



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

**Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação
de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore**

António Jorge Nunes Pedro André

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Calião Lopes de Brito

Vogal: Professor Doutor António José da Silva Costa

Lisboa, Julho 2012

Resumo

A indústria extractiva de rochas ornamentais é uma actividade extremamente importante para a economia nacional mas é também susceptível de gerar elevados impactes ambientais. O processo extractivo origina um volume de resíduos que pode ascender a 80% do total de rocha desmontada. Os resíduos que não são utilizados na recuperação das frentes inactivas, são transportados e colocados em locais afastados da frente de escavação, onde se acumulam indiscriminadamente, não existindo ainda alternativas viáveis para inverter esta problemática.

Neste âmbito, é necessário encontrar soluções que transformem este resíduo em subproduto, restituindo-lhe algum do seu valor económico. Contudo, a generalidade das investigações existentes não consideram a hipótese de utilizar mármore como agregado a incorporar em betão e as poucas que o fazem analisam preferencialmente as suas características mecânicas. A elaboração deste estudo pretendeu contribuir para o aprofundar do conhecimento desta temática, enfatizando a substituição de agregado primário por agregado de mármore, não introduzindo qualquer tipo de adição ou adjuvante, que pudesse alterar as características do betão tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Na campanha experimental que culminou nesta dissertação, foram produzidas três famílias distintas de betões, cada uma formada por agregados tradicionalmente utilizados na construção (basalto, calcário e granito), os quais foram substituídos por agregados grossos de mármore em percentagens de 20, 50 e 100%, num total de 10 composições. Estas foram ensaiadas, no estado fresco, à trabalhabilidade e massa volúmica, e no estado endurecido, à absorção de água, por imersão e capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.

Os resultados obtidos demonstram que as propriedades dos betões produzidos com AGM não diferem significativamente das propriedades dos betões produzidos com AP, ao nível da durabilidade, sendo perfeitamente exequível a utilização deste resíduo como agregado para betão.

Palavras-chave:

Betão; agregados grossos de mármore; durabilidade; resíduos da indústria extractiva

Abstract

The ornamental stone extraction industry is an extremely important activity for the national economy even though susceptible of generating large environmental impacts. The extraction process originates a waste volume which can rise up to 80% of all extracted stone. The waste that cannot be used to recuperate the inactive quarries is transported and dumped away from the quarry, where it accumulates indiscriminately, and a viable alternative to reverse this problem is not available yet.

In this context, it is necessary to find solutions that can transform this waste into a byproduct and restore some of its economic value. Although, most of the past research does not consider the possibility of using marble as aggregate in concrete, the few studies that do, examine preferentially its mechanical properties. This study intended to contribute to further the knowledge on this subject, emphasizing the replacement of primary aggregates (PA) by marble aggregates, without introducing any type of additions or admixtures, which could change the fresh or hardened properties of the resulting concrete.

In the experimental campaign leading to this thesis, three distinct concrete families were produced, each with conventional aggregates (basalt, granite and limestone), replaced by marble coarse aggregates (MCA) at 20%, 50% and 100% ratios, totaling 10 mixes. These mixes were tested, in the fresh state, for workability and specific gravity, and hardened state, for water absorption, by capillary and immersion, carbonation and chloride penetration.

The results show that the properties of concrete produced using MCA do not significantly differ from the properties of concrete made with PA, in terms of durability, making the use of this waste as concrete aggregate perfectly feasible.

Keywords:

Concrete, marble coarse aggregates, durability, extraction industry waste

Agradecimentos

A entrega desta dissertação representa o culminar de uma importante fase a nível académico, mas também marcante a nível pessoal. Para que tal se tornasse realidade, várias pessoas, directa ou indirectamente, deram o seu contributo. A essas gostaria de expressar o meu mais sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador desta dissertação, expresso o meu profundo agradecimento pela disponibilidade constante, pelo apoio e motivação nos momentos menos positivos, pela exigência e rigor pretendidos e pela partilha de conhecimentos, que em muito contribuíram para o desenvolvimento da presente dissertação.

Ao Engenheiro Nuno Bonito, da CEVALOR, e ao Engenheiro Hugo Primo, da Solubema, pela sua disponibilidade e apoio, não só nas visitas realizadas, mas também no esclarecimento de qualquer dúvida ao longo da realização desta dissertação.

Às empresas Secil, Mota-Engil e Lena Agregados, pela gentileza de terem cedido os materiais indispensáveis para a realização da campanha experimental.

Aos técnicos dos Laboratórios de Construção e Resistência de Materiais do IST, Sr. Leonel Silva, Sr. João Lopes, Sr. Fernando Costa e Sr. Fernando Alves, pela constante disponibilidade, pela importante colaboração e pelo companheirismo demonstrado durante todos os momentos da campanha experimental.

Aos amigos que estiveram directamente ligados à realização da dissertação, Luís Ferreira, Pedro Martins, José Saraiva Lima e Micael Ferreira, pelo seu apoio durante a campanha experimental, que em muito contribuíram para o fantástico espírito de companheirismo e entajuda presente todos os dias no laboratório. Sem a sua presença, a realização desta dissertação seria ainda mais difícil.

Aos amigos, João Caetano, Jorge Vaz, André Mendes, Maria do Mar, Diogo Silva, Bernardo Mendonça e todos os outros, pela sua amizade e companheirismo, por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos, pelo apoio e motivação, e por terem contribuído, de uma forma ou de outra, para o meu sucesso académico.

Aos meus primos Nuno Sebastião e Pedro Sebastião, pelo seu precioso auxílio na revisão do texto, mas também pelo seu apoio, motivação e amizade.

Aos meus pais e avó, pelo seu apoio, carinho e capacidade motivadora em todos os momentos, por todos os sacrifícios que fizeram, que me permitiram alcançar este patamar, e por me inculcarem os princípios e valores que regem a minha vida, o meu mais sincero obrigado.

Ao meu falecido avô, que em vida foi um exemplo, uma fonte de inspiração, contribuindo de forma decisiva para o meu crescimento pessoal, dedico esta dissertação, com a esperança que se mantenha, ao longo da minha vida pessoal e profissional, sempre orgulhoso de mim.

Abreviaturas

AF	agregados finos;
AG	agregados grossos;
AGB	agregados grossos de basalto;
AGC	agregados grossos de calcário;
AGG	agregados grossos de granito;
AGM	agregados grossos de mármore;
AP	agregados primários;
AR	agregados reciclados;
AS	agregados secundários;
BAGM	betão produzido com agregados grossos de mármore;
BAP	betão produzido com agregados primários;
BRB	betão de referência com 100% de agregados grossos de basalto;
BB20	betão com substituição de 20% de agregados grossos de basalto por agregados grossos de mármore;
BB50	betão com substituição de 50% de agregados grossos de basalto por agregados grossos de mármore;
BRC	betão de referência com 100% de agregados grossos de calcário;
BC20	betão com substituição de 20% de agregados grossos de calcário por agregados grossos de mármore;
BC50	betão com substituição de 50% de agregados grossos de calcário por agregados grossos de mármore;
BRG	betão de referência com 100% de agregados grossos de granito;
BG20	betão com substituição de 20% de agregados grossos de granito por agregados grossos de mármore;
BG50	betão com substituição de 50% de agregados grossos de granito por agregados grossos de mármore;
BRM	betão com substituição de 100% de agregados primários por agregados grossos de mármore;
RO	rochas ornamentais.

Índice geral

Resumo.....	i
Abstract	ii
Agradecimentos.....	iii
Abreviaturas	iv
Índice geral.....	v
Índice de figuras	ix
Índice de quadros	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Metodologia e organização	4
2. Estado de arte	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Processo extractivo do mármore	7
2.3. Aplicações do mármore na construção civil.....	10
2.4. Propriedades do mármore de Borba - Vila Viçosa.....	16
2.5. Propriedades dos betões produzidos com AR de mármore	18
2.5.1. Trabalhabilidade.....	23
2.5.2. Massa volúmica.....	25
2.5.3. Absorção de água	26
2.5.4. Resistência à carbonatação.....	28
2.5.5. Resistência à penetração de cloretos	30
2.6. Propriedades dos betões produzidos com AR	33
2.6.1. Trabalhabilidade.....	33
2.6.2. Massa volúmica.....	34
2.6.3. Absorção de água	35
2.6.4. Resistência à carbonatação.....	36
2.6.5. Resistência à penetração de cloretos	37
2.7. Conclusões	38
3. Descrição da campanha experimental	41
3.1. Introdução.....	41
3.2. Planificação da campanha experimental	41
3.2.1. Fase 1.....	41

3.2.2.	Fase 2.....	42
3.2.3.	Fase 3.....	42
3.3.	Ensaaios aos agregados	43
3.3.1.	Análise granulométrica.....	43
3.3.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	46
3.3.3.	Baridade e volume de vazios	50
3.3.4.	Desgaste de Los Angeles.....	52
3.3.5.	Teor em água total	55
3.3.6.	Índice de forma.....	56
3.4.	Formulação dos betões	58
3.4.1.	Introdução.....	58
3.4.2.	Máxima dimensão do agregado.....	59
3.4.3.	Volume de vazios	60
3.4.4.	Índice de vazios	61
3.4.5.	Dosagem de água.....	62
3.4.6.	Valor médio de resistência à compressão.....	63
3.4.7.	Dosagem de cimento	64
3.4.8.	Relação a/c	65
3.4.9.	Volume das partículas de cimento.....	65
3.4.10.	Volume de agregados	66
3.4.11.	Volume total das partículas sólidas	66
3.4.12.	Percentagem de volume de cimento em relação ao volume de sólidos.....	66
3.4.13.	Curva de referência de Faury	66
3.4.14.	Composição dos betões de referência.....	68
3.5.	Produção dos betões	71
3.6.	Ensaaios de betão no estado fresco	72
3.6.1.	Abaixamento do cone de Abrams.....	72
3.6.2.	Massa volúmica.....	74
3.7.	Ensaaios de betão no estado endurecido	75
3.7.1.	Absorção de água por imersão	76
3.7.2.	Absorção de água por capilaridade.....	77
3.7.3.	Resistência à carbonatação	79
3.7.4.	Resistência à penetração de cloretos	81
4.	Apresentação e análise dos resultados da campanha experimental.....	85
4.1.	Introdução.....	85
4.2.	Propriedades dos agregados	85

4.2.1.	Análise granulométrica.....	85
4.2.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	93
4.2.3.	Baridade e volume de vazios.....	95
4.2.4.	Desgaste de <i>Los Angeles</i>	97
4.2.5.	Teor em água total.....	97
4.2.6.	Índice de forma.....	98
4.3.	Propriedades do betão no estado fresco.....	99
4.3.1.	Abaixamento do cone de Abrams.....	99
4.3.2.	Massa volúmica.....	100
4.4.	Propriedades do betão no estado endurecido.....	101
4.4.1.	Resistência à compressão	101
4.4.2.	Absorção de água por imersão	103
4.4.3.	Absorção de água por capilaridade.....	106
4.4.4.	Resistência à carbonatação.....	111
4.4.5.	Resistência à penetração de cloretos	116
4.5.	Conclusões	120
4.5.1.	Propriedades dos agregados	120
4.5.2.	Propriedades do betão no estado fresco.....	121
4.5.3.	Propriedades do betão no estado endurecido.....	121
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	123
5.1.	Considerações finais.....	123
5.2.	Conclusões gerais.....	124
5.2.1.	Betão no estado fresco.....	124
5.2.2.	Betão no estado endurecido.....	125
5.3.	Propostas de desenvolvimento futuro.....	126
	Bibliografia.....	129
Anexos		
A.	Composição dos betões	A.1
B.	Análise granulométrica.....	B.1
C.	Massa volúmica e absorção de água.....	C.1
D.	Baridade e volume de vazios.....	D.1
E.	Desgaste de <i>Los Angeles</i>	E.1
F.	Teor em água total.....	F.1
G.	Índice de forma.....	G.1
H.	Absorção de água por imersão	H.1

I.	Absorção de água por capilaridade.....	I.1
J.	Resistência à carbonatação.....	J.1
K.	Resistência à penetração de cloretos	K.1

Índice de figuras

Figura 1.1 - Aspecto da envolvente ambiental no anticlinal de Estremoz	3
Figura 1.2 - Diferentes famílias de betão produzidas e respectivas taxas de substituição	4
Figura 2.1 - Exemplo de pedreira a céu-aberto	7
Figura 2.2 - Pormenor de degraus direitos em pedreira	7
Figura 2.3 - Descontinuidade em bloco de mármore	8
Figura 2.4 - Roçadeira de cadeia a seco	8
Figura 2.5 - Serragem das costas do maciço rochoso.....	8
Figura 2.6 - Limpeza da frente de desmonte	9
Figura 2.7 - Transporte, por intermédio de <i>dumper</i> , de inertes para as escombreyras.....	9
Figura 2.8 - Beneficiamento de blocos de mármore através da utilização de monofio.....	9
Figura 2.9 - Beneficiamento de bloco de mármore através de utilização de monolâmina	9
Figura 2.10 - Armazenamento, após medição e classificação, de blocos de mármore para comercialização.....	10
Figura 2.11 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Binici <i>et al.</i> (2008)	24
Figura 2.12 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Pereira <i>et al.</i> (2009)	24
Figura 2.13 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Hebhouh <i>et al.</i> (2011)	25
Figura 2.14 - Massa volúmica dos betões, no estado fresco, produzidos na campanha de Hebhouh <i>et al.</i> (2011)	25
Figura 2.15 - Massa volúmica dos betões, no estado fresco e endurecido, produzidos na campanha de Binici <i>et al.</i> (2007)	26
Figura 2.16 - Coeficiente de absorção obtido na campanha de Pereira <i>et al.</i> (2009)	27
Figura 2.17 - Coeficiente de capilaridade obtido na campanha de Pereira <i>et al.</i> (2009).....	28
Figura 2.18 - Absorção de água por imersão com vácuo obtido na campanha de Pereira <i>et al.</i> (2009)	28
Figura 2.19 - Profundidade de penetração de cloretos obtida por Binici <i>et al.</i> (2008).....	32
Figura 3.1 - Peneiração da amostra	45
Figura 3.2 - Pesagem do material retido em cada peneiro.....	45
Figura 3.3 - Medição da temperatura da água do recipiente utilizado como picnómetro vazio.....	48
Figura 3.4 - Secagem do agregado com um pano seco	48
Figura 3.5 - Pesagem do recipiente utilizado como picnómetro contendo a amostra	49
Figura 3.6 - Pesagem da amostra depois de evaporada a humidade superficial.....	49
Figura 3.7 - Nivelamento da amostra	52
Figura 3.8 - Máquina do desgaste de <i>Los Angeles</i>	54
Figura 3.9 - Pesagem da amostra.....	56

Figura 3.10 - Medição do índice de forma	58
Figura 3.11 - Curva de Faury com e sem cimento	68
Figura 3.12 - Homogeneização do betão.....	73
Figura 3.13 - Remoção do molde	74
Figura 3.14 - Medição do abaixamento do cone de Abrams	74
Figura 3.15 - Pesagem do recipiente da massa volúmica com betão	75
Figura 3.16 - Provetes em diferentes fases do ensaio de absorção de água por imersão.....	77
Figura 3.17 - Balança hidrostática.....	77
Figura 3.18 - Provetes com água até 5 ± 1 mm de água acima da face inferior.....	79
Figura 3.19 - Pesagem de um provete do ensaio de absorção de água por capilaridade	79
Figura 3.20 - Aplicação de tinta epóxida nos provetes	81
Figura 3.21 - Aplicação da solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% nas superfícies fracturadas	81
Figura 3.22 - Medição da profundidade da frente de carbonatação	81
Figura 3.23 - Corte de um provete para o ensaio de resistência à penetração de cloretos	83
Figura 3.24 - Equipamento de migração de cloretos.....	83
Figura 3.25 - Aplicação de nitrato de prata nas superfícies fracturadas e medição da penetração de cloretos	83
Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina.....	87
Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia grossa.....	87
Figura 4.3 - Curva granulométrica dos AGB	89
Figura 4.4 - Curva granulométrica dos AGC	90
Figura 4.5 - Curva granulométrica dos AGG.....	91
Figura 4.6 - Curva granulométrica dos AGM	92
Figura 4.7 - Massa volúmica dos AG.....	94
Figura 4.8 - Absorção de água dos AG	95
Figura 4.9 - Baridade dos AG	96
Figura 4.10 - Percentagem de vazios dos AG	96
Figura 4.11 - Abaixamento do cone de Abrams dos diversos betões.....	99
Figura 4.12 - Massa volúmica no estado fresco dos diversos betões	100
Figura 4.13 - Resistência à compressão média aos 28 dias dos diversos betões	102
Figura 4.14 - Absorção de água por imersão dos diversos betões.....	104
Figura 4.15 - Variação da absorção por imersão média com a taxa de substituição de AP por AGM	104
Figura 4.16 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias	105
Figura 4.17 - Variação da relação entre absorções de água por imersão do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	105

Figura 4.18 - Variação da relação entre absorções de água por imersão do betão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	106
Figura 4.19 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, em g/mm ² , para os diversos betões....	107
Figura 4.20 - Altura de água por ascensão capilar às 72 horas, em mm, para os diversos betões	108
Figura 4.21 - Absorção por capilaridade dos diversos betões em função da raiz do tempo.....	108
Figura 4.22 - Altura de água por ascensão capilar dos diversos betões em função da raiz do tempo .	109
Figura 4.23 - Coeficiente de absorção capilar médio dos diversos betões	109
Figura 4.24 - Relação entre a absorção por imersão e a altura de água por ascensão capilar às 72 horas	109
Figura 4.25 - Variação da relação entre absorções de água por capilaridade do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	110
Figura 4.26 - Variação da relação entre absorções de água por capilaridade do betão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados.....	110
Figura 4.27 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGB	112
Figura 4.28 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGC	112
Figura 4.29 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGG	112
Figura 4.30 - Relação entre a absorção de água por imersão e a profundidade de carbonatação aos 91 dias	113
Figura 4.31 - Relação entre a absorção de água por capilaridade às 72 horas e a profundidade de carbonatação aos 91 dias.....	114
Figura 4.32 - Profundidade de carbonatação média para as diferentes taxas de substituição de AP por AGM.....	114
Figura 4.33 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias	115
Figura 4.34 - Variação da relação entre resistências à carbonatação do betão, com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	115
Figura 4.35 - Variação da relação entre resistências à carbonatação do betão, com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	116
Figura 4.36 - Coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias para os diversos betões.....	117
Figura 4.37 - Coeficiente de difusão médio dos cloretos para as diferentes taxas de substituição de AP por AGM	118
Figura 4.38 - Relação entre a absorção de água por imersão e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias	118

Figura 4.39 - Relação entre a absorção de água por capilaridade às 72 horas e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias	119
Figura 4.40 - Variação da relação entre coeficientes de difusão de cloretos do betão, com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	119
Figura 4.41 - Variação da relação entre coeficientes de difusão de cloretos do betão, com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	120

Índice de quadros

Quadro 1.1 - Quantidade de rocha desmontada, em toneladas.....	1
Quadro 1.2 - Produção de blocos e de britas	2
Quadro 2.1 - Composição química do mármore, adaptado de Moura <i>et al.</i> (2007)	17
Quadro 2.2 - Composição física e mecânica do mármore, adaptado de Moura <i>et al.</i> (2007)	17
Quadro 2.3 - Constituição das famílias no estudo de Binici <i>et al.</i> (2008).....	19
Quadro 2.4 - Composição química dos materiais utilizados por Binici <i>et al.</i> (2008).....	19
Quadro 2.5 - Distribuição granulométrica dos agregados utilizados por Binici <i>et al.</i> (2008) na composição dos betões	19
Quadro 2.6 - Propriedades físicas dos agregados utilizados na campanha experimental de Binici <i>et al.</i> (2008)	20
Quadro 2.7 - Formulação dos betões produzidos por Binici <i>et al.</i> (2008).....	20
Quadro 2.8 - Propriedades físicas e mecânicas dos agregados grossos utilizados por Pereira <i>et al.</i> (2009)	21
Quadro 2.9 - Propriedades físicas e mecânicas dos agregados finos utilizados por Pereira <i>et al.</i> (2009)	21
Quadro 2.10 - Composição do betão A1A2 utilizado por Pereira <i>et al.</i> (2009)	21
Quadro 2.11 - Composição do betão A1 utilizado por Pereira <i>et al.</i> (2009)	21
Quadro 2.12 - Composição do betão A1SAT utilizado por Pereira <i>et al.</i> (2009).....	22
Quadro 2.13 - Propriedades químicas médias dos AGM utilizados por Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	22
Quadro 2.14 - Propriedades físicas dos AGM utilizados por Hebhoub <i>et al.</i> (2011).....	23
Quadro 2.15 - Caracterização dos agregados utilizados por Hebhoub <i>et al.</i> (2011) na campanha experimental	23
Quadro 3.1 - Ensaio, normas e especificações utilizados na caracterização dos agregados grossos ...	41
Quadro 3.2 - Ensaio e norma utilizada na caracterização do betão no estado fresco na fase 2	42
Quadro 3.3 - Ensaio e norma utilizada na caracterização do betão no estado endurecido na fase 2	42
Quadro 3.4 - Ensaio e especificações utilizadas na caracterização do betão no estado endurecido	43
Quadro 3.5 - Idade, amostras, forma e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios da fase 3.....	43
Quadro 3.6 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica.....	44
Quadro 3.7 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação da massa volúmica e da absorção de água	47
Quadro 3.8 - Capacidade mínima dos recipientes utilizados na determinação da baridade e do volume de vazios.....	51
Quadro 3.9 - Composição granulométrica dos provetes	53
Quadro 3.10 - Composição da carga abrasiva	54

Quadro 3.11 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação do teor em água total e superficial	56
Quadro 3.12 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica	57
Quadro 3.13 - Dimensão máxima do agregado admissível para cada tipo de provete utilizado	60
Quadro 3.14 - Abertura dos peneiros utilizados na separação dos agregados	60
Quadro 3.15 - Valores do volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado	61
Quadro 3.16 - Valores de K e K'	62
Quadro 3.17 - Trabalhabilidade em função do abaixamento	62
Quadro 3.18 - Desvio padrão segundo o grau de controlo de produção	63
Quadro 3.19 - Valores de A e B	67
Quadro 3.20 - Coordenadas da curva de Faury sem cimento	68
Quadro 3.21 - Coeficientes a e b para definição das equações das curvas de Faury	69
Quadro 3.22 - Percentagem de material acumulado passado, definida pela curva de Faury	69
Quadro 3.23 - Massas volúmicas dos agregados utilizados	70
Quadro 3.24 - Composição dos diferentes betões de referência produzidos (em volume e em massa)	70
Quadro 3.25 - Ensaio, tipos de moldes e quantidades de betão a produzir	71
Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina	86
Quadro 4.2 - Módulo de finura e percentagem de finos da areia fina	87
Quadro 4.3 - Análise granulométrica da areia grossa	88
Quadro 4.4 - Módulo de finura e percentagem de finos da areia grossa	88
Quadro 4.5 - Análise granulométrica dos AGB	89
Quadro 4.6 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGB	89
Quadro 4.7 - Análise granulométrica dos AGC	90
Quadro 4.8 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGC	91
Quadro 4.9 - Análise granulométrica dos AGG	91
Quadro 4.10 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGG	92
Quadro 4.11 - Análise granulométrica dos AGM	92
Quadro 4.12 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGM	93
Quadro 4.13 - Massa volúmica e absorção dos agregados	93
Quadro 4.14 - Comparação entre a absorção de água dos AG da presente dissertação e de estudos anteriores	95
Quadro 4.15 - Baridade e percentagem de vazios dos agregados	95
Quadro 4.16 - Desgaste de <i>Los Angeles</i> dos AG	97
Quadro 4.17 - Comparação entre o desgaste de <i>Los Angeles</i> dos AG da presente dissertação e de estudos anteriores	97
Quadro 4.18 - Teor em água total dos AG	98
Quadro 4.19 - Índice de forma dos AG	98

Quadro 4.20 - Resultados do ensaio de abaixamento do cone de Abrams	99
Quadro 4.21 - Variação da massa volúmica no estado fresco com a substituição de AP por AGM...	101
Quadro 4.22 - Variação da resistência à compressão aos 28 dias com a substituição de AP por AGM	102
Quadro 4.23 - Variação da absorção de água por imersão com a substituição de AP por AGM.....	103
Quadro 4.24 - Variação da absorção e da altura de água por capilaridade às 72 horas com a substituição de AP por AGM.....	106
Quadro 4.25 - Variação da profundidade de carbonatação com a substituição de AP por AGM	111
Quadro 4.26 - Variação do coeficiente de difusão dos cloretos com a substituição de AP por AGM	116

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Na Europa Ocidental, segundo Coope (1995) citado por Brodtkom (2000), os subsectores mais activos do mundo na indústria extractiva não energética são os de minas e pedreiras e, apesar de a produção de rochas ornamentais (RO) ser condicionada pelas tendências do mercado, os volumes de produção e exportação têm resistido à instabilidade na procura e extracção, aumentando progressivamente ao longo dos anos.

O sector das RO ocupa assim um papel fundamental no panorama da indústria extractiva nacional, principalmente no que diz respeito ao valor das exportações. Segundo estudo do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), em 2002, Portugal ocupava a quinta posição no mercado mundial de exportações, destinando-se mais de 50% do produto final ao mercado internacional. Segundo o mesmo estudo, entre 1992 e 2002, a produção de RO de mármore e rochas afins, cresceu cerca de 15% e 46% em volume e valor respectivamente.

Em Portugal, a extracção de rochas exhibe valores de produção mais expressivos na região do Alentejo, alcançando cerca de 141,5 milhões de euros em 1998, valor que corresponde a 28,3% do valor global de produção de pedreiras do país e 54% do total da indústria extractiva desta região. A produção de RO nesta região representa 39% do volume produzido no país e 61% do valor global de RO produzidas nacionalmente.

A faixa de Estremoz - Borba - Vila Viçosa, onde se situa o anticlinal de Estremoz, é fundamental para a expressividade destes valores, os seus afloramentos dolomíticos e vulcano-sedimentar-carbonatado, como identificados por Lopes e Silva (2004), garantem que este é um dos principais centros mundiais de extracção de mármore.

O estudo da pedra "Herdade de Vigária", localizada na freguesia de Bencatel, concelho de Vila Viçosa, permite um conhecimento mais pormenorizado da indústria extractiva desta região. Esta pedra, situada na faixa de Estremoz - Borba - Vila Viçosa, apresenta uma área de 937.835 m² e destina-se especialmente à extracção e produção de RO de mármore, possuindo também uma central de britagem, a qual permite a produção de britas para a indústria da construção. A quantidade de rocha desmontada no "Herdade da Vigária", no período de 2006 a 2009, pode ser consultada no Quadro 1.1, de acordo com os dados cedidos por Solubema (2010).

Quadro 1.1 - Quantidade de rocha desmontada, em toneladas

Ano	Rocha desmontada (t)
2006	380.000
2007	450.000
2008	540.000
2009	500.000
Total	1.870.000

Da observação do quadro, verifica-se que a quantidade de rocha desmontada manteve uma tendência crescente para os primeiros três anos apresentados, conforme a análise das estatísticas apresentadas sugeria, registando-se uma ligeira diminuição em 2009, reflexo do início da crise económica mundial. De forma análoga, a produção de resíduos apresenta uma tendência crescente, como se comprova no Quadro 1.2, retirado de Solubema (2010).

Quadro 1.2 - Produção de blocos e de britas

Ano	Produção de blocos (t)	Produção de britas (t)	Quantidade para aterro (%)
2006	38.000	185.000	41
2007	34.500	200.000	48
2008	31.000	175.000	62
2009	30.000	160.000	62
Total	133.500	720.000	54

Através da sua análise, pode concluir-se que a produção de RO vai diminuindo à medida que a pedreira é explorada. Este facto pode explicar-se pelo aumento dos afloramentos de pior qualidade e das impurezas presentes nos blocos extraídos, reduzindo assim o seu valor comercial. Verifica-se também que a produção de britas depende da procura da indústria mais próxima, flutuando conforme a mesma. No entanto, é claro que as soluções existentes actualmente são manifestamente insuficientes para inverter a tendência crescente de volume de rocha transportada para aterro.

É assim evidente que devido à sua natureza, a indústria extractiva é susceptível de gerar um elevado número de impactes ambientais. Apesar de todos os impactes serem relevantes para a degradação do meio ambiente, alguns apresentam uma maior importância pela sua dimensão.

O impacte visual que esta indústria origina na envolvente é inegavelmente um dos principais factores de preocupação. A dimensão das pedreiras, que pode variar entre 10 e 150 ha, torna-as inquestionavelmente num marco na paisagem, agravando-se este problema naquelas que se localizam em colinas ou montanhas, quando ficam esventradas e os seus flancos expostos.

Este impacte é impossível de avaliar através de normalização, tornando-se fundamental um bom planeamento para o minimizar. Na faixa de Borba - Vila Viçosa, o problema adensa-se com a proximidade entre pedreiras, definindo-se que apenas um plano integrado de cooperação entre todos os intervenientes poderia minimizar o impacte visual. Com esse efeito, surgiu em Portugal, em 2002, o Plano Regional de Ordenamento da Zona dos Mármorees (PROZOM). Neste, são definidas cinco unidades de ordenamento, abrangendo cada uma um ou mais núcleos de pedreiras, tendo a sua delimitação em conta factores como a intensidade de exploração de mármore e os graus de sensibilidade ambiental.

No entanto, as alterações introduzidas por este Plano em pouco contribuíram para debelar este problema. Pelo contrário tornaram a indústria fortemente dependente do poder local, o qual impede ou restringe o desenvolvimento da actividade extractiva, através dos Planos Directores Municipais. Tais

dificuldades desencorajam os industriais a aderir às medidas, preferindo cerca de 90% desenvolver a actividade na clandestinidade, segundo Dinis da Gama (2005).

Aliando este facto à quantidade de resíduos gerados durante o processo de extracção de RO, que pode ascender a 80%, segundo LNEC (1991), obtêm-se todos os factores para mais um impacte ambiental extremamente relevante. Normalmente, os resíduos de maior dimensão são depositados em locais afastados da frente de escavação e que podem beneficiar da topografia do local. Após a desactivação da frente, estes resíduos podem ser utilizados para a recuperação da mesma, sendo empregues para diminuir a visibilidade da pedreira. No entanto, este destino é manifestamente insuficiente e, enquanto as frentes de escavação continuam activas, os resíduos vão-se acumulando e ocupando indiscriminadamente o solo.

Do corte das rochas surge um outro resíduo, sob a forma de lama, que pode ser controlado através da utilização de bacias de precipitação. Após a secagem e separação dos materiais nocivos é possível obter água purificada e um inerte, em forma de pó, que pode ser utilizado para diversos fins.

Apesar das diferentes alternativas encontradas permitirem escoar algum do material, estas continuam a ser insuficientes para solucionar o problema. E ainda que as pedreiras sejam obrigadas a recorrer ao transporte de resíduos para vazadouro de forma a continuar a escavação, este processo é de difícil execução, moroso e oneroso, não contribuindo para alterar a tendência registada. O meio ambiente e a paisagem continuam assim a ser descaracterizados pelo acumular dos resíduos, como demonstra a Figura 1.1.



Figura 1.1 - Aspecto da envolvente ambiental no anticlinal de Estremoz

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo contribuir para a investigação existente relativamente à utilização de agregados grossos provenientes de resíduos da indústria de mármore em betão. Este estudo ganha especial relevância atendendo ao que foi exposto, uma vez que pretende

avaliar a exequibilidade da reutilização de um resíduo que acarreta graves consequências para o meio ambiente. Pretende também determinar a variação que a substituição de agregados primários (AP), por agregados grossos de mármore (AGM), introduz nas características de durabilidade dos betões. Esta investigação reveste-se de uma maior importância tendo em conta que, em termos de durabilidade, a bibliografia é praticamente inexistente. Espera-se assim ser possível transformar este resíduo em subproduto, conferindo-lhe uma função secundária e restaurando algum do seu valor económico, permitindo também uma diminuição da quantidade acumulada.

Assim, pretende-se analisar e comparar as propriedades do betão com diferentes agregados grossos e taxas de substituição (20, 50 e 100% do volume total de agregados grossos). Para tal, fabricaram-se três famílias de betão, correspondentes aos agregados tradicionalmente utilizados na construção (basalto, calcário e granito) e procedeu-se à substituição da percentagem de AP por AGM, conforme estabelecido. A Figura 1.2 pretende ilustrar as diferentes famílias de betão produzidas, assim como as respectivas taxas de substituição. Todos os resultados obtidos para as 10 famílias de betão produzidas foram comparados e analisados, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Foi realizada uma dissertação em simultâneo a esta, subordinada ao mesmo tema, mas focando-se no desempenho em termos mecânicos. Esta foi efectuada pelo aluno Pedro Jorge da Cruz Martins, também do Instituto Superior Técnico.

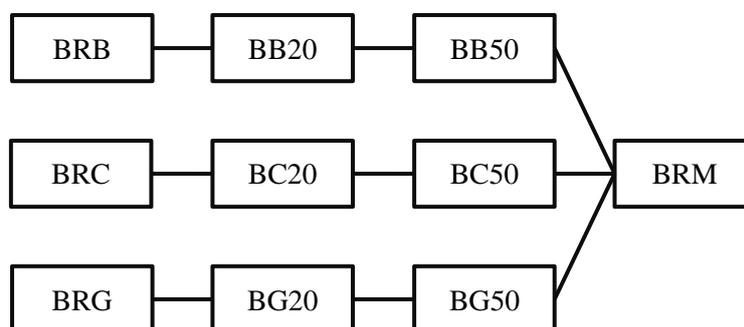


Figura 1.2 - Diferentes famílias de betão produzidas e respectivas taxas de substituição

1.3. Metodologia e organização

A elaboração desta dissertação contemplou uma metodologia com etapas distintas. A primeira etapa consistiu numa extensa pesquisa bibliográfica a nível nacional, mas sobretudo a nível internacional. Com esta, pretendeu-se recolher o máximo de informação sobre a temática em estudo, adquirindo conhecimentos necessários para completar o adquirido previamente, contribuindo de forma determinante para a planificação e elaboração da campanha experimental e posterior análise dos seus resultados.

A etapa seguinte revela-se exclusivamente de importância operacional, isto é, engloba a elaboração de um plano de ensaio às características físicas dos agregados e de durabilidade dos betões, seguindo as normas e especificações analisadas na pesquisa bibliográfica efectuada. Nesta etapa, foi fundamental responder à necessidade de planificar com exactidão os ensaios a realizar, devido à

importância de uma correcta monitorização dos resultados e de uma rigorosa programação dos recursos e materiais, e respectivas quantidades, para a campanha experimental.

Terminado o planeamento iniciou-se a realização da campanha experimental. Esta etapa dividiu-se em três fases, sendo que a primeira compreende todos os trabalhos que antecedem a produção do betão e consequente realização dos ensaios. É nesta que se obtêm os diversos constituintes do betão a ensaiar (cimento e todas as fracções granulométricas de AP e agregados secundários (AS)) e se realizam os ensaios de caracterização física dos diversos agregados utilizados na campanha experimental, de forma a obter melhores justificações e comparações com outros autores. Na segunda fase pretendeu-se conhecer o processo de produção dos diversos betões, de modo a assegurar a inexistência de problemas na fase que conduz aos resultados finais. Para tal, verificou-se a trabalhabilidade e segregação do betão no estado fresco, betonando e vibrando vários provetes. Finalmente, a terceira fase teve como objectivo avaliar o desempenho dos diferentes betões produzidos ao nível da sua durabilidade.

Na quarta etapa, efectuou-se todo o tratamento e análise dos resultados alcançados na campanha experimental, para as diversas famílias de betão produzidas. Para além desta análise, sempre que possível, procedeu-se à comparação dos resultados referentes a esta campanha experimental com os de outras investigações na área dos betões com agregados de mármore.

