	0,0	100,0	11,2	0,0	0,0	0,0	100,0	11,2	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0	8	0,0	0,0	0,0	100,0	8	0,0	0,0	0,0	100,0
5,6	0,0	0,0	0,0	100,0	5,6	0,0	0,0	0,0	100,0	5,6	0,1	0,0	0,0	100,0
4	0,6	0,1	0,1	99,9	4	0,1	0,0	0,0	100,0	4	0,3	0,0	0,0	100,0
2	1,7	0,2	0,3	99,7	2	0,8	0,1	0,1	99,9	2	0,5	0,1	0,1	99,9
1	10,9	1,4	1,7	98,3	1	7,6	0,9	1,1	98,9	1	8,3	1,0	1,1	98,9
0,5	166,0	21,4	23,1	76,9	0,5	137,9	17,2	18,2	81,8	0,5	145,1	17,6	18,7	81,3
0,25	406,1	52,4	75,5	24,5	0,25	449,9	56,0	74,3	25,7	0,25	463,4	56,3	75,0	25,0
0,125	179,0	23,1	98,6	1,4	0,125	198,0	24,7	98,9	1,1	0,125	199,4	24,2	99,2	0,8
0,063	9,4	1,2	99,8	0,2	0,063	5,2	0,6	99,6	0,4	0,063	4,3	0,5	99,7	0,3
Refugo	0,9	0,1	100,0	0,0	Refugo	0,1	0,0	99,6	0,4	Refugo	0,3	0,0	99,8	0,2
Total	774,6	100,0	-	-	Total	799,6	99,6	-	-	Total	821,7	99,8	-	-
Módulo de finura	1,99	f (%)	1,07	Módulo de finura	1,93	f (%)	0,72	Módulo de finura	1,94	f (%)	0,35			

Areia grossa

Amostra 1	M ₁ (g)	978,5	M ₂ (g)	963,4	Amostra 2	M ₁ (g)	961,4	M ₂ (g)	954	Amostra 3	M ₁ (g)	976,6	M ₂ (g)	970,2
Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada		Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada		Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)		(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)		(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0	125	0,0	0,0	0,0	100,0	125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0	63	0,0	0,0	0,0	100,0	63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0	22,4	0,0	0,0	0,0	100,0	22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0	16	0,0	0,0	0,0	100,0	16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	0,0	100,0	11,2	0,0	0,0	0,0	100,0	11,2	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0	8	0,0	0,0	0,0	100,0	8	2,2	0,2	0,2	99,8
5,6	7,7	0,8	0,8	99,2	5,6	15,0	1,6	1,6	98,4	5,6	11,3	1,2	1,4	98,6
4	22,9	2,4	3,2	96,8	4	29,6	3,1	4,7	95,3	4	13,3	1,4	2,8	97,2
2	119,0	12,4	15,5	84,5	2	70,7	7,4	12,1	87,9	2	72,2	7,4	10,2	89,8
1	255,3	26,5	42,0	58,0	1	196,6	20,6	32,7	67,3	1	203,8	21,0	31,2	68,8
0,5	333,8	34,6	76,7	23,3	0,5	319,3	33,5	66,2	33,8	0,5	337,3	34,8	66,0	34,0
0,25	178,8	18,6	95,2	4,8	0,25	263,4	27,6	93,8	6,2	0,25	266,7	27,5	93,5	6,5
0,125	41,2	4,3	99,5	0,5	0,125	53,2	5,6	99,4	0,6	0,125	52,4	5,4	98,9	1,1
0,063	6,5	0,7	100,2	-0,2	0,063	5,4	0,6	99,9	0,1	0,063	5,5	0,6	99,4	0,6
Refugo	0,9	0,1	100,3	-0,3	Refugo	0,4	0,0	100,0	0,0	Refugo	0,8	0,1	99,5	0,5
Total	966,1	100,3	-	-	Total	953,6	100,0	-	-	Total	965,5	99,5	-	-
Módulo de finura	3,32	f (%)	1,64		Módulo de finura	3,09	f (%)	0,81		Módulo de finura	3,03	f (%)	0,74	

Bago de arroz

Amostra 1	M₁ (g)	1215,5	M₂ (g)	1203,6
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 2	M₁ (g)	1100,5	M₂ (g)	1088,2
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 3	M₁ (g)	1122,3	M₂ (g)	1110,5
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0
5,6	132,9	11,0	11,0	89,0
4	871,7	72,4	83,5	16,5
2	184,9	15,4	98,8	1,2
1	4,4	0,4	99,2	0,8
0,5	2,4	0,2	99,4	0,6
0,25	0,5	0,0	99,4	0,6
0,125	1,2	0,1	99,5	0,5
0,063	0,7	0,1	99,6	0,4
Refugo	0,9	0,1	99,7	0,3
Total	1199,6	99,7	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0
5,6	110,3	10,1	10,1	89,9
4	755,6	69,4	79,6	20,4
2	192,5	17,7	97,3	2,7
1	13,7	1,3	98,5	1,5
0,5	8,6	0,8	99,3	0,7
0,25	4,4	0,4	99,7	0,3
0,125	1,4	0,1	99,8	0,2
0,063	0,4	0,0	99,9	0,1
Refugo	0,1	0,0	99,9	0,1
Total	1087,0	99,9	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,8	0,1	0,1	99,9
5,6	116,0	10,4	10,5	89,5
4	788,4	71,0	81,5	18,5
2	175,5	15,8	97,3	2,7
1	10,0	0,9	98,2	1,8
0,5	10,8	1,0	99,2	0,8
0,25	6,1	0,5	99,7	0,3
0,125	1,6	0,1	99,9	0,1
0,063	0,3	0,0	99,9	0,1
Refugo	0,1	0,0	99,9	0,1
Total	1109,6	99,9	-	-

Módulo de finura	5,80	f (%)	1,05
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	5,74	f (%)	1,13
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	5,76	f (%)	1,06
-------------------------	------	--------------	------

Brita 1

Amostra 1	M₁ (g)	3060,6	M₂ (g)	3027,2
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 2	M₁ (g)	3042,2	M₂ (g)	3000,2
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 3	M₁ (g)	3042,0	M₂ (g)	2995,7
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	209,9	6,9	6,9	93,1
8	708,4	23,4	30,3	69,7
5,6	1046,1	34,6	64,9	35,1
4	899,4	29,7	94,6	5,4
2	136,3	4,5	99,1	0,9
1	10,3	0,3	99,4	0,6
0,5	2,0	0,1	99,5	0,5
0,25	2,2	0,1	99,6	0,4
0,125	2,4	0,1	99,7	0,3
0,063	2,2	0,1	99,7	0,3
Refugo	1,0	0,0	99,8	0,2
Total	3020,2	99,8	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	372,5	12,4	12,4	87,6
8	914,2	30,5	42,9	57,1
5,6	999,2	33,3	76,2	23,8
4	640,7	21,4	97,5	2,5
2	67,9	2,3	99,8	0,2
1	0,5	0,0	99,8	0,2
0,5	1,3	0,0	99,9	0,1
0,25	1,2	0,0	99,9	0,1
0,125	1,0	0,0	99,9	0,1
0,063	0,9	0,0	100,0	0,0
Refugo	0,2	0,0	100,0	0,0
Total	2999,6	100,0	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	315,9	10,5	10,5	89,5
8	791,0	26,4	36,9	63,1
5,6	919,5	30,7	67,6	32,4
4	824,4	27,5	95,2	4,8
2	123,7	4,1	99,3	0,7
1	11,5	0,4	99,7	0,3
0,5	3,0	0,1	99,8	0,2
0,25	1,7	0,1	99,8	0,2
0,125	1,5	0,1	99,9	0,1
0,063	1,9	0,1	99,9	0,1
Refugo	0,6	0,0	100,0	0,0
Total	2994,7	100,0	-	-

Módulo de finura	6,22	f (%)	1,12
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	6,40	f (%)	1,39
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	6,31	f (%)	1,54
-------------------------	------	--------------	------

Brita 2

Amostra 1	M₁ (g)	6093,7	M₂ (g)	6064,1
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 2	M₁ (g)	6408,5	M₂ (g)	6372,8
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 3	M₁ (g)	6310,2	M₂ (g)	6279,2
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	253,5	4,2	4,2	95,8
16	2594,8	42,8	47,0	53,0
11,2	2818,9	46,5	93,5	6,5
8	329,6	5,4	98,9	1,1
5,6	28,5	0,5	99,4	0,6
4	16,1	0,3	99,6	0,4
2	0,1	0,0	99,6	0,4
1	0,7	0,0	99,6	0,4
0,5	2,2	0,0	99,7	0,3
0,25	4,9	0,1	99,8	0,2
0,125	6,5	0,1	99,9	0,1
0,063	6,4	0,1	100,0	0,0
Refugo	1,8	0,0	100,0	0,0
Total	6064,0	100,0	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	255,0	4,0	4,0	96,0
16	2895,2	45,4	49,4	50,6
11,2	2718,9	42,7	92,1	7,9
8	463,2	7,3	99,4	0,6
5,6	25,9	0,4	99,8	0,2
4	2,0	0,0	99,8	0,2
2	0,6	0,0	99,8	0,2
1	0,8	0,0	99,8	0,2
0,5	0,6	0,0	99,8	0,2
0,25	1,6	0,0	99,9	0,1
0,125	4,7	0,1	99,9	0,1
0,063	1,1	0,0	99,9	0,1
Refugo	0,4	0,0	100,0	0,0
Total	6370,0	100,0	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	265,0	4,2	4,2	95,8
16	2425,3	38,6	42,8	57,2
11,2	2977,0	47,4	90,3	9,7
8	553,1	8,8	99,1	0,9
5,6	38,1	0,6	99,7	0,3
4	3,1	0,0	99,7	0,3
2	0,6	0,0	99,7	0,3
1	1,0	0,0	99,7	0,3
0,5	1,1	0,0	99,8	0,2
0,25	1,5	0,0	99,8	0,2
0,125	4,1	0,1	99,9	0,1
0,063	5,6	0,1	99,9	0,1
Refugo	1,1	0,0	100,0	0,0
Total	6276,6	100,0	-	-

Módulo de finura	7,44	f (%)	0,52
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	7,48	f (%)	0,56
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	7,41	f (%)	0,51
-------------------------	------	--------------	------

AGRB 4-10 mm

Amostra 1	M₁ (g)	1802,9	M₂ (g)	1800,7
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 2	M₁ (g)	2442,1	M₂ (g)	2437,7
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 3	M₁ (g)	2241,1	M₂ (g)	2238,2
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	14,0	0,8	0,8	99,2
8	527,3	29,3	30,1	69,9
5,6	746,9	41,5	71,5	28,5
4	396,2	22,0	93,5	6,5
2	99,9	5,5	99,1	0,9
1	8,7	0,5	99,6	0,4
0,5	1,3	0,1	99,6	0,4
0,25	0,5	0,0	99,7	0,3
0,125	0,6	0,0	99,7	0,3
0,063	0,5	0,0	99,7	0,3
Refugo	0,8	0,0	99,8	0,2
Total	1796,7	99,8	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	21,9	0,9	0,9	99,1
8	823,1	33,8	34,7	65,3
5,6	934,0	38,3	73,0	27,0
4	512,8	21,0	94,0	6,0
2	131,3	5,4	99,4	0,6
1	11,7	0,5	99,9	0,1
0,5	0,6	0,0	99,9	0,1
0,25	0,1	0,0	99,9	0,1
0,125	0,1	0,0	99,9	0,1
0,063	0,1	0,0	99,9	0,1
Refugo	0,2	0,0	99,9	0,1
Total	2435,9	99,9	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	23,6	1,1	1,1	98,9
8	808,8	36,1	37,2	62,8
5,6	915,9	40,9	78,1	21,9
4	389,9	17,4	95,5	4,5
2	89,3	4,0	99,5	0,5
1	7,4	0,3	99,9	0,1
0,5	1,7	0,1	99,9	0,1
0,25	0,1	0,0	99,9	0,1
0,125	0,1	0,0	99,9	0,1
0,063	0,1	0,0	99,9	0,1
Refugo	0,3	0,0	100,0	0,0
Total	2237,2	100,0	-	-

Módulo de finura	6,21	f (%)	0,17
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	6,28	f (%)	0,19
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	6,32	f (%)	0,14
-------------------------	------	--------------	------

AGRB 10-20 mm

Amostra 1	M₁ (g)	6001,6	M₂ (g)	6000,8
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 2	M₁ (g)	6032,6	M₂ (g)	6030,5
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Amostra 3	M₁ (g)	6202,4	M₂ (g)	6201,1
------------------	--------------------------	--------	--------------------------	--------