Por fim, a última etapa consiste na redacção desta dissertação, a qual pretende expor de forma clara, coerente e concisa todas as informações, análises e conclusões que esta investigação possibilitou ao longo das várias etapas realizadas. De forma a tornar a organização desta dissertação mais inteligível, o seu conteúdo foi organizado em cinco capítulos, como a seguir se descreve:

- **Capítulo 1** - este capítulo engloba algumas das considerações gerais sobre a problemática que a presente dissertação pretende abordar, a referência aos factores mais relevantes e que estimulam a sua realização e os seus objectivos e, finalmente, a descrição da metodologia utilizada na elaboração da mesma e a sua organização;
- **Capítulo 2** - neste capítulo, pretende-se descrever o conhecimento adquirido através do levantamento bibliográfico realizado, optando-se por dividir este capítulo em 5 partes: o processo extractivo do mármore, as aplicações do mármore na construção civil, que não a utilização em betão, as propriedades do mármore de Borba - Vila Viçosa, as propriedades dos betões produzidos com agregados reciclados (AR) de mármore em outras campanhas experimentais, ao nível da durabilidade, e as propriedades dos betões produzidos com AR de outra natureza, também ao nível da durabilidade;
- **Capítulo 3** - este capítulo contempla a descrição de todas as etapas da campanha experimental, mais concretamente, todos os ensaios realizados aos agregados e ao betão no estado fresco e no estado endurecido, são também apresentados os cálculos realizados para determinar a composição dos betões produzidos;

- **Capítulo 4** - neste capítulo, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos no decorrer da campanha experimental, relativamente aos ensaios descritos no capítulo anterior, estabelecendo-se uma comparação sempre que possível, não só com os resultados de outros estudos registados no levantamento bibliográfico, mas também entre os resultados dos ensaios aos agregados e ao betão no estado fresco e no estado endurecido;
- **Capítulo 5** - este capítulo apresenta as conclusões adquiridas após a análise aos resultados alcançados ao longo da campanha experimental, definindo-se ainda várias propostas de investigação futuras, como o intuito de aprofundar o conhecimento na área da utilização de agregados de mármore em betão.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação e os anexos referenciados ao longo da mesma.

2. Estado de arte

2.1. Introdução

O presente capítulo pretende descrever, concisamente, as principais características, em termos de durabilidade, de betões produzidos com agregados de mármore, através do levantamento da informação existente e da apresentação de resultados obtidos em outras investigações.

Para esse efeito, inicia-se o presente estado de arte com a caracterização do processo extractivo, identificando as técnicas utilizadas, bem como de onde advêm os resíduos utilizados. Numa fase seguinte, faz-se uma breve referência às possíveis aplicações do mármore em outras áreas da construção civil, que não a estudada no âmbito desta dissertação. Finalmente, procede-se à análise das principais propriedades dos AR de origem natural e aborda-se o desempenho dos betões com incorporação de agregados grossos de mármore, em termos de durabilidade, onde são estudadas as propriedades do betão no estado fresco e endurecido, comparando-as com as obtidas em betões produzidos com outros AR.

2.2. Processo extractivo do mármore

Depois do descrito no capítulo anterior, torna-se evidente que a maior parte dos resíduos gerados pela indústria do mármore decorre do processo extractivo, pelo que é fundamental conhecê-lo com maior detalhe. Este processo, que pode realizar-se a céu-aberto, como se pode ver na Figura 2.1, em fosso ou poço, e é sempre efectuado por degraus direitos, como ilustrado na Figura 2.2, inicia-se com a identificação da localização da matéria-prima para extracção. Nesse local, são criadas as infra-estruturas necessárias para o acompanhamento de todo o processo. Após a decapagem do terreno, procede-se à traçagem e levantamento topográfico. Esta etapa pretende caracterizar a massa mineral a explorar, isto é, definir a orientação do desmonte, as suas dimensões e fazer a identificação e levantamento das descontinuidades existentes, como é exemplo a Figura 2.3, através de métodos topográficos e posterior análise informática.



Figura 2.1 - Exemplo de pedreira a céu-aberto



Figura 2.2 - Pormenor de degraus direitos em pedreira

Terminada a fase preliminar, iniciam-se os trabalhos de furação e corte. Assim, executam-se furos verticais, através de martelos pneumáticos ou perfuradoras hidráulicas, a cerca de 3 metros da frente livre, assegurando desta forma que, ao realizar o corte de levante, ou seja, horizontal, a lâmina da roçadeira de cadeia a seco, com aproximadamente 3,2 metros de comprimento, intersecta os furos, permitindo a posterior passagem do fio diamantado. A roçadeira de cadeia a seco pode ser vista na Figura 2.4. Os desperdícios do corte são recolhidos através de um aspirador que é acoplado à roçadeira. Nos locais mais fracturados, o risco de desabamento de pedras é superior e, como tal, o corte de levante deve ser realizado através de máquinas de fio diamantado. Neste processo, a furação horizontal, realizada com recurso a perfuradoras hidráulicas, tem que intersectar os furos verticais, de forma a que seja possível passar o fio diamantado. Normalmente a serragem das costas, processo demonstrado na Figura 2.5, realiza-se antes da serragem dos topos. No término deste processo de corte, a massa mineral encontra-se separada do maciço rochoso.



Figura 2.3 - Descontinuidade em bloco de mármore



Figura 2.4 - Roçadeira de cadeia a seco



Figura 2.5 - Serragem das costas do maciço rochoso

É habitual realizar cortes a meio da massa mineral, com espaçamento de 3 m, de modo a facilitar o derrube, dando origem às denominadas talhadas. O derrube destas é realizado com o auxílio de um colchão hidráulico, que provoca o afastamento da talhada do maciço rochoso.

Seguidamente, através de uma escavadora giratória ou pá carregadora, a talhada é derrubada para cima de uma camada de entulho constituída por pequenos fragmentos de terra e rocha, comumente chamada de “cama”. A função dessa “cama” é amortecer o impacto da queda, minimizando a quantidade de fracturas que podem ser geradas, minimizar a projecção de pedras e permitir a passagem do fio diamantado, sem que seja necessário proceder a uma nova furação. Essa necessidade deve-se ao processo de esquadrejamento, realizado por máquinas de fio diamantado de menores dimensões, denominadas por corta-topos, que se destina à “limpeza” dos blocos, ou seja, à eliminação de zonas com maior fracturação ou com mais veias dos blocos. Segue-se então a fase de remoção, que consiste na limpeza da frente de desmonte através de uma pá carregadora ou escavadora giratória, como está patente na Figura 2.6. Os blocos comercializáveis são transportados pela pá carregadora para os centros de produção. Os restantes, denominados por inertes, são transportados para as escombrelas, por intermédio de *dumppers*, como demonstra a Figura 2.7, e serão estes inertes de maiores dimensões que irão dar origem aos agregados utilizados na fase experimental desta dissertação.



Figura 2.6 - Limpeza da frente de desmonte



Figura 2.7 - Transporte, por intermédio de *dumper*, de inertes para as escombrelas



Figura 2.8 - Beneficiamento de blocos de mármore através da utilização de monofio



Figura 2.9 - Beneficiamento de bloco de mármore através de utilização de monolâmina

No entanto, o processo produtivo de RO continua depois desta fase, assim como a geração de resíduos. É durante a etapa seguinte que são geradas as maiores quantidades de resíduos finos, resultantes do tratamento das lamas originadas pelo corte dos blocos. Esta fase denomina-se de beneficiamento e caracteriza-se pela “limpeza” mais criteriosa dos blocos e regularização da sua forma, já nos centros de produção, através da utilização de monofios (Figura 2.8) ou monolâminas (Figura 2.9). Depois de beneficiados, os blocos são medidos, classificados e armazenados, tendo em consideração a pedra de origem e o seu padrão, ficando, finalmente, disponíveis para comercialização, como demonstra a Figura 2.10.



Figura 2.10 - Armazenamento, após medição e classificação, de blocos de mármore para comercialização

2.3. Aplicações do mármore na construção civil

O mármore, assim como as restantes RO, podem ser considerados materiais nobres, o que lhes confere um elevado valor económico para a indústria da construção. Este facto permite explicar a dificuldade em identificar diferentes aplicações que não o sector das RO, em particular a sua utilização como agregado para incorporar em betão, como é o âmbito desta dissertação. Ainda assim, a aplicação do mármore, em diferentes áreas de especialidade, encontra-se relativamente generalizada.

Devido à facilidade com que se obtém o pó resultante do processo de beneficiamento dos blocos, o qual resulta do tratamento das lamas, originadas pela necessidade de utilização de água para arrefecer as ferramentas de corte, este tem vindo a merecer um crescente destaque ao longo dos anos, nomeadamente com a realização de diversos estudos para encontrar possíveis aplicações para este subproduto.

Okagbue e Onyeobi (1998) avaliaram o potencial do pó de mármore como estabilizante para a construção de estradas em solos tropicais. Para esse efeito, foram avaliados parâmetros como o índice de plasticidade e a resistência à compressão de três tipos de solo diferentes, com uma percentagem de substituição de 0, 2, 4, 6, 8 e 10%. Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura normal ou 24 horas de cura acelerada a 40, 60 e 80 °C. Através da análise dos resultados, verifica-se que os parâmetros em estudo são melhorados substancialmente com a adição de pó de mármore.

O índice de plasticidade foi reduzido entre 20 e 33% e a resistência mecânica aumentou 30 a 46%, registando-se o valor mais elevado para uma taxa de substituição de 8%. O maior desenvolvimento de resistência verificou-se após a cura acelerada a 60° C. Apesar de os resultados demonstrarem uma melhoria das características geotécnicas dos solos tropicais, esta ainda é insuficiente para a sua utilização como camada de base em pavimentos flexíveis sujeitos a tráfego intenso.

Karaşahin e Terzi (2005) estudaram o desempenho do pó resultante do processo de beneficiamento dos blocos de mármore, como *filler* para misturas asfálticas. De forma a validar os resultados, estes foram comparados com os obtidos através da incorporação de pó de calcário, também como *filler*, em outra mistura. Os provetes de ensaio foram preparados utilizando o ensaio de Marshall, para determinar a percentagem óptima de betume, e foram realizados ensaios dinâmicos de deformação recorrendo a equipamento de ensaio indirecto de tensão. A temperatura de ensaio foi de 40 °C e efectuaram-se 5000 ciclos, com força axial de 100 kPa, em cada provete. Assim, determinou-se que, para proceder a uma correcta comparação entre amostras, seria necessário utilizar uma percentagem óptima de betume de 4,7% para ambas as famílias, o que resultava numa deformação decrescente até 7% da relação entre o *filler* e o betume, valor após o qual esta aumentava. Segundo os autores, este acontecimento pode dever-se ao facto de, para um determinado valor da relação, o *filler* deixar de preencher os vazios existentes, aumentando a estabilidade, e passar a impedir a ligação entre o agregado e o asfalto, aumentando assim as deformações plásticas. As misturas contendo mármore apresentam deformações plásticas ligeiramente superiores às misturas calcárias. Assim, apesar de poderem ser utilizadas sem qualquer tratamento prévio, são recomendadas, segundo os autores, em estradas com baixo volume de trânsito e onde o custo de transporte seja inferior ao dos demais materiais.

Saboya Jr. *et al.* (2006) propuseram-se a determinar a variação introduzida pela utilização de pó de mármore nas propriedades do tijolo cerâmico. Para esse efeito, tanto este subproduto como um solo argiloso da região estudada foram caracterizados através das suas curvas granulométricas, massa volúmica, limites de Atterberg, área específica e submetidos a uma análise química, térmica e de difracção de raios-x. Os diferentes provetes foram preparados misturando o solo argiloso com percentagens de 0, 5, 10, 15 e 20%, em massa, de pó de mármore. Após a mistura, as diferentes composições foram secas durante 24 horas num forno a 110 °C, sendo depois humedecidas até ao teor ideal de água para extrusão, função do limite de liquidez. Após o processo de laminação e extrusão, foram novamente secas a 110 °C e cozidas a temperaturas de 750, 800 e 950 °C, com um aumento de temperatura de 5 °C/min, e arrefecidas naturalmente à temperatura ambiente. Os vários provetes assim preparados foram sujeitos aos ensaios de absorção de água, massa volúmica específica, porosidade, retracção e resistência à tracção num ensaio de flexão, para aferir as suas propriedades. Os autores concluíram que a utilização de entre 15 a 20% de pó de mármore na composição do tijolo vermelho cerâmico pode ser considerada a melhor proporção a utilizar. No entanto, a absorção de água é uma das propriedades fundamentais para o bom desempenho do tijolo, e com uma taxa de substituição de 20% o valor registado foi superior ao permitido.

Assim, foi concluído que a composição contendo 15% de pó de mármore e cozida a 850 °C pode ser utilizada em escala industrial para uso comercial, surgindo também a hipótese de utilizar uma taxa de substituição superior, sem perda de qualidade, caso exista um forno capaz de atingir temperaturas superiores a 950 °C, o que não se verificou durante este procedimento experimental. Também segundo os autores, a principal vantagem deste tipo de subproduto é a baixa temperatura necessária para dissociar a calcite e a dolomite, melhorando a resistência do corpo cerâmico.

Binici *et al.* (2007) utilizaram pó de mármore e de calcário para inferir a sua influência, como adição, em determinadas propriedades do betão. Para esse efeito, foram produzidas diversas famílias, com taxas de substituição, de agregados finos, em 5, 10 e 15%, e 400 kg/m³ de dosagem de cimento. Os diversos provetes produzidos foram avaliados quanto à sua resistência à compressão aos 7, 28, 90 e 360 dias, ao sulfato de sódio durante 12 meses, à abrasão e à penetração de água. O pó de mármore foi recolhido ainda molhado, directamente do depósito existente na pedreira, e seco antes da preparação dos provetes. Como este contém diferentes tipos de mármore, pedaços da serra de corte e outras partículas, foi lavado e peneirado sobre o peneiro de abertura de malha de 1 mm. Ao invés, o calcário foi apenas peneirado sobre o mesmo peneiro. Os provetes preparados com pó de mármore apresentavam uma resistência à compressão superior aos demais, especialmente o preparado com 15% de substituição, que apresentava, aos 28 dias, uma resistência 38% superior ao grupo de calcário e 24% ao betão de referência. A resistência ao sulfato de sódio melhora progressivamente com a adição de qualquer dos tipos de pó. Novamente, os provetes preparados com 15% de pó de mármore são os que registam o maior incremento no seu desempenho. Pelo contrário, a resistência à abrasão não foi significativamente afectada pela inclusão de pó até 15%, registando, inclusive, uma pequena descida na resistência nos provetes de mármore, especialmente com a maior percentagem de substituição. Para qualquer família de provetes, a profundidade de penetração de água diminui com o aumento da percentagem de substituição, sendo particularmente superior nos provetes de mármore. Com base neste desempenho, os autores defendem que ambos os pós investigados podem ser utilizados para produzir betões mais duráveis.

Topçu *et al.* (2009) estudaram os efeitos do pó de mármore como *filler* nas propriedades do betão auto-compactável. Para esse efeito, substituíram os materiais aglutinantes, cimento e cinzas, por quantidades de 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg/m³ de pó de mármore, sem recorrer a qualquer tratamento prévio. As diversas famílias produzidas foram ensaiadas no estado fresco, recorrendo aos ensaios de espalhamento, “caixa-L” e “funil-V”, e no estado endurecido, onde se avaliou, após 28 dias de cura, a resistência à compressão e à flexão, a velocidade de ultra-sons, a porosidade e a compacidade. Quando as propriedades do betão no estado fresco, tais como o espalhamento, o tempo no “funil-V”, a relação de bloqueio, o teor de ar e o peso específico são os critérios definidos para determinar o teor óptimo de pó de mármore a utilizar, os autores afirmam que uma quantidade próxima de 200 kg/m³ é capaz de melhorar todas as propriedades estudadas. O mesmo valor foi

considerado ideal quando as propriedades do betão no estado endurecido ensaiadas foram a sua resistência à compressão e à flexão, o coeficiente de capilaridade e a compacidade.

A utilização de pó de mármore contribui ainda para a melhoria da resistência inicial e final, o que contrasta com as propriedades pozolânicas das cinzas, que apenas contribuem para a resistência a longo prazo. Tendo em consideração estes factores positivos, os autores afirmam que, para quantidades de 200 kg/m³, alcançaram a melhor e máxima quantidade de pó de mármore a utilizar, desenvolvendo um novo método para a utilização do pó de mármore.

Corinaldesi *et al.* (2010) propuseram-se a caracterizar o pó de mármore para utilizar em betão e argamassa. Este foi caracterizado química e fisicamente, de forma a determinar a sua exequibilidade como adição mineral, e todas as argamassas produzidas foram submetidas ao ensaio de espalhamento, em mesa vibratória, para verificar a sua consistência. As argamassas foram preparadas com o mesmo traço, 1:3, e o pó de mármore foi adicionado sobre a forma de lama, substituindo 10% de cimento ou de areia, ajustando a quantidade de água a adicionar à mistura de acordo com a percentagem de água presente na lama. O teor de água e, conseqüentemente, a relação a/c variam nas várias famílias produzidas, mantendo a fluidez da argamassa fresca constante. Estudaram também a influência da utilização de um superplastificante, adicionando-o com uma dosagem de 0,5% da massa do cimento. Todos os provetes foram sujeitos a uma cura em ambiente saturado a 20 °C até à data de ensaio. O comportamento mecânico das argamassas sem adjuvantes químicos foi avaliado através da realização de ensaios de compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias, com os resultados a demonstrar que substituir 10%, quer de cimento ou de areia, causa uma diminuição da resistência à compressão a longo prazo, de 20% e 10% respectivamente. O mesmo ensaio de compressão para os provetes com superplastificantes foi executado aos 3, 7 e 28 dias, demonstrando que a substituição de 10 % de cimento ou areia apenas causa uma perda de 10% de resistência. O pó de mármore demonstra um efeito de *filler*, particularmente importante nos estádios iniciais de resistência, não contribuindo de forma evidente para o processo de hidratação. Devido à sua elevada finura, este pó provou, segundo os autores, que pode ser bastante efectivo em assegurar uma muito boa coesão da argamassa e do betão, mesmo na presença de superplastificantes, em termos de desempenho mecânico. A substituição de 10% de areia por pó de mármore, na presença de superplastificante, produziu a máxima resistência à compressão com o mesmo nível de trabalhabilidade, comparativamente à mistura de referência após 28 dias de cura.

Confirmadas as vantagens da utilização do pó de mármore como *filler*, surgiram, com naturalidade, novos desafios para a aplicação deste subproduto. Com esse propósito, surgiram Aruntaş *et al.* (2010) que se propuseram estudar o efeito da utilização do pó de mármore como adição na produção de cimento. Para tal, o pó de mármore foi adicionado ao *clinker* de cimento *Portland*, com uma percentagem de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% de substituição em massa. Com o cimento resultante, produziram-se várias argamassas que permaneceram em moldes metálicos durante 24 horas até serem removidas e colocadas a curar imersas a uma temperatura de 20 ± 2 °C, até à data do ensaio. As

amostras foram ensaiadas à compressão e à tracção aos 7, 28 e 90 dias e comparadas entre elas e com provetes de controlo produzidos de acordo com as especificações da EN 197-1:2000 para CEM I e CEM II.

A maior resistência à tracção, para todas as idades, foi obtida para a argamassa produzida com CEM I e a menor com CEM II, o que se pode explicar pela diferença de percentagem de *clinker* em ambos. Este facto demonstra que a introdução de pó de mármore no processo de fabrico não influencia significativamente a resistência à tracção. Relativamente à resistência à compressão, as argamassas produzidas com 5% de pó de mármore apresentam um valor superior ao registado pelas produzidas com CEM I e todas as argamassas com pó de mármore obtiveram uma resistência superior à do CEM II. Segundo os autores, a utilização do pó de mármore na produção de cimento não afecta o tempo de presa, aumenta o peso específico e diminui a superfície específica. E, ainda que aumentando o teor de pó de mármore no cimento em detrimento do *clinker* possa afectar negativamente a sua resistência, este pode apresentar-se como uma alternativa ao CEM II, até a uma taxa de substituição de 10%, diminuindo o custo de produção e mantendo a conformidade com a EN 197-1:2000.

Ergün (2011) avaliou os efeitos da utilização de diatomite, um material pozolânico, que na sua composição apresenta sílica amorfa, cristobalita e pequenas quantidades de outros resíduos minerais, e de pó de mármore como substitutos do cimento nas propriedades mecânicas do betão. Para esse efeito, o cimento foi substituído, em massa, por 5, 7,5 e 10% de diatomite ou mármore e 5 e 10% de diatomite e mármore, mantendo-se a relação água / aglutinante constante, no valor de 0,50, com a introdução de 1% em massa de material aglutinante de superplastificante. Depois de betonados, os provetes permaneceram 24 horas nos moldes, sendo posteriormente retirados e imersos num tanque de cura, com água saturada de óxido de cálcio a 20 ± 2 °C até aos 7, 28 e 90 dias, após os que foram ensaiados à compressão e à flexão. Segundo o autor, a resistência à compressão decresce com o aumento da percentagem de pó de mármore utilizado, como comprova o facto de a família com 10% de taxa de substituição apresentar o menor valor. Isto pode dever-se à potencial redução de materiais cimentícios, originando a diluição das reacções pozolânicas, no entanto, a resistência à flexão não foi significativamente alterada. A família produzida com 5% de substituição de pó de mármore apresentou 5% de aumento na resistência à flexão e 12% à compressão, comparativamente com o betão de controlo. Isto pode dever-se ao efeito de *filler* do mármore, preenchendo os poros e apresentando uma importante propriedade aglutinante, desenvolvida pela hidratação da calcite e C_3A . Também a utilização de superplastificante compensou a elevada exigência de água do pó de mármore, contribuindo positivamente para a resistência dos provetes com um baixo teor deste subproduto. Em suma, o autor considera que o estudo demonstra que a substituição de cimento até 10% de diatomite e 5% de mármore, em separado ou em conjunto, com o auxílio de um superplastificante, pode ser utilizada para melhorar as propriedades mecânicas dos betões convencionais.

Apesar de o pó de mármore ter demonstrado, com sucesso, que pode ser processado em diversas áreas da indústria de construção, a realidade é que continua a ser insuficiente, como referido, para escoar todos os resíduos gerados. Mesmo considerando a hipótese que os resíduos de maiores

dimensões possuem, de ser transformados em pó, através do processo de micronização, a verdade é que este processo requer um consumo demasiado elevado de recursos energéticos e económicos.

Surge assim, com naturalidade, a possibilidade de estudar o efeito da incorporação de agregados de maiores dimensões em outras indústrias. A construção de pavimentos rodoviários utiliza pelo menos 95% do peso de materiais em agregados, o que a torna, inquestionavelmente, uma das indústrias com maior consumo de recursos e onde a extracção contínua de rocha natural acarreta graves consequências para o meio ambiente. Com naturalidade, Akbulut e Gürer (2007), partindo dessa premissa, estudaram a utilização de agregados provenientes das pedreiras de mármore em pavimentos. As misturas asfálticas produzidas a partir do mármore extraído na região foram comparadas com outras produzidas com andesito, uma rocha vulcânica de alta qualidade, utilizada também na construção de pavimentos, e dois tipos diferentes de rochas calcárias, através da realização dos ensaios de *Los Angeles*, de impacto, da acção de ciclos gelo-degelo e do índice de lamelação, para caracterizar as propriedades físicas dos agregados, e o ensaio de Marshall, para determinar as características das misturas em quente. No ensaio de *Los Angeles*, o mármore apresenta o maior valor, 27,44%, de entre todos os agregados, mantendo-se, ainda assim, dentro dos limites regulamentares. Por outro lado, no ensaio de impacto, o resultado de 18,66% foi superior ao valor limite de 18%. No entanto, o provete de controlo produzido com um dos calcários, vulgarmente utilizado nas camadas de base, regularização e desgaste, registou 18,60%, o que levou os autores a considerar que o mármore poderia ser utilizado na camada de regularização. A acção dos ciclos gelo-degelo não varia significativamente entre famílias, cifrando-se abaixo de 12%, voltando o mármore a registar o pior desempenho, o que pode demonstrar a sua inaptidão como agregado para camada de desgaste. Também no índice de lamelação, comparativamente aos provetes produzidos com calcário, os de mármore apresentaram os piores valores, ainda que estes possam ser melhorados alterando a britadeira ou os métodos de peneiração. De acordo, com os valores obtidos através do ensaio de Marshall, os provetes de mármore apresentavam uma melhor relação entre estabilidade e fluidez do que os demais, o que conseqüentemente conduzirá a um melhor desempenho destas misturas. Destes resultados, os autores concluíram que os agregados de mármore podem ser utilizados como camada de regularização de pavimentos em estradas de pequeno a médio volume de tráfego.

Gencil *et al.* (2012) analisaram as propriedades de blocos de betão, para pavimentos, executados com resíduos de mármore. Para tal, foram produzidas duas séries de 5 misturas, cada uma com CEM II 32,5N ou CEM II 42,5N, onde se substituíram 10, 20, 30 e 40% dos AP, finos e grossos, por agregados de mármore. Os provetes de controlo eram constituídos por 25% de areia natural do rio, 25% de areia britada e 50% de agregados grossos britados. Estes foram automaticamente misturados e, recorrendo a uma máquina de compactação, pressionados e vibrados, até estarem completamente compactados, sendo posteriormente curados a uma temperatura constante de 20 °C e humidade relativa de 65%. Após serem sujeitos às condições ambientais locais, foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias. Da análise dos resultados, verifica-se que o peso específico dos blocos produzidos decresce com

a introdução de mármore, expectável pois este apresenta uma massa volúmica mais baixa quando comparado com os restantes agregados.

Da mesma forma, a resistência à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição de mármore, o que, mais uma vez, seria de esperar, visto que a resistência à compressão aumenta com o aumento da massa volúmica. A resistência à tracção é também negativamente afectada pela utilização de maiores teores de mármore. No entanto, os efeitos não são muito significativos, visto que é mais importante a resistência da matriz cimentícia do que a qualidade dos agregados. Relativamente à absorção de água, a influência do mármore é pouco significativa, registando-se, ainda assim, uma pequena diminuição com o aumento da taxa de substituição. Este facto pode contribuir para os provetes produzidos com mármore apresentarem uma menor perda de massa por acção dos ciclos gelo-degelo. A adição de mármore contribui ainda para a diminuição do módulo de elasticidade e do desgaste, aumentando a resistência à abrasão, possivelmente devido à dureza do mármore, na escala de Mohs, ser superior à dos restantes materiais. Analisando estes dados, os autores concluem que o tipo de cimento é mais condicionante do que o mármore, considerando ainda que a incorporação de mármore, substituindo os agregados comumente utilizados, se traduz em blocos de pavimento com qualidade suficiente.

2.4. Propriedades do mármore de Borba - Vila Viçosa

Apesar de os vários estudos apresentados demonstrarem que a indústria do mármore pode não se limitar às RO, e que apresenta características interessantes em diversos outros sectores, o seu uso não é consensual, continuando a acumular-se em escombreyras por toda a região. Com a pesquisa efectuada, confirma-se a existência de uma lacuna na sua utilização como agregado para incorporar em betão, substanciada pela escassez de estudos nesta área.

No entanto, após uma análise às suas propriedades, este aparenta possuir características interessantes para a sua utilização como agregado. Com base nesta evidência, pretende-se, seguidamente, apresentar as principais características que o mármore utilizado nesta campanha experimental regista.

O mármore, como rocha metamórfica, teve origem na alteração da textura, estrutura e composição do calcário, quando exposto a variações das condições físicas, pressão e temperatura, e químicas. Como tal, é natural que apresentem características mineralógicas, químicas e físicas semelhantes. Analisando a sua mineralogia, verifica-se que o mármore é constituído por uma percentagem superior a 90% de calcite, podendo na generalidade dos casos apresentar um valor próximo de 100%, como acontece com os calcários. É também composto por outros minerais acessórios como a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Esta, com uma percentagem até 10%, ganha especial relevância, pois é um mineral mais duro, pesado e frágil, surgindo, normalmente, como veios. É ainda possível identificar quartzo num teor inferior a 2%, segundo LNEC (1991).

Após a análise do Quadro 2.1, verifica-se que o mármore apresenta percentagens superiores a 50% de óxido de cálcio, comum nas restantes rochas carbonatadas, assim como percentagens

reduzidas de silicatos, aluminatos e óxido de ferro. Observa-se também que os valores de perda ao rubro são consideravelmente elevados. Este facto deve-se à perda de materiais carbonatados e outros compostos voláteis, significando um grau de pureza elevado, comum às demais rochas calcárias.

Quadro 2.1 - Composição química do mármore, adaptado de Moura *et al.* (2007)

Mármore de Estremoz / Borba / Vila Viçosa			
	\bar{x} (%)	Máx (%)	Mín (%)
SiO₂	1,66	4,67	0,10
Al₂O₃	0,64	1,69	0,10
Fe₂O₃ total	0,18	1,15	0,04
MnO	0,05	0,05	0,00
CaO	53,77	55,55	51,91
MgO	0,64	2,76	0,04
Na₂O	0,20	1,80	0,03
K₂O	0,24	0,82	0,04
TiO₂	0,04	0,05	0,00
P. rubro	42,77	43,60	41,32

Com o baixo teor de sílica (SiO₂), não se espera a ocorrência de reacções álcalis-sílica. No entanto, os álcalis do cimento podem, segundo Sousa Coutinho (1999), reagir com o carbonato de magnésio, das dolomites, alterando a estrutura dos agregados e originando um produto expansivo. Ainda no panorama químico, de acordo com LNEC (1992), a perda em massa do agregado grosso, devido a alteração pelo sulfato de magnésio, após 5 ciclos, é inferior ao valor limite, de 15%, definido pela especificação LNEC E 373, cifrando-se num valor de 11,4%. Este ensaio deve ser realizado quando o betão está sujeito a ambientes em que a temperatura pode, frequentemente, atingir valores inferiores a -5 °C, ou se pretende obter betões de elevada resistência à penetração de cloretos, o que pode perspectivar um desempenho aceitável dos betões nestes dois parâmetros. Como as restantes rochas carbonatadas, o mármore é susceptível à acção de ácidos, pelo que será assim provável que um betão com AGM exposto a ambientes contaminados com este agente químico possa sofrer uma maior deterioração, isto é, a degradação das suas características mecânicas e de durabilidade.

Quadro 2.2 - Composição física e mecânica do mármore, adaptado de Moura *et al.* (2007)

Mármore de Vila Viçosa			
	\bar{x}	Máx	Mín
Resistência à compressão (MPa)	86,69	108,56	64,04
Idem, após ensaio de resistência ao gelo (25 ciclos) (MPa)	87,97	103,66	71,39
Resistência à tracção por flexão (MPa)	15,89	22,07	9,81
Massa volúmica aparente (kg/m³)	2712	2717	2703
Absorção de água à pressão atmosférica (%)	0,1	0,1	0,0(3)
Porosidade aberta (%)	0,2	0,3	0,1
Resistência ao choque (cm)	55	70	45
Índice de abrasão de <i>Los Angeles</i> (%)	37,7	41	34

Os agregados ocupam, geralmente, cerca de 70 a 80% do volume do betão e, como tal, não são apenas as suas características químicas que irão influenciar o desempenho do betão.

As propriedades físicas dos agregados, como a massa volúmica, a porosidade, a absorção ou a resistência mecânica, irão afectar o seu comportamento, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A análise do Quadro 2.2 permite verificar que a resistência à compressão média do mármore é de 86,69 MPa, o que pode perspectivar um desempenho positivo do betão produzido com AGM pois, segundo Costa e Appleton (2002), para betões correntes, a resistência do betão depende essencialmente da resistência do cimento para valores de resistência das rochas utilizadas como agregados na ordem de 60 MPa. A análise da massa volúmica possibilita a classificação do agregado como normal, o que, dependendo da composição de cada betão, corresponderá a betões comuns com massa volúmica entre 2250 e 2450 kg/m³. Os valores de absorção são consideravelmente reduzidos, mesmo comparados com outras rochas carbonatadas. Esse facto influencia positivamente a quantidade de água a adicionar à mistura, para alcançar a trabalhabilidade desejada, permitindo assim uma maior compacidade da mesma. Apesar de não existir uma relação directa entre o índice de abrasão de *Los Angeles* e o comportamento do betão, o valor médio deste encontra-se bastante próximo do limite máximo de 50%, definido pela especificação LNEC E 237, para a utilização em betões, o que pode contribuir de forma negativa para as características mecânicas e de durabilidade.

Interessa ainda referir que o material presente nas escombreliras não é homogéneo, além do mármore sem interesse ornamental, devido ao elevado grau de fracturação ou a intercalações, encraves e intrusões de outras rochas, que representa cerca de 50% do material existente, podendo em alguns casos atingir 75%. Segundo LNEC (1991), pode-se encontrar também até 40% de solos, não ultrapassando em média 20%, dolomitos até 10% e rochas xistosas e filonianas que não devem ultrapassar 5%. Assim, dependendo do estágio de exploração da pedreira, os resíduos recolhidos para britagem podem apresentar uma variabilidade significativa, introduzindo assim uma variação indeterminada das propriedades do betão.

2.5. Propriedades dos betões produzidos com AR de mármore

A substituição dos agregados primários (AP) por agregados grossos de mármore (AGM) vai, inquestionavelmente, introduzir alterações no desempenho do betão assim produzido. Seguidamente, pretende-se apresentar o levantamento das principais alterações, nos escassos estudos existentes, registadas nas propriedades dos betões, ao nível da durabilidade. Para esse efeito, são apresentadas as características de cada campanha experimental, bem como a variação que os agregados introduziram nas propriedades do betão.

Binici *et al.* (2008) avaliaram a durabilidade de betão produzido com granito e mármore como agregados reciclados (AR). Para esse efeito, utilizaram o tradicional cimento Portland do tipo II, AGM e agregados grossos de granito (AGG) com uma dimensão máxima de 19 mm, areia de rio e escória de alto-forno, com dimensão máxima de 4,75 mm, como agregados finos, e adicionaram superplastificante

a todas as misturas. Foram também produzidos dois betões de controlo com agregados grossos de calcário (AGC), alternando a areia de rio com a escória de alto-forno. A constituição das famílias e a composição química dos constituintes podem ser observados nos Quadros 2.3 e 2.4.

Quadro 2.3 - Constituição das famílias no estudo de Binici *et al.* (2008)

Família	Agregado grosso	Agregado fino
MC1	Resíduos de mármore	Areia de rio
MC2	Resíduos de mármore	Escória de alto-forno
GC1	Resíduos de granito	Areia de rio
GC2	Resíduos de granito	Escória de alto-forno
C1	Calcário	Areia de rio
C2	Calcário	Escória de alto-forno

Quadro 2.4 - Composição química dos materiais utilizados por Binici *et al.* (2008)

Materiais	Óxidos (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	L.I	T.A (%)	Total (%)
CEM II	20,9	5,7	3,6	64,9	1,8	0,9	0,3	0,3	0,80	99,2
Mármore	14,8	21,9	36,8	6,8	7,3	1,2	9,3	0,2	1,02	98,3
Granito	53,2	14,1	12,3	9,1	8,3	-	1,2	0,3	1,10	99,6
Calcário	6,4	2,1	0,4	61,1	1,3	0,2	0,4	26,9	0,95	99,7
Areia de rio	57,1	4,2	1,0	9,3	2,4	0,3	0,6	23,6	1,12	99,6
Escória de alto-forno	35,2	17,1	-	37,2	5,3	0,67	0,35	2,9	0,97	99,7

Os agregados grossos e finos foram separados em fracções diferentes e combinados de acordo com as percentagens presentes no Quadro 2.5, e as propriedades físicas dos mesmos são fornecidas no Quadro 2.6.

Quadro 2.5 - Distribuição granulométrica dos agregados utilizados por Binici *et al.* (2008) na composição dos betões

Agregado grosso						Agregado fino			
Mármore		Granito		Calcário		Areia de rio		Escória de alto-forno	
Malha do peneiro (mm)	Material passado (%)	Malha do peneiro (mm)	Material passado (%)	Malha do peneiro (mm)	Material passado (%)	Malha do peneiro (mm)	Material passado (%)	Malha do peneiro (mm)	Material passado (%)
19	100	19	100	19	100	4,75	100	4,75	100
12,7	75	12,7	72	12,7	75	2,36	88	2,36	85
9,5	33	9,5	30	9,5	25	1,18	67	1,18	65
4,75	0	4,75	0	4,75	0	0,600	43	0,600	47
						0,300	19	0,300	22
						0,150	6	0,150	5

Quadro 2.6 - Propriedades físicas dos agregados utilizados na campanha experimental de Binici *et al.* (2008)

Tipo de agregado		Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
Agregado grosso	AGM	2720	1,40
	AGG	2650	1,50
	AGC	2710	2,30
Agregado fino	Areia de rio	2600	2,40
	Escória de alto-forno	2100	8,78

Em todas as misturas, os agregados, grossos e finos, foram pesados em ambiente seco. Os agregados grossos foram posteriormente imersos em água durante 24 horas, após as quais o excesso de água foi decantado e a água retida pelos agregados determinada pela diferença de massa. Aos agregados finos foi adicionada uma quantidade de água pré-determinada também durante 24 horas. A relação a/c foi mantida em 0,4 para todas as famílias. A formulação dos betões pode ser consultada no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Formulação dos betões produzidos por Binici *et al.* (2008)

Família	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grosso (kg/m ³)	Superplastificante (l/m ³)
MC1	120	300	765	1140	2,5
MC2	120	300	740	1140	2,6
GC1	120	300	770	1150	2,7
GC2	120	300	755	1150	2,4
C1	120	300	780	1180	2,1
C2	120	300	745	1180	2,3

Pereira *et al.* (2009) estudaram a influência do tamanho, mineralogia e teor em água do agregado grosso na permeabilidade de betão estrutural. Com esse objectivo, utilizaram quatro agregados de diferente composição mineralógica, o granito, o basalto, o calcário e o mármore, ou seja, aqueles que são considerados os mais comuns e relevantes agregados da indústria extractiva portuguesa. A areia utilizada foi obtida na região de Lisboa e Vale do Tejo, pois representa cerca de 80% do total de areia produzida em Portugal. As propriedades mecânicas e físicas dos agregados, grossos e finos, são apresentadas nos Quadros 2.8 e 2.9.

Com o objectivo de produzir betões da classe C30/37, foi utilizado um teor em cimento de 450 kg/m³ e relação a/c de 0,44 constantes em todas as famílias. Outras propriedades, como a trabalhabilidade, as condições de mistura e cura e o volume de vazios, também foram mantidas constantes. Os agregados grossos de diferentes dimensões, 4,76/9,52 mm e 9,52/12,70 mm, foram usados em estado seco e saturado, e denominados A1 e A2, respectivamente. Para cada tipo de agregado, foram produzidas três composições diferentes e designadas A1A2, contendo ambas as dimensões, A1, utilizando apenas o agregado 4,76/9,52 mm e A1SAT, recorrendo ao agregado 4,76/9,52 mm saturado com a superfície seca, como se demonstra nos Quadros 2.10, 2.11 e 2.12.

Quadro 2.8 - Propriedades físicas e mecânicas dos agregados grossos utilizados por Pereira *et al.* (2009)

Agregados A1/A2	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Tamanho máximo das partículas (mm)	12,7/19,1	12,7/19,1	12,7/19,1	12,7/19,1
Módulo de finura de Faury	6,4/7,0	6,4/7,0	6,4/7,0	6,4/7,0
Índice volumétrico	0,25/0,25	0,12/0,19	0,20/0,26	0,17/0,22
Baridade (kg/m ³)	1630	1420	1360	1490
Massa volúmica (kg/m ³)	2850	2640	2540	2750
Absorção de água das partículas (%)	1,5	0,3	2,8	0,05
Índice de abrasão de <i>Los Angeles</i> (%)	15	26	37	41
Índice de esmagamento	16	24	32	29
Resistência à compressão (MPa) ^a	138	100	61	71
Coefficiente de absorção (kg/m ² h ^{0,5}) ^a	0,03	0,03	1,30	0,015
Coefficiente de capilaridade (g/cm ² min ^{0,5}) ^a	0,04	0,04	1,68	0,02
Permeabilidade ao ar (x 10 ⁻¹⁶ m ²) ^a	0	0,01	0,32	0
Permeabilidade à água (x 10 ⁻¹⁶ m ²) ^a	0	0,0006	6,97	0

^a Valores obtidos directamente de carotes de rocha

Quadro 2.9 - Propriedades físicas e mecânicas dos agregados finos utilizados por Pereira *et al.* (2009)

	Agregados finos
Tamanho máximo das partículas (mm)	2,4
Módulo de finura de Faury	3,3
Baridade (kg/m ³)	1690
Massa volúmica (kg/m ³)	2620
Absorção de água das partículas (%)	0,5

Quadro 2.10 - Composição do betão A1A2 utilizado por Pereira *et al.* (2009)

	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Agregado fino (kg/m ³)	697,5	697,5	697,5	697,5
Agregado 4,76/9,52 mm (kg/m ³)	511,9	475,7	459,4	502,8
Agregado 9,52/12,70 mm (kg/m ³)	471,4	345,2	418,7	448,4
Cimento CEM II/B-L 35,2 (kg/m ³)	450,0	450,0	450,0	450,0
Água (l/m ³)	198,0	198,0	198,0	198,0
Água adicionada durante a mistura (%)	0	1,5	35	1,5
Abaixamento final (cm)	13	11	11	13

Quadro 2.11 - Composição do betão A1 utilizado por Pereira *et al.* (2009)

	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Agregado fino (kg/m ³)	813,8	813,8	813,8	813,8
Agregado 4,76/9,52 mm (kg/m ³)	839,9	780,5	753,8	825,1
Agregado 9,52/12,70 mm (kg/m ³)	-	-	-	-
Cimento CEM II/B-L 35,2 (kg/m ³)	450,0	450,0	450,0	450,0
Água (l/m ³)	198,0	198,0	198,0	198,0
Água adicionada durante a mistura (%)	4	13	16	5
Abaixamento final (cm)	10	11	10	11

Quadro 2.12 - Composição do betão AISAT utilizado por Pereira *et al.* (2009)

	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Agregado fino (kg/m³)	813,8	813,8	813,8	813,8
Agregado 4,76/9,52 mm (kg/m³)	839,9	780,5	753,8	825,1
Agregado 9,52/12,70 mm (kg/m³)	-	-	-	-
Cimento CEM II/B-L 35,2 (kg/m³)	450,0	450,0	450,0	450,0
Água (l/m³)	198,0	198,0	198,0	198,0
Água adicionada durante a mistura (%)	0	0	0	20
Abaixamento final (cm)	10	10	10	10

O betão foi curado durante 28 dias a 90% de humidade relativa e aproximadamente 20 °C de temperatura. Para compensar a absorção inicial dos agregados, foi adicionada água à mistura, calculada considerando que os agregados absorvem 70% do valor total de água necessária para a sua saturação, durante os primeiros minutos da mistura. Em casos excepcionais, foi necessário recorrer a um segundo ajuste, para obter a trabalhabilidade desejada, medida pelo abaixamento do cone de Abrams de 12 ± 2 cm. Os autores admitiram que esse factor não iria influenciar a relação a/c, pois a água é maioritariamente absorvida pelo agregado grosso.

Hebhoub *et al.* (2011) aferiram algumas propriedades da utilização de resíduos de mármore como agregados para betão. Para esse efeito, recolheram agregados grossos e finos de mármore de uma pedreira e compararam-nos com os agregados calcários tradicionalmente utilizados. As propriedades químicas e físicas dos agregados grossos de mármore podem ser consultadas nos Quadros 2.13 e 2.14, respectivamente.

Quadro 2.13 - Propriedades químicas médias dos AGM utilizados por Hebhoub *et al.* (2011)

	\bar{x} (%)
CaCO₃	99,05
MgO	1,03
CaO	54,86
Fe₂O₃	0,04
Al₂O₃	0,08
SiO₂	0,15
P.C	44,26

A campanha experimental foi aplicada a três famílias distintas, onde os agregados finos seriam substituídos pelos agregados finos reciclados, S, os agregados grossos pelos agregados grossos reciclados, G, e os agregados grossos e finos pelos AR, M, em taxas de 25, 50, 75 e 100%. A caracterização dos agregados é apresentada no Quadro 2.15. O cimento utilizado foi um CEM I 42,5 e a sua dosagem mantida constante a 350 kg/m³. Também a relação a/c se manteve constante, em todas as famílias, e assumiu o valor de 0,5.

Quadro 2.14 - Propriedades físicas dos AGM utilizados por Hebhouh *et al.* (2011)

	Mármore
Massa volúmica (kg/m ³)	2736
Baridade (kg/m ³)	2684
Porosidade (%)	1,96
Absorção (%)	0,39
Saturação (%)	0,87
Resistência à compressão (MPa)	94,3
Resistência à compressão após arrefecimento e aquecimento (MPa)	94,8
Resistência ao desgaste (mm)	1,82
Resistência ao impacto (cm)	40

Quadro 2.15 - Caracterização dos agregados utilizados por Hebhouh *et al.* (2011) na campanha experimental

	Agregados primários			Agregados reciclados		
	Areia 0/5	Agregado grosso 5/15	Agregado grosso 15/25	Areia 0/5	Agregado grosso 5/15	Agregado o grosso 15/25
Baridade (kg/m ³)	1723	1575	1551	1667	1578	1672
Massa volúmica (kg/m ³)	2591	2666	2666	2666	2666	2666
Índice de lamelação (%)	-	12	15	-	24	9
Equivalente de areia (%)	81	-	-	75	-	-
Azul-de-metileno	0,33	-	-	0,33	-	-
Índice de abrasão de <i>Los Angeles</i>	-	-	26,14	-	-	38,9
Ensaio Micro-Deval	-	-	21,50	-	-	24,66
CaCO ₃ (%)	25,56	-	88	99,25	-	-
Cl ⁻ (%)	0,25	-	0,12	0,12	-	-

2.5.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é influenciada por um vasto conjunto de propriedades físicas que condicionam o seu resultado. O ângulo de atrito, a coesão e a viscosidade interferem na maior ou menor mobilidade da massa, a massa volúmica interfere na compactação, e a segregação e exsudação alteram a estabilidade do betão fresco, segundo Coutinho e Gonçalves (1997). Estas propriedades físicas são condicionadas pelas características físicas e químicas dos materiais que dão origem às composições. De acordo com Aïtcin (1998) e Ramachandran *et al.* (1998), a quantidade total de agregados na mistura, a proporção entre o agregado fino e grosso, a distribuição granulométrica e a forma dos agregados estão entre as características físicas, e a reactividade do cimento e das adições, caso necessárias para produzir o betão, nas propriedades químicas. Assim, segundo Brito (2005), a trabalhabilidade condiciona tão fortemente o desempenho do betão, mesmo após a presa, que não é razoável comparar betões com trabalhabilidade diferente. Deste modo, quando se pretende incorporar agregados que comumente não fazem parte da composição do betão, é fundamental o conhecimento desta característica. Nas Figuras 2.11 e 2.12, pode-se observar a trabalhabilidade do betão produzido com AGM, medida através do abaixamento do cone de Abrams, para os estudos de Binici *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2009), respectivamente.

No seu estudo, Binici *et al.* (2008) afirmam que a perda de trabalhabilidade, nas duas famílias de betões produzidos com AGM, se deve ao aumento da actividade pozolânica do betão, devido à

interacção da escória de alto-forno com o mármore. Facto impossível uma vez que as reacções das adições iniciam-se mais tarde do que as do cimento, principalmente as que têm propriedades pozolânicas. Os mesmo autores concluem ainda que a família GC1 requer mais superplastificante do que a família GC2, para obter a mesma trabalhabilidade, por ter sido produzida com escória de alto-forno, o que contraria a denominação dada às composições utilizadas no restante trabalho, não estando assim claro se existiram outras trocas e se isso influencia as conclusões obtidas.

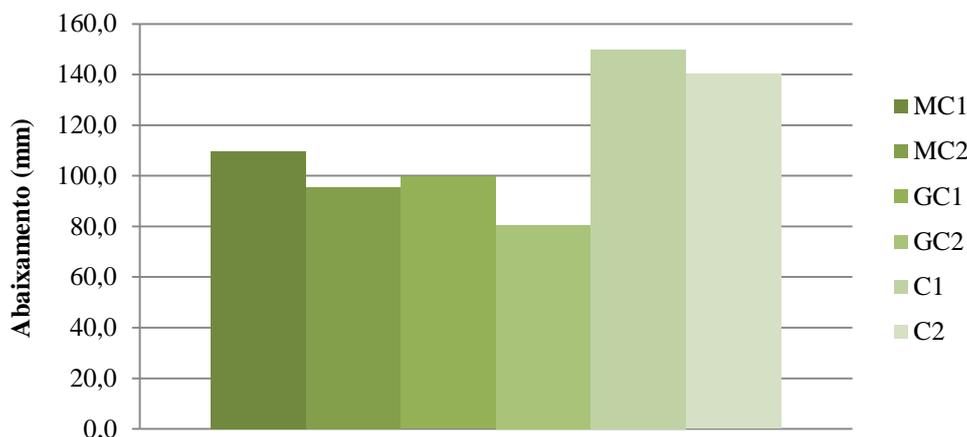


Figura 2.11 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Binici *et al.* (2008)

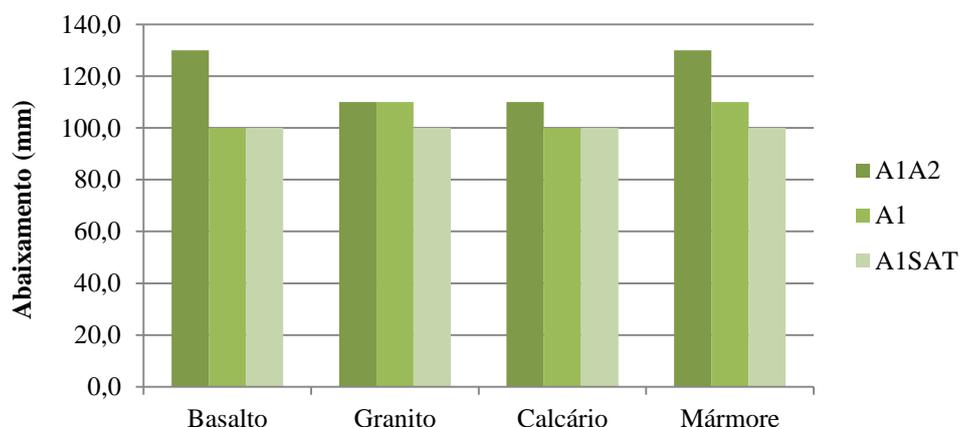


Figura 2.12 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Pereira *et al.* (2009)

Já Pereira *et al.* (2009) demonstram que uma distribuição granulométrica mais extensa do agregado se traduz num melhor abaixamento. Ainda assim, os betões produzidos com mármore saturado necessitaram de adição de água, para obter o mesmo abaixamento do que os betões produzidos nas mesmas condições, com os AP. Apesar de o motivo não ser claro para os autores, estes tentam explicar que o índice volumétrico e a superfície lisa dos AGM originam uma mistura com uma coesão especial o que diminui a sua trabalhabilidade.

Também Hebhoub *et al.* (2011) afirmam que os principais factores que influenciam a trabalhabilidade do betão são a distribuição granulométrica, a forma dos agregados, as proporções utilizadas e as características intrínsecas dos agregados. Afirmam ainda que o parâmetro crítico para se obter uma trabalhabilidade decrescente com o aumento da taxa de substituição, como se comprova na

Figura 2.13, é a maior absorção por parte dos agregados primários, comparativamente com os agregados de mármore, obrigando a uma correcção da quantidade da água a adicionar às misturas, dependendo das proporções da mesma.

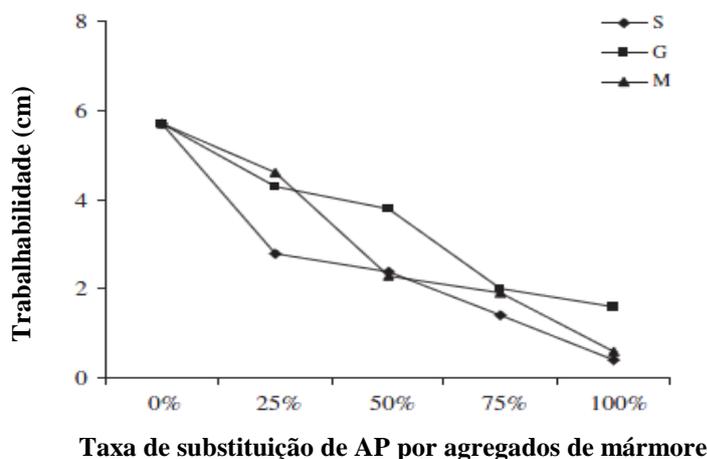


Figura 2.13 - Trabalhabilidade dos betões obtidos na campanha experimental de Hebhouh *et al.* (2011)

2.5.2. Massa volúmica

A massa volúmica do betão fresco, segundo Brito (2005), reflecte a massa volúmica de cada um dos seus componentes e o seu grau de compactação. Como referido, os agregados representam cerca de $\frac{3}{4}$ do volume total de betão, o que os torna, inquestionavelmente, os mais condicionantes para essa propriedade. Analisando as propriedades dos AGM, verifica-se que estes apresentam uma massa volúmica similar à dos AGC e inferior à dos AGG e AGB, tradicionalmente utilizados em Portugal, pelo que não se espera grandes diferenças nesta relação para os betões produzidos com estes agregados.

Da Figura 2.14, pode-se constatar que, nos estudos de Hebhouh *et al.* (2011), a densidade das misturas de betão não varia significativamente com a variação da taxa de substituição e que, para uma substituição de 50% de agregados finos e grossos, os valores obtidos são equivalentes aos obtidos através da utilização de AP na produção de betão.

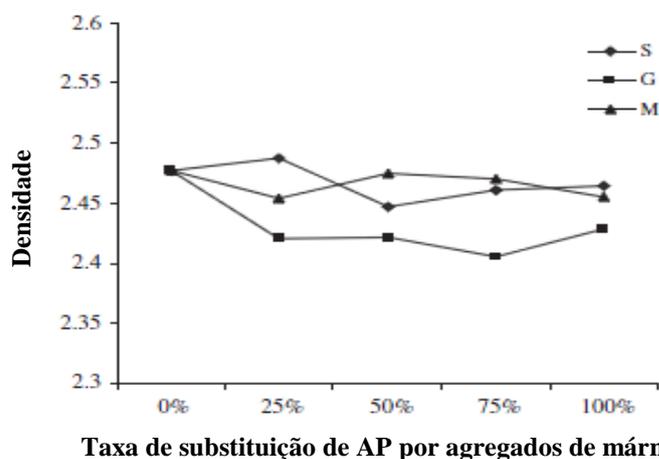


Figura 2.14 - Massa volúmica dos betões, no estado fresco, produzidos na campanha de Hebhouh *et al.* (2011)

Da análise da Figura 2.15, observa-se que os trabalhos de Binici *et al.* (2008) permitiram verificar que a massa volúmica do betão não varia significativamente entre o estado fresco e o estado endurecido, neste caso específico após 1 dia de cura.

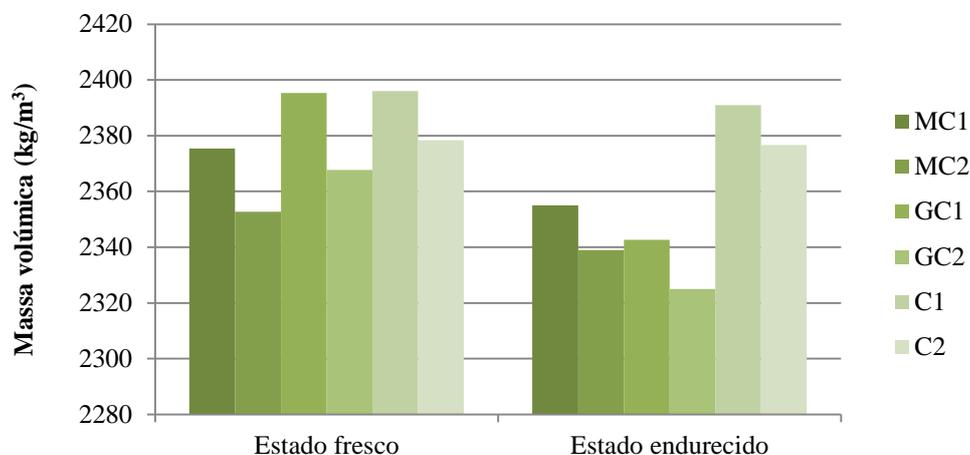


Figura 2.15 - Massa volúmica dos betões, no estado fresco e endurecido, produzidos na campanha de Binici *et al.* (2007)

Em ambos os estudos, ainda que com uma expressão pouco significativa, verifica-se que o agregado com maior massa volúmica não produz o betão com maior massa volúmica. Embora não seja claro o motivo, este parece ser apenas resultante dos diferentes graus de compactação de cada mistura, uma vez que Hebhoub *et al.* (2011) aparentam ter produzido todos os provetes com as mesmas proporções, e por a introdução de superplastificante nos provetes produzidos por Binici *et al.* (2008) ser a variação mais significativa, o que, segundo Brito (2005), não parece afectar a massa volúmica do betão fresco.

2.5.3. Absorção de água

A capacidade do betão, no estado endurecido, em absorver água é uma das propriedades mais relevantes para o estudo da sua durabilidade, visto que permite estimar a facilidade com que os agentes agressivos, como cloretos, sulfatos, entre outros, penetram no betão, contribuindo para a sua deterioração. Esta pode ser medida tanto por imersão, directamente relacionada com a porosidade aberta na matriz cimentícia do betão, ou seja, a existência de poros com comunicação entre si, como por capilaridade, caracterizada pela capacidade que o betão apresenta em, através dos seus vasos capilares, absorver líquidos por ascensão.

De acordo com Coutinho e Gonçalves (1994), este fenómeno é originado pela diferença de pressão existente entre a superfície livre dos líquidos e a superfície desses mesmos líquidos no interior dos vasos capilares, e será tanto maior quanto menor for o diâmetro dos poros do betão. Assim, a absorção, segundo Brito (2005), depende da finura do cimento, da relação a/c, do teor em cimento, da idade, da duração e condições de cura, da compacidade do betão, da sua trabalhabilidade e também da absorção de água dos agregados. Neville (2002) concluiu que o coeficiente de permeabilidade aumenta

consideravelmente para betões com uma relação a/c superior a 0,6 e diminui com a idade do protótipo, podendo explicar-se esse fenómeno com o processo de endurecimento do cimento, onde, numa fase de maturação avançada, os poros capilares são obstruídos pelo gel formado, conduzindo a uma diminuição da permeabilidade.

Na produção dos betões, conservou-se a curva granulométrica do agregado, a dosagem de cimento e a relação a/c em todas as famílias, bem como se procurou garantir a similaridade das condições de cura e trabalhabilidade, minimizando a variabilidade no processo de compactação, de forma a apenas a absorção de água dos agregados influenciar a absorção do betão. Como tal, e face ao referido relativamente às propriedades dos AGM, é expectável que os betões, com eles produzidos apresentem uma absorção baixa e inferior à dos demais AP.

Pela análise das Figuras 2.16, 2.17 e 2.18, observa-se que, no estudo de Pereira *et al.* (2009), esse facto é parcialmente comprovado. As famílias produzidas com calcário, que apresenta uma maior absorção de água do que os restantes agregados, são, de facto, as que conduzem à maior absorção de água no betão, não se verificando o oposto nos betões produzidos com agregados de mármore que, apesar de ser o agregado com menor absorção de água, não produz, em todas as famílias, o menor valor de absorção de água no betão. Ainda assim, de acordo com a NFB 10502, relativamente ao coeficiente de capilaridade, todas as famílias produzidas podem ser classificadas como tendo uma baixa absorção de água por capilaridade.

Considerando, para todos os betões produzidos, os valores dos coeficientes de absorção e capilaridade e a absorção de água por imersão com vácuo, estes apresentam uma tendência decrescente das misturas A1A2, que utiliza agregados de maiores dimensões, A1 e A1SAT, agregados de menores dimensões e saturados, respectivamente. Este facto, segundo os autores, pode ser explicado pela existência de agregados de maiores dimensões que contribuem, no betão, não só para aumentar o comprimento dos poros capilares e da sua intercomunicação, mas também para o incremento dos poros na zona de interface cimento-agregado, onde o fenómeno de absorção por capilaridade ocorre principalmente. Os agregados de granito são os únicos que contrariam esta tendência, não existindo, no entanto, uma razão evidente para tal.

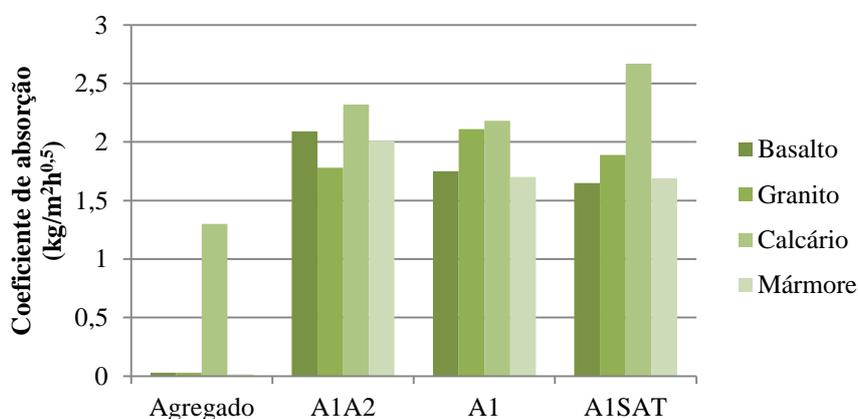


Figura 2.16 - Coeficiente de absorção obtido na campanha de Pereira *et al.* (2009)

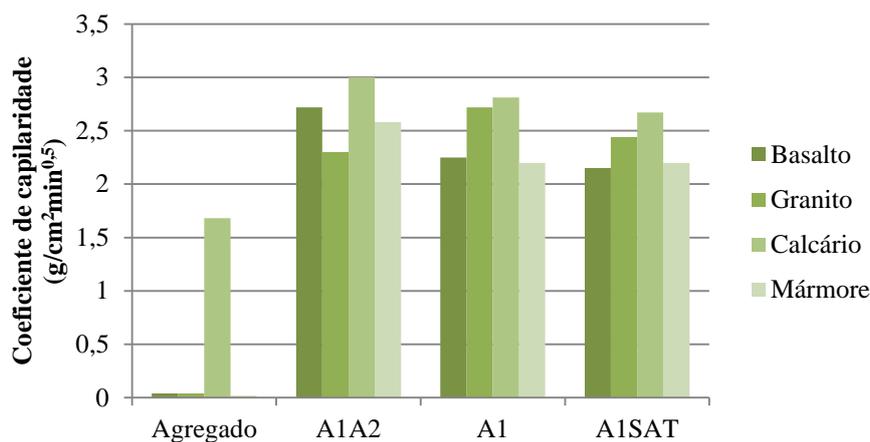


Figura 2.17 - Coeficiente de capilaridade obtido na campanha de Pereira *et al.* (2009)

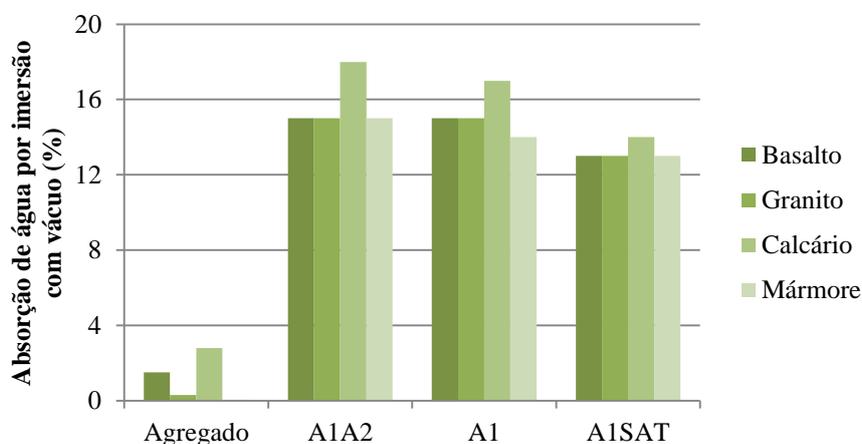
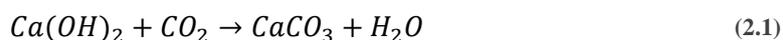


Figura 2.18 - Absorção de água por imersão com vácuo obtido na campanha de Pereira *et al.* (2009)

2.5.4. Resistência à carbonatação

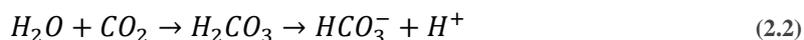
A capacidade de resistência à carbonatação é também uma das propriedades fundamentais na determinação da durabilidade do betão no estado endurecido e que, de acordo com Brito (2005), está também relacionada com a permeabilidade ao ar e à água, dependendo dos mesmos factores e, de forma geral, apresentando as mesmas tendências.

A carbonatação pode ser definida como o processo pelo qual o dióxido de carbono, CO₂, presente na atmosfera, reage, na presença de humidade, com os componentes hidratados do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, para formar o carbonato de cálcio, CaCO₃, de acordo com a seguinte reacção química:

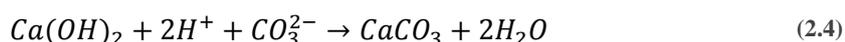


Na realidade, o elemento agressivo não é o CO₂, em estado gasoso, mas sim o ácido carbónico, pois o primeiro não é reactivo por si só. Assim, pode-se considerar que a reacção ocorre em três fases:

na primeira, o CO₂ difunde-se para o interior do betão, seguidamente, reage com as moléculas de água, existentes na matriz cimentícia, segundo a reacção química seguinte:



Finalmente, o produto resultante da reacção, o ácido carbónico, reage com os componentes alcalinos do betão, segundo a reacção química:



A progressão da frente de carbonatação é consideravelmente lenta, uma vez que depende da migração da humidade, gerada na reacção anterior, do interior do betão para a atmosfera, de forma a preservar o equilíbrio higrométrico. No entanto, esta desenvolve-se mesmo para pequenas concentrações de CO₂ na atmosfera, como no caso do ar rural onde o teor de carbono é cerca de 0,03% por unidade de volume, ou nos grandes centros urbanos, onde em média alcança 0,3%, podendo atingir, excepcionalmente, 1,0%.

A carbonatação não causa, por si só, a deterioração do betão, mas produz efeitos importantes. Entre estes, surge a retracção por carbonatação e que, de acordo com Coutinho e Gonçalves (1994), se define como a combinação do dióxido de carbono da atmosfera com os componentes hidratados do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, o qual origina produtos sólidos com um volume inferior à soma dos volumes do dióxido de carbono com os componentes hidratados. Outro efeito, talvez mais importante do que o anterior, é a destruição da película protectora das armaduras no betão. A presença de CO₂ no interior da matriz cimentícia reduz o pH da água presente nos poros do betão endurecido, de valores entre 12,6 e 13,5, para valores inferiores a 9,0. Segundo Neville (2002), quando todo o Ca(OH)₂ estiver carbonatado, o valor de pH pode atingir 8,3.

O aço, quando envolto pelo meio alcalino do betão, forma uma fina camada de óxido, denominada de camada de passivação que, de acordo com Neville (2002) adere fortemente ao aço, conferindo-lhe protecção à reacção com o oxigénio e água. De forma a garantir a manutenção dessa camada, é necessário que a água presente nos poros, em contacto com esta, mantenha um pH elevado. Quando a frente de carbonatação atinge a vizinhança da superfície do aço, a película protectora é eliminada e, na presença de humidade e oxigénio, pode-se iniciar o mecanismo de corrosão.

À medida que a frente de carbonatação avança, progressivamente, do exterior para o interior do betão, a velocidade diminui, uma vez que o CO₂ tem que se difundir através dos poros. Como a velocidade depende da humidade relativa, que por sua vez, varia com a profundidade no betão, esta poderá não ser determinada por uma equação de difusão normal. No entanto, é alcançada uma boa aproximação considerando as condições de humidade constante. Assim, a profundidade de carbonatação

umenta, segundo Neville (2002), com a raiz quadrada do tempo, podendo ser expressa sobre a forma da função seguinte:

$$D = kt^{0,5} \quad (2.5)$$

Onde,

- D - profundidade de carbonatação, em mm;
- k - coeficiente de carbonatação, em mm/ano^{0,5};
- t - tempo de exposição, em anos.

Os valores de k dependem da humidade e da permeabilidade de betão. Mas o principal factor que controla a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento endurecido que é função do sistema poroso, o que torna o tipo de cimento, a razão a/c e o teor de humidade ainda mais importantes. No entanto, é possível a dissolução da camada protectora, mesmo que a frente de carbonatação se encontre a poucos milímetros da superfície do betão. Este fenómeno pode ocorrer quando existem pequenas fissuras onde o CO₂ penetra mais facilmente ou pela presença de agregados grossos que originam que a frente não se desenvolva paralelamente à superfície do betão.

A velocidade com que a frente de carbonatação se desenvolve vai depender do teor em humidade da estrutura e da humidade relativa nas imediações desta. Como a carbonatação é fortemente influenciada pela concentração de CO₂ no ar, pelo tipo de cimento e pela razão a/c é necessário uma combinação entre a humidade e o CO₂ para que esta progrida, sendo assim possível determinar a velocidade de carbonatação em função da humidade relativa. Para valores de humidade relativa inferior a 30%, a velocidade de propagação é baixa, visto não haver água suficiente. Esta também é baixa para valores de humidade superiores a 75%, pois os valores elevados de água inibem a difusão do CO₂. Para valores entre 50 e 70%, a velocidade é elevada.

O método mais comum para avaliar a profundidade da carbonatação de uma superfície recentemente exposta, como foi o caso do trabalho experimental adiante descrito, resulta da aplicação de uma solução de fenolftaleína diluída em álcool, alterando a sua cor para valores de pH superiores a 9. No entanto, de acordo com Lo (2005), existe uma zona parcialmente carbonatada, onde o valor de pH não é facilmente detectado, utilizando este indicador. Outros ensaios demonstram que o CO₂ pode reagir a profundidades superiores às indicadas pelo indicador de fenolftaleína.

Embora não tenham sido encontrados estudos relativamente a esta propriedade em betões com AGM, ao manter constante em todas as famílias produzidas o tipo de cimento e a relação a/c, espera-se que, devido aos baixos valores de absorção de água verificados anteriormente, os valores da profundidade de carbonatação em betões com AGM sejam inferiores aos valores obtidos em betões com AGC e similares aos dos betões com AGG e AGB.

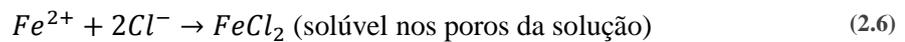
2.5.5. Resistência à penetração de cloretos

De acordo com Levy (2001), os iões de cloro, Cl⁻, são distintos do CO₂ pois são agentes que provocam a despassivação da armadura, permitindo consequentemente o desenvolvimento do mecanismo

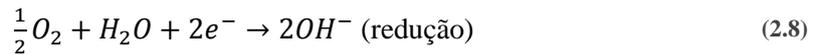
de corrosão do aço, tão prejudicial às estruturas de betão. A corrosão não só causa a perda localizada da secção transversal dos varões, originando a perda de capacidade resistente, como também, devido aos produtos de corrosão ocuparem um volume várias vezes superior ao ocupado pela armadura, gera fissuras, fragmentação e delaminação, possibilitando a entrada de agentes agressivos directamente para a armadura.

Como referido, a película protectora dos varões de aço adere fortemente ao aço e consiste em óxido de ferro, Fe_2O_3 . Enquanto existir essa película, os varões estão protegidos de qualquer ataque. No entanto, os iões de cloro reagem com o óxido de ferro e formam um complexo solúvel que se dissolve na solução em seu redor, terminando a protecção existente. As reacções químicas, segundo Bentur *et al.* (1997) e Callister (2000), citados por Rajabipour (2003), são as seguintes:

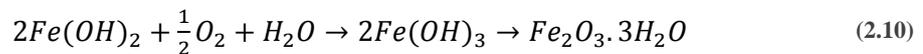
- decomposição da camada de passivação:



- corrosão do aço:



- formação de hidróxido de ferro:



Neville (2002) descreveu o processo de corrosão que se inicia quando é activada uma célula electroquímica, devido à existência de uma diferença de potencial eléctrico ao longo do aço no betão. Nesta célula, existe uma região anódica e catódica, ligadas por um electrólito, sob a forma de água nos poros da matriz endurecida do cimento, possibilitando a condutividade do meio. Os iões positivos Fe^{2+} passam do ânodo para a solução aquosa, enquanto os electrões, e^- , passam através do aço para a região catódica, onde são absorvidos pelos constituintes do electrólito e se combinam com o oxigénio e a água para formar iões hidróxido, OH^- . Estes percorrem o electrólito e combinam-se com os iões Fe^{2+} para formar hidróxido de ferro, $Fe(OH)_2$, que é convertido em óxido de ferro, Fe_2O_3 .

No entanto, não é o teor total de cloretos no betão que interessa para a corrosão. Apesar de não se entender completamente o mecanismo de fixação dos iões de cloro, segundo Ferreira (2000), parte dos cloretos é fixada quimicamente, sendo incorporada nos produtos de hidratação do cimento. Outra parte é fixada fisicamente, sendo absorvida na superfície dos micro-poros, e uma terceira parte encontra-se livre, e é esta que, sendo capaz de se deslocar livremente, destrói a camada passiva na superfície das armaduras e inicia o processo de corrosão, segundo as reacções atrás descritas.