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	26,1	0,4	0,4	99,6
16	2134,8	35,6	36,0	64,0
11,2	3029,5	50,5	86,5	13,5
8	641,5	10,7	97,2	2,8
5,6	111,2	1,9	99,0	1,0
4	39,7	0,7	99,7	0,3
2	1,9	0,0	99,7	0,3
1	1,2	0,0	99,8	0,2
0,5	1,2	0,0	99,8	0,2
0,25	0,6	0,0	99,8	0,2
0,125	0,9	0,0	99,8	0,2
0,063	3,3	0,1	99,9	0,1
Refugo	3,4	0,1	99,9	0,1
Total	5995,3	99,9	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	11,7	0,2	0,2	99,8
16	2575,1	42,7	42,9	57,1
11,2	2979,2	49,4	92,3	7,7
8	442,2	7,3	99,6	0,4
5,6	3,7	0,1	99,7	0,3
4	1,9	0,0	99,7	0,3
2	1,2	0,0	99,7	0,3
1	1,8	0,0	99,8	0,2
0,5	2,7	0,0	99,8	0,2
0,25	3,1	0,1	99,9	0,1
0,125	2,3	0,0	99,9	0,1
0,063	2,3	0,0	99,9	0,1
Refugo	3,0	0,0	100,0	0,0
Total	6030,2	100,0	-	-

Peneiro (mm)	Massa retida		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passada (%)
125	0,0	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	33,2	0,5	0,5	99,5
16	3543,1	57,1	57,7	42,3
11,2	2434,7	39,3	96,9	3,1
8	181,6	2,9	99,9	0,1
5,6	0,0	0,0	99,9	0,1
4	0,0	0,0	99,9	0,1
2	0,2	0,0	99,9	0,1
1	0,3	0,0	99,9	0,1
0,5	0,6	0,0	99,9	0,1
0,25	0,9	0,0	99,9	0,1
0,125	1,5	0,0	99,9	0,1
0,063	2,0	0,0	100,0	0,0
Refugo	1,7	0,0	100,0	0,0
Total	6199,8	100,0	-	-

Módulo de finura	7,32	f (%)	0,07
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	7,41	f (%)	0,08
-------------------------	------	--------------	------

Módulo de finura	7,57	f (%)	0,05
-------------------------	------	--------------	------

ANEXO F - ENSAIOS AOS AGREGADOS: MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Variável	Areia fina			Areia grossa			Bago de arroz			Brita 1		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
M₀ (g)	1845,5	1118,0	1098,2	2285,5	1757,2	1868,3	2200,7	2285,4	2013,0	2601,8	3039,0	2942,1
M₁ (g)	1483,6	1121,9	1101,0	1898,5	1761,5	1862,7	2096,7	2275,6	2020,3	2509,9	3055,8	2937,5
M₂ (g)	2347,4	2207,6	2149,8	6433,7	4318,9	7106,8	6622,4	6811,5	6489,2	6888,3	7302,4	7049,4
M₃ (g)	1462,8	1527,3	1481,0	5264,7	3222,7	5972,6	5308,1	5386,0	5237,9	5310,7	5388,2	5222,6
M₄ (g)	1478,7	1116,4	1096,7	1891,2	1752,5	1853,6	2074,1	2254,0	1998,9	2463,6	2996,2	2889,6
ρ_a (kg/m³)	2489,0	2560,0	2563,0	2618,7	2670,3	2576,6	2729,8	2720,6	2673,8	2780,6	2769,1	2718,9
ρ_{rd} (kg/m³)	2468,6	2528,1	2537,5	2592,5	2634,2	2544,4	2650,9	2651,5	2599,3	2642,5	2624,6	2601,6
ρ_{sss} (kg/m³)	2476,8	2540,5	2547,4	2602,5	2647,7	2556,9	2679,8	2676,9	2627,2	2692,2	2676,8	2644,7
WA₂₄ (%)	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	1,1	1,0	1,1	1,9	2,0	1,7

Variável	Brita 2			AGRB 4-10 mm			AGRB 10-20 mm		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
M₀ (g)	5000,0	4571,1	4481,5	2999,6	3000,5	3020,1	4000,0	3999,1	4299,6
M₁ (g)	4896,2	4467,1	4409,4	2920,1	2899,6	3094,6	3952,9	3948,4	4310,9
M₂ (g)	8248,7	7976,2	7934,6	7044,4	6982,2	7071,1	7578,7	7669,6	7766,5
M₃ (g)	5187,7	5191,4	5191,4	5312,2	5250,1	5222,8	5220,6	5315,2	5189,3
M₄ (g)	4842,7	4401,1	4347,5	2791,3	2771,0	2962,9	3776,2	3770,1	4122,3
ρ_a (kg/m³)	2718,0	2722,9	2709,9	2635,5	2667,2	2658,3	2662,9	2663,1	2668,0
ρ_{rd} (kg/m³)	2638,8	2616,1	2609,2	2349,8	2373,4	2377,4	2367,8	2365,2	2377,7
ρ_{sss} (kg/m³)	2667,9	2655,4	2646,4	2458,2	2483,6	2483,0	2478,6	2477,0	2486,5
WA₂₄ (%)	1,1	1,5	1,4	4,6	4,6	4,4	4,7	4,7	4,6

ANEXO G - ENSAIOS AOS AGREGADOS: MASSA VOLÚMICA APARENTE, VOLUME DE VAZIOS E DESGASTE DE LOS ANGELES

Massa volúmica aparente e volume de vazios	Areia fina			Areia grossa			Bago de arroz			Brita 1		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
V (l)	1	1	1	3	3	3	3	3	3	9,89	9,89	9,89
M ₁ (g)	1178,4	1178,4	1178,4	1857,6	1857,7	1857,7	1857,8	1857,4	1857,4	8972,8	8963,0	8961,0
M ₂ (g)	2773,7	2753,2	2756,2	6430,9	6479,5	6481,8	6038,8	6140,1	6057,7	23063,0	23166,0	23190,0
ρ _b (kg/m ³)	1595,3	1574,8	1577,8	1524,4	1540,6	1541,4	1393,7	1427,6	1400,1	1425,0	1436,4	1439,0
ρ _{b, média} (kg/m ³)		1582,6			1535,5			1407,1			1433,5	
ρ _{rd} (kg/m ³)		2511,4			2590,3			2633,9			2622,9	
% de vazios		37,0			40,7			46,6			45,3	

Massa volúmica aparente e volume de vazios	Brita 2			AGRB 4-10 mm			AGRB 10-20 mm		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
V (l)	9,89	9,89	9,89	9,68	9,68	9,93	9,68	9,93	9,93
M ₁ (g)	8986,7	8974,8	8974,2	8885,9	8885,9	8804,5	8885,9	8804,5	8804,5
M ₂ (g)	22461,0	22253,0	22786,0	21450,0	21572,0	21150,0	21273,0	21117,0	20951,0
ρ _b (kg/m ³)	1362,7	1342,9	1396,8	1298,6	1311,2	1243,7	1280,3	1240,4	1223,6
ρ _{b, média} (kg/m ³)		1367,5			1284,5			1248,1	
ρ _{rd} (kg/m ³)		2621,4			2366,9			2370,2	
% de vazios		47,8			45,7			47,3	

Desgaste de Los Angeles	Composição granulométrica		N.º de esferas	Massas parciais (g)	Massa M ₁ (g)	Massa M ₂ (g)	Δ LA (%)
	Tipo	Fracção (mm)					
Bago arroz	D	4,76-2,38	6	5001,9	5001,9	3886,0	22,3
Brita 1	C	9,51-6,35	8	2500,5	5001,7	3642,2	27,2
		6,35-4,76		2501,2			
Brita 2	B	19,0-12,7	11	2502,9	5004,3	3429,5	31,5
		12,7-9,51		2501,4			
AGRB 4-10	C	9,51-6,35	8	2499,5	5001,2	3338,3	33,3
		6,35-4,76		2501,7			
AGRB 10-20	B	19,0-12,7	11	2500,1	5000,7	2942,9	41,2
		12,7-9,51		2500,6			

ANEXO H - ENSAIOS AOS AGREGADOS: TEOR DE HUMIDADE; TEMPERATURAS EM LISBOA ENTRE MARÇO E SETEMBRO DE 2013

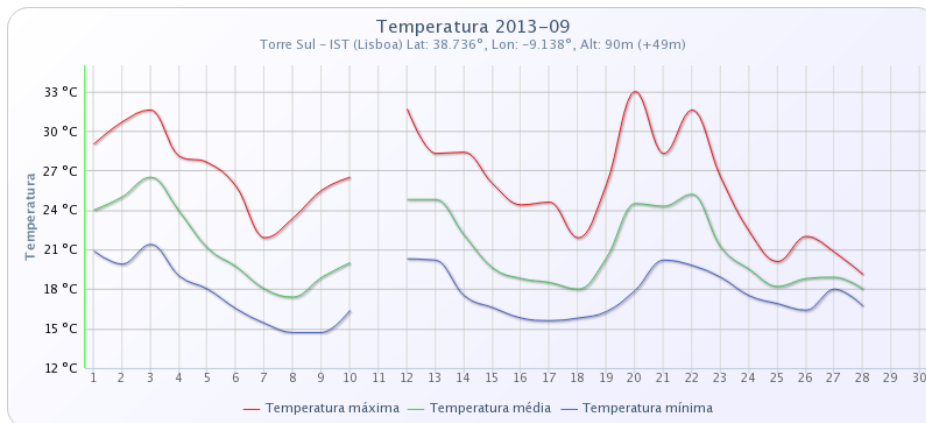
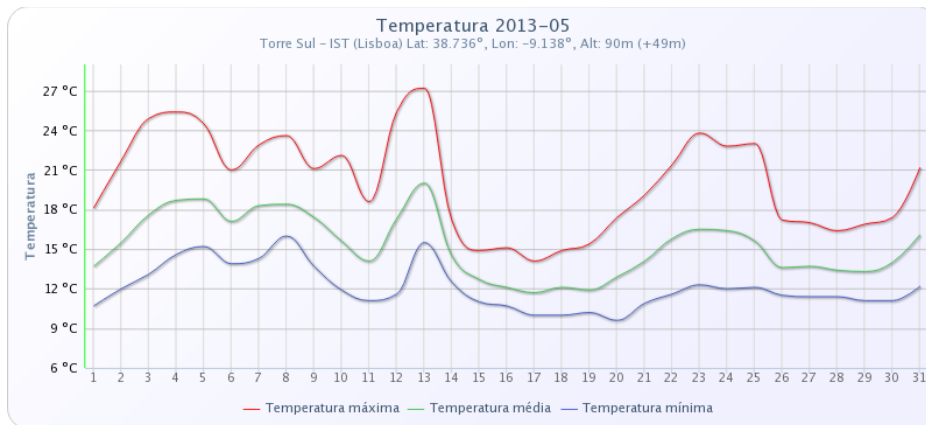
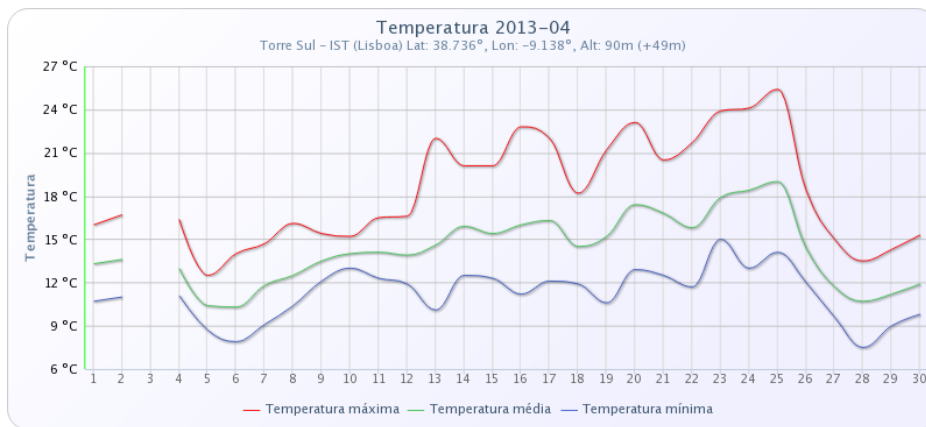
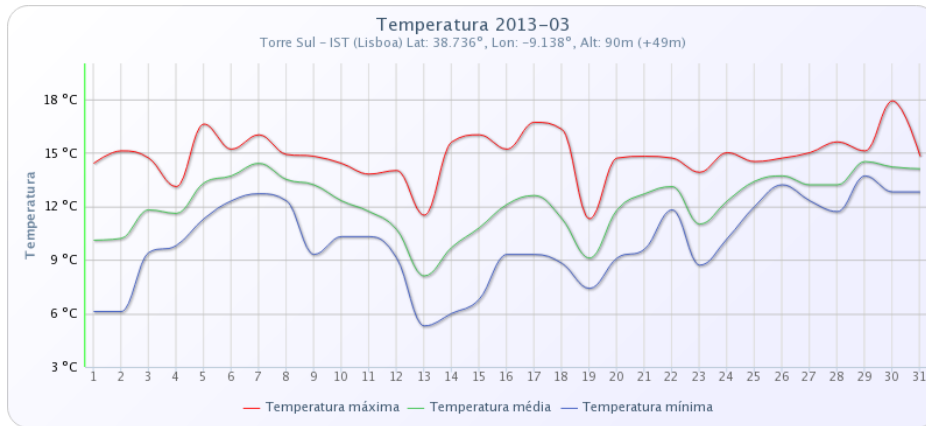
Teor de Humidade