De acordo com Rajabipour (2003), os iões cloro podem penetrar numa estrutura de betão através de diversos mecanismos. Quando a estrutura está sujeita a uma pressão hidráulica, a água que

contém cloro penetra no betão, sendo este mecanismo de permeabilidade ou migração de cloretos mais condicionante em estruturas marítimas.

Quando a água contendo cloretos encontra uma superfície seca de betão, esta vai ser absorvida pelos poros do betão, característica da absorção capilar. Quando existe uma variação da pressão entre o exterior e o interior de um elemento de betão e há iões cloreto na superfície, os iões migram para o interior do betão, onde os vazios se encontram com uma menor pressão. Outro mecanismo importante e método principal da penetração de cloretos é a difusão, ou seja, o movimento de cloro através de um gradiente de concentração. O coeficiente de difusão, segundo Neville (2002), não é constante e varia com a idade do betão, porque a estrutura dos poros varia com o tempo, especialmente devido às reacções do cimento.

A penetração de cloretos, como se pode constatar, depende das condições de humidade existentes, não se verificando corrosão em betões secos, permanentemente submersos, ou provavelmente, como demonstra Neville (2002) para humidades relativas inferiores a 60%, sendo que as zonas de rebentação de ondas ou zonas de maré são as que mais sofrem com este fenómeno. Lo (2005) afirma também que a corrosão não ocorre para concentrações de cloro inferiores ao limite de 0,1% a 0,4%, e que depende da permeabilidade e capacidade de fixação de cloretos do betão e do tipo e dosagem de cimento.

Binici *et al.* (2008) avaliaram a penetração de cloretos, como se pode verificar na Figura 2.19. Os resultados demonstram que a resistência à penetração foi significativamente mais elevada nos betões com mármore, granito e escória de alto-forno. Segundo os autores, isto indica que a utilização de escória de alto-forno, introduz um efeito significativo na profundidade de penetração de cloretos nos betões.

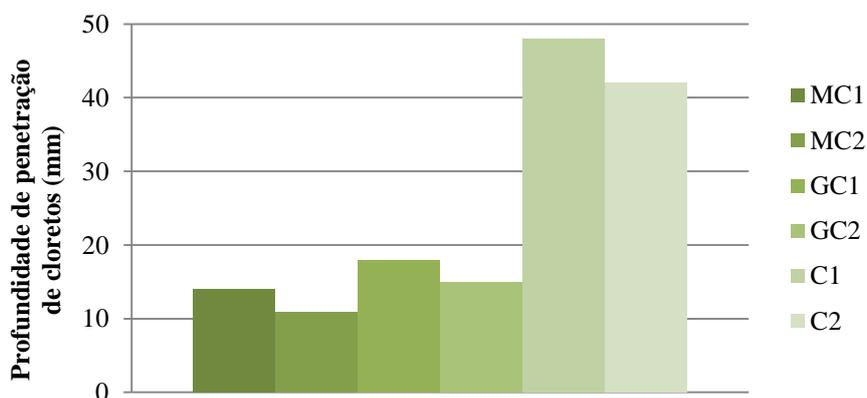


Figura 2.19 - Profundidade de penetração de cloretos obtida por Binici *et al.* (2008)

O coeficiente de difusão de iões cloreto é, normalmente, estimado através do ensaio de migração rápida em regime não estacionário. No entanto Spiesz e Brouwers (2010) afirmam que este ensaio utiliza um modelo teórico para a penetração de cloretos demasiado simplificado, conduzindo a estimativas incorrectas. Como tal, deve ser tratado com cuidado, devendo desenvolver-se um novo método tomando em atenção a natureza não linear da fixação dos cloretos no betão e as concentrações em estado não equilibrado.

2.6. Propriedades dos betões produzidos com AR

A utilização de AR tem, ao longo dos anos, ganho especial relevância, não só devido à crescente preocupação com as questões ambientais, mas também pela existência de regiões onde a capacidade de produção de agregados foi largamente ultrapassada, face às necessidades existentes. É, no entanto, unânime que a introdução de AR, quer apenas em parte ou na totalidade da composição dos agregados do betão, conduz a um desempenho algo inferior, comparativamente ao que se poderia obter para um betão produzido unicamente com os denominados AP. Este é um factor que geralmente conduz a alguma desconfiança, quanto há utilização de AR, e onde podem surgir as vantagens da utilização de AGM reciclados. Sendo este um material de origem rochosa, possuindo características semelhantes às das restantes rochas carbonatadas, é de prever que o seu comportamento não origine efeitos tão penalizantes nas propriedades do betão. Logo, ganha maior interesse verificar como alguns AR, tradicionalmente utilizados, influenciam as propriedades do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido, de forma a entender se a solução apresentada, caso não atinja os valores esperados, pode representar uma alternativa a qualquer deles.

Após alguma pesquisa bibliográfica, concluiu-se que os AR mais utilizados são os AR de betão, cerâmicos, de borracha, de vidro e de plástico, apresentando-se, seguidamente, uma breve descrição de como as suas características influenciam as propriedades do betão.

2.6.1. Trabalhabilidade

O recurso a AR, provenientes de resíduos da construção e demolição, em vez de AP conduz, segundo Brito (2005), para a mesma relação a/c aparente e com a mesma dosagem de componentes, a um betão com menor trabalhabilidade, sendo que esta redução está directamente relacionada com o aumento da absorção de água pelos AR. A trabalhabilidade será tanto menor quanto maior a taxa de substituição de AP por AR e esta diminuirá mais rapidamente, para a mesma taxa, com a substituição de finos do que de grossos. Também o processo de britagem pode ter influência significativa no valor da trabalhabilidade obtida, por vezes superior à da própria substituição de AP por AR.

Os resultados experimentais de Topçu e Günçan (1995) e Topçu (1997) confirmam que a elevada absorção de água por parte dos AR conduz a uma menor trabalhabilidade de betões produzidos com agregados grossos reciclados de betão. Para Montgomery (1998), o aumento da percentagem de argamassa aderente à superfície do agregado conduz a uma diminuição do abaixamento do cone de Abrams. Carrijo (2005), ainda sobre a mesma temática, refere uma tendência de redução da trabalhabilidade com a diminuição da massa volúmica dos AR. Da mesma forma, os AR cerâmicos, de acordo com Rosa (2002), também conduzem a menores valores de abaixamento para a mesma relação a/c aparente, conseguindo-se, no entanto, alcançar uma trabalhabilidade similar à dos betões produzidos com os agregados comuns, recorrendo à pré-saturação dos agregados cerâmicos, ou recorrendo ao uso de superplastificantes, para compensar eventuais mudanças de consistência.

Os AR de borracha continuam a demonstrar que, preservando a relação a/c aparente, a trabalhabilidade diminui. A comprovar este facto, surgem os estudos de Kew e Kenny (2009), onde se verifica que, com uma percentagem de agregados de borracha superior a 50%, o abaixamento será igual a 0, devido à combinação entre a baixa massa volúmica e o maior atrito da forma angular da borracha. Também Chaikaew e Sukontasukkul (2006) alcançaram um resultado semelhante, afirmando que os agregados de borracha necessitam de um maior teor de água para atingirem o mesmo abaixamento. A mesma conclusão foi retirada do trabalho experimental de Giacobbe (2008), que afirma que, para o betão de referência e os betões com AR de borracha terem a mesma trabalhabilidade, é necessário possuírem diferentes relações a/c.

Esta tendência volta a ser observada quando se utilizam agregados de vidro. Park *et al.* (2004) afirmam que a forma angulosa e irregular dos grãos de vidro, aliada à maior dimensão dos agregados, provoca a perda de fluidez e de trabalhabilidade no betão. Topçu e Canbaz (2003) concluíram que a substituição dos AP por agregados grossos de vidro conduz a uma diminuição do abaixamento do cone de Abrams, devendo-se também à fraca geometria destes.

Relativamente aos agregados de plástico, a tendência mantém-se inalterada. Albano *et al.* (2009) verificaram que as propriedades reológicas e de homogeneidade da amassadura são alteradas com a adição de agregados de plástico, especificamente na sua fluidez. Ismail e Al-Hashmi (2008) justificam a redução do abaixamento com o facto de algumas partículas serem muito angulares e terem formas não uniformes, resultando, novamente, numa menor fluidez. Kou *et al.* (2009) necessitaram de aumentar a dosagem de superplastificante com o aumento da percentagem de agregados plásticos, para obterem os valores de abaixamento pretendidos.

2.6.2. Massa volúmica

A diferença de massa volúmica entre um betão de referência e um betão com AR, no estado fresco, é igual à diferença da massa volúmica entre os AR e os AP correspondentes, multiplicada pelo respectivo teor na massa de betão, como explicado por Brito (2005). Assim, quanto maior for a diferença de massas volúmicas entre os agregados e a taxa de substituição de AP por AR, maior a diferença de massa volúmica dos respectivos betões no estado fresco. Este princípio está patente na campanha de Ferreira (2007), onde este verifica que a massa volúmica diminui com o aumento da taxa de substituição de AP por agregados grossos reciclados, sendo a redução da massa volúmica tanto maior quanto maior a relação a/c. Também Carrijo (2005) constata o aumento da massa volúmica do betão no estado fresco, com a diminuição da relação a/c. Hansen (1985), citado por Buttler (2003), garante que a quantidade de argamassa aderente ao material reciclado reduz a massa volúmica do agregado reciclado em cerca de 5 a 10% da massa específica do agregado original.

Os agregados grossos cerâmicos acompanham a tendência anterior, apresentando, de modo geral, uma massa volúmica inferior à dos AR de betão e AP.

Senthamarai *et al.* (2011) verificou que também a massa volúmica do betão produzido com AR cerâmicos diminui com o aumento da relação a/c e é sempre inferior à dos AP.

Para Bravo (2009), a diminuição da massa volúmica entre o betão de referência e os betões com AR de borracha, com iguais curvas granulométricas e trabalhabilidade, deve-se apenas à diferença entre a massa volúmica dos agregados utilizados. Também a diminuição da dimensão dos agregados de borracha origina uma diminuição da massa volúmica no estado fresco. Estas hipóteses são amplamente suportadas pela sua pesquisa bibliográfica.

A diminuição da massa volúmica do betão com o aumento do teor em vidro é um efeito previsível, atendendo a que a massa volúmica dos agregados de vidro é inferior à dos AP. Diversos autores, como Topçu e Canbaz (2003) e Ismail e Al-Hashmi (2009), confirmaram este facto, ou seja, a diminuição da massa volúmica em betões no estado fresco com o aumento da taxa de substituição.

A massa volúmica dos agregados plásticos é também significativamente inferior à dos AP. Logo, não é surpreendente a tendência decrescente, obtida por Ismail e Al-Hashmi (2008), para os valores de massa volúmica no estado fresco, com o aumento da taxa de substituição dos AR de plástico. Também Kou *et al.* (2009) alcançaram resultados semelhantes, retirando as mesmas conclusões.

2.6.3. Absorção de água

A absorção de água dos AR, de betão ou cerâmicos, é muito superior à dos AP, o que prejudica drasticamente o comportamento dos betões com este tipo de AR. Figueiredo (2005) e Gomes (2007) obtiveram um aumento linear entre a absorção de água do betão e a taxa de substituição de AP por AR. Barra (1996) verificou que, quando diminuía o diâmetro do agregado e aumentava a porosidade do material, aumentava a percentagem de absorção de água obtida. Também Padmini *et al.* (2002), citados por Buttler (2003), estudaram o efeito da absorção de água em betões produzidos com agregados originários de resíduos de resistência elevada, concluindo que esta era superior à obtida com os AR de betão convencionais, devido à maior quantidade de argamassa aderente a estes agregados.

Os agregados cerâmicos produzem betões com piores características do que os anteriores, uma vez que a sua absorção de água é superior à dos AR de betão. Segundo Rosa (2002), a absorção dos AR cerâmicos pode atingir valores que variam entre 20 e 35%, consoante a sua fracção granulométrica, o que, na continuação do seu estudo, culmina também num aumento linear entre a absorção de água do betão produzido. À mesma conclusão chegou Senthamarai *et al.* (2011) quando verificou que a absorção de água para betões produzidos com agregados cerâmicos aumenta linearmente com a relação a/c e foi sempre superior à dos betões produzidos com agregados tradicionais, nas mesmas condições.

A absorção de água nos AR de borracha varia consideravelmente com a sua porosidade, podendo atingir valores até 50%, mas a generalidade dos estudos considera-a similar à dos AP.

As campanhas de Giacobbe (2008) e Garros e Turatsinze (2008) indicam que o aumento da quantidade de agregados finos de borracha provoca um aumento da absorção de água, o que, segundo

Giacobbe (2008), pode dever-se à maior dificuldade de compactação dos betões produzidos com agregados de borracha. Estes também apresentam maior porosidade, o que conseqüentemente origina uma maior absorção de água.

Os AR de vidro, por seu lado, registam uma insignificante absorção de água, o que, com o aumento da taxa de substituição, conduzirá a uma absorção menor do betão com eles produzido. A confirmar esta tendência, Oliveira *et al.* (2008) e Wang e Huang (2010) verificaram que a absorção diminui com o aumento da taxa de substituição da areia natural por areia de vidro. Este facto pode dever-se à melhor distribuição granulométrica e, como tal, ao melhor arranjo das partículas, melhorando a compacidade e reduzindo os poros capilares.

Assim como os AR de borracha, a absorção de água dos AR de plástico é função da sua porosidade e pode assumir valores entre 0,02 e 13,9%, consoante a sua origem. Albano *et al.* (2009), na sua campanha experimental, obtêm uma absorção de água superior à do betão de referência. Apesar de a absorção de água dos agregados utilizados variar entre 0,1 e 0,3%, os autores atribuem esse facto à diferente granulometria entre a areia que iam substituir e os agregados de plástico existentes, o que originou uma menor compacidade e maior porosidade.

2.6.4. Resistência à carbonatação

O fenómeno de carbonatação está directamente relacionado com a porosidade e com a maior ou menor permeabilidade do betão, ao atravessamento de líquidos e gases. Como referido, os betões produzidos com AR de betão apresentam um comportamento muito inferior ao do betão produzido com AP, pelo que os resultados obtidos por Evangelista (2007), que constata um pior desempenho dos betões com agregados finos reciclados com o aumento da taxa de substituição, são expectáveis. Também a campanha experimental de Figueiredo (2005) demonstra uma tendência crescente da profundidade de carbonatação com o aumento da taxa de substituição. Gomes (2007) afirma ser possível, até determinados limites na percentagem de incorporação de AR de betão, controlar a perda de resistência à carbonatação, e Barra (1996) conclui que a resistência à carbonatação depende da resistência à compressão do betão.

Apesar de não ter sido encontrada qualquer campanha experimental onde este fenómeno é estudado, atendendo às características não só dos AR cerâmicos mas também dos betões produzidos com estes, para propriedades como a absorção de água, a compacidade e a relação a/c, parece ser aceitável afirmar que os betões com AR cerâmicos irão apresentar um desempenho pior do que os betões anteriores.

Para os betões produzidos com AR de borracha, o estudo de Bravo (2009) demonstra que a profundidade de carbonatação aumenta com a taxa de substituição de AP por AR de borracha. O autor atribui este facto à necessidade de manter a mesma trabalhabilidade, originando um aumento da quantidade de água, o que se traduz numa maior porosidade, e ao maior volume de vazios entre os agregados de borracha e a pasta cimentícia.

Fernandes (2011) estudou a profundidade de carbonatação dos betões com AR de vidro e verificou que esta é semelhante ou inferior à do betão de referência em qualquer idade. Para explicar este facto, a autora acredita que se verifica um refinamento na matriz cimentícia dos betões com vidro para idades mais avançadas, concluindo ainda que as variações são de tal forma pequenas que os betões produzidos com AR de vidro possuem características semelhantes às dos betões produzidos com AP, para este fenómeno.

Relativamente aos agregados de plástico, também não foi possível encontrar estudos onde a carbonatação fosse devidamente avaliada. Ainda assim, parece ser possível afirmar que, com os valores de absorção anteriormente registados, a resistência à carbonatação, para betões com AR de plástico, será inferior à dos betões produzidos com AP. Esse facto pode ser agravado com o aumento da relação a/c, devido à necessidade de aumentar a trabalhabilidade, conduzindo a uma matriz cimentícia mais porosa.

2.6.5. Resistência à penetração de cloretos

A resistência à penetração de cloretos é fortemente influenciada pela permeabilidade do betão, aumentando com a taxa de substituição de AP por AR de betão ou cerâmicos, sendo também expectável um pior desempenho do betão com agregados grossos de qualquer um destes materiais. Evangelista (2007) concluiu que os betões com agregados finos reciclados apresentam uma diminuição linear da resistência à penetração de cloretos com o aumento da percentagem de incorporação, devido à maior porosidade apresentada por estes. Também Gomes (2007) concluiu que os betões com AR cerâmicos, de betão ou mistos têm um pior desempenho relativamente ao betão de referência, verificando-se este facto com as taxas de penetração de cloretos elevadas.

De acordo com o exposto, o aumento da relação a/c também deve contribuir para o agravamento da penetração de cloretos. Esta premissa é confirmada no estudo de Senthamarai *et al.* (2011) que verifica a diminuição da penetração de cloretos com o aumento da relação a/c, potenciado pela substituição de AP por AR cerâmicos, levando os autores a acreditar que a textura lisa da superfície dos cerâmicos dificulta a ligação à matriz cimentícia, contribuindo para o aumento da porosidade na zona de interface entre o agregado reciclado cerâmico e o betão.

A mesma conclusão surge do estudo de Gesoglu e Guneyisi (2007), relativamente aos agregados de borracha, onde não só o aumento da relação a/c contribui para a diminuição da resistência à penetração de cloretos, mas também o aumento da taxa de incorporação de AR de borracha.

Os betões com AR de vidro surgem, novamente, como a excepção ao comportamento esperado para os betões produzidos com AR. Wang (2008) verificou que o valor da penetração de cloretos dos betões com AR de vidro é inferior ao dos betões de referência produzidos, justificando esta situação com o adensamento da matriz cimentícia que, com a presença de AR de vidro, produz um gel, que vai preencher os poros e conferir uma estrutura mais resistente. Também Jain e Neithalath (2009) verificaram que a resistência à penetração de cloretos de betões com AR de vidro aumenta com a idade dos provetes, devido às reacções de hidratação do cimento.

A contribuição dos AR de plástico para a resistência à penetração de cloretos não é consensual entre todos os autores. Fraj *et al.* (2010) registaram um aumento bastante significativo da penetração de cloretos, com o aumento da substituição de areia por AR de plástico, justificando este facto com a necessidade de pré-molhagem dos agregados para garantir a mesma trabalhabilidade entre todos os betões. Pelo contrário, Kou *et al.* (2009) obtiveram resultados onde a resistência à penetração de cloretos aumenta com a taxa de substituição, atribuindo esse facto à impermeabilidade dos agregados de plástico, que bloqueavam a passagem dos iões cloreto.

2.7. Conclusões

Com este capítulo, pretendeu-se fazer um levantamento bibliográfico dos estudos existentes nesta área de investigação, de forma a analisar a causa da acumulação dos resíduos de mármore, as soluções existentes e os efeitos da incorporação de agregados de mármore em betão, ao nível da durabilidade, assim como de outros tipos de AR.

O processo extractivo produz um volume considerável de resíduos, desde a extracção até ao beneficiamento dos blocos, continuando a ter como destino as escombreyras, que em muito contribuem para a descaracterização da paisagem. Também a extracção de rocha natural para agregado é uma problemática que tem vindo a gerar alguma preocupação, especialmente devido aos impactes por esta gerada e à crescente preocupação com o meio ambiente. Com base nestes dois pontos, iniciou-se uma pesquisa para possíveis soluções já existentes, verificando-se que, ao longo dos anos, se tem registado um aumento da investigação sobre estas e sobre quais os melhores destinos a dar ao mármore. Este esforço contínuo para encontrar uma solução, com maior ou menor sucesso, demonstra-se manifestamente insuficiente para resolver o problema na sua totalidade.

Da pesquisa efectuada, observa-se que a utilização do mármore concentra-se especialmente na sua forma de pó, ou seja, como *filler*, e na indústria de pavimentos. Ainda que se encontrem outras soluções, como o fabrico de tijolos, produção de argamassas, adição na produção de cimento ou mesmo como agregado para blocos de betão para pavimentos, a sua utilização como agregado para betão estrutural encontra-se negligenciada. Analisando as propriedades mineralógicas, químicas e físicas do mármore, não se encontram factores que possam explicar essa lacuna, ou mesmo para justificar a quase inexistência de estudos sobre a sua incorporação como agregado grosso em betão, especialmente no respeitante à durabilidade.

Ainda assim, foi possível constatar que os agregados de mármore apresentam características semelhantes à dos restantes agregados, provenientes de rochas carbonatadas, caracterizando-se por apresentarem uma absorção de água muito baixa. No que respeita aos betões produzidos com agregados grossos de mármore, pôde-se verificar que, com a sua introdução, a trabalhabilidade tende a diminuir, assim como a absorção de água, a massa volúmica mantém-se aproximadamente constante e a resistência à penetração de cloretos aumenta.

Da análise aos restantes AR, pelo menos aos mais comuns, conclui-se que o betão com eles produzido apresenta, em geral, pior desempenho na maior parte dos parâmetros analisados. Os agregados de vidro aparecem como a grande exceção, uma vez que acabam por contribuir para a melhoria de algumas características do betão, especialmente no estado endurecido. Este é um aspecto relevante para os agregados de mármore, que, caso a sua variabilidade não lhes permita estar ao nível dos restantes AP, pode, pelo menos, apresentar características melhores do que os restantes AR.

3. Descrição da campanha experimental

3.1. Introdução

A campanha experimental, realizada nesta dissertação, tem como objectivo avaliar o desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de AGM. Para esse efeito, é necessário realizar os ensaios adequados para melhor compreender a influência dos AGM nessas propriedades. Com este capítulo, pretende-se então descrever todas as etapas realizadas durante a campanha experimental, focando-se fundamentalmente a descrição e justificação das diferentes fases executadas, a produção das diferentes famílias de betões e os ensaios realizados aos agregados e betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

3.2. Planificação da campanha experimental

Conforme descrito, a realização desta campanha experimental requer uma quantidade significativa de processos que, embora não sejam particularmente complexos, tendem a gerar uma significativa entropia caso não sejam devidamente planeados. Como tal, para garantir uma maior fluidez na realização destas actividades, optou-se por dividir a campanha em 3 fases, devidamente caracterizadas e justificadas nos pontos seguintes.

3.2.1. Fase 1

Esta fase foi reservada para todo o trabalho que antecede a produção do betão e conseqüente realização dos ensaios. Nesta fase, formularam-se os betões, definiram-se e adquiriram-se as quantidades de material necessário e, para melhor compreender as diferenças de comportamento de cada família de betão, caracterizaram-se todos os agregados a utilizar, ou seja, os agregados grossos de granito (AGG), de basalto (AGB), de calcário (AGC) e de mármore (AGM), assim como a areia grossa e a areia fina.

Para caracterizar os agregados, é necessário a realização de ensaios específicos que devem obedecer às normas e especificações definidas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Ensaio, normas e especificações utilizados na caracterização dos agregados grossos

Ensaio	Normas / Especificações
Análise granulométrica	NP EN 933-1 e NP EN 933-2
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6
Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3
Desgaste de “Los Angeles”	LNEC E 237
Teor em água total	NP 956
Índice de forma	NP EN 933-4

Com a realização dos ensaios, surgiu a dúvida sobre se, devido ao excesso de pó, os AGM e AGG deveriam ser lavados, de forma a minimizar os efeitos não controláveis que este pó poderia

introduzir no betão. Optou-se por não realizar a operação de lavagem pois, sendo o objectivo a utilização dos resíduos resultantes da extracção, o processo de lavagem aumentaria o consumo de água e elevaria o custo da matéria-prima, inviabilizando esta alternativa, não só economicamente, mas também ambientalmente.

3.2.2. Fase 2

Nesta fase, pretendeu-se assegurar a correcção das diferentes composições, correspondentes a cada uma das famílias de betão, de forma a atenuar os erros que pudessem influenciar os resultados finais. Para esse efeito, foram betonados e vibrados vários provetes, com a intenção de obter dados de referência para as futuras betonagens.

Para que as diferentes famílias de betão pudessem ser comparáveis recorrendo apenas a uma variável, a percentagem de substituição de AP por AS, decidiu-se fixar a relação a/c, mantendo a trabalhabilidade, avaliada através do ensaio de abaixamento no cone de Abrams, em valores definidos no intervalo de 115 ± 10 mm. Todos os betões produzidos foram sujeitos a ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, bem como a ensaios no estado fresco, de acordo com as normas indicadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Ensaio e norma utilizada na caracterização do betão no estado fresco na fase 2

Ensaio	Normas
Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)	NP EN 12350-2

O Quadro 3.3 apresenta o número e tipo de provetes utilizados para o ensaio realizado na segunda fase desta campanha experimental.

Quadro 3.3 - Ensaio e norma utilizada na caracterização do betão no estado endurecido na fase 2

Ensaio	Idade (dias)	Amostras	Forma	Dimensões (mm)
Resistência à compressão	28	4	Cúbica	150 x 150 x 150

3.2.3. Fase 3

Esta última fase compreendeu todos os ensaios necessários para avaliar a durabilidade dos betões, produzidos com AP e AS, nas diferentes taxas de substituição, no seu estado fresco e endurecido. Para atingir este objectivo, as misturas foram sujeitas aos ensaios apresentados no Quadro 3.4, respeitando as respectivas normas ou especificações.

Como descrito, é essencial garantir valores de trabalhabilidade constantes. Para tal, todas as misturas foram também sujeitas ao ensaio de abaixamento conforme indicado no Quadro 3.2. O número e tipo de provetes utilizados para realizar os ensaios nesta terceira fase são apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.4 - Ensaios e especificações utilizadas na caracterização do betão no estado endurecido

Ensaios	Normas / Especificações
Massa volúmica	NP EN 12350-6
Absorção de água por imersão	LNEC E 394
Absorção de água por capilaridade	LNEC E 393
Resistência à carbonatação	LNEC E 391
Resistência à penetração de cloretos	LNEC E 463

Quadro 3.5 - Idade, amostras, forma e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios da fase 3

Ensaio	Idade (dias)	Amostras	Forma	Dimensões (mm)
Absorção por imersão	28	4	Cubos	100 x 100 x 100
Absorção por capilaridade	28	4	Prismas	100 x 100 x 200
Resistência à carbonatação	7	3	Discos	φ100 x 50
	28	3	Discos	φ100 x 50
	56	3	Discos	φ100 x 50
	91	3	Discos	φ100 x 50
Resistência à penetração de cloretos	28	3	Discos	φ100 x 50
	91	3	Discos	φ100 x 50

3.3. Ensaios aos agregados

Tendo em consideração que os agregados, grossos e finos, são os constituintes maioritários do betão, é necessário conhecer as suas características físicas e geométricas, de forma a inferir a sua influência nas propriedades dos betões produzidos. Este estudo é especialmente relevante quando a campanha experimental realizada pretende avaliar os efeitos da substituição do tipo de agregados no desempenho do betão.

Para esse efeito, foram realizados os ensaios de análise granulométrica, de massa volúmica e absorção de água, de baridade e volume de vazios, de desgaste de “Los Angeles”, de teor de água superficial e total e de índice de forma.

Relativamente aos restantes constituintes do betão, optou-se por não realizar ensaios de caracterização, uma vez que estes não variam consoante o tipo de betão e as suas características são conhecidas e controladas.

3.3.1. Análise granulométrica

3.3.1.1. Objectivo do ensaio

O objectivo da análise granulométrica é a caracterização e quantificação estatística da percentagem de partículas retidas nas diversas classes granulométricas, para cada um dos diferentes agregados a utilizar. A partir desta análise, obtém-se o traçado das curvas granulométricas, essenciais para determinar a quantidade de cada agregado a incorporar no betão, de forma a maximizar a sua compacidade.

No entanto, neste estudo os dados referentes às curvas granulométricas apenas serviram para uma melhor caracterização dos agregados, pois os diferentes agregados foram peneirados e separados nas suas diversas fracções granulométricas.

3.3.1.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio de análise granulométrica seguiram a norma NP EN 933-1 (2000) - “*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*”. A definição da abertura da malha dos peneiros utilizada neste ensaio é apresentada na norma NP EN 933-2 (1999) - “*Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas*”.

3.3.1.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos:

- agitador mecânico de peneiros;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- peneiros de ensaio, de acordo com o estabelecido na norma NP EN 933-2.

3.3.1.4. Amostras

Segundo a NP EN 933-1, para a realização deste ensaio, a massa mínima de cada provete varia com a máxima dimensão do agregado, $D_{\text{máx}}$, ou seja, a menor abertura do peneiro através do qual passa, pelo menos, 90% da massa da amostra. No Quadro 3.6, pode-se observar os valores mínimos de massa da amostra em função do $D_{\text{máx}}$.

Quadro 3.6 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica

$D_{\text{máx}}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Para os agregados que apresentem um valor de $D_{\text{máx}}$ correspondente a um valor intermédio aos expressos no Quadro 3.6 realiza-se uma interpolação, para determinar a massa mínima, a partir dos valores definidos no mesmo.

Este quadro apenas é válido para agregados com massa volúmica compreendida entre 2000 e 3000 kg/m^3 , como é o caso dos utilizados neste estudo.

3.3.1.5. Procedimento de ensaio

Inicialmente, secou-se a amostra a uma temperatura de 110 ± 5 °C até esta alcançar massa constante, ou seja, até que, em pesagens sucessivas efectuadas após secagem, com pelo menos 1 hora de intervalo, a variação da massa destes não fosse superior a 0,1%. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_1 .

De seguida, a amostra foi lavada, com a ajuda dos peneiros de 0,063 e 1 mm, até que a água que passasse pelo peneiro de 0,063 mm estivesse límpida. Obtiveram-se assim apenas os agregados de dimensões superiores à da menor abertura utilizada.

Após a lavagem, o material foi colocado na estufa até ser atingida, novamente, a massa constante. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 .

Posteriormente, despejou-se o material sobre uma coluna de peneiros, com abertura de malha conforme referido na NP EN 933-2, dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com fundo e tampa. A peneiração foi realizada através do agitador mecânico, conforme a Figura 3.1, até que a massa retida num dado peneiro não variasse mais de 1% durante 1 minuto de peneiração.

Finalmente, pesou-se o material retido em cada peneiro, como se observa na Figura 3.2, começando pelo de maior abertura, e registaram-se as massas como $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$. O material retido no fundo foi também pesado e registou-se a massa como P.



Figura 3.1 - Peneiração da amostra



Figura 3.2 - Pesagem do material retido em cada peneiro

3.3.1.6. Cálculos e expressão dos resultados

De forma a obter a curva granulométrica de cada um dos agregados analisados, começou-se por calcular a percentagem de material retida num dado peneiro, através da seguinte equação:

$$R_{i\%} = \frac{R_i}{M_1} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

Onde,

- $R_{i\%}$ - percentagem de material retido no peneiro i ;
- R_i - massa retida no peneiro i , em g;
- M_1 - massa total da amostra seca, em g.

Seguidamente, calculou-se a percentagem de finos (f) que passou pelo peneiro de 0,063 mm, através da expressão:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

Em que,

- f - percentagem de finos que passa pelo peneiro de 0,063 mm;
- M_1 - massa total da amostra seca, em g;
- M_2 - massa da amostra, após lavagem e secagem, em g;
- P - massa do material peneirado retido no fundo da coluna de peneiros, em g.

Os resultados serão válidos sempre que a soma das massas R_i e P difira menos de 1% da massa M_2 , não havendo assim necessidade de repetir o ensaio. Para finalizar, determinou-se o módulo de finura de cada agregado, que corresponde à soma das percentagens totais retidas nos peneiros da série principal dividida por 100.

3.3.2. Massa volúmica e absorção de água

3.3.2.1. Objectivo do ensaio

Os valores ideais dos diferentes componentes que constituem a composição óptima do betão foram determinados em volume. No entanto, por uma questão de simplicidade e rigor no trabalho laboratorial, é necessário realizar uma transformação destes valores para os valores em massa correspondentes.

Esta transformação realizou-se a partir dos valores da massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca, pois este é o método ideal de adicionar os agregados à mistura. Para além desta, calcularam-se também a massa volúmica das partículas secas em estufa e a massa volúmica do material impermeável das partículas.

Com a realização deste ensaio, foi também possível calcular a absorção de água. Esta consiste no aumento da massa dos diferentes agregados, depois de secos em estufa, causada pela entrada de água nos poros em contacto directo com a mesma. Desta forma, é possível determinar a quantidade máxima de água que os agregados conseguem reter no seu interior. A absorção de água é uma propriedade extremamente importante, visto que uma maior ou menor absorção por parte dos agregados afecta a relação a/c efectiva, reflectindo-se na consistência e trabalhabilidade do betão.

Com o propósito de não comprometer a fiabilidade das betonagens, com a introdução de factores exteriores não controláveis, optou-se por manter os agregados não saturados durante toda a campanha experimental. Apesar de, segundo Coutinho e Gonçalves (1997), nesta condição os poros

dos agregados que apresentem contacto com o exterior, por meio dos capilares, irem absorver a água da amassadura, não contribuindo para as reacções de hidratação do cimento, afectando ao mesmo tempo a trabalhabilidade, os valores de absorção de água, tanto dos AP como dos AS, nesta campanha, não são elevados, não sendo, por isso, necessário ter em consideração a adição de uma quantidade suplementar de água que compensasse a absorvida pelos agregados.

3.3.2.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio para determinação da massa volúmica e da absorção de água seguiram a norma NP EN 1097-6 (2003) - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”.

3.3.2.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- peneiros de ensaio, de acordo com a norma NP EN 933-3 com as aberturas de 0,063, 4,0 e 31,5 mm;
- picnómetro com capacidade de 1500 e de 5000 ml, conforme a dimensão da amostra;
- termómetro.

3.3.2.4. Amostras

A norma obriga a separar a amostra em diferentes fracções granulométricas, para a posterior realização do ensaio. No caso em estudo, todos os agregados apresentam partículas de dimensões inferiores a 31,5 mm. Assim, a norma recomenda a utilização do método do picnómetro, com os condicionalismos inerentes ao procedimento realizar-se com agregados finos (fracções de 0,063 a 4 mm) ou agregados grossos (fracções de 4 a 31,5 mm).

Para as partículas com dimensão entre 4 e 31,5 mm, a massa do provete de ensaio foi obtida através da interpolação dos valores apresentados no Quadro 3.7, sempre que $D_{\text{máx}}$ corresponder a um valor intermédio aos apresentados. Para as partículas com dimensão entre 0,063 e 4 mm, a norma recomenda a utilização de uma massa mínima de 1 kg.

Quadro 3.7 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação da massa volúmica e da absorção de água

$D_{\text{máx}}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
31,5	5
16	2
8	1

3.3.2.5. Procedimento de ensaio

Método do picnómetro para agregados com dimensão entre 4 e 31,5 mm

Inicialmente, lavou-se a amostra sobre os peneiros de 31,5 e 4 mm e rejeitaram-se as partículas não contidas nesse intervalo.

A amostra preparada anteriormente foi imersa dentro de um picnómetro, o qual foi colocado em banho-maria numa câmara à temperatura de 22 ± 3 °C, durante 24 horas.

Terminado esse período, agitou-se manualmente o picnómetro para retirar todo o ar do seu interior, fez-se transbordar o mesmo por adição de água à mesma temperatura e colocou-se a tampa sem permitir a entrada de ar. Secou-se o picnómetro por fora, pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 . Registou-se a temperatura da água.

Seguidamente, retirou-se a amostra da água e deixou-se escorrer. Encheu-se novamente o picnómetro, fazendo-o transbordar por adição de água, secou-se por fora, pesou-se e registou-se a sua massa como M_3 . Registou-se novamente a temperatura da água, ilustrado na Figura 3.3, e verificou-se se a variação não excedia 2 °C em relação à medição anterior.

A amostra escorrida foi transferida para um pano seco e limpo cuidadosamente de forma que não fossem visíveis películas de água na superfície do agregado, mas apresentasse ainda um aspecto húmido, como demonstra a Figura 3.4. Procedeu-se à sua pesagem e registou-se a massa como M_1 .

Finalmente, colocou-se o provete na estufa a 110 ± 5 °C até alcançar massa constante. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_4 .



Figura 3.3 - Medição da temperatura da água do recipiente utilizado como picnómetro vazio



Figura 3.4 - Secagem do agregado com um pano seco

Método do picnómetro para agregados com dimensão entre 4 e 31,5 mm

Em primeiro lugar, lavou-se a amostra sobre os peneiros de 4 e 0,063 mm, rejeitando as partículas fora desse intervalo.

De seguida, a amostra preparada foi imersa dentro de um picnómetro e este foi colocado em banho-maria durante 24 horas, numa câmara à temperatura de 22 ± 3 °C.

Passadas as 24 horas, agitou-se o picnómetro cuidadosamente, de forma a retirar o ar ocluso, fez-se transbordar o mesmo por adição de água e colocou-se a tampa não permitindo a entrada de ar. Secou-se o picnómetro for fora, pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 , conforme demonstra a Figura 3.5. Mediu-se a temperatura da água.

De seguida, decantou-se a maior quantidade de água possível, contida no provete, e espalhou-se a amostra sobre um tabuleiro. Encheu-se de novo o picnómetro, fazendo-o transbordar por adição de água, secou-se por fora, pesou-se e registou-se a sua massa como M_3 . A temperatura foi novamente medida, e verificou-se se a variação, face à medição anterior, não excedia 2 °C.

Posteriormente, a amostra foi exposta a uma leve corrente de ar, durante um certo período de tempo, e foi remexida frequentemente até não ser visível humidade superficial ou aglomerados de partículas. Para verificar se a superfície estava realmente seca, encheu-se um molde tronco-cónico, compactou-se a amostra por apiloamento, retirou-se o molde e avaliou-se a sua deformação para inferir sobre o seu estado. Quando se confirmou que a amostra atingiu o estado de superfície seca, pesou-se e registou-se a sua massa como M_1 , como está patente na Figura 3.6.

Finalmente, colocou-se a amostra na estufa a 110 ± 5 °C até alcançar massa constante. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_4 .



Figura 3.5 - Pesagem do recipiente utilizado como picnómetro contendo a amostra



Figura 3.6 - Pesagem da amostra depois de evaporada a humidade superficial

3.3.2.6. Cálculos e expressão dos resultados

As massas volúmicas do material impermeável das partículas, das partículas secas em estufa e das partículas saturadas com superfície seca foram calculadas, respectivamente, através das seguintes fórmulas:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (3.3)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (3.4)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (3.5)$$

A absorção de água após a imersão durante 24 horas, em percentagem de massa seca, obtém-se através da equação:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \text{ (\%)} \quad (3.6)$$

Em que,

- ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas, em kg/dm³;
- ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa, em kg/dm³;
- ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, em kg/dm³;
- ρ_w - massa volúmica da água à temperatura registada na determinação de M_2 , em kg/dm³;
- WA_{24} - absorção de água após imersão em água durante 24 h, em %;
- M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca, em g;
- M_2 - massa do picnómetro contendo o provete imerso na água e saturado, em g;
- M_3 - massa do picnómetro apenas cheio de água, em g;
- M_4 - massa do provete de ensaio seco em estufa, em g.

3.3.3. Baridade e volume de vazios

3.3.3.1. Objectivo do ensaio

A baridade ou massa volúmica aparente estabelece a relação entre a massa e o volume aparente ocupado por um determinado conjunto de agregados. O conhecimento desta grandeza é fundamental quando as medições correspondentes à formulação do betão são feitas em volume e não em massa, constituindo também uma medida indirecta da qualidade deste, pois, em teoria, quanto maior for a baridade dos agregados melhor é o desempenho do betão, em termos da sua capacidade resistente. A baridade pode variar com o grau de compactação, com a curva granulométrica e com a forma dos agregados.

Através do ensaio utilizado para determinar a baridade, é também possível calcular a percentagem de vazios num dado volume de agregados, conhecida como volume de vazios. A determinação deste volume ganha especial relevância pois não é possível dispor os agregados sem que existam vazios entre eles.

3.3.3.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio para determinação da baridade e do volume de vazio seguiram a norma NP EN 1097-3 (2003) - “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios”.

3.3.3.3. *Equipamento de ensaio*

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- recipientes cilíndricos de aço inoxidável, com 3 e 10 litros consoante a máxima dimensão dos agregados;
- régua.

3.3.3.4. *Amostras*

O ensaio para determinar a baridade pode resumir-se como a colocação de uma determinada quantidade de agregados num recipiente de volume conhecido, até este se encontrar completamente cheio. A norma define qual o volume do recipiente em função da máxima dimensão do agregado, conforme se pode observar no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Capacidade mínima dos recipientes utilizados na determinação da baridade e do volume de vazios

$D_{\text{máx}}$ (mm)	Capacidade mínima do recipiente (l)
Até 63	20
Até 31,5	10
Até 16	5
Até 4	1

Na campanha experimental, por motivo de indisponibilidade de algum material do laboratório, apenas foi possível utilizar os recipientes de 3 e 10 litros.

3.3.3.5. *Procedimento de ensaio*

Inicialmente, foram preparadas três amostras contendo entre 120 e 150% da massa necessária para encher o recipiente. As três amostras foram então colocadas na estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante.

Após as amostras apresentarem massa constante, limpou-se e pesou-se o recipiente de volume conhecido, registando-se o seu valor como M_1 .

Seguidamente, o recipiente foi colocado sobre uma superfície horizontal e foi cuidadosamente cheio, com o auxílio de uma pá, até transbordar e sem compactação. Utilizando uma régua, procedeu-se à regularização da superfície do mesmo, retirando o material em excesso e tentando igualar o volume de agregados à sua capacidade, como se ilustra na Figura 3.7.

Pesou-se o recipiente cheio e registou-se a sua massa como M_2 . Repetiu-se o procedimento anterior para as duas amostras restantes.



Figura 3.7 - Nivelamento da amostra

3.3.3.6. Cálculos e expressão dos resultados

A baridade foi então determinada através da seguinte fórmula:

$$\rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_a} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (3.7)$$

Em que,

- ρ_i - baridade da amostra i , em kg/dm^3 ;
- M_1 - massa do recipiente de ensaio, em kg;
- M_2 - massa do recipiente com a amostra, em kg;
- V_a - volume do recipiente de ensaio, em dm^3 .

A baridade de cada tipo de agregado (ρ_b) foi obtida através da seguinte expressão:

$$\rho_b = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (3.8)$$

Depois de determinada a baridade, a percentagem de vazios foi obtida através da expressão seguinte:

$$\vartheta = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100 \text{ (\%)} \quad (3.9)$$

Onde,

- ϑ - percentagem de vazios;
- ρ_b - baridade de cada agregado, em kg/dm^3 ;
- ρ_p - massa volúmica das partículas secas em estufa, determinada de acordo com a norma NP EN 1097-6, em kg/dm^3 .

3.3.4. Desgaste de Los Angeles

3.3.4.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de desgaste de Los Angeles pretende quantificar a perda de massa de cada agregado quando submetido a um processo abrasivo, ou seja, possibilita o conhecimento da resistência dos agregados à abrasão e, indirectamente, a resistência mecânica dos mesmos.

A ampla utilização deste ensaio deve-se, além do conhecimento do desgaste dos agregados, à obtenção de uma relação entre os resultados e a resistência mecânica dos betões fabricados com os respectivos agregados.

3.3.4.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio de desgaste de Los Angeles seguiram a especificação LNEC E 237 (1970) - “Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”.

3.3.4.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- agitador mecânico de peneiros;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- esferas de aço, que constituem a carga abrasiva, 6 a 12, consoante a composição granulométrica do provete de ensaio;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- máquina do desgaste de *Los Angeles*;
- peneiros de ensaio da série ASTM.

3.3.4.4. Amostras

Para a realização deste ensaio, a especificação exige a peneiração e separação da amostra segundo as fracções granulométricas especificadas no Quadro 3.9, segundo a série ASTM. De forma a proceder à peneiração, os agregados foram lavados e secos em estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até se atingir massa constante.

Quadro 3.9 - Composição granulométrica dos provetes

Fracções granulométricas (mm)	Massas (g)						
	Composições granulométricas						
	A	B	C	D	E	F	G
76,1/64,0	-	-	-	-	2500±50	-	-
64,0/50,8	-	-	-	-	2500±50	-	-
50,8/38,1	-	-	-	-	5000±50	5000±50	-
38,1/25,4	1250±25	-	-	-	-	5000±25	5000±25
25,4/19,0	1250±25	-	-	-	-	-	5000±25
19,0/12,7	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
12,7/9,51	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,51/6,35	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,35/4,76	-	-	2500±10	-	-	-	-
4,76/2,38	-	-	-	5000±10	-	-	-
Total	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50

Finalmente formou-se o provete de ensaio, juntando as porções das diversas fracções fixadas no quadro anterior, pesou-se a amostra e registou-se a sua massa (M_1).

3.3.4.5. Procedimento de ensaio

Preparou-se o provete de ensaio, conforme descrito e constituiu-se a carga abrasiva, correspondente ao provete a ensaiar, de acordo com o especificado no Quadro 3.10

Seguidamente, colocou-se a amostra, juntamente com a carga abrasiva, na máquina de desgaste de *Los Angeles*, visível na Figura 3.8, tendo o cuidado de os repartir de forma uniforme ao longo do comprimento do cilindro. Fechou-se a máquina e, após esta realizar 500 rotações à velocidade de 30 a 33 r.p.m., retirou-se a amostra do seu interior.

Procedeu-se à peneiração da amostra, sobre o peneiro com abertura de malha igual a 1,68 mm, colocando-se um peneiro de maior abertura sobre o anterior de forma a proteger a sua malha. O material retido sobre o peneiro de 1,68 mm foi então lavado e seco em estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até atingir massa constante. Pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 .

Quadro 3.10 - Composição da carga abrasiva

Composição granulométrica do provete	Número de esferas	Massa das esferas (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25



Figura 3.8 - Máquina do desgaste de *Los Angeles*

3.3.4.6. Cálculos e expressão dos resultados

A perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* foi calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$P_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 (\%) \quad (3.10)$$

Em que,

- P_d - perda por desgaste na máquina de *Los Angeles*, em %;
- M_1 - massa do provete de ensaio, em g;
- M_2 - massa do material retido no peneiro de 1,68 mm, em g.

3.3.5. Teor em água total

3.3.5.1. Objectivo do ensaio

Quando expostos ao clima exterior, os agregados conservam ou adquirem uma certa quantidade de humidade, conseguindo mantê-la por longos períodos. O teor em água superficial permite conhecer, em percentagem, a relação entre a água aderente à superfície das partículas e a massa do agregado seco. O teor de água total considera a grandeza anterior em conjunto com a absorção dos agregados, calculada de acordo com a NP EN 1097-6.

O teor em água deve ser considerado sempre que se estuda a composição de um betão, visto que é imprescindível deduzi-lo à quantidade de água total necessária ao fabrico deste, de forma a não alterar a relação a/c. No entanto, durante a campanha experimental, os agregados utilizados encontram-se não saturados, o que minimiza a importância desta grandeza para o estudo em curso.

3.3.5.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio de determinação do teor de água total e superficial seguiram a norma NP 956 (1973) - "*Inertes para argamassas e betões: Determinação dos teores em água total e em água superficial*".

3.3.5.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- tabuleiro metálico com capacidade suficiente para conter o provete e permitir o seu remexer, durante a secagem.

3.3.5.4. Amostras

Segundo a norma NP 956, a massa mínima do provete deve ser determinada de acordo com o Quadro 3.11, em função da máxima dimensão do agregado, $D_{\text{máx}}$. Para valores de $D_{\text{máx}}$ no intervalo dos indicados, pode-se proceder a uma interpolação para determinar a massa mínima da amostra a utilizar.

Para valores de baridade, calculada de acordo com a norma NP EN 1097-3, inferiores a 1600 kg/m^3 , os valores indicados devem ser corrigidos, multiplicando-os pelo factor $B/1600$, onde B representa a baridade do agregado em kg/m^3 . Apesar de este facto se verificar na campanha experimental, optou-se por manter os valores da massa mínima, uma vez que os resultantes da multiplicação serão inferiores.

Quadro 3.11 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação do teor em água total e superficial

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
37,5	6
25,0	4
19,0	3
12,5	2
9,50	1,5
$\leq 6,30$	0,5

3.3.5.5. Procedimento de ensaio

Após recolhida a amostra, de acordo com o descrito, pesou-se e registou-se a sua massa como M_1 , como ilustrado na Figura 3.9.

Seguidamente, espalhou-se a amostra no tabuleiro, numa camada aproximadamente uniforme, e secou-se em estufa ventilada à temperatura de (110 ± 5) °C, até atingir massa constante. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 .



Figura 3.9 - Pesagem da amostra

3.3.5.6. Cálculos e expressão dos resultados

O teor em água total, referido à massa do agregado seco, calculou-se de acordo com a seguinte expressão:

$$w_t = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 (\%) \quad (3.11)$$

Em que,

- w_t - teor em água total, em %;
- w_s - teor em água superficial, em %;
- M_1 - massa do provete antes da secagem, em g;
- M_2 - massa do provete seco, em g;

3.3.6. Índice de forma

3.3.6.1. Objectivo do ensaio

O índice de forma permite caracterizar a forma das partículas de um dado agregado, considerando apenas fracções granulométricas superiores a 4 mm.

A forma dos agregados influencia o modo como estes se dispõem no interior da pasta, condicionando a resistência mecânica e de durabilidade dos betões. Os agregados rolados favorecem, predominantemente, a compacidade e a trabalhabilidade do betão, enquanto que os agregados britados permitem um aumento na sua resistência mecânica.

3.3.6.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados na determinação da forma das partículas seguiram a norma NP EN 933-4 (2002) - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma”.

3.3.6.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- agitador mecânico de peneiros;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- paquímetro;
- peneiros de ensaio, de acordo com o especificado na norma NP EN 933-2.

3.3.6.4. Amostras

A massa mínima do provete varia, também neste ensaio, com o $D_{\text{máx}}$, conforme o presente no Quadro 3.12. Para valores de $D_{\text{máx}}$ que não se encontrem no referido quadro, é necessário recorrer a uma interpolação através dos valores da massa presentes neste.

Quadro 3.12 - Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica

$D_{\text{máx}}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
63	45
32	6
16	1
8	0,1

Antes de iniciar o procedimento experimental, foi necessário secar as amostras, numa estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante.

3.3.6.5. Procedimento de ensaio

Após a amostra alcançar massa constante, procedeu-se à sua peneiração, de forma a excluir todas as partículas que passem pelo peneiro com abertura de malha de 4 mm. A amostra daí resultante foi pesada e registou-se a sua massa como M_0 .

De seguida, separou-se a amostra nas suas diferentes fracções granulométricas, registou-se a massa de cada fracção como M_{i1} e determinou-se a percentagem de cada uma em relação à massa total da amostra, M_0 . As fracções com percentagens inferiores a 10% foram desprezadas.

Às fracções restantes, mediu-se, recorrendo a um paquímetro, a dimensão máxima, L, e a dimensão mínima, E, de cada partícula, e separaram-se e recolheram-se todas as partículas não cúbicas, ou seja, as que apresentavam uma relação dimensional $L/E > 3$, como se demonstra na Figura 3.10.

Finalmente, pesou-se e registou-se a massa da amostra contendo as partículas não cúbicas, de cada fracção granulométrica, como M_{2i} .



Figura 3.10 - Medição do índice de forma

3.3.6.6. Cálculos e expressão dos resultados

O índice de forma (SI) pode ser calculado utilizando a expressão seguinte:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 (\%) \quad (3.12)$$

Onde,

- SI - índice de forma, em %;
- $\sum M_{1i}$ - somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas, em g;
- $\sum M_{2i}$ - somatório das massas das partículas não cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas, em g.

3.4. Formulação dos betões

3.4.1. Introdução

A dosagem dos diferentes constituintes do betão é fundamental para garantir que as actuais exigências de resistência e durabilidade sejam cumpridas. Para esse efeito, e devido à experiência adquirida ao longo dos anos, nesta instituição, na formulação de betões através das curvas de referência de Faury, optou-se por utilizar este método em detrimento de outras abordagens existentes. Com o intuito de poder compatibilizar as famílias de betões a produzir durante este estudo com um número significativo de aplicações estruturais correntes, e baseado na norma NP EN 206-1 de 2007, definiram-se os seguintes pressupostos para o cálculo dos betões de referência:

- classe de resistência: C30/37;
- classe de consistência: S3 (100 a 150 mm);
- classe de exposição: diversas;
- máxima razão água / cimento: 0,55;
- mínima dosagem de cimento: 280 kg/m³;
- ligante: CEM II A-L 42,5 R da cimenteira da SECIL, no Outão, Setúbal;
- máxima dimensão do agregado: 22,4 mm;
- água de amassadura: potável da rede de abastecimento pública;
- local de fabrico: laboratório;
- método de compactação: vibração mecânica normal (agulha vibratória);
- medição dos vários constituintes: pesagem.

Como a campanha experimental desta dissertação apresenta particularidades específicas decorrentes da utilização de um agregado natural, os AGM, como agregado secundário, optou-se por gerar três famílias de betões de referência recorrendo para tal à incorporação de três tipos de agregados grossos primários comumente utilizados em betão. Assim, foram utilizados agregados grossos britados de origem calcária, granítica e basáltica.

Decidiu-se também reduzir o intervalo do abaixamento para 115 ± 10 mm, garantindo um maior controlo da variabilidade entre famílias, permitindo uma comparação mais próxima entre as diferentes composições.

3.4.2. Máxima dimensão do agregado

A máxima dimensão do agregado, $D_{m\acute{a}x}$, pode ser definida, de acordo com a ASTM, como a menor dimensão da abertura da malha do peneiro, da série de peneiros, através da qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado. Este parâmetro é fundamental para a definição da curva granulométrica e o seu sobredimensionamento conduz a uma maior dificuldade de vibração, bem como a um aumento do efeito de parede. Este fenómeno foi caracterizado por Caquot em 1937 e consiste na migração das partículas mais finas, argamassa ou pasta, do interior do betão para junto das superfícies contínuas limites, armaduras ou face dos moldes, de forma a preencher os vazios deixados pelo contacto dos agregados mais grossos com essa fronteira. Este efeito conduz a alterações da compacidade do betão, resultando num empobrecimento da massa do interior do mesmo e consequente perda de resistência.

Segundo Faury, o efeito de parede pode ser desprezado quando a relação entre a máxima dimensão do agregado e o raio médio do molde (R) respeita a seguinte equação:

$$\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} > 0,75 \Leftrightarrow D_{m\acute{a}x} < \frac{4}{3}R \quad (3.13)$$

Com,

- $R = \frac{\text{volume a encher de betão}}{\text{área total da parede em contacto com o betão}}$;
- $D_{m\acute{a}x}$ - máxima dimensão do agregado.

Como tal, procedeu-se à verificação da máxima dimensão do agregado para os diferentes moldes utilizados durante o procedimento experimental. Os resultados podem ser consultados no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 - Dimensão máxima do agregado admissível para cada tipo de provete utilizado

Provetes	Dimensões (mm)	Superfície confinante (cm ²)	Volume do provete (cm ³)	Raio (mm)	D _{máx} (mm)
Prisma	150 x 150 x 600	4050,0	13500	33,3	44,4
Prisma	100 x 100 x 200	1000,0	2000	20,0	26,7
Cubo	100 x 100 x 100	600,0	1000	16,7	22,2
Cilindro	φ100 x 200	785,4	1570,796	20,0	26,7

Pela análise do Quadro 3.13, conclui-se que os provetes cúbicos condicionam a máxima dimensão do agregado. No entanto, optou-se por utilizar, devido à sua proximidade e de acordo com a série principal mais a série 1 de peneiros da norma NP EN 12620-2002 + A1:2010 - Agregados para betão, o valor para D_{máx} de 22,4 mm.

A abertura dos peneiros utilizados na separação dos agregados, de acordo com a norma atrás definida, pode ser consultada no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 - Abertura dos peneiros utilizados na separação dos agregados

Série principal mais série 1	
N.º do peneiro da série principal	Malha (mm)
9	31,5
	22,4
8	16
	11,2
7	8
	5,6
6	4

3.4.3. Volume de vazios

O betão no estado fresco necessita de ser vibrado para remover o excesso de ar presente na sua matriz e, apesar de este processo permitir bons resultados, é impossível retirá-lo completamente. O volume ocupado pelo ar existente no interior do betão denomina-se por volume de vazios (V_v), e é necessário conhecê-lo para uma correcta caracterização do betão a produzir. O *American Concrete Institute* (ACI), na sua norma 613, propõe valores médios para o volume de vazios, exclusivamente em função da máxima dimensão do agregado, como se pode observar no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 - Valores do volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado

$D_{m\acute{a}x}$ - máxima dimensão do agregado (mm)	V_v - volume de vazios (l/m^3)
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10

Para valores de $D_{m\acute{a}x}$ não presentes no quadro anterior, como o desta dissertação, pode-se proceder a uma interpolação linear para obter uma boa estimativa do V_v , assim:

$$V_v = 15 - (25,4 - 22,4) \times \left(\frac{15-20}{25,4-19,1} \right) \approx 17,4 l/m^3 = 0,0174 m^3/m^3 \quad (3.14)$$

3.4.4. Índice de vazios

Em qualquer composição de betão, existe um determinado volume máximo de materiais sólidos e um correspondente volume mínimo de vazios. O índice de vazios (I_v) traduz esse volume mínimo e representa o volume total de água necessária e o volume de vazios, por unidade de volume de betão. É, por isso, um bom indicador do volume de material não sólido no betão e pode ser estimado recorrendo à expressão proposta por Faury, onde a primeira parcela é aplicável a betão simples e a segunda contabiliza o efeito de parede:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}}} + \frac{K'}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (3.15)$$

Com,

- K, K' - parâmetros que dependem da trabalhabilidade do betão, dos meios de compactação utilizados e da natureza dos agregados utilizados, conforme definidos no Quadro 3.16;
- $D_{m\acute{a}x}$ - máxima dimensão do agregado, em mm;
- R - raio médio do molde que contém o betão, em mm.

Considerando que os agregados utilizados podem ser classificados, quanto à sua geometria, como agregados grossos britados e agregados finos rolados, e que para uma classe de abaixamento S3, pretendida para o betão produzido, a trabalhabilidade, segundo o Quadro 3.17, pode ser descrita como mole, obtiveram-se os valores de 0,37 e 0,003 para K e K' , respectivamente. Assumindo, com base em outros estudos e de forma conservativa, que $R/D_{m\acute{a}x} = 1$, substituindo na expressão acima, obtém-se:

$$I_v = \frac{0,37}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{1-0,75} \approx 0,211 m^3/m^3 \quad (3.16)$$

Quadro 3.16 - Valores de K e K'

Trabalhabilidade	Meios de compactação	K			K'
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia e agregados grossos britados	
		Agregados grossos rolados	Agregados grossos britados		
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 0,24	≤ 0,25	≤ 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 0,34	0,003
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Sem nada	≥ 0,36	≥ 0,38	≥ 0,38	0,004

Quadro 3.17 - Trabalhabilidade em função do abaixamento

Trabalhabilidade	Meios de compactação	Método de determinação da trabalhabilidade	
		Graus de Vêbê	Abaixamento do cone de Abrams (mm)
Terra húmida	Vibração potente e compressão	> 30	-
Seca	Vibração potente	30 a 10	-
Plástica	Vibração média	10 a 2	0 a 40
Mole	Apiloamento	-	50 a 150
Fluida	Sem nada	-	> 150

3.4.5. Dosagem de água

A quantidade de água a adicionar na mistura tem como função principal garantir a realização das reacções de hidratação do ligante, mas também humedecer a superfície dos agregados permitindo a sua ligação com a pasta de cimento e ainda conferir alguma trabalhabilidade à mistura. Como descrito, o I_v traduz a necessidade de água e o volume de ar presentes por unidade de volume de betão. Deste modo, a dosagem de água (A) necessária para a produção de betão por unidade de volume pode ser determinada, sem erro significativo, pela expressão:

$$I_v = A + V_v \Leftrightarrow A = I_v - V_v \quad (3.17)$$

Onde,

- A - dosagem de água de amassadura;
- I_v - índice de vazios;
- V_v - volume de vazios.

Substituindo os valores obtidos, obtém-se:

$$A = 0,211 - 0,0174 \approx 0,193 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.18)$$

3.4.6. Valor médio de resistência à compressão

Conforme estabelecido, pretende-se obter uma classe de resistência C30/37 para os betões de referência, ou seja, que os provetes cúbicos, com 15 cm de aresta, apresentem um valor característico de resistência à compressão, f_{ck} , de 37 MPa, aos 28 dias de idade. Com efeito, é possível estimar os valores médios de resistência à compressão através da fórmula proposta por Nepomuceno (1999):

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda \times S_n \quad (3.19)$$

Onde,

- f_{cm} - valor médio de resistência à compressão (MPa);
- f_{ck} - valor característico de resistência à compressão (MPa);
- λ - parâmetro estatístico que depende do nível de probabilidade associado ao número de amostras, e tende para 1,64 quando este número é suficientemente elevado;
- S_n - desvio padrão (MPa), depende da variabilidade prevista para o betão, em função do nível de resistência e de controlo de produção.

Lourenço (1988), citado por Nepomuceno (1999), apresenta no Quadro 3.18 valores expectáveis para o desvio padrão de betões com resistências médias à compressão superiores a 35 MPa, em função do modo de medição dos componentes e a forma como é feito o controlo de produção.

Dado que todos os componentes que constituem o betão foram pesados e a sua produção decorreu em ambiente de laboratório, é aceitável adoptar o valor de 4,4 para o desvio padrão, correspondente a um bom grau de controlo de produção. Substituindo os valores na equação acima, obtém-se:

$$f_{cm} = 37 + 1,64 \times 4,4 = 44,2 \text{ MPa} \quad (3.20)$$

Quadro 3.18 - Desvio padrão segundo o grau de controlo de produção

Medição dos componentes		Grau de controlo da produção	Desvio padrão (MPa)
Cimento	Agregados		
Peso (servomecanismo)	Peso (servomecanismo)	Fraco	5,6
		Normal	4,6
		Bom	3,6
Peso	Peso	Fraco	6,5
		Normal	5,4
		Bom	4,4
Peso	Volume	Fraco	7,2
		Normal	6,0
		Bom	4,7
Volume	Volume	Fraco	7,6
		Normal	6,5
		Bom	5,2

3.4.7. Dosagem de cimento

Como o método de Faury não permite determinar a dosagem de cimento (C) necessária para obter o valor de resistência à compressão pretendida aos 28 dias, foi necessário recorrer a outros autores para garantir valores coerentes para este parâmetro. Optou-se por utilizar a fórmula proposta por Feret, em 1892, que relaciona a dosagem de cimento, a dosagem de água e o volume de vazios com a resistência média à compressão, como se observa seguidamente:

$$f_{cm} = K \times \left(\frac{C}{A+C+V_v} \right)^2 \quad (3.21)$$

Em que,

- f_{cm} - resistência à compressão média do betão, em MPa;
- K - parâmetro de Feret;
- A - dosagem de água;
- C - dosagem de cimento;
- V_v - volume de vazios.

O parâmetro de Feret, segundo Popovics (1998), é um parâmetro empírico que depende das unidades utilizadas e de todos os factores que influenciam a resistência do betão, com excepção do rácio cimento - pasta. Este, para um cimento 42,5R sem adições, assume um valor mínimo de 315 e máximo de 350, aos 28 dias.

Substituindo os valores atrás determinados na equação acima, obtém-se:

$$44,2 = 315 \times \left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{0,193+C_{m\acute{a}x}+0,0174} \right)^2 \Leftrightarrow C_{m\acute{a}x} = 0,126 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.22)$$

$$44,2 = 350 \times \left(\frac{C_{m\acute{i}n}}{0,193+C_{m\acute{i}n}+0,0174} \right)^2 \Leftrightarrow C_{m\acute{i}n} = 0,116 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.23)$$

Considerando, de acordo com o fabricante, que a massa volúmica do cimento é igual a 3050 kg/m³, a dosagem de cimento obtida em massa por unidade de volume é:

$$C_{m\acute{a}x} = 0,126 \times 3050 = 385 \text{ kg/m}^3 \quad (3.24)$$

$$C_{m\acute{i}n} = 0,116 \times 3050 = 354 \text{ kg/m}^3 \quad (3.25)$$

Com base nos resultados obtidos, optou-se por definir uma dosagem de cimento de 350 kg/m³. Este facto deveu-se, essencialmente, à proximidade desse valor com o obtido utilizando o valor máximo do parâmetro de Feret. No entanto, sendo o objectivo desta dissertação aferir o potencial da utilização futura de agregados de mármore em betão, é vital garantir a viabilidade ambiental, reduzindo os impactes gerados pela indústria produtora do cimento, e económicos, não encarecendo o preço final do betão. Da mesma forma, numa pesquisa exaustiva em trabalhos previamente realizados no Laboratório de Construção do IST, foi possível verificar que o desvio-padrão obtido, em provetes

submetidos ao ensaio de compressão, é inferior ao proposto no Quadro 3.18, resultando num valor de f_{cm} inferior e por conseguinte uma menor dosagem de cimento.

3.4.8. Relação a/c

A quantidade de água presente na constituição do betão condiciona inquestionavelmente as propriedades do mesmo, não só no estado fresco mas também no estado endurecido. A água a adicionar deve ser suficiente para garantir a hidratação do ligante e conferir a trabalhabilidade pretendida. No entanto, o excesso desta conduz a vazios no interior da matriz do betão, quando evaporar, o que prejudica as suas características resistentes, tanto mecânicas como de durabilidade. Este é, portanto, um factor importante a considerar na produção de betão.

Para o efeito, deve-se fixar a relação a/c, ou seja, o quociente entre a dosagem de água, em kg/m^3 , e a dosagem de cimento, como é traduzido pela seguinte fórmula:

$$\frac{a}{c} = \frac{193}{350} = 0,552 \quad (3.26)$$

Como se pode observar, este valor é superior à máxima relação a/c definida na norma NP EN 206-1 (2007). Como tal, decidiu-se reduzir esta relação para 0,54, *a priori* suficiente para garantir a trabalhabilidade do betão, e conferindo a possibilidade de executar algum ajuste necessário sem que o betão a produzir esteja em não conformidade com a norma.

Com a nova relação a/c e considerando a dosagem de cimento utilizada anteriormente, o valor para a dosagem de água pode ser verificado abaixo:

$$0,54 = \frac{A}{350} \Leftrightarrow A = 0,54 \times 350 = 189 \text{ kg}/m^3 = 0,189 \text{ m}^3/m^3 \quad (3.27)$$

3.4.9. Volume das partículas de cimento

O volume ocupado pelas partículas de cimento (V_c), por unidade de volume de betão produzido, é determinado através da seguinte expressão:

$$V_c = \frac{c}{\delta_c} \quad (3.28)$$

Onde,

- δ_c - massa volúmica do cimento utilizado.

Assim, o volume ocupado pelo cimento é:

$$V_c = \frac{350}{3050} = 0,115 \text{ m}^3/m^3 \quad (3.29)$$

3.4.10. Volume de agregados

O volume de agregados pode ser obtido através da seguinte equação:

$$1 = V_c + A + V_v + V_a \quad (3.30)$$

Substituindo os vários valores obtidos anteriormente na equação acima, obtém-se:

$$1 = 0,115 + 0,189 + 0,0174 + V_a \Leftrightarrow V_a = 0,679 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.31)$$

3.4.11. Volume total das partículas sólidas

O volume das partículas sólidas (V_s) compreende o volume ocupado pelos agregados e pelo cimento. Este pode ser facilmente determinado, conhecido o volume de cimento e de agregados, através da expressão seguinte:

$$V_s = V_c + V_a \quad (3.32)$$

Substituindo os valores acima, obtém-se:

$$V_s = 0,115 + 0,679 = 0,794 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.33)$$

3.4.12. Percentagem de volume de cimento em relação ao volume de sólidos

Seguidamente, determinou-se a percentagem do volume de cimento em relação ao volume de sólidos total ($C_{\%}$), através da seguinte expressão:

$$C_{\%} = \frac{V_c}{V_s} \times 100 = \frac{0,115}{0,794} \times 100 = 14,5\% \quad (3.34)$$

3.4.13. Curva de referência de Faury

As curvas de referência pretendem determinar a composição granulométrica ideal, ou seja, determinar as quantidades ponderadas de cada um dos agregados, na composição final do betão, de forma a maximizar a compacidade da mistura. Como referido, nesta dissertação, optou-se por utilizar a curva de referência de Faury para a obtenção da percentagem de material retido em cada peneiro. Essas percentagens correspondem aos valores utilizados na composição final do betão.

A curva de referência de Faury é constituída por dois segmentos de recta e é representada por um diagrama em que as abcissas apresentam uma escala proporcional à raiz quinta da dimensão das partículas, assumindo valores entre 0,0065 mm, a menor dimensão das partículas do cimento, as menores entre as presentes na mistura, e $D_{\text{máx}}$, e as ordenadas apresentam uma escala linear correspondente à percentagem de material que passa em cada peneiro. Importa referir que as percentagens correspondentes à curva de referência dizem respeito ao volume ocupado pelas partículas sólidas do betão e não ao volume total do mesmo. A curva de Faury fica totalmente definida determinando três pontos, o inicial, intermédio e final, como a seguir se demonstra:

Ponto inicial

- abcissa: 0,0065 mm;
- ordenada: 0%;

Ponto intermédio

- abcissa: $\frac{D_{máx}}{2} = \frac{22,4}{2} = 11,2 \text{ mm}$;
- ordenada: $P_{D/2} = A + 17^5 \sqrt{D_{máx}} + \frac{B}{D^{-0,75}}$; (3.35)

Em que,

- A, B - parâmetros que dependem da natureza dos agregados, meios de compactação e da consistência do betão, obtidos através do Quadro 3.19.

Quadro 3.19 - Valores de A e B

Trabalhabilidade	Meios de compactação	A			B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia e agregados grossos britados	
		Agregados grossos rolados	Agregados grossos britados		
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

Tendo, novamente, em consideração que se pretende um betão com uma classe de consistência S3 e que se consideram os agregados grossos britados e finos rolados, os parâmetros A e B assumem os valores 30 e 2, respectivamente. Assim, a ordenada do ponto intermédio é:

$$P_{D/2} = 30 + 17^5 \sqrt{22,4} + \frac{2}{1^{-0,75}} = 69,7\% \quad (3.36)$$

Ponto final

- abcissa: 22,4 mm;
- ordenada: 100%.

Como se pretende determinar a percentagem em cada fracção granulométrica, e a curva de Faury é referente ao total de partículas sólidas da mistura, foi necessário remover a contribuição do cimento na mesma. Assim, depois de determinado C%, a curva de Faury sem cimento é caracterizada pelos pontos apresentados no Quadro 3.20.

Quadro 3.20 - Coordenadas da curva de Faury sem cimento

	Abcissas	Ordenadas (%)	Ordenadas descontando o cimento (14,5%) (%)	Restabelecimento para 100% (%)
$D_{máx}$	22,4	100,0	85,5	100
$D_{máx}/2$	11,2	69,7	55,2	64,5
d_i	0,125	16,3	1,8	2,1

Conhecidos os pontos necessários para a caracterização da curva de Faury com e sem cimento, procedeu-se à representação gráfica dos dois segmentos que a constituem, como representado na Figura 3.11.