Fracção (mm)	% componentes	2ª fase experimental										
		Semana de 25 de Março de 2013			Semana de 01 de Abril de 2013			Semana de 15 de Abril de 2013				
		M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)		
4-5,6	0,041	1700,0	1658,6	2,50	1502,0	1453,7	3,32	1500,0	1469,4	2,08		
5,6-8	0,046	2218,0	2134,3	3,92	2000,6	1946,46	2,78	2200,8	2141,4	2,77		
8-11,2	0,047	3500,4	3447,0	1,55	2947,6	2835,7	3,95	3000,3	2905,8	3,25		
11,2-16	0,121	4223,0	4064,7	3,89	3001,0	2907,7	3,21	3999,6	3861,8	3,57		
16-22,4	0,122	5171,1	4977,4	3,89	5098,9	4898,4	4,09	5004,3	4855,5	3,06		
Total	0,377	Média			3,45	Média			3,48	Média		3,11

Fracção (mm)	% componentes	2ª fase experimental										
		Semana de 29 de Abril de 2013			Semana de 06 de Maio de 2013			Semana de 13 de Maio de 2013				
		M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)		
4-5,6	0,041	1600,8	1562,8	2,43	-	-	-	1500,2	1468,3	2,17		
5,6-8	0,046	1915,5	1870,8	2,39	2000,7	1967,7	1,68	2200,5	2128,6	3,38		
8-11,2	0,047	3000,0	2937,4	2,13	3000,8	2951,1	1,68	2999,9	2925,7	2,54		
11,2-16	0,121	-	-	-	4201,0	4061,2	3,44	3954,0	3838,1	3,02		
16-22,4	0,122	5001,9	4863,7	2,84	-	-	-	4996,9	4883,9	2,31		
Total	0,377	Média			2,56	Média			2,68	Média		2,68

Agregado	% componentes	3ª fase experimental						
		Semana de 09 de Setembro de 2013			Semana de 23 de Setembro de 2013			
		M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)	
AGRB 4-10	0,135	3008,4	2973,1	1,19	2962,9	2928	1,19	
AGRB 10-20	0,276	5006,5	4917,4	1,81	5001,2	4909,9	1,86	
Total	0,411	Média			1,61	Média		1,64

Temperaturas em Lisboa entre Março e Setembro de 2013 (IST, 2014)



ANEXO I - ENSAIOS AOS AGREGADOS: ÍNDICE DE FORMA

Bago de arroz

Fracção granulométrica (mm)	M ₁ (g)	V _i (%)	M ₂ (g)
22,4-31,5	0,0	0,0	-
16-22,4	0,0	0,0	-
11,2-16	0,0	0,0	-
8-11,2	0,0	0,0	-
5,6-8	53,4	15,6	6,5
4-5,6	288,3	84,4	49,6
M₀ (g)	341,7	SI (%)	16,4

Brita 1

Fracção granulométrica (mm)	M ₁ (g)	V _i (%)	M ₁ : mínimo 100 partículas (g)	M ₂ (g)
22,4-31,5	0,0	0,0	-	-
16-22,4	0,0	0,0	-	-
11,2-16	175,0	12,1	-	26,2
8-11,2	421,4	29,2	116,8	30,5
5,6-8	486,3	33,7	124,9	31,7
4-5,6	361,2	25,0	95,5	22,7
M₀ (g)	1443,9	SI (%)		21,7

Brita 2

Fracção granulométrica (mm)	M ₁ (g)	V _i (%)	M ₂ (g)
22,4-31,5	347,9	8,5	-
16-22,4	1919,4	46,9	234,3
11,2-16	1423,0	34,7	250,2
8-11,2	312,6	7,6	-
5,6-8	45,8	1,1	-
4-5,6	47,7	1,2	-
M₀ (g)	4096,4	SI (%)	14,5

AGRB 4-10

Fracção granulométrica (mm)	M ₁ (g)	V _i (%)	M ₁ : mínimo 100 partículas (g)	M ₂ (g)
31,5-45	0,0	0,0	-	-
22,4-31,5	0,0	0,0	-	-
16-22,4	0,0	0,0	-	-
11,2-16	18,6	1,8	-	26,2
8-11,2	358,2	35,1	116,8	30,5
5,6-8	425,3	41,7	124,9	31,7
4-5,6	217,5	21,3	95,5	22,7
M₀ (g)	1019,6		SI (%)	12,1

AGRB 10-20

Fracção granulométrica (mm)	M ₁ (g)	V _i (%)	M ₁ : mínimo 100 partículas (g)	M ₂ (g)
31,5-45	0,0	0,0	-	-
22,4-31,5	29,7	0,8	-	-
16-22,4	2167,7	55,7	1181,8	141,2
11,2-16	1514,4	38,9	800,7	101,4
8-11,2	177,5	4,6	-	-
5,6-8	0,6	0,0	-	-
4-5,6	0,1	0,0	-	-
M₀ (g)	3890,0		SI (%)	12,2

ANEXO J - ENSAIOS AO BETÃO FRESCO: ABAIXAMENTO E MASSA VOLÚMICA

2ª fase experimental

Betão	Abaixamento (mm)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volume (l)	Massa volúmica (kg/m ³)
BR	124	8675	32230	9,95	2367,8
B10	127	8685	32101	9,95	2353,8
B20	122	8685	32049	9,95	2348,6
B30	109	8675	31989	9,95	2342,4
B40	117	8655	31810	9,95	2326,4
B50	112	8653	31765	9,95	2322,1
B100	116	8657	31392	9,95	2284,2
B100SP0.5	127	8657	31943	9,95	2340,8
B100SP1.0	119	8698	32403	9,95	2384,3
B100SP1.5	118	8677	32260	9,95	2370,6
B100SP2.0	128	8698	32361	9,95	2380,1

3ª fase experimental

Betão	Amostra	Abaixamento (mm)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volume (l)	Massa volúmica (kg/m ³)
BR	1	121	8865	32292	9,88	2371,2
	2	116	8865	32397	9,88	2381,8
	média	118,5	8865	32345	9,88	2376,5
B25	1	126	8867	31984	9,88	2339,8
	2	120	8869	32073	9,88	2348,6
	média	123	8868	32029	9,88	2344,2
B100	1	136	8869	31067	9,88	2246,8
	2	115	8869	31679	9,88	2308,7
	média	125,5	8869	31373	9,88	2277,7
B100SP1.0	1	130	8869	32652	9,88	2407,2
	2	134	8869	32713	9,88	2413,4
	média	132	8869	32682,5	9,88	2410,3

ANEXO K - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

2ª fase experimental - 7 dias

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Desvio padrão
BR	Massa (g)	8064,4	8124,6	8213,3	8134,1	64,3
	Força (kN)	949,7	924,6	884,4	919,6	28,3
	f_{ci} (MPa)	42,2	41,1	39,3	40,9	1,3
B10	Massa (g)	8054,9	8117,9	8102,0	8091,6	26,9
	Força (kN)	788,1	785,9	815,3	796,4	14,2
	f_{ci} (MPa)	35,0	34,9	36,2	35,4	0,6
B20	Massa (g)	7955,8	8071,5	8139,6	8055,6	78,7
	Força (kN)	854,5	873,8	842,3	856,9	13,5
	f_{ci} (MPa)	38,0	38,8	37,4	38,1	0,6
B30	Massa (g)	8047,5	8112,9	8117,5	8092,6	32,6
	Força (kN)	969,2	961,7	985,5	972,1	10,5
	f_{ci} (MPa)	43,1	42,7	43,8	43,2	0,5
B40	Massa (g)	7810,2	7870,4	8013,2	7897,9	89,9
	Força (kN)	818,0	862,4	869,5	850,0	23,3
	f_{ci} (MPa)	36,4	38,3	38,6	37,8	1,0
B50	Massa (g)	7954,5	8003,0	8001,6	7986,4	22,9
	Força (kN)	921,6	878,0	951,3	917,0	31,3
	f_{ci} (MPa)	41,0	39,0	42,3	40,8	1,4
B100	Massa (g)	7933,4	7828,5	7821,7	7861,2	52,1
	Força (kN)	886,0	903,0	872,6	887,2	13,0
	f_{ci} (MPa)	39,4	40,1	38,8	39,4	0,6
B100S0.5	Massa (g)	8010,3	7913,1	8000,2	7974,5	44,1
	Força (kN)	1148,0	1348,0	1370,0	1288,7	101,9
	f_{ci} (MPa)	51,0	59,9	60,9	57,3	4,5
B100SP1.0	Massa (g)	7943,6	8118,9	8112,3	8058,3	82,2
	Força (kN)	1301,0	1274,0	1376,0	1317,0	45,6
	f_{ci} (MPa)	57,8	56,6	61,2	58,5	2,0
B100SP1.5	Massa (g)	8087,7	8075,1	7984,5	8049,1	48,7
	Força (kN)	1235,0	1413,0	1254,0	1300,7	80,7
	f_{ci} (MPa)	54,9	62,8	55,7	57,8	3,6
B100SP2.0	Massa (g)	8066,3	8079,5	8096,0	8080,6	12,7
	Força (kN)	1282,0	1441,0	1258,0	1327,0	83,0
	f_{ci} (MPa)	57,0	64,0	55,9	59,0	3,7

2ª fase experimental - 28 dias

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Média	Desvio padrão
BR	Massa (g)	8080,7	8070,4	8174,5	8247,0	8143,2	83,6
	Força (kN)	1085,0	1110,0	1092,0	1031,0	1079,5	34,0
	f _{ci} (MPa)	48,2	49,3	48,5	45,8	48,0	1,5
B10	Massa (g)	8107,6	8031,9	8153,4	7989,9	8070,7	73,6
	Força (kN)	1044,0	1055,0	1054,0	1067,0	1055,0	9,4
	f _{ci} (MPa)	46,4	46,9	46,8	47,4	46,9	0,4
B20	Massa (g)	8074,7	8095,0	8072,0	8115,6	8089,3	20,3
	Força (kN)	1078,0	1116,0	1031,0	1070,0	1073,8	34,9
	f _{ci} (MPa)	47,9	49,6	45,8	47,6	47,7	1,5
B30	Massa (g)	8159,4	8082,7	8063,1	8092,0	8099,3	41,8
	Força (kN)	1147,0	1134,0	1183,0	1112,0	1144,0	29,7
	f _{ci} (MPa)	51,0	50,4	52,6	49,4	50,8	1,3
B40	Massa (g)	7861,7	7870,4	7922,1	7941,8	7899,0	39,0
	Força (kN)	1140,0	1008,0	1158,0	1017,0	1080,8	79,2
	f _{ci} (MPa)	50,7	44,8	51,5	45,2	48,0	3,5
B50	Massa (g)	8003,3	8164,0	8121,0	8094,2	8095,6	67,9
	Força (kN)	1028,0	1153,0	1142,0	1136,0	1114,8	58,3
	f _{ci} (MPa)	45,7	51,2	50,8	50,5	49,5	2,6
B100	Massa (g)	7881,8	7957,3	7920,4	7972,2	7932,9	40,4
	Força (kN)	1121,0	1139,0	1143,0	1126,0	1132,3	10,4
	f _{ci} (MPa)	49,8	50,6	50,8	50,0	50,3	0,5
B100S0.5	Massa (g)	7999,6	7869,8	7959,3	7991,9	7955,2	59,5
	Força (kN)	1543,0	1429,0	1326,0	1442,0	1435,0	88,8
	f _{ci} (MPa)	68,6	63,5	58,9	64,1	63,8	3,9
B100SP1.0	Massa (g)	7926,7	8193,1	8046,2	8021,8	8047,0	110,2
	Força (kN)	1538,0	1394,0	1609,0	1544,0	1521,3	90,7
	f _{ci} (MPa)	68,4	62,0	71,5	68,6	67,6	4,0
B100SP1.5	Massa (g)	8128,3	7948,3	8091,9	8180,3	8087,2	99,5
	Força (kN)	1479,0	1412,0	1301,0	1277,0	1367,3	94,9
	f _{ci} (MPa)	65,7	62,8	57,8	56,8	60,8	4,2
B100SP2.0	Massa (g)	7974,9	8095,8	8158,7	8020,1	8062,4	81,3
	Força (kN)	1514,0	1575,0	1551,0	1689,0	1582,3	75,5
	f _{ci} (MPa)	67,3	70,0	68,9	75,1	70,3	3,4