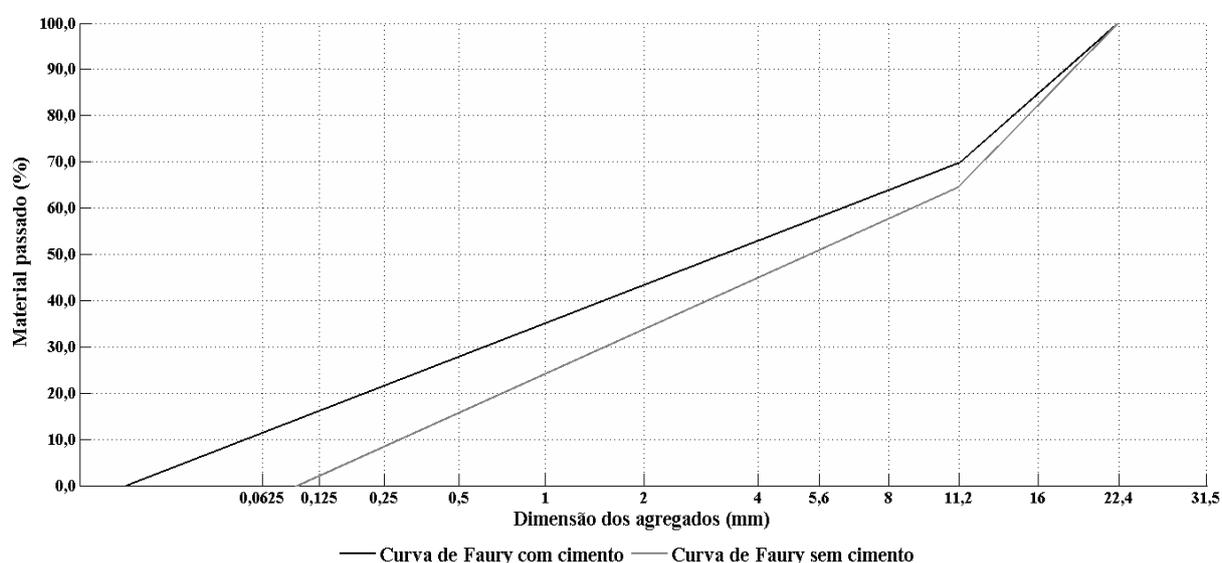


Figura 3.11 - Curva de Faury com e sem cimento

Geralmente, de forma a determinar-se as diferentes quantidades de agregados, é necessário ajustar as curvas granulométricas dos diferentes agregados à curva de referência de Faury. No entanto, para garantir a máxima compactidade e as melhores características em todos os betões produzidos, optou-se por separar os agregados grossos em intervalos granulométricos bem definidos, conforme especificado na norma EN 1260:2002 + A1:2008, ajustando apenas as curvas granulométricas dos agregados finos.

3.4.14. Composição dos betões de referência

As quantidades dos diversos componentes que constituem os betões de referência podem ser obtidas através dos cálculos anteriores. Para esse efeito, é necessário obter a percentagem de resíduos acumulados passados referentes a cada intervalo granulométrico. Como as curvas de referência de Faury, utilizadas neste estudo, são lineares, foi necessário determinar as equações dos dois segmentos de recta que a definem, conforme indicado:

$$P(d) = a \times d + b \quad (3.37)$$

Onde,

- P(d) - Percentagem de resíduos acumulados passados;
- d - raiz quinta da dimensão das partículas;
- a - declive da recta;
- b - ordenada na origem.

Os coeficientes a e b podem ser determinados de acordo com as seguintes equações:

$$a = \frac{\Delta P(d)}{\Delta d} \quad (3.38)$$

$$b = P(d) - a \times d \quad (3.39)$$

Os valores dos coeficientes, para os dois segmentos de recta, podem ser consultados no Quadro 3.21.

Quadro 3.21 - Coeficientes a e b para definição das equações das curvas de Faury

Segmento de recta	a	b
D compreendido entre 11,2 a 0,0065	64,8967	-40,7146
D compreendido entre 22,4 a 11,2	147,2677	-174,257

Através das equações definidas a partir dos coeficientes anteriores, foi possível determinar a percentagem de material acumulado passado, para cada fracção granulométrica, como indicado no Quadro 3.22.

Quadro 3.22 - Percentagem de material acumulado passado, definida pela curva de Faury

Abertura da malha (mm)	Resíduos acumulados passados (%)
22,4	100,0
16	82,2
11,2	64,5
8	57,7
5,6	50,9
4	44,9
2	33,8
1	24,2
0,5	15,8
0,25	8,5
0,125	2,1
0,0625	-3,4

Esta distribuição de percentagens é a ideal para maximizar a compacidade, segundo a curva de referência de Faury. No entanto, durante a campanha experimental, foi possível verificar que a areia grossa apresentava lacunas na fracção granulométrica de 2 a 4 mm, não sendo possível colmatá-las através dos agregados grossos. Apesar de esta situação ser prejudicial para a resistência, tanto mecânica como de durabilidade, do betão, optou-se por prosseguir o trabalho experimental com os agregados existentes, visto que a variação introduzida seria semelhante em todas as famílias, pois a percentagem a utilizar não se iria alterar em cada composição.

Seguidamente, foi necessário determinar a percentagem de material retido, recorrendo à expressão seguinte:

$$\% \text{ retido peneiro } i = \%d_i - \%d_{i-1} \quad (3.40)$$

Em que,

- $\%d_i$ e $\%d_{i-1}$ - percentagem de material acumulado passado no peneiro i e $i-1$, respectivamente.

Com este parâmetro determinado, é possível calcular o volume retido (V_i) em cada peneiro através da expressão:

$$V_i = \frac{\% \text{ retido peneiro } i \times V_a}{100} \quad (3.41)$$

Finalmente, aferiram-se as massas volúmicas dos diferentes agregados, recorrendo ao respectivo ensaio, com o objectivo de determinar a massa retida em cada peneiro. Esses valores podem ser observados no Quadro 3.23.

Assim, as massas de cada intervalo granulométrico podem ser determinadas através da expressão:

$$m_i = V_i \times \gamma_i \quad (3.42)$$

Quadro 3.23 - Massas volúmicas dos agregados utilizados

Material		Massa volúmica (kg/m ³)
Agregados grossos	Mármore	2736
	Calcário	2681
	Granito	2785
	Basalto	3024
Agregados finos		2603

No Quadros 3.24 apresentam-se os valores de composição dos betões de referência, para os diferentes agregados utilizados nesta dissertação, em volume e em massa, tendo em consideração todos os aspectos referidos. No Anexo A, pode-se consultar as composições detalhadas dos diferentes betões produzidos.

Quadro 3.24 - Composição dos diferentes betões de referência produzidos (em volume e em massa)

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Material retido (%)	Volume (m ³ /m ³)	BRB	BRC	BRG	BRM
				Massa (kg/m ³)			
Agregados grossos	16-22,4	17,8	0,121	366,4	324,9	337,5	331,5
	11,2-16	17,7	0,120	362,4	321,3	333,8	327,9
	8-11,2	6,8	0,046	140,6	124,6	129,5	127,2
	5,6-8	6,8	0,046	139,0	123,3	128,0	125,8
	4-5,6	6,0	0,040	122,4	108,5	112,7	110,7
Agregados finos	Areia grossa	35,0	0,238	619,1	619,1	619,1	619,1
	Areia fina	9,9	0,067	174,6	174,6	174,6	174,6
Total de agregados			0,679				
Cimento: CEM II A-L 42,5R			0,115	350,0	350,0	350,0	350,0
Água			0,189	189,0	189,0	189,0	189,0
Vazios			0,017	0,0	0,0	0,0	0,0
Volume total			1,000				

3.5. Produção dos betões

O procedimento utilizado no processo de amassadura foi baseado na investigação de Ferreira (2007), o qual permite obter uma boa envolverência entre a pasta e os agregados, garantindo de tal forma uma mistura o mais homogénea possível.

Para esse efeito, iniciou-se o processo humedecendo o interior da misturadora, com capacidade para 80 litros, preparando-a para receber os agregados. Estes foram introduzidos, com a misturadora em funcionamento, por ordem decrescente de granulometria, seguidos por 1/3 da água e pelo cimento. Esta ordem deve-se à função de misturadores e homogeneizadores da pasta que os agregados têm e à melhoria da aderência entre os mesmos e o cimento depois de humedecidos. De referir que este processo decorre durante 90 segundos e que a introdução do cimento foi executada com o maior cuidado para evitar perdas inerentes ao próprio funcionamento da misturadora. Após 30 segundos, introduziram-se os restantes 2/3 de água e deixou-se a misturadora funcionar durante mais 180 segundos.

Terminado este processo, introduziu-se a amassadura nos moldes, previamente lubrificadas com óleo descofrante, e procedeu-se à vibração através da agulha vibratória, com os tempos de vibração aferidos anteriormente. Regularizou-se a superfície livre dos moldes com o auxílio de uma colher de pedreiro. Passado aproximadamente 24 horas, desmoldaram-se os provetes e colocaram-se no local de cura destinado, a câmara húmida.

No Quadro 3.25, pode verificar-se a quantidade de betão necessária para realizar todos os ensaios propostos no Quadro 3.5, para cada uma das famílias estudadas. De referir que este volume é aproximado por defeito, pois foi necessário considerar uma margem de segurança de aproximadamente 40% do valor a produzir, para contabilizar as perdas durante o enchimento do molde, do processo de vibração e dos desperdícios nos cortes dos cilindros que originam os provetes dos ensaios de resistência à carbonatação e à penetração dos cloretos.

Quadro 3.25 - Ensaio, tipos de moldes e quantidades de betão a produzir

Ensaio	Idade (dias)	Amostras	Forma	Dimensões (mm)	Cofragens utilizadas (mm)	Volume total (l)
Absorção por imersão	28	4	Cubos	100 x 100 x 100	100 x 100 x 100	4,0
Absorção por capilaridade	28	4	Prismas	100 x 100 x 200	100 x 100 x 500	10,0
Resistência à carbonatação	7	3	Discos	φ100 x 50	φ100 x 200	4,7
	28	3	Discos	φ100 x 50		
	56	3	Discos	φ100 x 50		
	91	3	Discos	φ100 x 50		
Resistência à penetração de cloretos	28	3	Discos	φ100 x 50	φ100 x 200	3,1
	91	3	Discos	φ100 x 50		
Por composição						21,9

3.6. Ensaios de betão no estado fresco

Os ensaios realizados ao betão no seu estado fresco pretendem avaliar a conformidade com os pressupostos iniciais, assegurando, assim, que este respeita os critérios de aplicabilidade em obra. Permitem ainda estimar o desempenho futuro do betão no estado endurecido.

Na presente campanha experimental, realizaram-se os ensaios de abaixamento do cone de Abrams, especialmente relevante atendendo a que permite verificar a conformidade da classe de consistência definida como sendo 115 ± 10 mm, para as diversas composições do betão, e de determinação de massa volúmica, também denominada por densidade, que deve reflectir a soma ponderada das massas volúmicas parciais dos diferentes componentes do betão.

3.6.1. Abaixamento do cone de Abrams

3.6.1.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams é essencial para quantificar a trabalhabilidade de betões com diferentes taxas de substituição, uma vez que permite avaliar a consistência das diferentes famílias produzidas. Durante a fase de produção, exigiu-se que a trabalhabilidade de cada composição fosse mantida constante, ou seja, que se estabeleça no intervalo atrás definido de 115 ± 10 mm, possibilitando, deste modo, uma coerente e correcta comparação entre as diversas composições.

Para garantir esta exigência, caso fosse necessário, poderia proceder-se a um ajuste da relação a/c de uma determinada composição, durante o processo de betonagem. No entanto, atendendo às propriedades dos agregados utilizados no decorrer da campanha experimental, verificou-se que esta medida não seria necessária, já que a dosagem de água calculada anteriormente se revelou suficiente para manter o abaixamento nos valores pretendidos.

3.6.1.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados no ensaio para determinação do abaixamento do cone de Abrams seguiram a norma NP EN 12350-2 (2002) - “*Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento*”.

3.6.1.3. Equipamente de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- carrinho de mão;
- chapa metálica;
- colher de pedreiro e pá;
- funil que permite a acoplação ao topo do molde tronco-cónico;
- molde metálico tronco-cónico com diâmetro interno da base de (200 ± 2) mm, diâmetro interno do topo de (100 ± 2) mm e altura de (300 ± 2) mm;
- régua metálica graduada de 300 mm;
- varão de compactação com extremidades arredondadas, com um diâmetro de (16 ± 1) mm e um comprimento de (600 ± 5) mm.

3.6.1.4. *Amostras*

Após o processo de fabrico do betão estar concluído, este foi colocado no interior de um carrinho de mão, previamente humedecido, e homogeneizado, conforme se ilustra na Figura 3.12, com o auxílio de uma pá. As amostras, utilizadas no ensaio de abaixamento do cone de Abrams, foram recolhidas depois de terminado este processo.



Figura 3.12 - Homogeneização do betão

3.6.1.5. *Procedimento de ensaio*

Inicialmente, humedeceu-se todo o material em contacto com o betão, especialmente o molde tronco-cónico e a chapa metálica, e fixaram-se ambos, com o propósito de obter uma superfície nivelada.

Concluído o processo de preparação da amostra, o molde foi enchido com betão em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde. Cada camada foi compactada com 25 pancadas, recorrendo ao varão de compactação, e procurou-se distribuir cada pancada por toda a secção transversal do molde, sem que o varão atravessasse as camadas inferiores à que está a ser compactada. Assegurou-se também que o topo do molde, finalizado o processo de compactação, ficasse completamente preenchido.

Após a compactação da última camada, regularizou-se a superfície do molde, com o auxílio da colher de pedreiro, removeu-se o excesso de betão na chapa metálica e retirou-se, cuidadosamente, o molde, através de um movimento na vertical sem transmitir vibrações, num intervalo entre 5 e 10 segundos, como se pode observar na Figura 3.13.

Finalmente, verificou-se a validade do abaixamento e registou-se o seu valor.

3.6.1.1. *Cálculos e expressão dos resultados*

O abaixamento do cone de Abrams, h , é quantificado pela diferença de alturas entre o molde e o ponto mais alto do provete após a desmoldagem, conforme está patente na Figura 3.14. O ensaio só é considerado válido se o betão permanecer substancialmente intacto, simétrico e isento de qualquer distorção. Caso estas condições não sejam verificadas, é necessário retirar outra amostra e repetir o procedimento.



Figura 3.13 - Remoção do molde



Figura 3.14 - Medição do abaixamento do cone de Abrams

3.6.2. Massa volúmica

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão no estado fresco permite caracterizar, ainda que de forma indirecta, a trabalhabilidade dos betões, bem como o seu desempenho quando endurecidos. Como tal, na campanha experimental, este ensaio foi utilizado para comparar a compacidade, no estado fresco, das diferentes composições produzidas e prever, com alguma margem de erro, a porosidade das mesmas, após endurecimento.

3.6.2.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados na determinação da massa volúmica do betão no estado fresco seguiram a norma NP EN 12350-6 (2002) - “Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica”.

3.6.2.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- agulha vibratória;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- colher de pedreiro e pá;
- recipiente metálico de forma cilíndrica, com volume de 10 litros.

3.6.2.4. Amostras

Também no ensaio de determinação da massa volúmica, para a obtenção das amostras a utilizar, o betão produzido foi colocado no interior de um carrinho de mão, previamente humedecido, e homogeneizado com a ajuda de uma pá.

3.6.2.5. Procedimento de ensaio

Inicialmente, pesou-se o recipiente cilíndrico vazio e registou-se a sua massa como M_1 . Após a homogeneização do betão, encheu-se o recipiente, com a amostra recolhida, em duas camadas, cada uma com sensivelmente metade da altura do recipiente.

Cada camada foi cuidadosamente compactada, utilizando uma agulha vibratória, sem esta atravessar a camada subjacente à que está a ser vibrada. Este processo foi realizado durante o período

de tempo suficiente para garantir uma correcta compactação e não introduzir fenómenos de segregação ao betão.

Por fim, após nivelar a superfície do recipiente, com o auxílio de uma colher de pedreiro, e remover os restos de betão que se encontravam no exterior do mesmo, pesou-se e registou-se a sua massa como M_2 .



Figura 3.15 - Pesagem do recipiente da massa volúmica com betão

3.6.2.6. Cálculos e expressão dos resultados

Para determinar a massa volúmica do betão no estado fresco, foi utilizada a seguinte expressão:

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.43)$$

Onde,

- D - massa volúmica do betão no estado fresco, em kg/m^3 ;
- M_1 - massa do recipiente, em kg;
- M_2 - massa do recipiente cheio com betão fresco, em kg;
- V - volume do recipiente, em m^3 .

3.7. Ensaios de betão no estado endurecido

Os ensaios ao betão no estado endurecido pretendem, fundamentalmente, avaliar o seu comportamento e, embora os ensaios que incidiram sobre os agregados e o betão fresco permitam, de certo modo, prever o comportamento dos betões, são estes que fornecem informações reais e específicas sobre a capacidade do betão para cumprir as exigências para as quais foi dimensionado.

O comportamento do betão pode ser avaliado através das suas características físicas, mecânicas e de durabilidade. Esta dissertação deu especial enfoque às características de durabilidade, realizando-se em paralelo outra dissertação, que pretende caracterizar mais pormenorizadamente as características físicas e mecânicas.

Assim, para caracterizar o comportamento em termos de durabilidade do betão, efectuaram-se os ensaios de absorção de água por imersão, de absorção de água por capilaridade, de resistência à carbonatação e de resistência à penetração de cloretos.

3.7.1. Absorção de água por imersão

3.7.1.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de absorção de água por imersão permite caracterizar a porosidade aberta do betão, sendo, por esse motivo, fundamental para avaliar o desempenho deste em termos de durabilidade. A realização deste ensaio permite também estimar o volume de vazios do betão, pois a água não consegue preencher todos os poros da matriz cimentícia do betão.

3.7.1.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados na realização do ensaio de absorção de água por imersão seguiram a especificação LNEC E 394 (1993) - “*Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*”.

3.7.1.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- balança de precisão de $\pm 0,05\%$ da massa a determinar, que permita efectuar pesagens tanto no ar como imerso em água;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- pano;
- recipiente plástico.

3.7.1.4. Amostra

Como descrito na norma, os resultados deste ensaio podem ser significativamente influenciados pela idade do betão, tipo de cura, tipo de provete utilizado e suas dimensões. Como tal, durante a campanha experimental, utilizaram-se provetes cúbicos moldados, com 10 cm de aresta, realizando todos os ensaios após 28 dias de cura, do betão, em câmara húmida.

Para cada família de betão produzida, executaram-se 4 provetes, o que perfaz um total de 40 provetes de ensaio.

Deve-se, ainda, ter em consideração que todos os provetes passaram 24 horas nos moldes, em ambiente de laboratório, até adquirirem resistência suficiente para serem desmoldados e colocados na câmara húmida.

3.7.1.5. Procedimento de ensaio

Em primeiro lugar, os provetes cúbicos foram colocados no interior de um recipiente plástico. Posteriormente, adicionou-se água, de tal modo que, em intervalos sucessivos de uma hora, a lâmina líquida se encontre a 1/3, 2/3 e na totalidade da altura do provete e garantiu-se que o nível final da água não ultrapassava em mais de 20 mm a face superior, como se pode observar na Figura 3.16. Os provetes permaneceram no recipiente até alcançarem massa constante.

Após alcançado este objectivo, pesou-se e registou-se a massa do provete saturado com superfície seca, como M_1 , e a massa hidrostática após saturação, como M_2 , ilustrado na Figura 3.17. Antes de cada pesagem, teve-se o cuidado de secar completamente o provete, com um pano, de forma a remover a humidade superficial.

Finalmente, o provete foi colocado no interior de uma estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Deixou-se arrefecer, pesou-se e registou-se a sua massa como M_3 .



Figura 3.16 - Provete em diferentes fases do ensaio de absorção de água por imersão



Figura 3.17 - Balança hidrostática

3.7.1.6. Cálculos e expressão dos resultados

A absorção de água por imersão pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$A_i = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} (\%) \quad (3.44)$$

Em que,

- A_i - absorção de água por imersão, em %;
- M_1 - massa do provete saturado no ar, em g;
- M_2 - massa hidrostática do provete saturado, em g;
- M_3 - massa do provete seco, em g.

3.7.2. Absorção de água por capilaridade

3.7.2.1. Objectivo do ensaio

Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), o ensaio de absorção de água por capilaridade permite avaliar a capacidade do betão absorver líquidos por ascensão através dos vasos capilares. Este fenómeno é originado pelas diferenças de pressão que surgem entre a superfície livre dos líquidos e a superfície livre desses mesmos líquidos no interior dos vasos capilares.

3.7.2.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados na realização do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiram a especificação LNEC E 393 (1993) - “*Determinação da absorção de água por capilaridade*”.

3.7.2.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- apoio plásticos;
- balança de precisão de $\pm 0,05\%$ da massa a determinar;
- bandeja metálica;
- campânula;
- máquina de corte de discos adiamantados;
- régua graduada em décimas de milímetro.

3.7.2.4. Amostras

Este ensaio foi realizado em provetes prismáticos, de secção quadrada, com 250 mm de comprimento e 100 mm de aresta. Como as únicas cofragens disponíveis no laboratório possuíam as dimensões de 100 x 100 x 500 mm³, a meio do período de cura, ou seja, 14 dias após a betonagem, foi necessário cortar os provetes iniciais em 2 provetes com metade do comprimento (250 mm), recorrendo para esse efeito à máquina de corte. Para cada composição gerada, utilizaram-se 4 provetes, o que perfaz um total de 40 provetes de ensaio. Os provetes apenas foram desmoldados e transportados para a câmara húmida 24 horas após a sua betonagem.

3.7.2.5. Procedimento de ensaio

Em primeiro lugar, devido à ausência de estufas em que a temperatura pudesse ser regulada e à indisponibilidade das existentes, optou-se por secar o provete na câmara seca a uma temperatura de 20 ± 2 °C durante 14 dias, após a cura de 28 dias na câmara húmida. Este processo de secagem não corresponde ao recomendado na especificação, mas foi utilizado em todos os provetes, o que permite a comparação entre cada família. Atingida a idade pretendida, os provetes foram pesados e registou-se a sua massa como M_0 .

Posteriormente, o provete foi colocado numa bandeja, sobre os apoios plásticos, de modo a que a sua base, a face cortada, fique apoiada. De seguida, colocou-se água na bandeja, até que o nível desta atingisse 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete, valor mantido constante durante todo o ensaio, e taparam-se os provetes e a bandeja com uma campânula, de forma a evitar a evaporação, como se comprova na Figura 3.18.

Passadas 3, 6, 24 e 72 horas, retiraram-se os provetes da água e colocaram-se sobre uma base não absorvente durante 60 ± 5 segundos, tendo-se registado a altura capilar, sensivelmente a meio de

cada face, durante esse intervalo. Seguidamente, pesou-se e registou-se a massa de cada provete como M_i , como mostrado na Figura 3.19.



Figura 3.18 - Provete com água até 5 ± 1 mm de água acima da face inferior



Figura 3.19 - Pesagem de um provete do ensaio de absorção de água por capilaridade

3.7.2.6. Cálculos e expressão dos resultados

A absorção de água por capilaridade, ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas, foi determinada a partir da seguinte equação:

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A_s} \text{ (g/mm}^2\text{)} \quad (3.45)$$

Onde,

- A_c - absorção de água por capilaridade, no instante t_i , em g/mm^2 ;
- M_i - massa do provete, em contacto com a água durante o tempo t_i , em g;
- M_0 - massa do provete seco, em g;
- A_s - área da face inferior do provete, em contacto com a água, em mm^2 .

3.7.3. Resistência à carbonatação

3.7.3.1. Objectivo de ensaio

A resistência à carbonatação é uma das características fundamentais do betão, no estado endurecido, para avaliar a sua durabilidade. A carbonatação, por si só, não é prejudicial para o betão, uma vez que causa um muito ligeiro aumento da sua densidade e, consequentemente, da resistência mecânica.

No entanto, as armaduras presentes no interior do betão encontram-se num meio altamente alcalino, já que o pH do betão é de aproximadamente 12,5. Este facto confere-lhes uma película protectora, que impede a dissolução do ferro e, consequentemente, protege-as contra a corrosão. O processo de despasseamento inicia-se para valores de pH próximos de 9 e a presença de dióxido de carbono, no interior da matriz cimentícia, causa uma descida drástica dos valores de pH do betão. Assim, quando a frente de carbonatação atinge as armaduras, estas deixam de estar protegidas e pode dar-se início ao processo de corrosão do aço.

3.7.3.2. Normas de ensaio

A metodologia e princípios adoptados na determinação da resistência à carbonatação seguiram a especificação LNEC E 391 (1993) - “*Determinação da resistência à carbonatação*”.

3.7.3.3. Equipamento de ensaio

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- câmara de carbonatação, com entrada e saída de gases, controlo de humidade e temperatura e fluxómetros para medição de caudal de CO₂ e ar;
- escopro;
- paquímetro;
- máquina de corte de discos adiamantados;
- martelo.

3.7.3.4. Amostras

A partir dos provetes cilíndricos iniciais de $\phi 100 \times 200$ mm, foi necessário, com o auxílio de uma máquina de corte, cortar-se discos de 50 mm de altura. O período de cura foi de 28 dias, encontrando-se os provetes em câmara húmida, a uma temperatura de 20 ± 2 °C e 100% de humidade relativa, durante os primeiros 14 dias, e, após o corte, em câmara seca, a 20 ± 2 °C e $60 \pm 5\%$ de humidade relativa, nos restantes 14 dias.

Os ensaios foram realizados após os provetes permanecerem na câmara de carbonatação 7, 28, 56 e 91 dias, utilizando-se, para cada composição e idade, 3 provetes, o que perfaz um total de 120 provetes de ensaio.

Todos os provetes se mantiveram durante 24 horas na zona de betonagem, antes de serem desmoldados e transportados para a zona de cura.

3.7.3.5. Procedimento de ensaio

De modo a não alterar o período de cura definido pela especificação, os provetes foram protegidos, no topo e na base, com uma tinta epóxida, como se exemplifica na Figura 3.20, para que a penetração de CO₂ se fizesse apenas pela superfície de revolução lateral, três dias antes de completarem a cura. Este período é suficiente para garantir que o isolante se encontra seco e os provetes são introduzidos na câmara de carbonatação, que se encontrava com $5 \pm 1\%$ de CO₂, com $60 \pm 5\%$ de humidade relativa e à temperatura de 23 ± 3 °C, exactamente aos 28 dias de idade.

Nas datas previamente definidas, retiraram-se os provetes da câmara e partiram-se, com o auxílio de um martelo e escopro, em 4 partes. Sobre as superfícies fracturadas, aplicou-se a solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%, indicando que a alcalinidade do betão se encontrava entre 8 e 10 na escala de pH, conforme se verifica na Figura 3.21.

Foi medido, recorrendo a um paquímetro, o valor médio e o valor máximo de profundidade da frente de carbonatação, como descrito na especificação, e registaram-se os valores.



Figura 3.20 - Aplicação de tinta epóxida nos provetes



Figura 3.21 - Aplicação da solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% nas superfícies fracturadas

3.7.3.6. Cálculos e expressão dos resultados

A resistência à carbonatação, de cada família produzida, foi determinada através da média da profundidade de carbonatação dos 3 provetes. Essa profundidade de carbonatação, para cada provete, foi obtida através da média das 8 leituras realizadas, como se mostra na Figura 3.22.



Figura 3.22 - Medição da profundidade da frente de carbonatação

3.7.4. Resistência à penetração de cloretos

3.7.4.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de resistência à penetração de cloretos pretende avaliar a resistência do betão à migração de iões cloreto no seu interior.

O processo inicia-se com a difusão de iões cloreto na estrutura porosa do betão. A difusão pode-se caracterizar como o processo pelo qual um fluido atravessa o betão através de um gradiente de concentração, perante determinados valores de humidade.

Tal como descrito no processo de carbonatação, as armaduras no interior do betão encontram-se envoltas por uma película protectora, que na presença de cloretos acaba por também ser destruída. No entanto, os iões cloretos geram um potencial eléctrico entre pontos diferentes da armadura, facto que acelera o processo de corrosão, agravando a situação.

A velocidade de penetração vai depender de factores como a permeabilidade do betão, do teor de cloretos no meio exterior e do teor de humidade do betão.

3.7.4.2. *Normas de ensaio*

A metodologia e princípios adoptados na determinação da resistência à penetração de cloretos seguiram a especificação LNEC E 463 (2004) - “*Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*”.

3.7.4.3. *Equipamento de ensaio*

No decorrer do procedimento experimental, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- bomba de vácuo;
- braçadeira de aço inoxidável com diâmetro entre 105-115 mm;
- equipamento de migração;
- escopro;
- exsiccador;
- manga de borracha de silicone com diâmetro interno de 105 mm e 200 mm de comprimento;
- máquina de corte de disco adiamantado;
- martelo;
- paquímetro.

3.7.4.4. *Amostras*

Os provetes cilíndricos iniciais, com $\phi 100 \times 200$ mm, permaneceram na câmara húmida até 14 dias do fim do período de cura, de 28 e 91 dias. Alcançada essa idade, os provetes foram cortados em discos com 50 mm de altura, recorrendo à máquina de corte, como se mostra na Figura 3.23. Durante os restantes 14 dias, colocaram-se os provetes de ensaio na câmara seca, a 20 ± 2 °C e $60 \pm 5\%$ de humidade relativa.

Para realizar este ensaio, utilizaram-se 3 provetes, por idade de cura e para cada composição, o que perfaz um total de 60 provetes.

Todos os provetes se mantiveram 24 horas, após a betonagem, no interior dos moldes, período após o qual foram desmoldados e transportados para a devida zona de cura.

3.7.4.5. *Procedimento de ensaio*

Os provetes, com superfície seca, foram colocados no interior do exsiccador, com ambas as faces expostas, e reduziu-se a pressão, no interior deste, para valores entre 10 e 50 mbar. Passadas três horas, e com a bomba ainda ligada, cobriu-se os provetes com uma solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Manteve-se a bomba de vácuo a funcionar durante mais uma hora, antes de permitir que o ar reentrasse no exsiccador. Os provetes ficaram imersos na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante 18 ± 2 horas, à pressão atmosférica. Terminado esse período, os provetes foram retirados do exsiccador, colocados no equipamento de migração e preparou-se a solução catódica de cloreto de sódio (NaCl) e anódica de hidróxido de sódio (NaOH).



Figura 3.23 - Corte de um provete para o ensaio de resistência à penetração de cloretos

Depois de os provetes se encontrarem no interior das mangas, foram colocados no reservatório com a solução catódica e as mangas cheias com a solução anódica. Deu-se então início ao ensaio, instalando uma corrente eléctrica de 30 V em cada manga e, com o auxílio de um multímetro, mediu-se a intensidade da corrente que passava em cada uma delas. Procedeu-se à correcção da voltagem e à determinação da duração do ensaio, t , segundo os critérios da especificação. No início e no fim do ensaio, mediu-se e registou-se a temperatura da solução anódica, T_i e T_f , respectivamente.

Após retirar os provetes do interior das mangas, estes foram lavados com água corrente e partiram-se em duas metades, com o auxílio de martelo e escopro. Sobre uma das superfícies fracturadas, aplicou-se uma solução de nitrato de prata e, recorrendo a um paquímetro, mediu-se a profundidade de penetração dos iões de cloro, x_d , conforme definido na especificação.



Figura 3.24 - Equipamento de migração de cloretos



Figura 3.25 - Aplicação de nitrato de prata nas superfícies fracturadas e medição da penetração de cloretos

3.7.4.6. Cálculos e expressão dos resultados

O coeficiente de migração de cloretos, em regime não estacionário, foi determinado a partir da equação seguinte:

$$D_{nssm} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (m^2/s) \quad (3.46)$$

Sendo,

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (3.47)$$

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E}} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \times c_d}{c_0} \right) \quad (3.48)$$

Em que,

- D_{nssm} - coeficiente de migração em regime não estacionário, em m^2/s ;
- z - valor absoluto de valência do ião, para cloretos, $z = 1$;
- F - constante de Faraday, $F = 9,648 \times 10^4$ (J/(V.mol));
- R - constante dos gases perfeitos, $R = 8,314$ (J/(kmol));
- T - temperatura média entre o início e o fim do ensaio na solução anódica, em K;
- U - voltagem aplicada no circuito, em V;
- L - espessura do provete, em mm;
- x_d - valor médio da profundidade de penetração, em m;
- erf^{-1} - inverso da função erro;
- c_d - concentração de cloretos para a qual o nitrato de prata reage;
- c_0 - concentração de cloretos no cátodo;
- t - duração do ensaio em segundos.

4. Apresentação e análise dos resultados da campanha experimental

4.1. Introdução

O presente capítulo pretende apresentar e analisar de forma clara e sucinta o resultado dos ensaios desenvolvidos durante a campanha experimental.

Inicialmente, apresentam-se os valores obtidos nos ensaios aos agregados. Nestes, é possível identificar as diferenças e similaridades entre agregados primários, AP, e agregados secundários, AS, permitindo também, ainda que de forma indirecta, uma primeira noção da sua influência no comportamento do betão que os incorpora. A determinação da composição do betão realizou-se com base nos resultados obtidos nesta fase.

Seguidamente, expõem-se os resultados referentes ao betão no estado fresco. Estes, além de permitirem avaliar a conformidade do betão com o pretendido no capítulo 3.6, conseguem fornecer, através da análise de determinados parâmetros do estado fresco, uma estimativa mais aproximada do desempenho real do betão no estado endurecido.

Por fim, apresentam-se os resultados alcançados nos ensaios ao betão no estado endurecido, permitindo, deste modo, avaliar de forma mais concreta o desempenho em termos de durabilidade de betões com AS, assim como o efeito das diferentes taxas de substituição utilizadas.

Sempre que possível, procurou-se efectuar uma análise comparativa entre os resultados obtidos durante a fase experimental e os obtidos em investigações onde as mesmas propriedades foram analisadas.

4.2. Propriedades dos agregados

Durante a realização da campanha experimental, procurou-se caracterizar os diversos agregados utilizados, de forma a compreender de que modo as suas propriedades condicionam o desempenho dos betões produzidos, no que concerne à sua durabilidade.

Assim, neste subcapítulo, pretende-se interpretar os resultados dos ensaios de análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água, baridade e volume de vazios, desgaste de *Los Angeles*, teor em água total e superficial e índice de forma, a que os agregados foram submetidos.

Devido às limitações de espaço e à quantidade de agregados grossos de calcário, AGC, existente no laboratório, foi necessário recorrer a AGC previamente separados por granulometria, para campanhas experimentais anteriores. Este facto impossibilitou a realização dos ensaios de caracterização necessários, sendo, como tal, necessário recorrer aos resultados obtidos nessas campanhas.

4.2.1. Análise granulométrica

Os resultados a seguir apresentados estão de acordo com a metodologia descrita na norma NP EN 933-1 (2000), conforme descrito no subcapítulo 3.3.1. O ensaio de análise granulométrica é,

geralmente, utilizado para determinar as quantidades adequadas de cada agregado a adicionar à mistura, de forma a maximizar a compacidade do betão. No entanto, com o intuito de minimizar a variabilidade das propriedades não controladas nesta investigação, optou-se por peneirar e separar todos os agregados grossos, AG, nas suas fracções granulométricas. Este processo permite garantir curvas consideravelmente semelhantes entre todos os AG, independentemente da sua génese, e que se ajustam muito bem à curva de referência de Faury. No que respeita aos agregados finos, AF, invariáveis em todas as composições, optou-se por ajustar as curvas granulométricas à curva de referência de Faury.

Apesar de apenas as curvas granulométricas dos AF serem relevantes para esta investigação, apresentam-se os resultados do ensaio de análise granulométrica de todos os agregados, com a intenção de, assim, os melhor caracterizar.

4.2.1.1. Areia fina

Pode-se observar a análise granulométrica da areia fina no Quadro 4.1 e, no Quadro 4.2, o módulo de finura e a percentagem de finos, f , do agregado.

Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina

Massa da amostra, M_1 (g)	1453,0
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	1404,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
			Passado	Retido
	(g)	(%)	(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	0,0	0,0	100,0	0,0
5,6	0,9	0,1	99,9	-
4	1,1	0,1	99,9	0,1
2	1,8	0,1	99,7	0,3
1	6,7	0,5	99,2	0,8
0,5	367,1	26,1	73,1	26,9
0,25	856,4	61,0	12,2	87,8
0,125	163,8	11,7	0,5	99,5
0,063	5,7	0,4	0,1	99,9
Refugo	1,2	0,1	-	-
Total	1404,8	100,0		

Quadro 4.2 - Módulo de finura e percentagem de finos da areia fina

Percentagem de finos, f (%)	3,40
Módulo de finura	2,15

A curva granulométrica da areia fina pode ser observada na Figura 4.1.