3ª fase experimental - 7 dias

Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Desvio padrão	Betão	Variável
8151,4	8182,3	8144,8	8159,5	20,0	BR	Massa (g)
869,9	860,3	913,5	881,2	28,4		Força (kN)
38,7	38,2	40,6	39,2	1,7		f _{ci} (MPa)
8114,9	8082,7	8189,6	8129,1	54,8	B25	Massa (g)
820,5	897,5	854	857,3	38,6		Força (kN)
36,5	39,9	38,0	38,1	1,7		f _{ci} (MPa)
7926,8	7901,6	7931,1	7919,8	15,9	B100	Massa (g)
836,1	861,7	835,2	844,3	15,1		Força (kN)
37,2	38,3	37,1	37,5	0,7		f _{ci} (MPa)
7806,3	7828	8034	7889,4	125,7	B100SP1.0	Massa (g)
1332	1341	1414	1362,3	45,0		Força (kN)
59,2	59,6	62,8	60,5	2,0		f _{ci} (MPa)

3ª fase experimental - 28 dias

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média	Desvio padrão
BR	Massa (g)	8139	8144,5	8168,5	8208,3	8254,4	8182,9	48,4
	Força (kN)	999,7	965,5	984,4	965,3	931,3	969,2	25,6
	f _{ci} (MPa)	44,4	42,9	43,8	42,9	41,4	43,1	1,1
B25	Massa (g)	8130,7	8149,8	8120,8	8058,2	8115,9	8115,1	34,3
	Força (kN)	999,3	1025	1037	907,7	1049	1003,6	56,7
	f _{ci} (MPa)	44,4	45,6	46,1	40,3	46,6	44,6	2,5
B100	Massa (g)	7849,1	7926,8	7918,4	7830,2	7973,3	7899,6	58,93
	Força (kN)	1065	1036	1079	997,7	1040	1043,5	31,2
	f _{ci} (MPa)	47,3	46,0	48,0	44,3	46,2	46,4	1,39
B100SP1.0	Massa (g)	7907,6	8109	7977,5	8033,9	8054,3	8016,5	76,92
	Força (kN)	1516	1699	1566	1687	1544	1602,4	84,7
	f _{ci} (MPa)	67,4	75,5	69,6	75,0	68,6	71,2	3,8

3ª fase experimental - 56 dias

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Desvio padrão
BR	Massa (g)	8138,1	8176,8	8143,2	8152,7	21,03
	Força (kN)	1137,0	1178,0	1106,0	1140,3	36,12
	f _{ci} (MPa)	50,5	52,4	49,2	50,7	1,61
B25	Massa (g)	8194,5	8178	8133,9	8168,8	31,33
	Força (kN)	1151	1111	1116	1126,0	21,79
	f _{ci} (MPa)	51,2	49,4	49,6	50,0	0,97
B100	Massa (g)	7890,3	7929,5	7804,9	7874,9	63,71
	Força (kN)	1108	1082	1074	1088,0	17,78
	f _{ci} (MPa)	49,2	48,1	47,7	48,4	0,79
B100SP1.0	Massa (g)	8059,9	8156,5	-	5405,5	68,31
	Força (kN)	1603	1593	-	1065,3	7,07
	f _{ci} (MPa)	71,2	70,8	-	71,0	0,31

ANEXO L - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RESISTÊNCIA À TRACÇÃO (POR COMPRESSÃO DIAMETRAL)

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Desvio padrão
BR	M (g)	12683,9	12639,5	12849,2	12724,2	110,51
	L (mm)	299,0	298,0	300,0	299,0	1,00
	F (kN)	265,5	224,7	207,0	232,4	30,00
	f_{cti} (MPa)	3,8*	3,2	2,9	3,3	0,43
B25	M (kg)	12609,9	12599,3	12648,5	12619,2	25,89
	L (mm)	298	298	300	298,7	1,15
	F (kN)	207,8	192,7	219,2	206,6	13,29
	f_{cti} (MPa)	3,0	2,7	3,1	2,9	0,18
B100	M (kg)	12271,1	12415,1	12334	12340,1	72,19
	L (mm)	297	300	300	299,0	1,73
	F (kN)	203,9	219,6	224,1	215,9	10,60
	f_{cti} (MPa)	2,9	3,1	3,2	3,1	0,13
B100SP1.0	M (kg)	12682,6	12506,2	12772,9	12653,9	135,65
	L (mm)	295	298	300	297,7	2,52
	F (kN)	309,3	275,0	312,0	298,8	20,63
	f_{cti} (MPa)	4,4	3,9	4,4	4,3	0,30

*Valor desprezado por se apresentar bastante superior aos restantes.

ANEXO M - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: MÓDULO DE ELASTICIDADE

BR - provete 1

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)				
	1,0	-17,7	11,27	199,2				
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	31,37	325,35	21,88	296,17	6,70	284,13	36,15	36,63
2	40,85	325,35	26,99	300,55	3,85	279,03	36,81	
3	41,58	326,08	27,72	301,28	3,85	279,03	36,81	
4	41,58	326,08	28,45	302,74	3,59	279,40	36,76	

BR - provete 2

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)				
	1,0	-17,7	11,27	199,2				
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	28,45	326,08	24,07	308,57	4,41	291,06	35,29	35,74
2	32,10	326,81	27,72	307,11	5,20	287,05	35,78	
3	35,02	329,00	31,37	309,30	5,46	285,96	35,92	
4	35,74	329,00	31,37	309,30	5,22	285,59	35,96	

B25 - provete 1

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)				
	1,0	-17,7	11,58	204,7				
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	32,83	350,15	24,80	316,60	8,05	304,56	34,75	35,07
2	37,93	349,42	30,64	320,24	7,03	300,55	35,21	
3	39,39	350,88	29,91	320,97	6,56	301,28	35,13	
4	40,85	350,88	29,91	321,70	5,88	300,91	35,17	

B25 - provete 2

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)	
	1,0	-17,7	11,58	204,7	

Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	27,72	355,26	30,64	347,84	3,16	322,37	32,83	33,05
2	38,66	359,64	35,02	351,61	1,36	318,78	33,20	
3	40,12	361,82	37,20	353,80	1,59	319,15	33,16	
4	40,85	364,01	37,93	355,99	1,58	320,61	33,01	

B100 - provete 1

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)	
	1,0	-17,7	12,13	214,4	

Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	30,64	401,22	26,99	377,14	5,51	360,36	30,89	31,59
2	45,96	401,95	38,66	384,44	2,87	350,88	31,73	
3	48,15	401,95	40,85	386,63	2,27	349,79	31,83	
4	51,06	401,95	43,04	389,54	1,25	348,69	31,93	

B100 - provete 2

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)	
	1,0	-17,7	12,13	214,4	

Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	25,53	360,36	28,45	385,90	6,75	346,14	32,16	32,62
2	32,83	361,09	40,12	391,00	6,89	339,57	32,78	
3	35,74	362,55	40,85	392,46	7,59	339,21	32,82	
4	35,74	363,28	40,85	393,92	7,80	340,30	32,71	

B100SP1.0 - provete 1

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)			
	1,0	-17,7	14,15	250,0			

Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	29,18	361,09	22,61	370,58	4,84	339,94	38,67	39,67
2	54,71	369,12	29,18	371,31	8,82	328,27	40,05	
3	59,09	374,22	29,91	373,50	9,03	329,36	39,92	
4	62,01	376,41	31,37	373,50	8,82	328,27	40,05	

B100SP1.0 - provete 2

	Tensão inicial (MPa)	Força aplicada para tensão inicial (kN)	Tensão de ensaio - $f_c/3$ (MPa)	Força aplicada para $f_c/3$ (kN)			
	1,0	-17,7	14,15	250,0			

Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases de medida (%)	Extensão média (% x 10^{-6})	E_{ci} (GPa)	E_c (GPa)
	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})	Extensão inicial (% x 10^{-6})	Extensão $f_c/3$ (% x 10^{-6})				
1	21,16	361,09	22,61	360,36	0,64	338,84	38,80	39,33
2	30,64	362,55	31,37	365,47	0,66	333,01	39,48	
3	32,83	364,01	32,83	367,66	1,10	333,01	39,48	
4	33,56	363,28	33,56	368,39	1,55	332,28	39,57	

**ANEXO N - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: VELOCIDADE DE
PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS**

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média	v (km/s)	Desvio padrão
BR	t ₁ (µs)	32,1	31,8	32,2	31,1	32	31,84	4,71	0,05
	v ₁ (km/s)	4,67	4,72	4,66	4,82	4,69	4,71		
	t ₂ (µs)	31,9	31,7	32,1	31,7	31,6	31,80		
	v ₂ (km/s)	4,70	4,73	4,67	4,73	4,75	4,72		
B25	t ₁ (µs)	32,2	31,9	32,6	32,4	32,4	32,30	4,65	0,05
	v ₁ (km/s)	4,66	4,70	4,60	4,63	4,63	4,64		
	t ₂ (µs)	32,7	32,7	32,2	31,5	32,1	32,24		
	v ₂ (km/s)	4,59	4,59	4,66	4,76	4,67	4,65		
B100	t ₁ (µs)	33,5	34,4	33,9	34	33,6	33,88	4,42	0,05
	v ₁ (km/s)	4,48	4,36	4,42	4,41	4,46	4,43		
	t ₂ (µs)	33,7	33,9	34,3	34,4	33,4	33,94		
	v ₂ (km/s)	4,45	4,42	4,37	4,36	4,49	4,42		
B100SP1.0	t ₁ (µs)	31,6	32,2	32,3	31,9	31,5	31,90	4,70	0,05
	v ₁ (km/s)	4,75	4,66	4,64	4,70	4,76	4,70		
	t ₂ (µs)	31,4	32,4	32	31,8	32,1	31,94		
	v ₂ (km/s)	4,78	4,63	4,69	4,72	4,67	4,70		

ANEXO O - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BR

Variável	Provete 1			Provete 2			Provete 3		
	Inicial	Final	DI ₁	Inicial	Final	DI ₂	Inicial	Final	DI ₃
Ponto 1 (mm)	47,42	42,65	4,77	48,88	44,03	4,85	49,45	45,30	4,15
Ponto 2 (mm)	47,30	42,97	4,33	48,85	44,24	4,61	49,69	45,18	4,51
Ponto 3 (mm)	47,53	43,18	4,35	48,62	44,22	4,40	49,80	44,96	4,84
Ponto 4 (mm)	47,41	43,15	4,26	48,53	44,26	4,27	49,32	45,62	3,70
Ponto 5 (mm)	47,76	43,59	4,17	48,46	44,30	4,16	49,79	45,58	4,21
Ponto 6 (mm)	47,40	43,44	3,96	48,43	44,34	4,09	49,83	45,35	4,48
Ponto 7 (mm)	47,40	43,36	4,04	48,28	44,07	4,21	49,17	45,62	3,55
Ponto 8 (mm)	47,52	43,58	3,94	48,21	44,17	4,04	49,75	45,76	3,99
Ponto 9 (mm)	47,30	43,52	3,78	48,25	44,19	4,06	49,71	45,68	4,03
Média (mm)	47,45	43,27	4,18	48,50	44,20	4,30	49,61	45,45	4,16
DI (mm)						4,21			
Desvio padrão (mm)						0,07			
Massa (g)	507,8	463,3	44,5	501,8	457,5	44,3	530,6	489,7	40,9
DM (g)						43,2			

B25

Variável	Provete 1			Provete 2			Provete 3		
	Inicial	Final	DI ₁	Inicial	Final	DI ₂	Inicial	Final	DI ₃
Ponto 1 (mm)	48,94	44,11	4,83	48,77	46,04	2,73	48,16	43,69	4,47
Ponto 2 (mm)	49,28	44,25	5,03	49,07	46,05	3,02	48,24	43,82	4,42
Ponto 3 (mm)	49,16	44,19	4,97	49,52	46,11	3,41	47,89	43,86	4,03
Ponto 4 (mm)	48,81	44,42	4,39	48,86	46,02	2,84	48,24	43,87	4,37
Ponto 5 (mm)	49,01	44,52	4,49	49,19	45,96	3,23	48,09	44,04	4,05
Ponto 6 (mm)	49,16	44,60	4,56	49,69	45,82	3,87	47,96	44,09	3,87
Ponto 7 (mm)	48,49	44,52	3,97	48,76	45,88	2,88	47,88	44,03	3,85
Ponto 8 (mm)	48,81	44,78	4,03	49,31	45,99	3,32	47,79	44,16	3,63
Ponto 9 (mm)	49,31	44,69	4,62	49,55	45,65	3,90	47,73	44,14	3,59
Média (mm)	49,00	44,45	4,54	49,19	45,95	3,24	48,00	43,97	4,03
DI (mm)						3,94			
Desvio padrão (mm)						0,65			
Massa (g)	513,3	466,2	47,1	517,9	483,4	34,5	501,8	458,8	43,0
DM (g)						41,5			