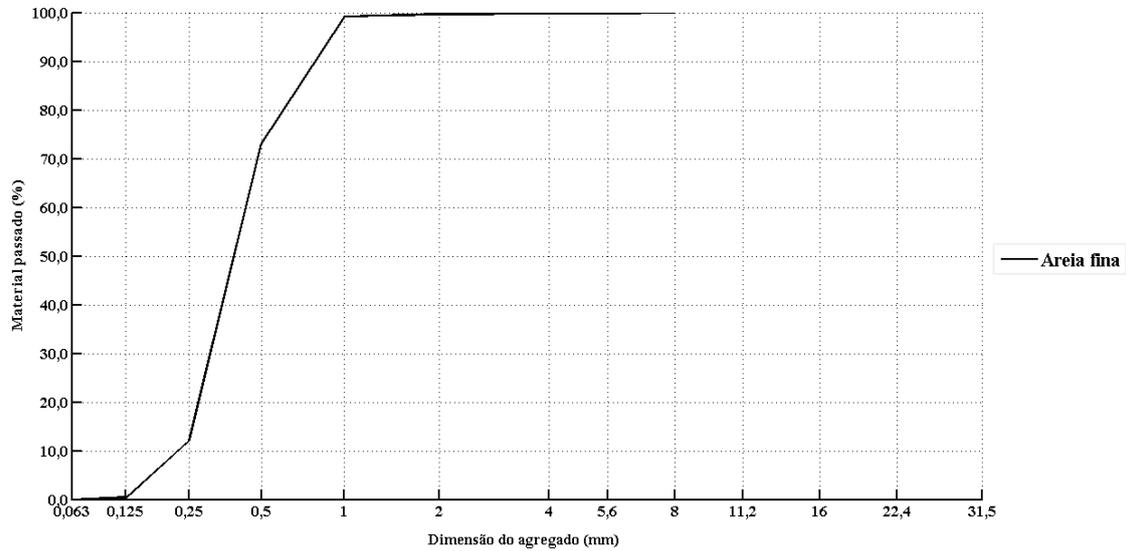


Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina

4.2.1.2. Areia grossa

No Quadro 4.3, está presente a análise granulométrica da areia grossa e, no Quadro 4.4, o seu módulo de finura e percentagem de finos, f .

Na Figura 4.2, é apresentada a curva granulométrica da areia grossa.

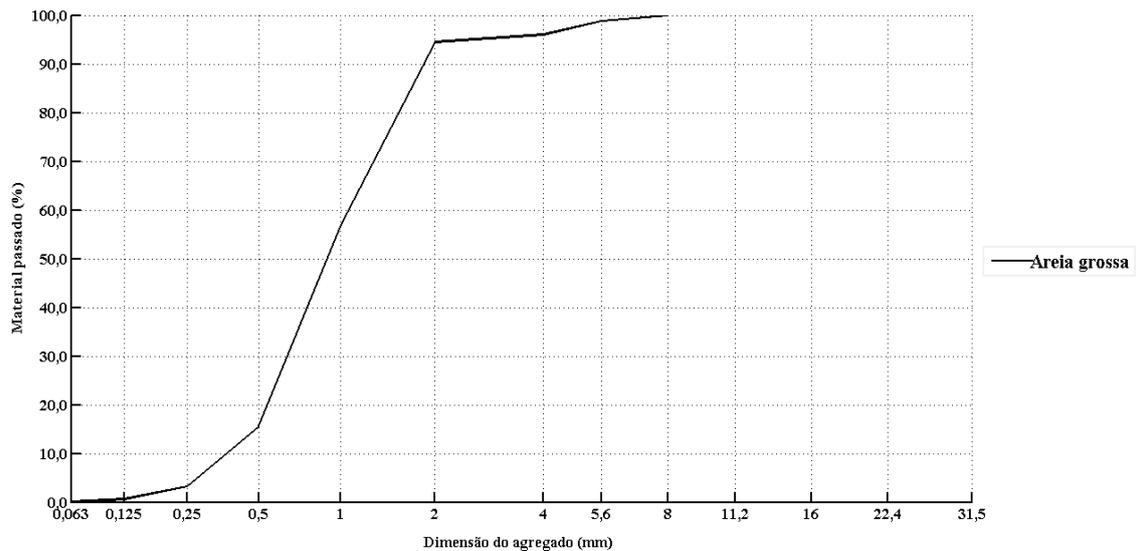


Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia grossa

Quadro 4.3 - Análise granulométrica da areia grossa

Massa da amostra, M_1 (g)	1960,0
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	1929,5

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
			Passado	Retido
	(g)	(%)	(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	0,0	0,0	100,0	0,0
5,6	21,4	1,1	98,9	-
4	53,7	2,8	96,1	3,9
2	30,5	1,6	94,5	5,5
1	722,1	37,4	57,1	42,9
0,5	799,1	41,4	15,7	84,3
0,25	239,5	12,4	3,3	96,7
0,125	48,4	2,5	0,8	99,2
0,063	12,2	0,6	0,1	99,9
Refugo	2,4	0,1	-	-
Total	1929,5	100,0		

Quadro 4.4 - Módulo de finura e percentagem de finos da areia grossa

Percentagem de finos, f (%)	1,68
Módulo de finura	3,33

4.2.1.3. Basalto

A análise granulométrica, das diferentes fracções dos agregados grossos de basalto, AGB, pode ser consultada no Quadro 4.5, enquanto que o módulo de finura e a percentagem de finos, f , podem ser consultados no Quadro 4.6. A Figura 4.3 representa as curvas granulométricas dos AGB.

Pode ser efectuada uma consulta mais completa dos resultados obtidos neste ensaio para todos os AG no Anexo B. Devido à inexistência de Brita 2, na pedreira de recolha, foi necessário recorrer a uma Brita 3 exclusivamente para a fracção 22,4-16.

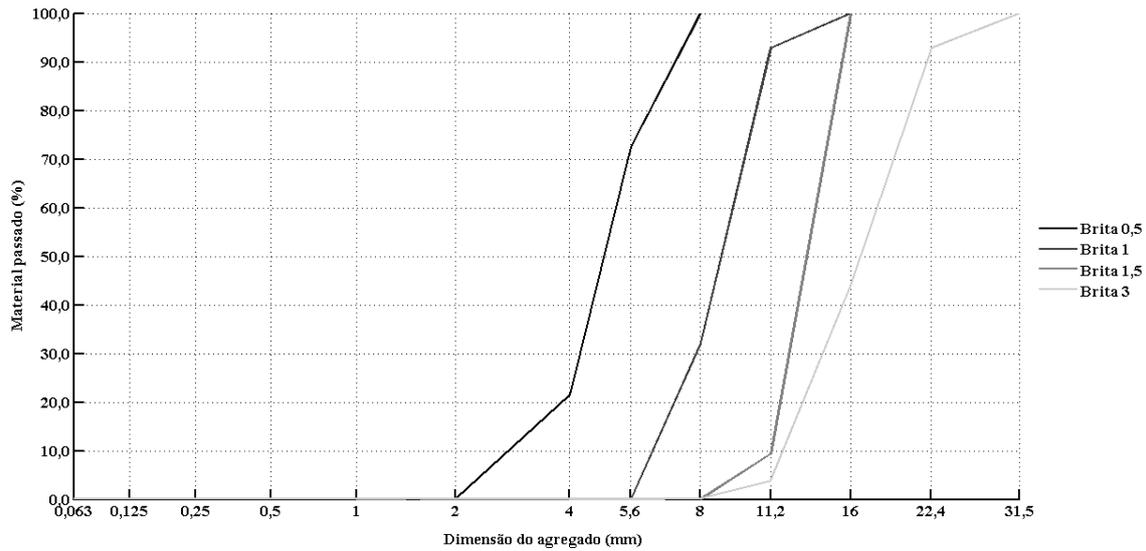


Figura 4.3 - Curva granulométrica dos AGB

Quadro 4.5 - Análise granulométrica dos AGB

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 1,5	Brita 3
Massa da amostra, M_1 (g)	1559,8	1737,6	7044,6	7158,5
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	1551,1	1734,8	7044,2	7148,8

Malha (mm)	Resíduo acumulado passado (%)			
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 1,5	Brita 3
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	92,9
16	100,0	100,0	100,0	44,0
11,2	100,0	92,9	9,4	3,9
8	100,0	32,2	0,1	0,2
5,6	72,7	0,2	0,1	0,2
4	21,5	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,1	0,1	0,1
1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
0,25	0,1	0,1	0,1	0,1
0,125	0,1	0,1	0,1	0,1
0,063	0,1	0,1	0,1	0,1

Quadro 4.6 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGB

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 1,5	Brita 3
Percentagem de finos, f (%)	0,66	0,25	0,09	0,28
Módulo de finura	5,78	6,67	6,99	7,55

4.2.1.4. Calcário

No Quadro 4.7, pode ser observada a análise granulométrica e, no Quadro 4.8, o módulo de finura e a percentagem de finos, f , referentes aos agregados grossos de calcário, AGC.

As curvas granulométricas dos AGC estão representadas na Figura 4.4.

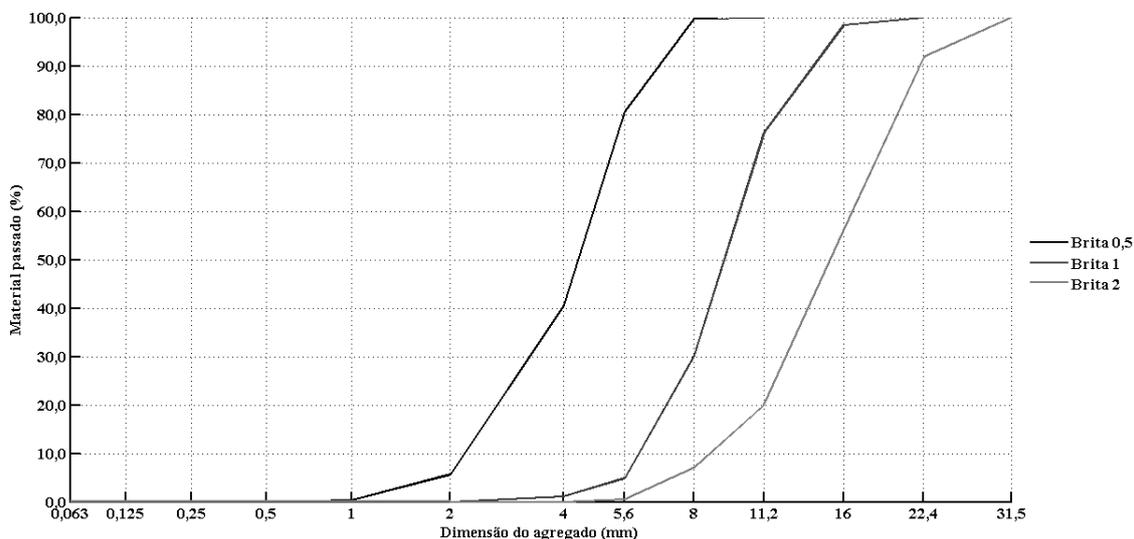


Figura 4.4 - Curva granulométrica dos AGC

Quadro 4.7 - Análise granulométrica dos AGC

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Massa da amostra, M_1 (g)	894,6	3983,9	10233,7
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	894,6	3983,8	10230,8

Malha (mm)	Resíduo acumulado passado (%)		
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	91,9
16	100,0	98,5	56,0
11,2	100,0	76,3	20,0
8	99,9	30,3	7,1
5,6	80,7	5,0	0,6
4	40,7	1,2	0,1
2	5,7	0,1	0,1
1	0,4	0,0	0,1
0,5	0,1	0,0	0,1
0,25	0,0	0,0	0,1
0,125	0,0	0,0	0,1
0,063	0,0	0,0	0,1

Quadro 4.8 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGC

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Percentagem de finos, f (%)	0,00	0,01	0,10
Módulo de finura	5,53	6,70	7,36

4.2.1.5. Granito

A análise granulométrica dos agregados grossos de granito, AGG, está patente no Quadro 4.9 e o módulo de finura e a percentagem de finos, f , no Quadro 4.10. Na Figura 4.5, estão definidas as curvas granulométricas dos AGG.

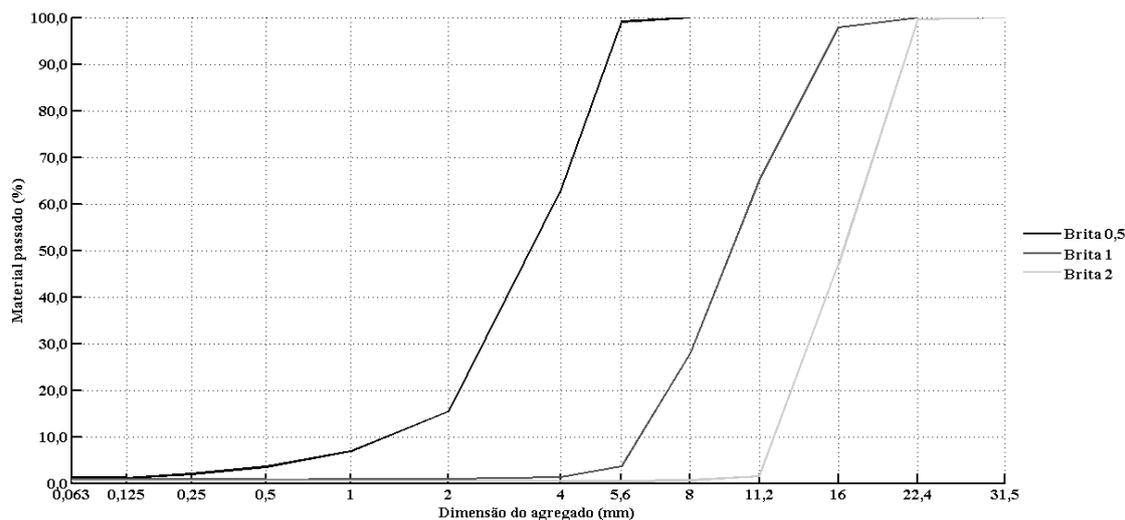


Figura 4.5 - Curva granulométrica dos AGG

Quadro 4.9 - Análise granulométrica dos AGG

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Massa da amostra, M_1 (g)	2396,3	2430,9	6851,0
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	2237,2	2404,8	6823,9

Malha (mm)	Resíduo acumulado passado (%)		
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	99,7
16	100,0	97,9	47,1
11,2	100,0	65,0	1,5
8	100,0	28,1	0,7
5,6	99,1	3,7	0,5
4	63,2	1,4	0,5
2	15,5	1,0	0,5
1	6,9	0,9	0,5
0,5	3,6	0,8	0,5
0,25	2,1	0,8	0,5
0,125	1,2	0,8	0,5
0,063	1,2	0,8	0,5

Quadro 4.10 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGG

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Percentagem de finos, f (%)	7,80	1,88	0,92
Módulo de finura	5,07	6,68	7,49

4.2.1.6. Mármore

No Quadro 4.11, pode-se consultar a análise granulométrica dos agregados grossos de mármore, AGM, e, no Quadro 4.12, o seu módulo de finura e percentagem de finos, f .

As curvas granulométricas dos AGM estão representadas na Figura 4.6.

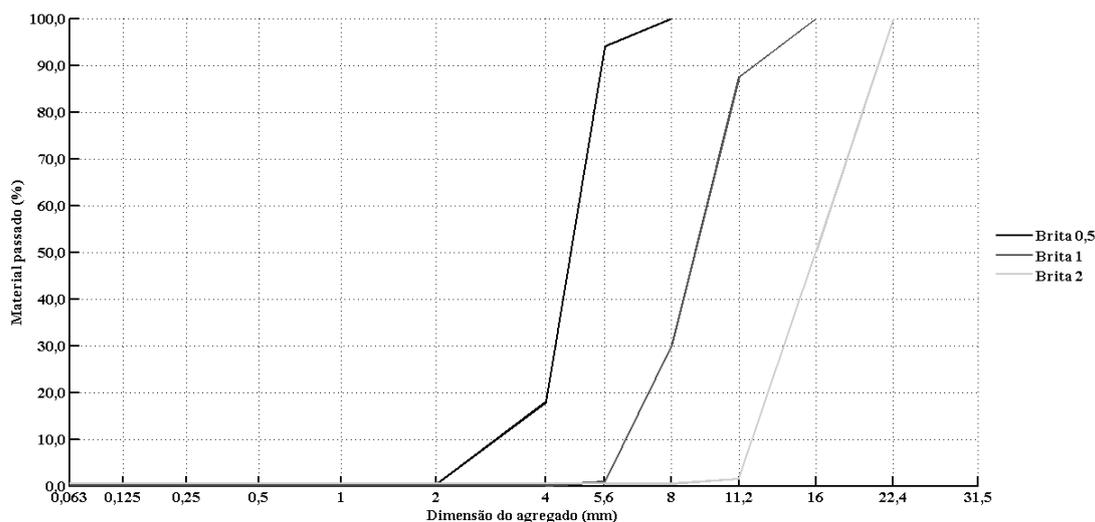


Figura 4.6 - Curva granulométrica dos AGM

Quadro 4.11 - Análise granulométrica dos AGM

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Massa da amostra, M_1 (g)	2025,4	1885,4	5872,9
Massa da amostra após lavagem, M_2 (g)	2009,2	1878,4	5821,6

Malha (mm)	Resíduo acumulado passado (%)		
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	50,1
11,2	100,0	87,5	1,6
8	100,0	30,1	0,5
5,6	94,0	1,0	0,5
4	18,0	0,2	0,5
2	0,5	0,2	0,5
1	0,4	0,2	0,5
0,5	0,3	0,2	0,5
0,25	0,3	0,2	0,5
0,125	0,2	0,2	0,5
0,063	0,2	0,2	0,5

Quadro 4.12 - Módulo de finura e percentagem de finos dos AGM

	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
Percentagem de finos, f (%)	0,99	0,54	1,37
Módulo de finura	5,80	6,69	7,46

4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

A determinação dos valores, abaixo apresentados, de massa volúmica e absorção de água respeita a norma NP EN 1097-6 (2003), de acordo com o descrito no subcapítulo 3.3.2, realizando-se procedimentos distintos para AF, de 0,063 a 4,0 mm, e para AG, de 4,0 a 31,5 mm. Com a determinação da massa volúmica impermeável, ρ_a , da massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} , da massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, ρ_{ssd} , e da absorção de água após imersão durante 24 horas, WA_{24} , conseguiu-se determinar a dosagem dos agregados, em massa, a incorporar no betão, bem como inferir numa das propriedades dos agregados que mais condiciona o desempenho do betão no estado fresco. Os resultados obtidos podem ser consultados no Quadro 4.13, e as medições e cálculos realizados no Anexo C.

Quadro 4.13 - Massa volúmica e absorção dos agregados

		ρ_a (kg/m ³)	ρ_{rd} (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	WA_{24} (%)
Areia fina		2581,8	2575,7	2584,1	0,091
Areia grossa		2623,9	2620,6	2625,1	0,048
Basalto	Brita 0,5	3011,0	2929,8	2956,7	0,918
	Brita 1	3046,8	2964,2	2991,3	0,913
	Brita 1,5	3001,0	2938,7	2959,4	0,706
	Brita 3	3031,3	2977,8	2995,4	0,591
Calcário	Brita 0,5	2735,6	2648,9	2680,5	1,193
	Brita 1	2734,6	2642,7	2676,2	1,271
	Brita 2	2699,8	2630,0	2655,8	0,982
Granito	Brita 0,5	2774,6	2649,6	2694,6	1,701
	Brita 1	2793,9	2723,8	2748,8	0,919
	Brita 2	2787,0	2740,3	2757,0	0,611
Mármore	Brita 0,5	2725,4	2665,3	2687,3	0,827
	Brita 1	2738,3	2685,6	2704,8	0,715
	Brita 2	2743,1	2710,2	2722,2	0,443

A Figura 4.7 representa graficamente os valores de massa volúmica obtidos para os AG e, a partir da sua análise, em conjunto com a do Quadro 4.13, verifica-se que os valores alcançados para as massas volúmicas dos AGM estão em concordância com os apresentados no levantamento bibliográfico. Também a similaridade entre estes valores e os das massas volúmicas dos AGC, corresponde às expectativas, conduzindo a possibilidade de o comportamento dos betões que incorporam ambos os agregados ser semelhante.

A massa volúmica dos agregados primários irá sempre depender da rocha que lhes deu origem variando, obviamente, de acordo com a composição mineralógica de cada material. Tal análise estaria fora do âmbito desta dissertação, mas ainda assim é possível constatar que o basalto, entre todos os agregados, apresenta o maior valor de massa volúmica, muito provavelmente pela sua composição rica em minerais ferromagnesianos, como as piroxenas ou a olivina, de acordo com Rutley (1916). Apesar de a génese ser semelhante à do basalto, o granito é constituído por minerais feldspáticos, que apresentam uma percentagem de elementos pesados inferior à dos ferromagnesianos, tornando-se assim menos densos. No entanto, é o processo de formação do calcário que origina as rochas com piores características nesta propriedade. Estas resultam dos fenómenos de meteorização na superfície terrestre, que contribuem para a deposição de precipitados inorgânicos nas bacias de sedimentação onde, juntamente com alguma actividade orgânica, são solidificados por compactação e cimentação, originando rochas menos densas e mais porosas.

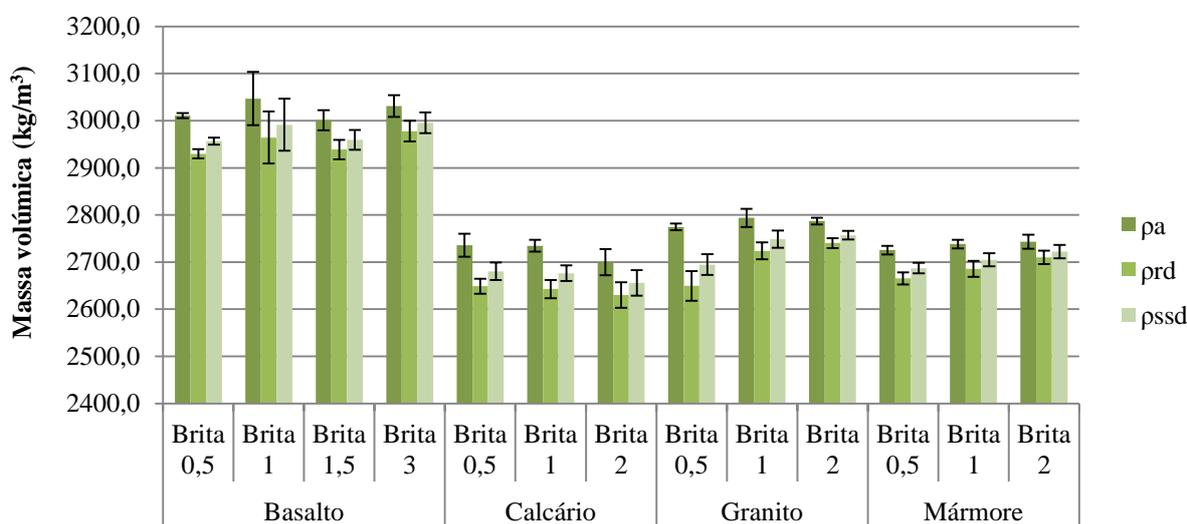


Figura 4.7 - Massa volúmica dos AG

No que se refere à absorção de água dos AG, representada na Figura 4.8, todos apresentam valores que se podem considerar reduzidos, e como tal desprezáveis para o cálculo da relação a/c efectiva do betão. Como esperado, pelo levantamento bibliográfico, os AGM apresentam a mais baixa absorção de água, seguidos pelos AGB. Este facto deve-se à matriz densa característica da génese das rochas que lhes deram origem.

A comparação da absorção de água desta dissertação, obtida através da média dos valores registados para as diferentes fracções granulométricas de cada agregado, com a de estudos anteriores, patente no Quadro 4.14, demonstra que os AGG desta campanha são os únicos que apresentam valores superiores à média dos restantes estudos. Este facto pode dever-se à fraca qualidade do material recolhido, mas também à dificuldade de identificar a transição da superfície do agregado de húmida para seca, requisito do procedimento experimental, especialmente notado para a brita 0,5. Nesta propriedade, os AGC apresentaram os piores resultados.

Quadro 4.14 - Comparação entre a absorção de água dos AG da presente dissertação e de estudos anteriores

Autores	Absorção de água (%)			
	Basalto	Calcário	Granito	Mármore
Binici <i>et al.</i> (2008)	-	2,30	1,50	1,40
Pereira <i>et al.</i> (2009)	1,50	2,80	0,30	0,05
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	-	-	-	0,39
Média	1,50	2,55	0,90	0,92
André (2012)	0,78	1,15	1,08	0,66

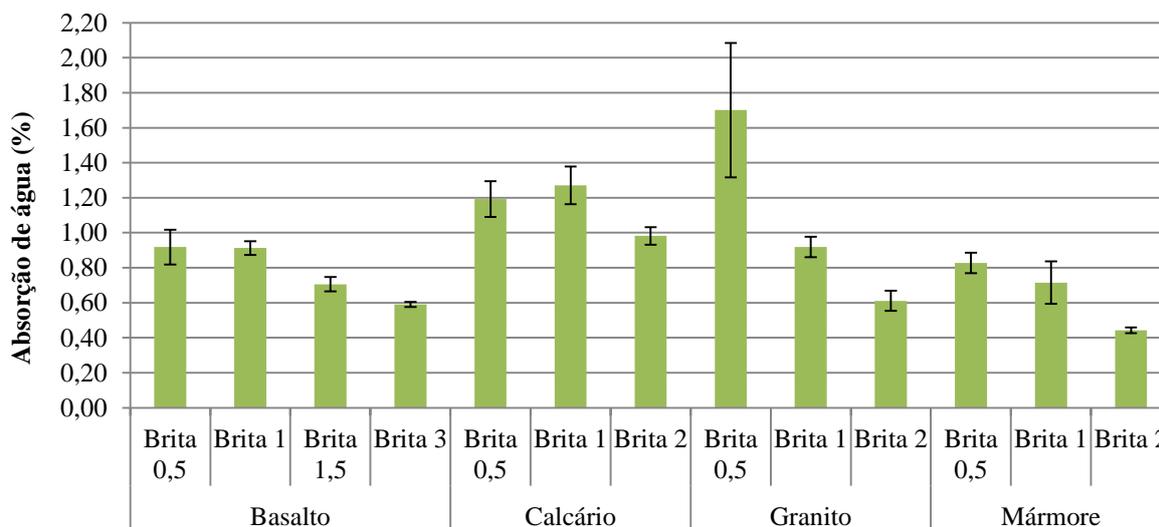


Figura 4.8 - Absorção de água dos AG

4.2.3. Baridade e volume de vazios

Conforme descrito no subcapítulo 3.3.3, o ensaio de determinação da baridade e percentagem de vazios foi realizado segundo a metodologia adoptada na norma NP EN 1097-3 (2003).

Quadro 4.15 - Baridade e percentagem de vazios dos agregados

		ρ_b (kg/m ³)	ρ (%)
Areia fina		1500,0	41,76
Areia grossa		1543,0	41,12
Basalto	Brita 0,5	1408,5	51,92
	Brita 1	1470,3	50,40
	Brita 1,5	1507,9	48,69
	Brita 3	1514,1	49,16
Calcário	Brita 0,5	1438,3	45,70
	Brita 1	1424,9	46,08
	Brita 2	1426,2	45,77
Granito	Brita 0,5	1383,6	47,78
	Brita 1	1325,5	51,34
	Brita 2	1339,7	51,11
Mármore	Brita 0,5	1313,6	50,71
	Brita 1	1378,1	48,69
	Brita 2	1363,3	49,70

Os valores obtidos neste ensaio para a baridade, ρ_b , e percentagem de vazios, ϑ , estão indicados no Quadro 4.15 e as medições e cálculos efectuados podem ser consultados no Anexo D.

Como esperado, entre os AG, após a análise da massa volúmica, os AGB apresentam um valor da baridade consideravelmente superior ao dos restantes, como se comprova na Figura 4.9.

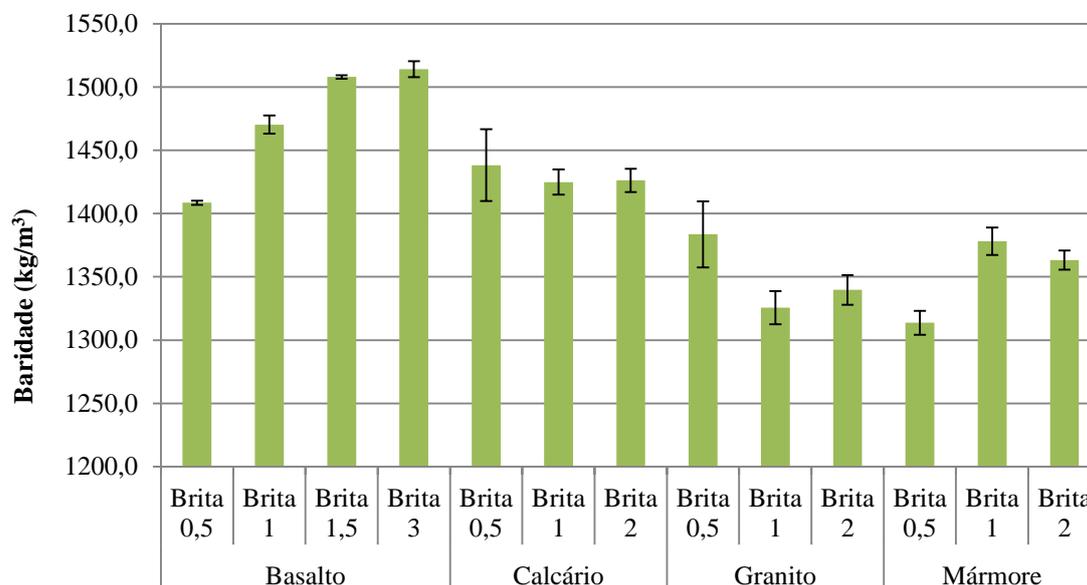


Figura 4.9 - Baridade dos AG

Constata-se, também, que os AGC surgem com uma baridade superior à dos AGG e AGM, contrariando os resultados obtidos na massa volúmica. Este facto pode dever-se à reduzida diferença de valores de massa volúmica entre estes, aliada à maior continuidade da curva granulométrica deste agregado, como se verificou no subcapítulo 4.2.1, o que favorece um melhor arranjo espacial das partículas e, conseqüentemente, uma menor percentagem de vazios, observando-se esse facto na Figura 4.10.

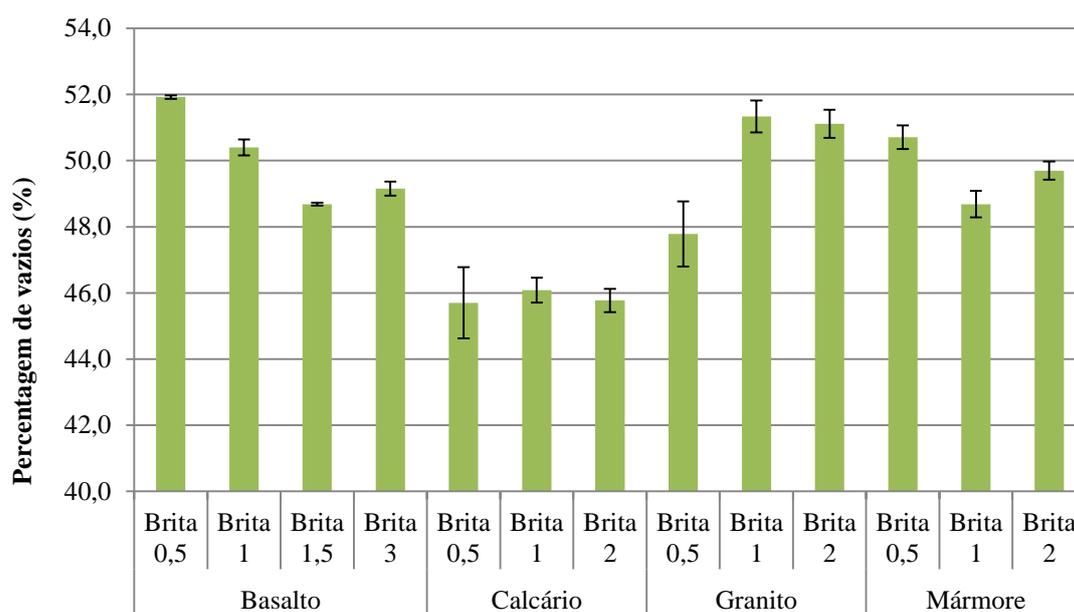


Figura 4.10 - Percentagem de vazios dos AG

4.2.4. Desgaste de *Los Angeles*

O ensaio de desgaste de *Los Angeles*, conforme descrito no subcapítulo 3.3.4, realizou-se segundo a metodologia e princípios recomendados pela especificação LNEC E 237 (1970).

Conforme estipulado na norma, este ensaio só é aplicável a partículas com dimensões compreendidas entre 2,38 e 76,1 mm. Assim, apenas se determinou a perda em massa dos AG, quando submetidos ao processo abrasivo. Nesta campanha experimental em concreto, a distribuição granulométrica da brita 1, juntamente com as quantidades recolhidas, não foram suficientes para formar uma composição definida na especificação. Como tal, não foi possível realizar o ensaio para esta fracção. Os valores obtidos na realização do ensaio estão presentes no Quadro 4.16 e as restantes medições e cálculos efectuados são apresentados no Anexo E.

Quadro 4.16 - Desgaste de *Los Angeles* dos AG

	Basalto			Calcário			Granito		Mármore	
	Brita 0,5	Brita 1,5	Brita 3	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2	Brita 0,5	Brita 2	Brita 0,5	Brita 2
P_d (%)	14,79	9,22	11,28	34,16	30,84	31,92	27,42	21,94	38,52	39,10

Pela análise dos resultados, verifica-se que os AGB são os menos susceptíveis ao desgaste de *Los Angeles*, seguidos pelos AGG, o que, mais uma vez, torna crível que a composição mineralógica seja o factor determinante para estes valores. Como tal, não surpreende que a perda de massa dos AGC seja consideravelmente superior à dos anteriores, bem como os AGM apresentarem o maior valor de desgaste, possivelmente devido à sua composição rica em minerais mais frágeis e sensíveis a acções mecânicas. Ainda assim, os valores médios, de cada fracção granulométrica dos AG em estudo, estão em concordância com o levantamento bibliográfico, como se comprova no Quadro 4.17, e o seu valor é inferior ao limite de 50% para incorporar em betões estruturais.

Quadro 4.17 - Comparação entre o desgaste de *Los Angeles* dos AG da presente dissertação e de estudos anteriores

Autores	Desgaste de <i>Los Angeles</i> , P _d (%)			
	Basalto	Calcário	Granito	Mármore
Pereira <i>et al.</i> (2009)	15,0	37,0	26,0	41,0
André (2012)	11,8	32,3	24,7	38,8

4.2.5. Teor em água total

Tal como exposto no subcapítulo 3.3.5, o ensaio de teor em água total, w_t, foi realizado de acordo com a norma NP 956 (1973). Com este ensaio, pretendeu-se conhecer a quantidade de humidade que os agregados possuíam na data de recolha, uma vez que estiveram expostos ao ambiente exterior. Esta grandeza é geralmente de vital importância para o estudo da composição de um betão, visto que influencia a quantidade de água a adicionar ao mesmo. No entanto, como foi dito, os agregados utilizados na produção de betão foram previamente secos, pelo que a sua apresentação é

meramente informativa. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.18 e as restantes medições e cálculos no Anexo F.

Quadro 4.18 - Teor em água total dos AG

	Basalto				Granito			Mármore		
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 1,5	Brita 3	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
w_t (%)	0,89	0,58	0,53	0,57	2,44	0,66	0,21	0,05	0,02	0,02

4.2.6. Índice de forma

O ensaio de determinação do índice de forma foi realizado conforme preconizado na norma NP EN 933-4 (2002), como indicado no subcapítulo 3.3.6. Esta norma estabelece que o ensaio apenas seja realizado para agregados cujas dimensões estejam compreendidas entre 4 e 63 mm, pelo que não foi realizado às areias, fina e grossa. Os resultados obtidos para o índice de forma, SI, podem ser consultados no Quadro 4.19 e as medições e cálculos no Anexo G.

Quadro 4.19 - Índice de forma dos AG

	Basalto				Calcário			Granito			Mármore		
	Brita 0,5	Brita 1	Brita 1,5	Brita 3	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2	Brita 0,5	Brita 1	Brita 2
SI (%)	29,4	25,4	17,0	21,8	17,6	18,2	12,7	24,9	48,1	40,1	30,1	31,5	28,8

Da análise do quadro anterior, constata-se que, à exceção dos AGC, os agregados apresentam valores de índice de forma superiores a 20%, o que, indubitavelmente, poderá causar problemas ao nível da trabalhabilidade do betão no estado fresco, pois as partículas mais angulosas conduzem a um aumento do ângulo de atrito interno e a um pior arranjo espacial das partículas, o que contribuirá para um betão, no estado endurecido, mais poroso e como tal menos durável. O valor de 20% surge como o limite máximo recomendável para agregados reciclados a incorporar em betões de classe igual ou superior a C20/25, de acordo com a *Technical guideline for recycled aggregate concrete in Hungary*. O mesmo guia técnico estabelece ainda 40% como o valor máximo para betões entre as classes C8/10 e C16/20, o que demonstra que os AGG não são os mais apropriados para a produção de betão.