B100

Variável	Provete 1			Provete 2			Provete 3		
	Inicial	Final	Dl ₁	Inicial	Final	Dl ₂	Inicial	Final	Dl ₃
Ponto 1 (mm)	48,87	44,72	4,15	48,62	44,61	4,01	48,75	44,44	4,31
Ponto 2 (mm)	49,08	45,17	3,91	48,66	44,79	3,87	48,5	44,54	3,96
Ponto 3 (mm)	49,09	45,44	3,65	48,72	45,00	3,72	48,11	44,78	3,33
Ponto 4 (mm)	49,36	44,51	4,85	48,48	44,81	3,67	49,07	44,47	4,60
Ponto 5 (mm)	49,27	44,85	4,42	48,38	44,93	3,45	48,62	44,58	4,04
Ponto 6 (mm)	49,10	45,25	3,85	48,23	45,2	3,03	48,31	44,7	3,61
Ponto 7 (mm)	49,43	44,60	4,83	48,92	44,92	4,00	49,11	44,53	4,58
Ponto 8 (mm)	49,37	44,87	4,50	48,62	45,2	3,42	48,71	44,6	4,11
Ponto 9 (mm)	49,30	44,95	4,35	48,23	45,26	2,97	48,48	44,67	3,81
Média (mm)	49,21	44,93	4,28	48,54	44,97	3,57	48,63	44,59	4,04
Dl (mm)						3,96			
Desvio padrão (mm)						0,36			
Massa (g)	479,1	437,1	42,0	485,5	450,1	35,4	491,3	450,6	40,7
DM (g)						39,4			

B100SP1.0

Variável	Provete 1			Provete 2			Provete 3		
	Inicial	Final	Dl ₁	Inicial	Final	Dl ₂	Inicial	Final	Dl ₃
Ponto 1 (mm)	49,64	46,24	3,40	49,08	45,76	3,32	47,05	43,83	3,22
Ponto 2 (mm)	49,60	46,32	3,28	49,03	45,85	3,18	47,07	43,90	3,17
Ponto 3 (mm)	49,73	46,37	3,36	49,09	45,86	3,23	47,08	43,87	3,21
Ponto 4 (mm)	49,70	46,24	3,46	49,19	45,78	3,41	47,34	44,18	3,16
Ponto 5 (mm)	49,59	46,25	3,34	49,09	45,82	3,27	47,37	44,11	3,26
Ponto 6 (mm)	49,50	46,38	3,12	49,04	45,90	3,14	47,26	44,10	3,16
Ponto 7 (mm)	49,92	46,19	3,73	49,35	45,69	3,66	47,59	44,27	3,32
Ponto 8 (mm)	49,98	46,20	3,78	49,08	45,76	3,32	47,69	44,38	3,31
Ponto 9 (mm)	49,46	46,27	3,19	48,84	45,74	3,10	47,53	44,41	3,12
Média (mm)	49,68	46,27	3,41	49,09	45,80	3,29	47,33	44,12	3,21
Dl (mm)						3,30			
Desvio padrão (mm)						0,10			
Massa (g)	511,3	479,0	32,3	513,6	480,0	33,6	495,8	461,0	34,8
DM (g)						33,6			

ANEXO P - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RETRACÇÃO

BR

Dias passados	Diferença (mm)		Média (mm)	Deformação média (µm/m)
	Provete 1	Provete 2		
1	0	0	0	0,0
2	-0,01	-0,0115	-0,01075	-53,8
3	-0,017	-0,0175	-0,01725	-86,3
4	-0,0195	-0,0205	-0,02	-100,0
5	-0,0265	-0,0245	-0,0255	-127,5
6	-0,031	-0,03	-0,0305	-152,5
7	-0,035	-0,035	-0,035	-175,0
8	-0,0355	-0,037	-0,03625	-181,3
9	-0,0385	-0,0415	-0,04	-200,0
10	-0,039	-0,0415	-0,04025	-201,3
11	-0,042	-0,046	-0,044	-220,0
12	-0,0465	-0,046	-0,04625	-231,3
13	-0,0485	-0,046	-0,04725	-236,3
14	-0,051	-0,0485	-0,04975	-248,8
15	-0,0535	-0,0505	-0,052	-260,0
16	-0,057	-0,0525	-0,05475	-273,8
17	-0,0595	-0,0545	-0,057	-285,0
20	-0,0625	-0,0585	-0,0605	-302,5
22	-0,0665	-0,0625	-0,0645	-322,5
24	-0,0685	-0,0665	-0,0675	-337,5
27	-0,0715	-0,07	-0,07075	-353,8
28	-0,072	-0,0715	-0,07175	-358,8
29	-0,0735	-0,0725	-0,073	-365,0
30	-0,074	-0,0735	-0,07375	-368,8
31	-0,0745	-0,074	-0,07425	-371,3
34	-0,0765	-0,0755	-0,076	-380,0
36	-0,0785	-0,078	-0,07825	-391,3
38	-0,0775	-0,0785	-0,078	-390,0
41	-0,08	-0,081	-0,0805	-402,5
44	-0,083	-0,082	-0,0825	-412,5
47	-0,084	-0,0825	-0,08325	-416,3
49	-0,0855	-0,085	-0,08525	-426,3
52	-0,088	-0,0875	-0,08775	-438,8
57	-0,09	-0,0895	-0,08975	-448,8
59	-0,091	-0,089	-0,09	-450,0
63	-0,0925	-0,0895	-0,091	-455,0
66	-0,094	-0,088	-0,091	-455,0
73	-0,095	-0,093	-0,094	-470,0
77	-0,0965	-0,094	-0,09525	-476,3
84	-0,098	-0,095	-0,0965	-482,5
91	-0,0985	-0,0955	-0,097	-485,0

B25

Dias passados	Diferença (mm)		Média (mm)	Deformação média (µm/m)
	Provete 1	Provete 2		
1	0	0	0	0,0
2	-0,008	-0,003	-0,0055	-27,5
3	-0,015	-0,009	-0,012	-60,0
4	-0,0185	-0,014	-0,01625	-81,3
5	-0,0225	-0,0185	-0,0205	-102,5
6	-0,0235	-0,0195	-0,0215	-107,5
7	-0,0285	-0,0255	-0,027	-135,0
8	-0,031	-0,0265	-0,02875	-143,8
9	-0,0345	-0,0305	-0,0325	-162,5
10	-0,0375	-0,033	-0,03525	-176,3
11	-0,0415	-0,0345	-0,038	-190,0
12	-0,044	-0,0365	-0,04025	-201,3
13	-0,0445	-0,0385	-0,0415	-207,5
14	-0,0485	-0,041	-0,04475	-223,8
15	-0,0515	-0,0445	-0,048	-240,0
18	-0,0525	-0,05	-0,05125	-256,3
20	-0,059	-0,057	-0,058	-290,0
22	-0,06	-0,059	-0,0595	-297,5
25	-0,0655	-0,063	-0,06425	-321,3
26	-0,067	-0,065	-0,066	-330,0
27	-0,0695	-0,0655	-0,0675	-337,5
28	-0,0705	-0,068	-0,06925	-346,3
29	-0,071	-0,068	-0,0695	-347,5
32	-0,0755	-0,071	-0,07325	-366,3
34	-0,0775	-0,073	-0,07525	-376,3
36	-0,079	-0,0735	-0,07625	-381,3
39	-0,0825	-0,075	-0,07875	-393,8
42	-0,0845	-0,079	-0,08175	-408,8
45	-0,085	-0,0795	-0,08225	-411,3
47	-0,087	-0,0815	-0,08425	-421,3
50	-0,089	-0,086	-0,0875	-437,5
55	-0,091	-0,0885	-0,08975	-448,8
57	-0,0935	-0,089	-0,09125	-456,3
61	-0,094	-0,09	-0,092	-460,0
64	-0,093	-0,092	-0,0925	-462,5
71	-0,097	-0,093	-0,095	-475,0
75	-0,0975	-0,095	-0,09625	-481,3
82	-0,099	-0,0965	-0,09775	-488,8
91	-0,099	-0,098	-0,0985	-492,5

B100

Dias passados	Diferença (mm)		Média (mm)	Deformação média (µm/m)
	Provete 1	Provete 2		
1	0	0	0	0,0
2	-0,0065	-0,0065	-0,0065	-32,5
3	-0,011	-0,013	-0,012	-60,0
4	-0,0155	-0,0135	-0,0145	-72,5
5	-0,02	-0,017	-0,0185	-92,5
6	-0,0245	-0,0215	-0,023	-115,0
7	-0,027	-0,0245	-0,02575	-128,8
8	-0,0305	-0,027	-0,02875	-143,8
9	-0,033	-0,03	-0,0315	-157,5
10	-0,036	-0,036	-0,036	-180,0
11	-0,038	-0,0375	-0,03775	-188,8
14	-0,0475	-0,0455	-0,0465	-232,5
16	-0,055	-0,0505	-0,05275	-263,8
18	-0,059	-0,0565	-0,05775	-288,8
21	-0,064	-0,0605	-0,06225	-311,3
22	-0,067	-0,0655	-0,06625	-331,3
23	-0,069	-0,069	-0,069	-345,0
24	-0,0695	-0,0695	-0,0695	-347,5
25	-0,071	-0,071	-0,071	-355,0
28	-0,075	-0,075	-0,075	-375,0
30	-0,077	-0,078	-0,0775	-387,5
32	-0,0795	-0,0805	-0,08	-400,0
35	-0,082	-0,083	-0,0825	-412,5
38	-0,0855	-0,0865	-0,086	-430,0
41	-0,0875	-0,0875	-0,0875	-437,5
43	-0,0905	-0,09	-0,09025	-451,3
46	-0,096	-0,0945	-0,09525	-476,3
51	-0,099	-0,0975	-0,09825	-491,3
53	-0,099	-0,0985	-0,09875	-493,8
57	-0,1	-0,103	-0,1015	-507,5
60	-0,102	-0,102	-0,102	-510,0
67	-0,104	-0,1085	-0,10625	-531,3
71	-0,1055	-0,11	-0,10775	-538,8
78	-0,109	-0,112	-0,1105	-552,5
85	-0,108	-0,113	-0,1105	-552,5
91	-0,1105	-0,114	-0,11225	-561,3

B100SP1.0

Dias passados	Diferença (mm)		Média (mm)	Deformação média (µm/m)
	Provete 1	Provete 2		
1	0	0	0	0,0
2	-0,003	-0,004	-0,0035	-17,5
3	-0,004	-0,006	-0,005	-25,0
4	-0,008	-0,009	-0,0085	-42,5
5	-0,011	-0,0125	-0,01175	-58,8
6	-0,014	-0,0135	-0,01375	-68,8
7	-0,014	-0,017	-0,0155	-77,5
8	-0,0145	-0,0195	-0,017	-85,0
9	-0,018	-0,0225	-0,02025	-101,3
10	-0,0205	-0,0255	-0,023	-115,0
13	-0,0265	-0,0285	-0,0275	-137,5
15	-0,03	-0,032	-0,031	-155,0
17	-0,0315	-0,035	-0,03325	-166,3
20	-0,0365	-0,04	-0,03825	-191,3
21	-0,0395	-0,0415	-0,0405	-202,5
22	-0,0395	-0,0425	-0,041	-205,0
23	-0,041	-0,0435	-0,04225	-211,3
24	-0,0415	-0,045	-0,04325	-216,3
27	-0,046	-0,0475	-0,04675	-233,8
29	-0,049	-0,048	-0,0485	-242,5
31	-0,051	-0,0495	-0,05025	-251,3
34	-0,0535	-0,052	-0,05275	-263,8
37	-0,054	-0,0575	-0,05575	-278,8
40	-0,055	-0,058	-0,0565	-282,5
42	-0,057	-0,0595	-0,05825	-291,3
45	-0,06	-0,0625	-0,06125	-306,3
50	-0,062	-0,065	-0,0635	-317,5
52	-0,0615	-0,066	-0,06375	-318,8
56	-0,0625	-0,067	-0,06475	-323,8
59	-0,0625	-0,0675	-0,065	-325,0
66	-0,064	-0,0695	-0,06675	-333,8
70	-0,065	-0,0705	-0,06775	-338,8
77	-0,0675	-0,0715	-0,0695	-347,5
84	-0,067	-0,0705	-0,06875	-343,8
90	-0,068	-0,072	-0,07	-350,0

ANEXO Q - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Betão	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4
BR	m ₁ (g)	2473,5	2473,9	2459,1	2471
	m ₂ (g)	1446	1447,3	1439,4	1446,1
	m ₃ (g)	2325,7	2327,0	2316,3	2326,1
	Absorção de água (%)	14,38	14,31	14,00	14,14
	Média (%)		14,21		
	Desvio padrão (%)		0,17		
B25	m ₁ (g)	2437,7	2417,7	2433,4	2523,4
	m ₂ (g)	1416,5	1398,1	1412,4	1473,9
	m ₃ (g)	2280,3	2252,4	2271,6	2370,7
	Absorção de água (%)	15,41	16,21	15,85	14,55
	Média (%)		15,51		
	Desvio padrão (%)		0,72		
B100	m ₁ (g)	2405,2	2380,4	2362,3	2404,4
	m ₂ (g)	1373,5	1359,1	1348,9	1380,5
	m ₃ (g)	2217,1	2190,1	2178,9	2228,4
	Absorção de água (%)	18,23	18,63	18,10	17,19
	Média (%)		18,04		
	Desvio padrão (%)		0,61		
B100SP1.0	m ₁ (g)	2447,4	2414	2384,7	2439,9
	m ₂ (g)	1426,9	1405,5	1385,2	1422,7
	m ₃ (g)	2310,9	2278,7	2243,5	2297,6
	Absorção de água (%)	13,38	13,42	14,13	14,99
	Média (%)		13,73		
	Desvio padrão (%)		0,39		

ANEXO R - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tempo de ensaio (h)	Provete 1			Provete 2			Provete 3			Provete 4			Ac média (g/mm ²)	Desvio padrão (g/mm ²)
	M (g)	Ac (g/mm ²)	Kc (g/(mm ² h ^{1/2}))	M (g)	Ac (g/mm ²)	Kc (g/(mm ² h ^{1/2}))	M (g)	Ac (g/mm ²)	Kc (g/(mm ² h ^{1/2}))	M (g)	Ac (g/mm ²)	Kc (g/(mm ² h ^{1/2}))		
BR														
0	4004,0	0,00E+00	0,00E+00	4156,5	0,00E+00	0,00E+00	4164,7	0,00E+00	0,00E+00	4028,9	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	4036,8	1,86E-03	1,07E-03	4189,1	1,84E-03	1,07E-03	4194,8	1,70E-03	9,83E-04	4060,7	1,80E-03	1,04E-03	1,80E-03	6,95E-05
6	4046,2	2,39E-03	9,75E-04	4198,8	2,39E-03	9,77E-04	4203,3	2,18E-03	8,92E-04	4070,3	2,34E-03	9,56E-04	2,33E-03	9,79E-05
24	4074,0	3,96E-03	8,09E-04	4229,4	4,13E-03	8,42E-04	4231,7	3,79E-03	7,74E-04	4098,0	3,91E-03	7,98E-04	3,95E-03	1,38E-04
72	4098,8	5,36E-03	6,32E-04	4260,4	5,88E-03	6,93E-04	4259,1	5,34E-03	6,30E-04	4125,2	5,45E-03	6,42E-04	5,51E-03	2,51E-04
B25														
0	4013,9	0,00E+00	0,00E+00	3986,3	0,00E+00	0,00E+00	4070,5	0,00E+00	0,00E+00	3973,1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	4049,5	2,01E-03	1,16E-03	4024,5	2,16E-03	1,25E-03	4106,5	2,04E-03	1,18E-03	4002,0	1,64E-03	9,44E-04	1,96E-03	2,27E-04
6	4060,2	2,62E-03	1,07E-03	4035,2	2,77E-03	1,13E-03	4116,3	2,59E-03	1,06E-03	4010,6	2,12E-03	8,66E-04	2,53E-03	2,80E-04
24	4094,2	4,54E-03	9,28E-04	4069,0	4,68E-03	9,55E-04	4151,0	4,56E-03	9,30E-04	4038,6	3,71E-03	7,57E-04	4,37E-03	4,48E-04
72	4125,8	6,33E-03	7,46E-04	4099,3	6,39E-03	7,54E-04	4185,5	6,51E-03	7,67E-04	4064,9	5,19E-03	6,12E-04	6,11E-03	6,13E-04
B100														
0	3943,0	0,00E+00	0,00E+00	3914,5	0,00E+00	0,00E+00	4016,0	0,00E+00	0,00E+00	3910,7	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3989,2	2,61E-03	1,51E-03	3958,5	2,49E-03	1,44E-03	4059,8	2,48E-03	1,43E-03	3959,1	2,74E-03	1,58E-03	2,58E-03	1,22E-04
6	4003,1	3,40E-03	1,39E-03	3969,4	3,11E-03	1,27E-03	4073,7	3,27E-03	1,33E-03	3971,8	3,46E-03	1,41E-03	3,31E-03	1,56E-04
24	4045,7	5,81E-03	1,19E-03	4007,7	5,27E-03	1,08E-03	4117,5	5,74E-03	1,17E-03	4011,6	5,71E-03	1,17E-03	5,63E-03	2,44E-04
72	4088,1	8,21E-03	9,68E-04	4045,4	7,41E-03	8,73E-04	4156,8	7,97E-03	9,39E-04	4046,1	7,66E-03	9,03E-04	7,81E-03	3,51E-04
B100SP1.0														
0	4095,8	0,00E+00	0,00E+00	4179,7	0,00E+00	0,00E+00	4063,5	0,00E+00	0,00E+00	4157,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	4118,5	1,28E-03	7,42E-04	4201,4	1,23E-03	7,09E-04	4085,6	1,25E-03	7,22E-04	4179,5	1,24E-03	7,19E-04	1,25E-03	2,37E-05
6	4124,9	1,65E-03	6,72E-04	4208,6	1,64E-03	6,68E-04	4091,6	1,59E-03	6,49E-04	4185,9	1,61E-03	6,56E-04	1,62E-03	2,59E-05
24	4142,6	2,65E-03	5,41E-04	4225,3	2,58E-03	5,27E-04	4107,5	2,49E-03	5,08E-04	4203,7	2,61E-03	5,34E-04	2,58E-03	6,81E-05
72	4162,1	3,75E-03	4,42E-04	4243,2	3,59E-03	4,23E-04	4122,2	3,32E-03	3,91E-04	4222,4	3,67E-03	4,33E-04	3,58E-03	1,87E-04

ANEXO S - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Betão	Provete	Profundidade de carbonatação (mm)											
		7 dias			28 dias			56 dias			90 dias		
		Média provete	Média betão	Desvio padrão	Média provete	Média betão	Desvio padrão	Média provete	Média betão	Desvio padrão	Média provete	Média betão	Desvio padrão
BR	1	2,98			4,41			9,03			10,65		
	2	3,33			4,82			8,16			10,66		
	3	2,52	3,00	0,35	4,32	4,51	0,22	7,72	8,27	0,55	10,97	10,44	0,66
	4	3,16			4,48			8,16			9,47		
B25	1	3,41			5,46			7,92			11,39		
	2	2,84			5,11			9,28			11,10		
	3	3,24	3,16	0,24	5,55	5,29	0,25	9,76	8,99	0,78	10,65	11,21	0,45
	4	3,15			5,05			9,02			11,72		
B100	1	4,30			5,32			9,58			9,39		
	2	2,88			5,54			8,36			10,77		
	3	3,75	3,68	0,59	5,87	5,67	0,30	7,48	8,95	1,29	11,14	10,61	0,84
	4	3,78			5,96			10,39			11,16		
B100SP1.0	1	1,17			2,01			4,26			3,79		
	2	0,71			1,79			2,51			4,26		
	3	1,36	1,14	0,30	2,04	1,89	0,16	3,50	3,38	0,72	4,11	4,21	0,38
	4	1,35			1,71			3,25			4,70		

ANEXO T - ENSAIOS AO BETÃO ENDURECIDO: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DOS CLORETOS

28 dias

Betão	Provete	L (mm)	I _{30v} (mA)	U (V)	I _{ajust} (mA)	T _i (°C)	I _f (mA)	T _f (°C)	T _{méd} (°C)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	X ₄ (mm)	X ₅ (mm)	X ₆ (mm)	X ₇ (mm)	X _{méd} (mm)	D ₀ (x10 ⁻¹² m ² /s)	D _{0méd} (x10 ⁻¹² m ² /s)	Desvio padrão (x10 ⁻¹² m ² /s)
BR	1	49,0								23,6	23,0	28,3	25,8	30,6	27,8	27,2	26,6	14,9		
	2	51,0	239	25	200	23,9	201	26,2	25,1	29,1	31,2	27,8	28,1	29,2	29,2	28,9	29,1	16,9	16,5	1,4
	3	50,5								29,0	27,5	27,5	29,0	33,0	36,6	29,7	30,3	17,6		
B25	1	51,0								29,5	25,9	27,3	33,3	34,5	34,0	28,2	30,4	17,7		
	2	50,0	261	25	218	22,9	256	26,0	24,5	23,2	29,4	29,9	30,1	29,8	29,7	30,7	29,0	16,6	17,7	1,1
	3	50,0								34,7	35,0	31,0	35,4	35,4	32,4	27,7	32,5	18,7		
B100	1	49,0								26,5	31,9	28,6	30,7	31,5	27,5	29,2	29,4	16,4		
	2	52,0	267	25	226	22,5	256	21,1	21,8	23,5	26,8	26,9	28,2	28,3	29,3	25,7	26,9	15,8	16,0	0,4
	3	48,0								28,8	27,7	26,9	30,2	31,4	30,3	26,5	28,8	15,7		
B100SP1.0	1	48,5								12,8	17,0	16,2	16,1	25,0	20,9	7,8	18,0	8,0		
	2	50,0	171	30	171	22,5	202	22,5	22,5	18,2	18,2	13,2	19,0	17,2	17,7	19,6	17,6	8,0	8,0	0,1
	3	50,5								14,6	18,1	17,8	19,1	18,5	16,6	14,9	17,1	7,9		

91 dias

Betão	Provete	L (mm)	I _{30v} (mA)	U (V)	I _{ajust} (mA)	T _i (°C)	I _f (mA)	T _f (°C)	T _{méd} (°C)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	X ₄ (mm)	X ₅ (mm)	X ₆ (mm)	X ₇ (mm)	X _{méd} (mm)	D ₀ (x10 ⁻¹² m ² /s)	D _{0méd} (x10 ⁻¹² m ² /s)	Desvio padrão (x10 ⁻¹² m ² /s)
BR	1	49,5								25,9	31,3	25,3	21,7	24,9	26,5	29,4	26,4	14,6		
	2	50,5	190	25	150	17,0	190	22,5	19,8	28,2	30,9	29,9	30,0	23,2	21,2	23,1	26,6	15,1	14,1	1,3
	3	49,5								26,9	20,1	22,7	22,5	22,2	21,6	25,7	23,1	12,7		
B25	1	50,0								31,4	32,6	32,4	29,9	27,4	28,5	31,6	30,5	14,4		
	2	51,0	180	30	180	17,1	290	23,9	20,5	32,1	32,1	29,4	30,2	31,2	31,8	31,5	31,2	15,0	15,1	0,9
	3	50,0								34,6	36,2	32,8	34,4	33,4	32,5	31,0	34,0	16,1		
B100	1	51,5								19,8	20,4	21,1	23,7	26,3	22,2	23,8	22,5	12,8		
	2	50,0	190	25	160	16,7	210	21,7	19,2	25,0	20,6	24,7	25,2	26,3	25,9	27,9	25,1	14,0	13,8	0,9
	3	49,0								23,3	25,9	29,5	34,8	26,1	27,0	19,5	26,6	14,6		
B100SP1.0	1	51,0								17,5	14,7	14,9	15,8	15,3	14,4	14,1	15,5	7,1		
	2	49,0	140	30	140	16,7	170	21,7	19,2	18,0	17,8	18,7	18,4	17,5	18,4	17,0	18,0	8,0	7,3	0,6
	3	51,0								14,9	16,6	17,6	14,8	15,6	12,7	13,6	15,1	6,9		

ANEXO U - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO *IN SITU*: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PROVETES

7 dias

Betão	Piso	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Desvio padrão
BR	1	Massa (g)	7526,1	7520,4	7420,3	7488,9	59,5
		Força (kN)	601,7	670,9	596,9	623,2	41,4
		f _{ci} (MPa)	26,7	29,8	26,5	27,7	1,8
B25	1	Massa (g)	7506,0	7606,0	7548	7556,0	70,7
		Força (kN)	579,7	573,2	454,2	576,4	4,6
		f _{ci} (MPa)	25,8	25,5	20,2*	25,6	0,2
	2	Massa (g)	7480,6	7528,8	7487,1	7498,8	26,2
		Força (kN)	418,6	458,6	454,9	444,0	22,1
		f _{ci} (MPa)	18,6	20,4	20,2	19,7	1,0
B100	1	Massa (g)	-	-	-	-	-
		Força (kN)	651,2	594,7	617,1	621,0	28,5
		f _{ci} (MPa)	28,9	26,4	27,4	27,6	1,3
	2	Massa (g)	7379,7	7459,9	7476,5	7438,7	51,8
		Força (kN)	586,1	562,0	560,3	569,4	14,4
		f _{ci} (MPa)	26,0	25,0	24,9	25,3	0,6
B100SP1.0	1	Massa (g)	7870,3	8065,6	7892,7	7942,9	106,9
		Força (kN)	1005	1136	1063	1070,5	65,6
		f _{ci} (MPa)	44,7	50,5	47,2	47,5	2,9
	2	Massa (g)	8119,9	8093,3	8088,5	8100,6	16,9
		Força (kN)	1175	1215	1192	1193,8	19,7
		f _{ci} (MPa)	52,2	54,0	53,0	53,1	0,9

*valor desprezado por ser bastante inferior ao dos outros dois provetes

28 dias

Betão	Piso	Variável	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média	Desvio padrão
BR	1	Massa (g)	7577,7	7535,5	7539,0	7634	7524,15	7562,1	45,0
		Força (kN)	696,3	685,8	705,8	732,1	701	704,2	17,3
		f _{ci} (MPa)	30,9	30,5	31,4	32,5	31,2	31,3	0,8
B25	1	Massa (g)	7533,4	7729,9	7547,4	7516,4	7778,2	7621,1	123,1
		Força (kN)	627,0	652,5	630,5	664,7	669,2	648,8	19,3
		f _{ci} (MPa)	27,9	29,0	28,0	29,5	29,7	28,8	0,9
	2	Massa (g)	7407,3	7378,3	7516,0	7437,1	7688,0	7485,3	124,4
		Força (kN)	552,5	516,6	471,3	489,6	494,3	504,8	31,2
		f _{ci} (MPa)	24,6	23,0	20,9	21,8	22,0	22,4	1,4
B100	1	Massa (g)	7357,9	7427,8	7475,9	7391,4	7497,4	7430,1	57,8
		Força (kN)	796,9	772,5	782,1	739,8	789,8	776,2	22,3
		f _{ci} (MPa)	35,4	34,3	34,8	32,9	35,1	34,5	1,0
	2	Massa (g)	7365,3	7275,1	7336,7	7371,1	7335,6	7336,8	38,1
		Força (kN)	706,1	689,4	698,1	677,8	688,3	692,0	10,7
		f _{ci} (MPa)	31,4	30,6	31,0	30,1	30,6	30,8	0,5
B100C50	1	Massa (g)	7896,5	8020,2	7952,2	8092,7	-	7990,4	84,9
		Força (kN)	1244	1156	1183	1271	-	1213,5	53,1
		f _{ci} (MPa)	55,3	51,4	52,6	56,5	-	53,9	2,4
	2	Massa (g)	8130,2	8070,2	7977,2	8364,3	8105,7	8129,5	143,5
		Força (kN)	1380	1445	1354	1459	1389	1406,5	45,7
		f _{ci} (MPa)	61,3	64,4	60,2	64,8	58,8	61,9	2,6

ANEXO V - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO *IN SITU*: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS

BR

Elemento		t ₁ (μs)	d ₁ (cm)	v ₁ (km/s)	t ₂ (μs)	d ₂ (cm)	v ₂ (km/s)	v _{média} (km/s)	Média elemento (km/s)	Desvio padrão elemento (km/s)	Média betão (km/s)	Desvio padrão betão (km/s)		
Pilares	1º piso	Base	45	20,0	4,44	53	21,0	3,96	4,21	0,07				
		Meio	48	20,0	4,17	52	21,5	4,13					4,15	
		Topo	47	20,0	4,26	48	21,3	4,44					4,35	
	2º piso	Base	47	20,2	4,30	49	21,0	4,29					4,29	
		Meio	47	20,0	4,26	51	21,1	4,14					4,20	
		Topo	49	20,5	4,18	48	20,1	4,19					4,19	
		3º piso	Meio	52	21,5	4,13	48	20,3					4,23	4,18
	4º piso	Meio	53	21,9	4,13	49	20,2	4,12					4,13	
		1º piso	Base	48	20,6	4,29	49	20,1					4,10	4,20
			Meio	49	20,0	4,08	52	20,5					3,94	4,01
			Topo	51	20,0	3,92	51	20,6					4,04	3,98
	2º piso	Base	47	20,2	4,30	47	20,0	4,26					4,28	4,15
Meio		49	20,3	4,14	48	20,0	4,17	4,15						
Topo		-	-	-	-	-	-	-						
3º piso		Meio	46	19,5	4,24	50	20,7	4,14	4,19					
4º piso	Meio	48	20,1	4,19	48	20,3	4,23	4,21						
	1º piso	Extremidade 1	65	25,5	3,92	51	20,1	3,94	3,93					
		Meio	63	25,5	4,05	49	20,4	4,16	4,11	4,03	0,09			
		Extremidade 2	63	25,6	4,06	50	20,2	4,04	4,05					
Extremidade 1	-	-	-	-	-	-	-							
2º piso	Meio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Extremidade 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

B25

Elemento		t ₁ (μs)	d ₁ (cm)	v ₁ (km/s)	t ₂ (μs)	d ₂ (cm)	v ₂ (km/s)	v _{média} (km/s)	Média elemento (km/s)	Desvio padrão elemento (km/s)	Média betão (km/s)	Desvio padrão betão (km/s)					
Pilares	1º piso	Base	46	20,0	4,35	46	20,4	4,43	4,19	0,14							
		Meio	48	20,0	4,17	50	20,7	4,14									
		Topo	50	20,5	4,10	51	20,2	3,96									
	2º piso	2	Base	49	20,2	4,12	49	20,8					4,24				
			Meio	49	20,5	4,18	50	21,2					4,24				
			Topo	49	20,1	4,10	49	20,1					4,10				
		3	Meio	49	20,1	4,10	50	20,2					4,04	4,07			
	4	Meio	49	21,5	4,39	46	20,2	4,39					4,39				
	1º piso	1	Base	47	20,0	4,26	47	20,1					4,28	3,94	0,14	4,06	0,17
			Meio	51	20,0	3,92	53	20,6					3,89				
			Topo	53	20,1	3,79	52	20,1					3,87				
		2	Base	50	20,2	4,04	51	20,1					3,94				
Meio			51	20,6	4,04	53	20,0	3,77	3,91								
3		Topo	51	20,0	3,92	53	20,1	3,79	3,86								
		Meio	52	20,4	3,92	54	21,3	3,94	3,93								
		Meio	51	20,0	3,92	56	21,1	3,77	3,84								
Vigas	1º piso	Extremidade 1	65	25,8	3,97	42	19,0	4,52	4,08	0,14							
		Meio	69	26,5	3,84	46	19,4	4,22									
		Extremidade 2	67	26,1	3,90	48	19,5	4,06									
	2º piso	Extremidade 1	70	26,2	3,74	47	20,2	4,30					4,02				
		Meio	-	-	-	50	20,3	4,06					4,06				
		Extremidade 2	71	26,3	3,70	48	20,0	4,17					3,94				

B100

Elemento		t ₁ (μs)	d ₁ (cm)	v ₁ (km/s)	t ₂ (μs)	d ₂ (cm)	v ₂ (km/s)	v _{média} (km/s)	Média elemento (km/s)	Desvio padrão elemento (km/s)	Média betão (km/s)	Desvio padrão betão (km/s)					
Pilares	1º piso	Base	52	20,8	4,00	52	20,0	3,85	3,91	0,14							
		Meio	53	21,5	4,06	51	20,3	3,98					4,02				
		Topo	53	21,1	3,98	54	20,0	3,70					3,84				
	2º piso	Base	54	20,3	3,76	54	20,0	3,70					3,73				
		Meio	55	20,7	3,76	51	20,1	3,94					3,85				
		Topo	52	20,5	3,94	56	20,0	3,57					3,76				
	3º piso	Meio	50	20,2	4,04	51	20,8	4,08					4,06				
		4º piso	Meio	50	20,2	4,04	48	20,0					4,17	4,10			
			Meio	54	20,0	3,70	55	20,5					3,73	3,72			
			Meio	49	20,0	4,08	50	20,5					4,10	4,09			
	2º piso	Topo	51	19,9	3,90	-	-	-					3,90	3,95	0,12	3,90	0,13
		Base	50	19,8	3,96	54	20,7	3,83					3,90				
Meio		49	19,8	4,04	52	20,5	3,94	3,99									
Topo		49	20,0	4,08	-	-	-	4,08									
Meio		52	20,2	3,88	49	20,1	4,10	3,99									
1º piso	Meio	50	19,9	3,98	52	20,0	3,85	3,91									
	Extremidade 1	53	20,2	3,81	69	26,3	3,81	3,81									
	Meio	53	20,1	3,79	72	26,5	3,68	3,74	3,82	0,08							
	Extremidade 2	51	20,2	3,96	69	26,5	3,84	3,90									
2º piso	Extremidade 1	50	20,0	4,00	-	-	-	4,00									
	Meio	49	20,0	4,08	-	-	-	4,08					3,94	0,18			
	Extremidade 2	54	20,2	3,74	-	-	-	3,74									

B100SP1.0

Elemento		t ₁ (μs)	d ₁ (cm)	v ₁ (km/s)	t ₂ (μs)	d ₂ (cm)	v ₂ (km/s)	v _{média} (km/s)	Média elemento (km/s)	Desvio padrão elemento (km/s)	Média betão (km/s)	Desvio padrão betão (km/s)					
Pilares	1	Base	44	20,2	4,59	48	20,5	4,27	4,28	0,12							
		Meio	50	20,7	4,14	50	20,3	4,06									
		Topo	49	20,5	4,18	46	20,2	4,39									
	1º piso	2	Base	49	20,1	4,10	48	20,0					4,17				
			Meio	46	20,4	4,43	48	20,5					4,27				
			Topo	46	19,8	4,30	46	20,0					4,35				
	2º piso	3	Meio	48	20,5	4,27	49	20,5					4,18	4,46	0,17	4,38	0,18
		4	Meio	47	20,3	4,32	45	20,1					4,47				
		1	Base	45	20,1	4,47	44	20,1					4,57				
			Meio	43	19,7	4,58	44	20,0	4,55	4,56							
			Topo	43	20,4	4,74	45	20,5	4,56	4,65							
			Base	48	19,8	4,13	48	20,0	4,17	4,15							
2		Meio	47	20,1	4,28	44	20,3	4,61	4,45								
		Topo	44	20,3	4,61	44	20,2	4,59	4,60								
	3	Meio	46	20,5	4,46	44	20,2	4,59	4,52								
	4	Meio	48	20,1	4,19	46	20,0	4,35	4,27								
Vigas	1º piso	Extremidade 1	49	20,0	4,08	-	-	-	4,08	4,22	0,20						
		Meio	49	20,2	4,12	-	-	-	4,12								
		Extremidade 2	45	20,0	4,44	-	-	-	4,44								
	2º piso	Extremidade 1	43	19,9	4,63	-	-	-	4,63	4,54	0,08						
		Meio	44	19,9	4,52	-	-	-	4,52								
		Extremidade 2	45	20,1	4,47	-	-	-	4,47								

ANEXO W - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO *IN SITU*: DUREZA SUPERFICIAL

BR

Elemento	Modo de medição	Número de ressalto									Mediana	Mediana elemento	Mediana betão - descendente	Mediana betão - horizontal		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Pilares	1° piso	Base	Horizontal	30	38	32	30	28	31	28	30	30	30			
		Meio	Horizontal	30	29	30	31	36	30	31	30	30	30			
		Topo	Horizontal	31	29	30	30	30	32	36	32	31	31			
	2° piso	2	Base	Horizontal	33	31	28	30	30	30	30	31	32	30		
			Meio	Horizontal	26	26	26	30	31	32	28	28	26	28		
			Topo	Horizontal	30	30	30	30	34	31	29	27	31	30	30	
		3	Base	Horizontal	36	34	32	38	34	32	36	33	30	34		
	Meio		Horizontal	40	34	38	32	34	32	40	34	34	34			
	4	Base	Horizontal	34	28	30	32	32	29	29	29	31	30			
		Meio	Horizontal	36	32	32	31	33	31	28	30	33	32			
	Vigas	1° piso	Base	Horizontal	28	26	29	26	26	28	26	26	24	26		
			Meio	Horizontal	32	28	26	28	26	30	26	26	28	28		
Topo			Horizontal	30	27	30	26	27	29	27	29	27	27			
2° piso		2	Base	Horizontal	34	34	34	31	29	29	29	28	30	30		
			Meio	Horizontal	31	29	31	27	27	26	31	30	24	29		
			Topo	Horizontal	28	32	32	30	28	30	30	34	29	30	28	
		3	Base	Horizontal	28	34	28	26	28	24	30	29	24	28		
Meio			Horizontal	31	32	26	28	34	28	24	26	30	28	24	30	
4		Base	Horizontal	30	30	29	28	30	31	29	28	31	30			
		Meio	Horizontal	34	28	28	27	31	24	30	31	26	28			
1° piso		Extremidade 1	Descendente	24	22	26	30	21	24	22	24	24	24			
			Horizontal	24	24	26	26	26	21	20	30	28	26	22 -	27 -	
	Extremidade 2	Descendente	22	26	20	21	16	20	18	20	22	20	Descente	Horizontal		
		Horizontal	33	24	28	31	31	31	26	22	24	28				
	2° piso	Extremidade 1	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
			Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Extremidade 2	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
2° piso	1° piso	Extremidade 1	Descendente	26	31	22	21	26	24	22	22	24	24			
		Extremidade 2	Descendente	26	22	22	28	22	23	24	22	21	22	24		
		Meio	Descendente	32	26	29	24	30	27	22	22	29	27			
	2° piso	Extremidade 1	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
		Extremidade 2	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
		Meio	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

B25

Elemento	Modo de medição	Número de ressalto									Mediana	Mediana elemento	Mediana betão - descendente	Mediana betão - horizontal	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9					
Pilares	1º piso	Base	Horizontal	34	42	42	40	36	34	36	39	36	36		
		Meio	Horizontal	34	32	36	32	34	36	34	36	34	34		
		Topo	Horizontal	28	33	36	32	30	34	34	36	33	33		
	2º piso	Base	Horizontal	36	44	42	40	37	38	40	38	44	40		
		Meio	Horizontal	32	36	38	34	39	32	33	30	36	34	35	
		Topo	Horizontal	30	36	33	34	36	32	34	36	33	34		
	3º piso	Base	Horizontal	32	36	38	38	38	36	34	39	34	36		
		Meio	Horizontal	34	36	38	36	38	34	34	38	33	36		
		Topo	Horizontal	34	36	36	44	42	38	38	38	38	38		
	4º piso	Base	Horizontal	30	28	28	30	28	26	32	36	36	30		
		Meio	Horizontal	28	35	33	32	34	33	33	30	30	33		
		Topo	Horizontal	32	31	26	26	24	28	30	33	34	30		
1º piso	Base	Horizontal	27	22	24	22	24	20	22	24	24	24			
	Meio	Horizontal	31	30	32	28	34	32	32	30	32	32			
	Topo	Horizontal	26	24	24	26	34	28	28	30	28	28	30		
2º piso	Base	Horizontal	31	26	30	28	28	26	31	26	32	28			
	Meio	Horizontal	30	30	30	32	30	32	32	34	34	32	22,5	32,5	
	Topo	Horizontal	28	30	30	26	32	28	33	26	28	28			
3º piso	Base	Horizontal	34	34	31	28	30	30	30	30	30	30			
	Meio	Horizontal	30	32	34	28	30	28	28	26	30	30			
	Topo	Horizontal	30	30	30	32	30	32	32	34	34	32			
Vigas	1º piso	Extremidade 1	Descendente	24	24	26	20	32	24	26	20	22	24		
			Horizontal	36	32	33	34	36	32	38	34	36	34	24 -	34 -
		Extremidade 2	Descendente	20	18	22	24	26	24	26	20	24	24	Descente	Horizontal
	2º piso		Horizontal	34	32	30	36	34	32	33	34	34	34		
		Extremidade 1	Descendente	28	26	24	32	24	20	22	24	20	24		
			Horizontal	26	34	29	30	22	28	29	30	28	29	22 -	28,5 -
3º piso	Extremidade 2	Descendente	22	18	20	22	20	20	22	21	18	20	Descente	Horizontal	
		Horizontal	31	26	30	28	28	26	31	26	32	28			
	Topo	Horizontal	31	26	30	28	28	26	31	26	32	28			
Lajes	1º piso	Extremidade 1	Descendente	26	21	20	20	20	20	26	25	24	21		
		Extremidade 2	Descendente	22	24	24	26	20	24	26	20	22	24	24	
		Meio	Descendente	28	24	24	24	26	24	21	26	24	24		
	2º piso	Extremidade 1	Descendente	18	24	20	18	20	24	23	20	20	20		
		Extremidade 2	Descendente	20	24	16	20	24	18	18	20	22	20	20	20
		Meio	Descendente	16	16	18	20	22	24	23	20	20	20		

B100

Elemento	Modo de medição	Número de ressalto									Mediana	Mediana elemento	Mediana betão - descendente	Mediana betão - horizontal		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Pilares	1º piso	Base	Horizontal	32	32	32	40	42	40	36	34	36	36			
		Meio	Horizontal	34	30	30	30	32	31	30	32	31	31			
		Topo	Horizontal	30	30	30	36	34	31	32	30	34	31			
	2	Base	Horizontal	32	40	40	40	36	38	34	36	38	38			
		Meio	Horizontal	30	40	40	38	36	34	32	30	33	34	34		
		Topo	Horizontal	30	32	32	30	34	28	30	33	30	30	30	34	
	3	Base	Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		Meio	Horizontal	40	32	36	34	34	40	34	32	33	34			
	4	Base	Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		Meio	Horizontal	40	40	40	34	34	30	32	33	34	34			
	2º piso	1	Base	Horizontal	40	40	40	40	36	33	38	34	36	38		
			Meio	Horizontal	42	36	38	40	38	34	34	32	37	37		
Topo			Horizontal	36	34	32	34	36	34	32	30	32	34			
2		Base	Horizontal	30	32	34	36	34	32	30	32	30	32			
		Meio	Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34		
		Topo	Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3		Base	Horizontal	38	38	36	32	34	34	34	33	32	34	25	34	
		Meio	Horizontal	38	38	36	36	36	36	36	36	36	36			
4		Base	Horizontal	36	38	34	39	38	36	34	38	33	36			
		Meio	Horizontal	35	39	40	40	32	32	34	34	33	34			
Vigas		1º piso	Extremidade 1	Descendente	26	28	26	24	24	26	28	24	22	26		
				Horizontal	34	32	36	40	36	38	34	34	36	36	25 -	35 -
	Extremidade 2		Descendente	29	28	22	22	24	26	20	28	24	24	Descente	Horizontal	
	2º piso	Extremidade 1	Descendente	26	32	20	24	26	30	24	22	26	26			
			Horizontal	30	30	32	32	34	36	32	34	32	32	25 -	33 -	
		Extremidade 2	Descendente	28	30	18	26	24	24	22	20	24	24	Descente	Horizontal	
Lajes	1º piso	Extremidade 1	Descendente	26	20	20	20	22	24	26	24	22	22			
			Extremidade 2	Descendente	26	20	28	22	24	26	20	22	20	22	22	
		Meio	Descendente	26	24	22	30	32	30	26	24	26	26			
	2º piso	Extremidade 1	Descendente	20	22	26	24	30	32	26	24	24	24			
			Extremidade 2	Descendente	30	30	28	26	28	30	27	29	30	29	26	
		Meio	Descendente	28	28	26	30	26	24	29	26	24	26			

B100SP1.0

Elemento	Modo de medição	Número de ressalto									Mediana	Mediana elemento	Mediana betão - descendente	Mediana betão - horizontal		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Pilares	1	Base	Horizontal	46	46	38	42	43	46	39	44	46	44			
		Meio	Horizontal	40	44	40	36	38	42	34	44	36	40			
		Topo	Horizontal	37	33	42	38	36	40	38	36	34	37			
	2	Base	Horizontal	48	46	47	44	44	46	40	38	46	46			
		Meio	Horizontal	34	40	42	44	38	36	44	40	43	40		40	
		Topo	Horizontal	38	44	38	44	44	44	38	38	40	40			
	3	Base	Horizontal	34	38	36	42	40	37	36	38	36	37			
		Meio	Horizontal	36	32	40	39	41	32	34	37	34	36			
	4	Base	Horizontal	42	44	49	42	40	41	40	38	47	42			
		Meio	Horizontal	36	38	46	46	40	42	44	40	37	40			
	2º piso	1	Base	Horizontal	48	46	50	46	54	46	50	46	52	48		
			Meio	Horizontal	44	48	46	46	46	44	44	43	45	45		
			Topo	Horizontal	44	42	42	38	44	43	46	46	44	44		
		2	Base	Horizontal	41	42	45	46	40	41	46	44	46	44		
			Meio	Horizontal	45	42	48	46	44	44	48	41	46	45		44
			Topo	Horizontal	42	40	38	44	44	36	46	44	44	44		
3		Base	Horizontal	32	44	40	38	42	46	46	42	45	42			
		Meio	Horizontal	48	49	49	50	48	48	50	48	50	49	37	42	
4		Base	Horizontal	32	40	40	39	36	44	44	46	40	40			
		Meio	Horizontal	44	42	40	42	41	40	38	36	36	40			
Vigas		1º piso	Extremidade 1	Descendente	34	32	28	30	32	36	39	39	31	32		
				Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		33 -
	Extremidade 2		Descendente	34	33	34	36	36	40	33	34	35	34	34	33 -	-
		Horizontal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	2º piso	Extremidade 1	Descendente	38	40	38	40	38	39	36	34	40	38			
			Horizontal	48	36	38	38	44	46	43	42	38	42		37 -	
Extremidade 2		Descendente	36	36	38	34	32	40	41	34	36	36	36	37 -	42 -	
	Horizontal	40	48	41	42	46	42	42	42	44	44	42		Horizontal		
Lajes	1º piso	Extremidade 1	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		Extremidade 2	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		Meio	Descendente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	2º piso	Extremidade 1	Descendente	36	34	38	36	40	38	38	34	39	38			
		Extremidade 2	Descendente	38	38	39	36	36	42	38	40	38	38		38	
		Meio	Descendente	41	35	43	30	33	40	39	35	37	37			

ANEXO X - TEMPERATURAS EM TAIPADAS (SETÚBAL) ENTRE JULHO E OUTUBRO DE 2013 (ACCUWEATHER, 2014)

Gráfico de temperaturas julho 2013

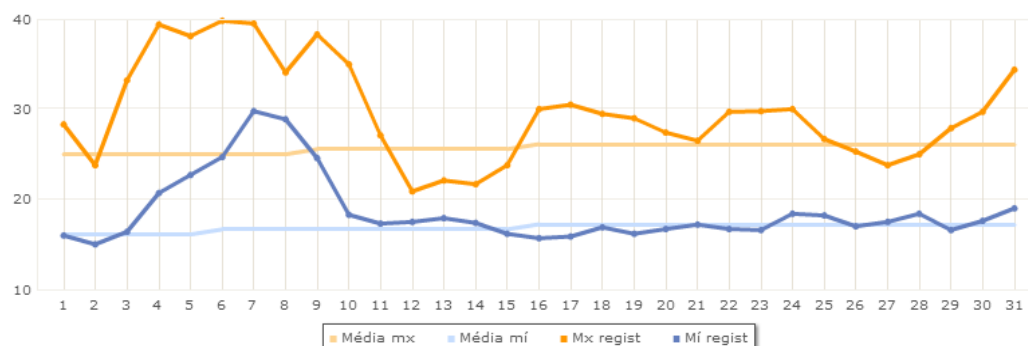


Gráfico de temperaturas agosto 2013

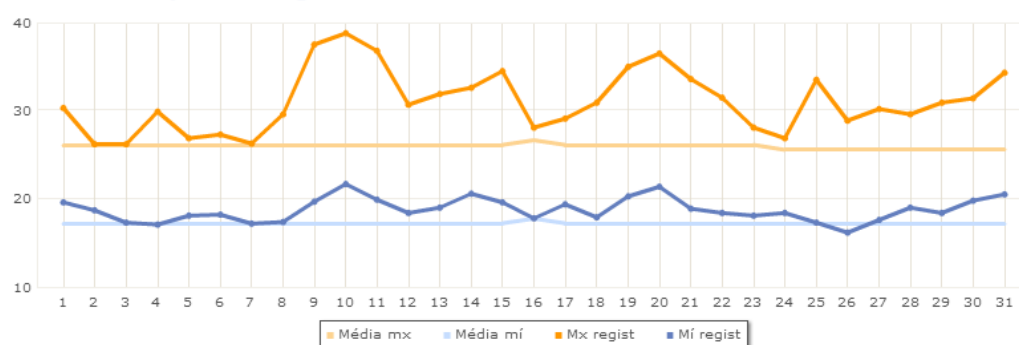


Gráfico de temperaturas setembro 2013

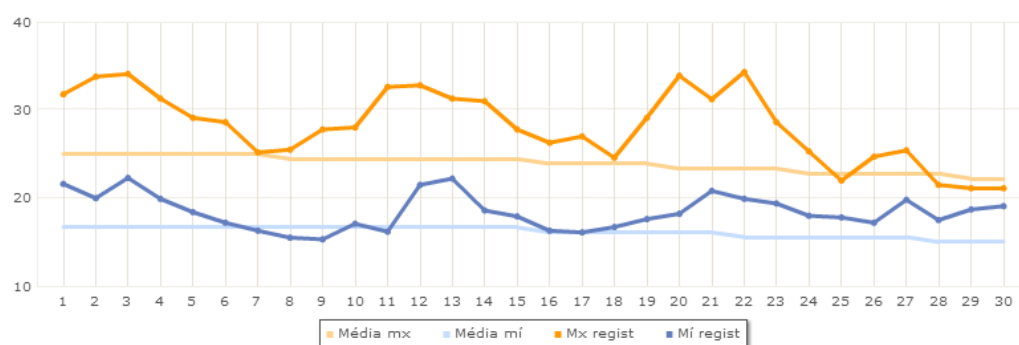


Gráfico de temperaturas outubro 2013