No entanto, os agregados recolhidos não se destinavam exclusivamente à incorporação em betão e a sua qualidade nem sempre era a melhor, o que, no caso desta campanha experimental, não é muito relevante, uma vez que desta forma consegue-se simular melhor a variabilidade da utilização de material reciclado. Certamente um melhor processo de britagem conduzirá a melhores valores do índice de forma, apesar de as rochas com uma matriz mais densa conduzirem preferencialmente a agregados mais angulares.

4.3. Propriedades do betão no estado fresco

Após terminada a caracterização dos agregados, e com as primeiras noções de como as suas propriedades podem interferir no comportamento do betão no estado endurecido, iniciou-se a produção das diversas famílias de betões.

Assim, surgem os ensaios de abaixamento do cone de Abrams e de massa volúmica, que pretendem apresentar as primeiras propriedades do betão, ainda que no estado fresco.

Neste subcapítulo, faz-se então a análise aos resultados obtidos e tenta-se enquadrá-los nas restantes campanhas do levantamento bibliográfico.

4.3.1. Abaixamento do cone de Abrams

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams obedece à norma NP EN 12350-2 (2002), como definido no subcapítulo 3.6.1. Com a realização deste ensaio, foi possível avaliar a consistência do betão no estado fresco, tendo sido, pelas razões mencionadas, fixado o resultado num intervalo de 115 ± 10 mm, contido na classe de consistência S3 (100 a 150 mm). Os valores obtidos para o abaixamento do cone de Abrams, de todas as famílias produzidas, podem ser consultados no Quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Resultados do ensaio de abaixamento do cone de Abrams

Taxa de Substituição	0			20			50			100
Família do betão	BRC	BRG	BRB	BC20	BG20	BB20	BC50	BG50	BB50	BRM
Abaixamento (mm)	120,0	108,5	120,0	122,5	108,5	125,0	117,0	109,0	112,5	123,0

Uma representação gráfica destes resultados pode ser observada na Figura 4.11.

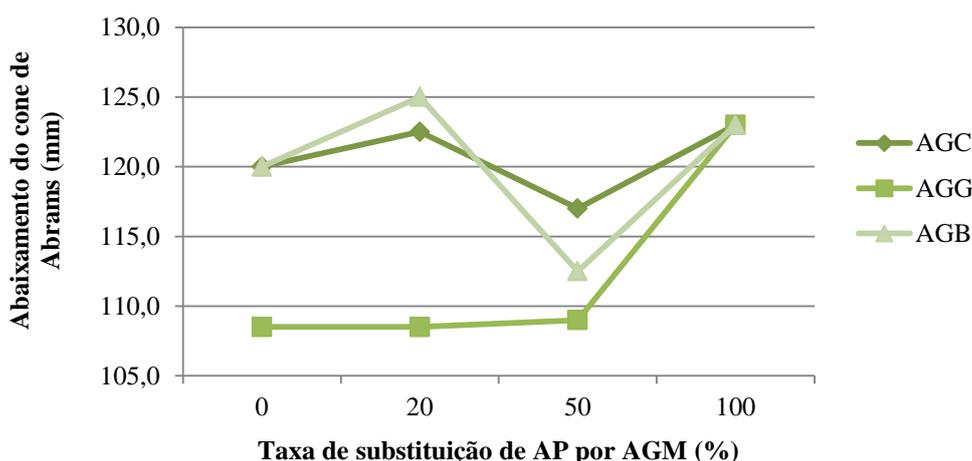


Figura 4.11 - Abaixamento do cone de Abrams dos diversos betões

Contrariamente ao esperado, após a análise ao levantamento bibliográfico, não é possível observar uma tendência marcadamente decrescente, com o aumento da taxa de substituição de AP por AGM, como os vários autores obtiveram. No caso dos betões produzidos com AGG, a introdução de AGM não teve uma influência visível ao nível da trabalhabilidade, provavelmente devido à

significativa contribuição da forma dos AGG no aumento do ângulo de atrito interno. Nos betões produzidos com AGB e AGC, observa-se uma ligeira melhoria da trabalhabilidade para uma taxa de substituição de 20% e uma diminuição para uma taxa de substituição de 50%. Este facto pode dever-se à reduzida absorção dos AGM, que juntamente com a sua superfície lisa, vai contribuir para uma maior fluidez do betão, para pequenas quantidades, sobrepondo-se aos efeitos provocados pelo índice de forma e distribuição granulométrica, de cada fracção, em quantidades superiores, conduzindo, provavelmente, a uma mistura menos compacta e, como tal, menos trabalhável. O resultado deste ensaio é variável, dependendo fortemente de factores como o processo de mistura, as condições ambientais e o próprio procedimento experimental, sendo precipitado concluir sobre estes resultados sem eliminar estas variáveis. Apesar de todas as precauções, de forma a garantir que o ensaio fosse realizado imediatamente após o processo de mistura ter terminado, seguindo criteriosamente a norma e de ser realizado sempre pelo mesmo ensaiador, simples factores, como a compactação ou a quantidade de agregados introduzidos no molde, podem influenciar significativamente o valor do abaixamento, gerando resultados díspares para a mesma família produzida. Ainda que este ensaio seja uma boa aproximação da verdadeira trabalhabilidade, questões como estas poderiam conduzir a uma formulação errada dos betões, introduzindo variáveis difíceis de controlar.

4.3.2. Massa volúmica

Conforme exposto no subcapítulo 3.6.2, o ensaio para a determinação da massa volúmica do betão no estado fresco adoptou a metodologia proposta pela norma NP EN 12350-6 (2002). Os resultados obtidos para esta propriedade estão expostos na Figura 4.12.

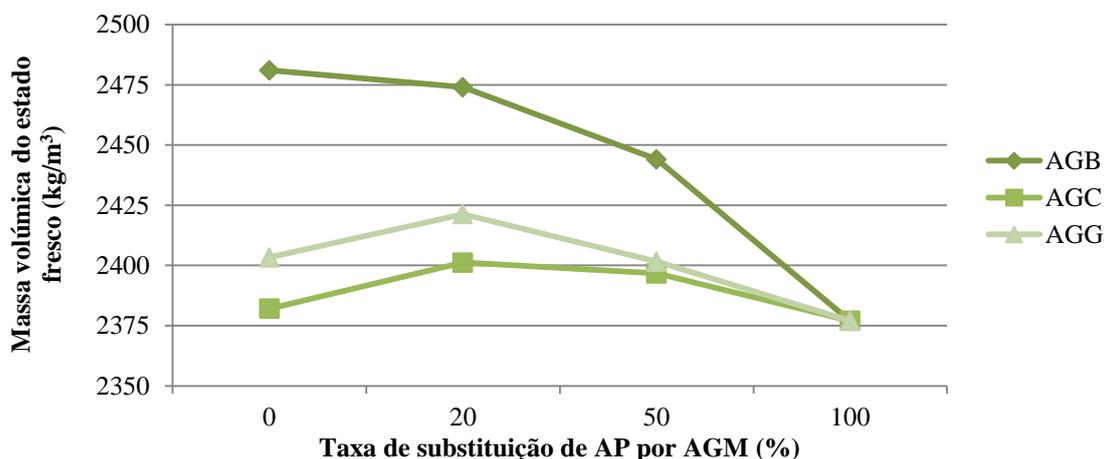


Figura 4.12 - Massa volúmica no estado fresco dos diversos betões

Através da observação desta figura, verifica-se que os AGB, tal como esperado, produzem o betão com a massa volúmica mais elevada. Esta vai diminuindo com o aumento da taxa de substituição por AGM, certamente, devido à diferença considerável de massas volúmicas entre ambos. Relativamente aos betões que incorporam AGG ou AGC, constata-se que as suas massas volúmicas são similares e não variam significativamente com a introdução de AGM. Esta era uma situação relativamente previsível,

tendo em conta que todos os agregados possuem massas volúmicas semelhantes e que os betões foram produzidos com a mesma trabalhabilidade, sem necessidade de adição de água. A pequena subida no valor da massa volúmica, registada para uma taxa de substituição de 20%, deve-se, possivelmente, à melhoria do arranjo espacial das partículas, causando uma maior compacidade, tal como observado para o abaixamento do cone de Abrams. Quanto ao BRM, tal como o levantamento bibliográfico indicava, corresponde a um betão comum e os seus valores de massa volúmica são, em tudo, semelhantes aos do BRC. No Quadro 4.21, pode-se observar as massas volúmicas de cada família de betão produzida, assim como a variação deste em relação ao BR de cada família.

Quadro 4.21 - Variação da massa volúmica no estado fresco com a substituição de AP por AGM

Betão	Massa volúmica (kg/m ³)	Variação (%)	Betão	Massa volúmica (kg/m ³)	Variação (%)	Betão	Massa volúmica (kg/m ³)	Variação (%)
BRB	2481	0,0	BRC	2382	0,0	BRG	2403	0,0
BB20	2474	-0,3	BC20	2401	0,8	BG20	2421	0,7
BB50	2444	-1,5	BC50	2397	0,6	BG50	2402	-0,1
BRM	2377	-4,2	BRM	2377	-0,2	BRM	2377	-1,1

Com este quadro, verifica-se que a variação mais significativa ocorre para a substituição de 100% de AGB por AGM, correspondente a 4,2%. É possível ainda observar que a diferença de massa volúmica entre o BRC e o BRM é de apenas 0,2%, o que pode, mais uma vez, indicar a semelhança do comportamento destes no estado endurecido.

4.4. Propriedades do betão no estado endurecido

Terminada a produção das diversas famílias de betões, e alcançada a idade definida no procedimento experimental de cada uma das normas, realizaram-se os ensaios ao betão no estado endurecido, fornecendo, pela primeira vez, informações reais e específicas sobre o desempenho do betão em termos de durabilidade. Assim, neste subcapítulo, vai proceder-se à análise dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão, de absorção de água por capilaridade, de resistência à carbonatação e de resistência à penetração de cloretos, tentando enquadrá-los nos restantes estudos bibliográficos.

Antes desta análise, vai fazer-se uma pequena referência aos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, incluídos na dissertação realizada em paralelo por Pedro Martins, pois são, comumente, utilizados como uma medida indirecta da qualidade e consequente durabilidade dos betões.

4.4.1. Resistência à compressão

O ensaio para determinar a resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2003) e tem como finalidade a determinação da capacidade resistente dos diversos

betões produzidos, quando sujeitos a uma tensão uniforme de compressão. Como referido, a resistência à compressão não é, por si, uma propriedade que caracterize directamente a durabilidade de um betão. No entanto, é inúmeras vezes utilizada na caracterização da qualidade dos betões, bem como na avaliação indirecta da durabilidade destes. Assim, estes resultados foram analisados devido à sua relevância e utilizados como medida comparativa com os obtidos nos ensaios de durabilidade, sempre que se torne conveniente. Os valores de resistência à compressão aos 28 dias, assim como a sua variação relativamente ao betão de referência de cada família são apresentados no Quadro 4.22.

Quadro 4.22 - Variação da resistência à compressão aos 28 dias com a substituição de AP por AGM

Betão	$f_{cm\ 28}$ (MPa)	Variação (%)	Betão	$f_{cm\ 28}$ (MPa)	Variação (%)	Betão	$f_{cm\ 28}$ (MPa)	Variação (%)
BRB	45,9	0,0	BRC	43,4	0,0	BRG	46,6	0,0
BB20	44,0	-4,2	BC20	43,2	-0,5	BG20	43,7	-6,2
BB50	44,1	-3,9	BC50	44,2	1,8	BG50	41,3	-11,4
BRM	41,8	-9,0	BRM	41,8	-3,7	BRM	41,8	-10,3

Da observação do Quadro 4.22, verifica-se que o BRM apresenta, de facto, um valor de resistência à compressão inferior aos restantes, sendo 10,3% a variação mais significativa relativamente aos AGG. No entanto, esse valor de 41,8 MPa, segundo os critérios de conformidade da NP EN 206-1 (2007), corresponde a uma classe de resistência C35/45, superior ao requerido na sua formulação, C30/37. Tal facto deve-se ao desvio padrão adoptado para determinar o valor médio de resistência à compressão, consideravelmente superior ao obtido nesta campanha experimental, para o caso do BRM apenas 1,28 MPa, o que conduziu a uma dosagem de cimento superior à estritamente necessária.

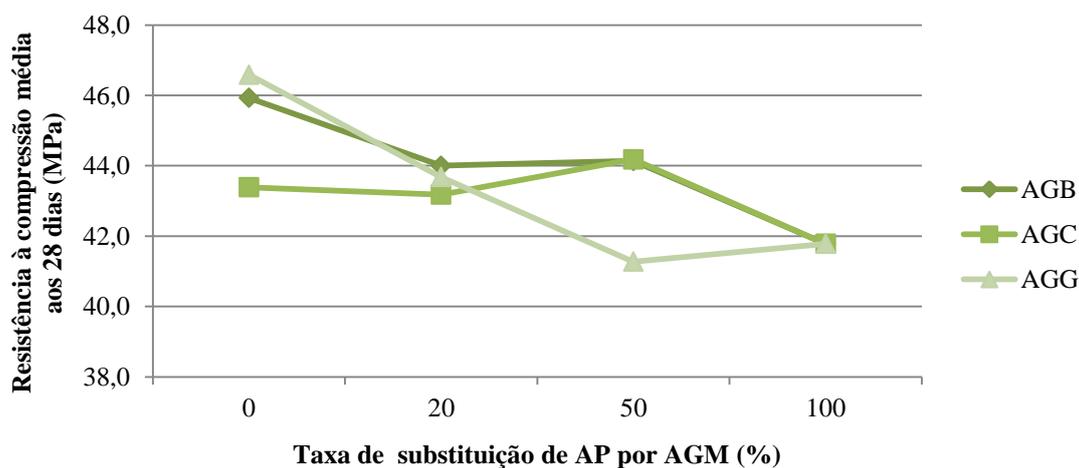


Figura 4.13 - Resistência à compressão média aos 28 dias dos diversos betões

Pela análise da Figura 4.13, pode-se observar a tendência predominantemente decrescente da resistência à compressão, com o aumento da taxa de substituição de AP por AGM. Apesar de, em geral, constatar-se uma diminuição da resistência à compressão dos betões com a incorporação de AGM, não significa que estes condicionem o desempenho do betão estrutural relativamente à sua durabilidade, uma

vez que é possível existir um elemento de betão com um elevado valor de resistência à compressão e a sua durabilidade ser reduzida se a camada de recobrimento das armaduras for pequena.

4.4.2. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a metodologia apresentada na especificação LNEC E 394 (1993), conforme descreve o subcapítulo 3.7.2.

O resultado deste ensaio permitiu caracterizar a porosidade aberta na matriz cimentícia do betão, aos 28 dias de idade.

Esta porosidade pode ser originada, principalmente, pela colocação excessiva de água na amassadura, que não é consumida nas reacções de hidratação do cimento, pelo ar retido na mistura após o processo de vibração e pela absorção dos respectivos agregados. Os resultados obtidos para a absorção de água nos diversos betões produzidos são apresentados no Quadro 4.23 e as medições e cálculos intermédios no Anexo H.

Quadro 4.23 - Variação da absorção de água por imersão com a substituição de AP por AGM

Betão	Absorção por imersão (%)	Variação (%)	Betão	Absorção por imersão (%)	Variação (%)	Betão	Absorção por imersão (%)	Variação (%)
BRB	13,6	0,0	BRC	14,1	0,0	BRG	13,8	0,0
BB20	14,4	5,8	BC20	13,8	-2,3	BG20	13,6	-1,6
BB50	14,4	5,8	BC50	13,3	-5,4	BG50	14,0	1,9
BRM	14,0	3,0	BRM	14,0	-0,8	BRM	14,0	1,5

Pela observação dos valores do Quadro 4.23, pode verificar-se que a introdução de AGM não interfere significativamente na absorção de água dos betões produzidos com os AP, apresentando características semelhantes. Com os resultados a variar entre -5,4 e 5,8%, é possível afirmar-se que todas as misturas apresentam um valor de absorção bastante aproximado. Tal pode dever-se, não só à fraca absorção por parte de todos os agregados incorporados na mistura, mas também a uma similaridade a nível microestrutural entre os betões produzidos, aspecto que não foi avaliado no decorrer desta campanha experimental.

Ainda assim, contrariando a hipótese proposta no subcapítulo 2.5.4, a Figura 4.14 demonstra que os AGM não produzem o betão com a menor absorção de água, e a sua introdução, à excepção dos betões com AGC, não diminui a absorção por imersão dos restantes betões. Os resultados apresentados nesta figura estão de acordo com os obtidos por Pereira *et al.* (2009), para a absorção por imersão com vácuo (%), mais eficiente para a determinação real da absorção dos diversos betões.

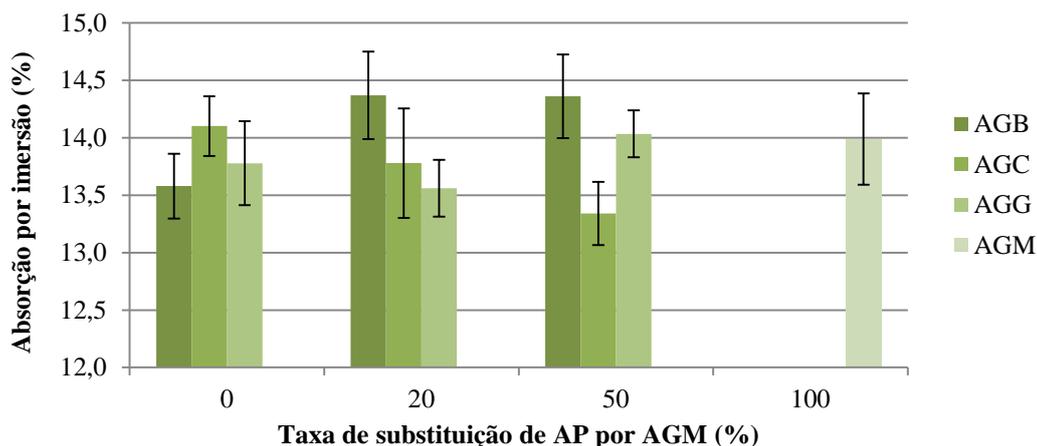


Figura 4.14 - Absorção de água por imersão dos diversos betões

Na Figura 4.15, pretende-se ilustrar a variação da média das absorções de água por imersão obtidas para cada percentagem de substituição de AP por AGM.

Apesar de a absorção média apresentar uma ligeiríssima tendência linear crescente, com o aumento da taxa de substituição, apresentando um coeficiente de determinação de 0,93, a variação dos seus valores encontra-se dentro do desvio padrão, o que parece indicar que o aumento da taxa de substituição de AP por AGM não influencia esta grandeza.

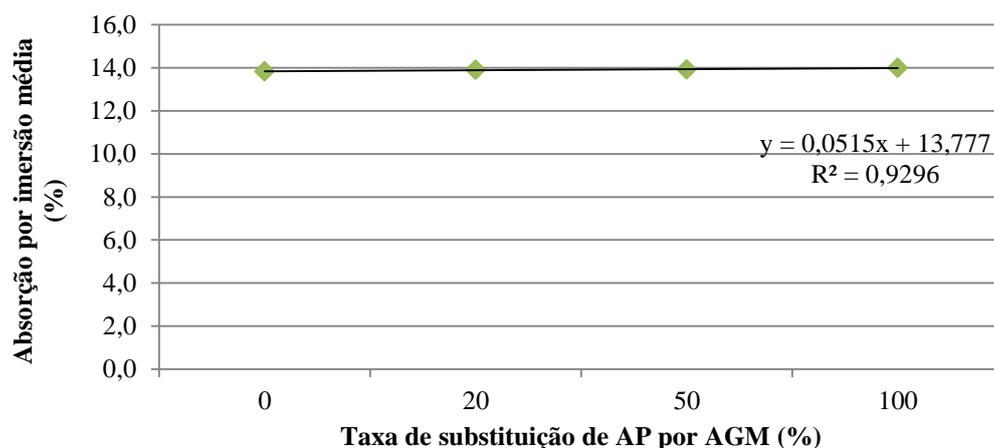


Figura 4.15 - Variação da absorção por imersão média com a taxa de substituição de AP por AGM

Diversos autores, como Ferreira (2000) ou Fernandes (2011), entre outros, obtiveram relações lineares entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias. Nesta campanha experimental, como se constata pela Figura 4.16, a absorção de água por imersão revela ser insensível ao aumento da resistência à compressão, contrariando o registado pelas outras investigações, não existindo uma relação estatisticamente relevante.

Durante a realização do levantamento bibliográfico, foi possível verificar a existência de estudos sobre a variação da relação entre as absorções de água por imersão com a relação entre as massas volúmicas ponderadas dos agregados reciclados. Entre estes surgem os trabalhos de Alves (2007), que investiga a influência da incorporação de agregados reciclados no comportamento do betão a nível nacional, Robles (2007), para uma investigação semelhante a nível internacional,

Amorim (2008), que estuda a influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados e Bravo (2009), que avalia o desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados de borracha.

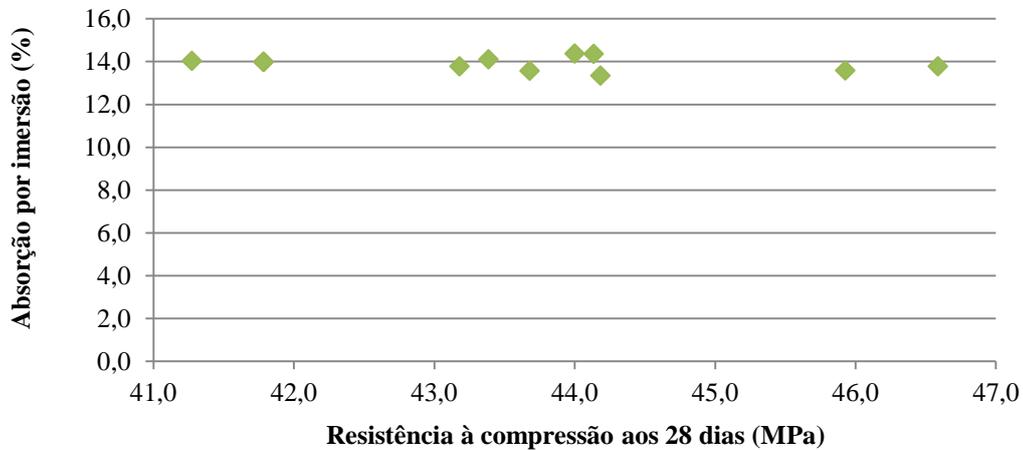


Figura 4.16 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados destas investigações, bem como da presente campanha, podem ser observados na Figura 4.17, onde se verifica que, de forma semelhante aos estudos referidos, a tendência é crescente. Embora a diminuição da massa volúmica afecte, de forma menos significativa, o aumento da absorção de água por imersão, a relação apresenta, de igual modo, um coeficiente de determinação reduzido, afastando a hipótese de ser estatisticamente significativa.

A Figura 4.18 demonstra que a relação entre as absorções de água por imersão do betão diminui com a diminuição da relação entre a absorção de água ponderada dos agregados, tal como seria esperado. No entanto, com o coeficiente de determinação de 0,0288 mostra que a relação existente não é estatisticamente significativa.

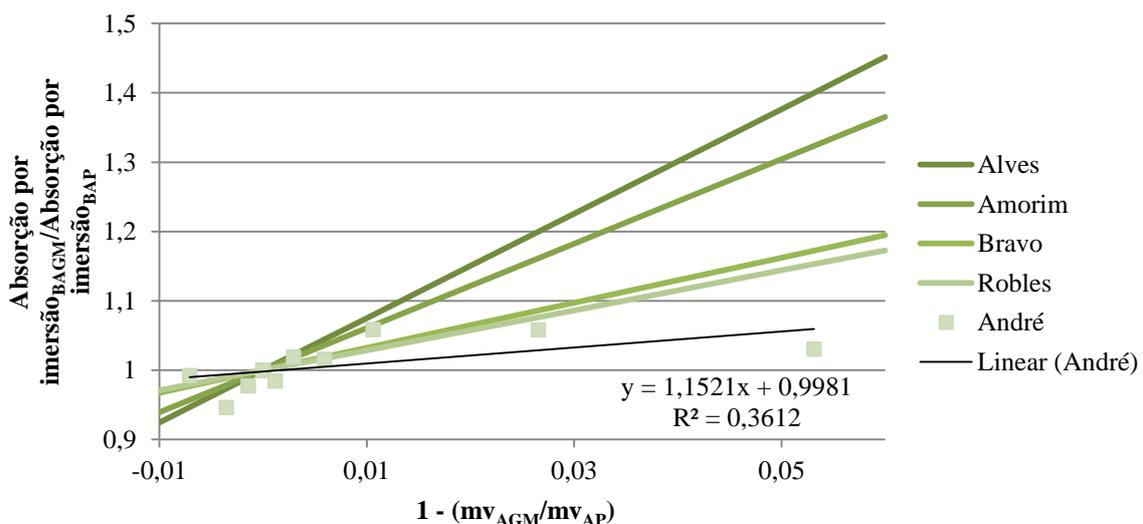


Figura 4.17 - Variação da relação entre absorções de água por imersão do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados

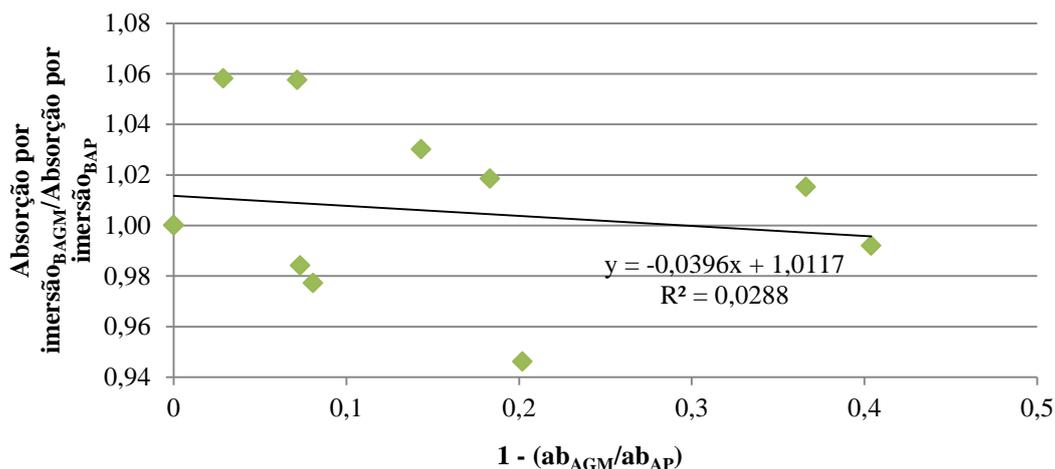


Figura 4.18 - Variação da relação entre absorções de água por imersão do betão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados

4.4.3. Absorção de água por capilaridade

Como descrito no subcapítulo 3.7.3, a determinação do valor de absorção de água por capilaridade dos betões produzidos foi feita segundo a metodologia proposta na especificação LNEC E 393 (1993).

A absorção por capilaridade consiste na penetração de um fluido, através do gradiente de pressões existente entre a superfície livre dos líquidos e a superfície dos mesmos líquidos no interior dos vasos capilares do betão, sendo tanto maior quanto menores forem os diâmetros dos poros. O conhecimento desta grandeza, bem como da absorção por imersão, é fundamental para o conhecimento da durabilidade de um betão, uma vez que permite estimar a facilidade com que os agentes agressivos penetram neste. Nesse sentido, os resultados alcançados para a absorção de água por capilaridade e a altura de ascensão capilar para os betões produzidos são apresentados no Quadro 4.24, enquanto que as medições e cálculos intermédios estão dispostos no Anexo I.

Quadro 4.24 - Variação da absorção e da altura de água por capilaridade às 72 horas com a substituição de AP por AGM

Betão	Absorção de água por capilaridade às 72 horas (g/mm ² x 10 ⁻⁴)	Variação (%)	Altura de água por ascensão capilar às 72 horas (mm)	Variação (%)
BRB	7,2	0,0	17,4	0,0
BB20	10,0	38,2	15,8	-9,0
BB50	12,1	67,7	20,5	18,0
BRM	8,0	10,8	15,4	-11,5
BRC	14,2	0,0	21,3	0,0
BC20	11,7	-17,4	12,6	-40,6
BC50	13,3	-6,7	19,3	-9,1
BRM	8,0	-43,8	15,4	-27,6
BRG	13,6	0,0	31,2	0,0
BG20	9,4	-31,0	16,3	-47,9
BG50	11,6	-14,5	16,0	-48,7
BRM	8,0	-41,5	15,4	-50,7

Pela análise dos resultados do Quadro 4.24, juntamente com as Figuras 4.19 e 4.20, pode verificar-se que a introdução de AGM, em betões produzidos com AGC e AGG, diminui a absorção de água por capilaridade e a altura de ascensão capilar, facto corroborado pelas variações negativas até 17,4 e 31%, para a absorção por capilaridade, e até 40,6 e 48,7%, para a ascensão capilar, para os AGC e AGG, respectivamente. Quando se analisa a substituição de AGB por AGM, verifica-se uma inversão desta tendência, sendo que o aumento da absorção de água por capilaridade pode alcançar 67,7%, resultado, ainda assim, inferior ao registado para os betões produzidos exclusivamente com AGC e AGG. Estes resultados vão ao encontro do observado na campanha de Pereira *et al.* (2009), onde os AGC produziram o betão com o maior valor de coeficiente de capilaridade, registando-se o valor seguinte para os AGG. Apenas a proximidade entre os valores de absorção por capilaridade entre os betões produzidos com AGB e AGM não foi verificada. Tal pode dever-se a uma superfície mais lisa dos AGM, prejudicando a aderência entre estes e a pasta cimentícia, incrementando, desta forma, os poros na zona de interface, onde o fenómeno de absorção por capilaridade ocorre principalmente. Este efeito não é, no entanto, observável para a taxa de substituição de 100%, devendo-se tal aos resultados deste ensaio, que apresentam grandes oscilações, algumas pouco expectáveis e, como neste caso, de difícil explicação. Em geral, verificam-se valores de absorção de água por capilaridade e de altura de ascensão capilar reduzidos, quando comparados com os obtidos para outros AR, demonstrando que os diversos betões produzidos revelam um bom comportamento, relativamente a esta propriedade.

Nestas figuras, pode ainda constatar-se que existem diferenças entre os resultados da absorção por capilaridade e da altura de ascensão capilar, especialmente notados para os betões produzidos com AGG.

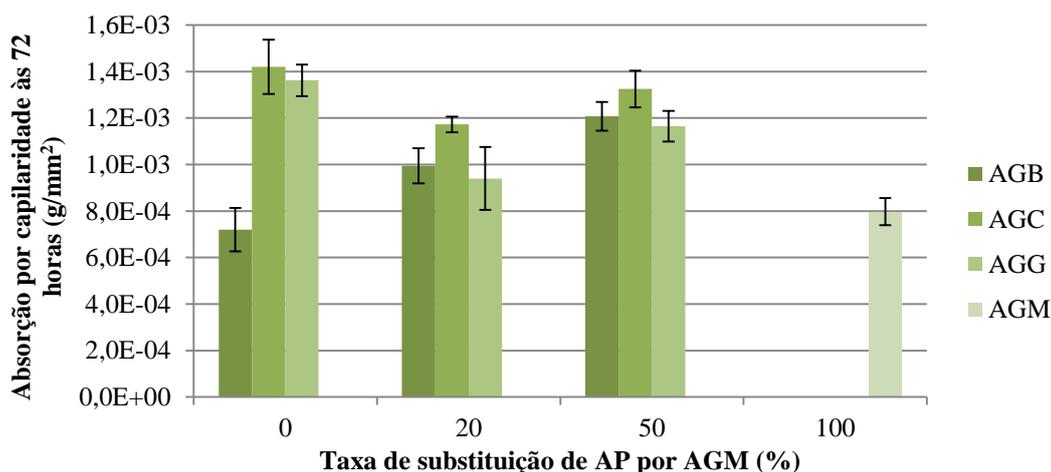


Figura 4.19 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, em g/mm², para os diversos betões

Nas Figuras 4.21 e 4.22, estão representados os valores de absorção de água por capilaridade e de altura de água por ascensão capilar, respectivamente, em função da raiz do tempo, para cada família de betão produzida. Pela sua observação, é possível verificar que este fenómeno ocorre mais intensamente nas primeiras horas em que o provete se encontra em contacto com a água.

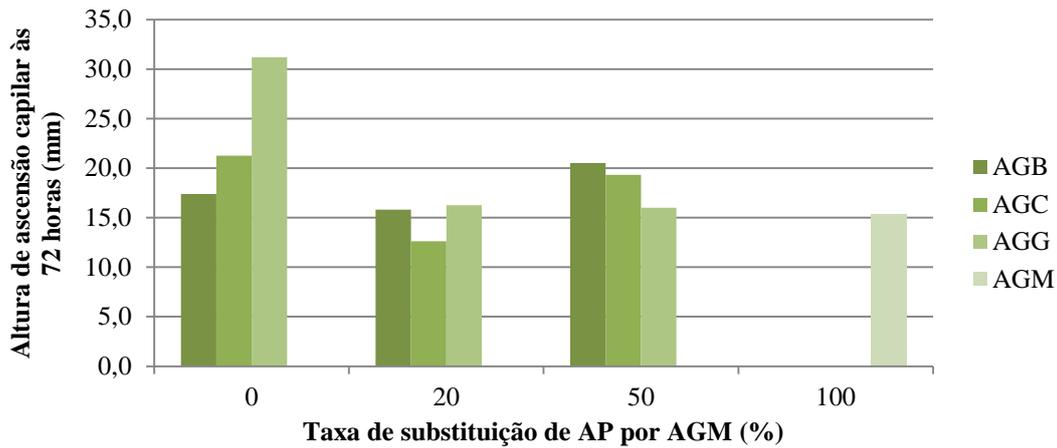


Figura 4.20 - Altura de água por ascensão capilar às 72 horas, em mm, para os diversos betões

Calculando o coeficiente de absorção capilar, K_c , através da seguinte equação:

$$K_c = \frac{p}{S \times \sqrt{t}}$$

Onde,

- p - quantidade de água absorvida, em g;
- S - superfície inferior do provete, em mm²;
- t - tempo, em horas.

Obtém-se os referidos coeficientes de todas as composições e apresenta-se a variação da média destes com o acréscimo da taxa de substituição dos AP por AGM na Figura 4.23.

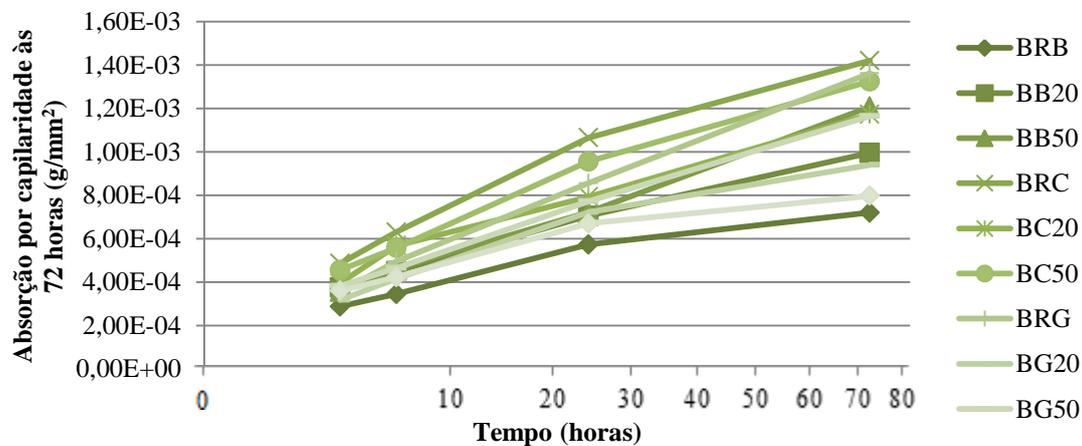


Figura 4.21 - Absorção por capilaridade dos diversos betões em função da raiz do tempo

Da análise da Figura 4.23, verifica-se que o valor médio do coeficiente de capilaridade em função da taxa de substituição apresenta um comportamento aproximadamente linear, não sendo possível inferir se existe a capacidade de esta grandeza apresentar uma tendência decrescente, para taxas de substituição de AP por AGM mais próximas 100%.

Alguns autores, incluindo Ferreira (2000) e Bravo (2009), verificaram que a altura da água por ascensão capilar às 72 horas varia exponencialmente com a absorção de água por imersão aos 28 dias. A Figura 4.24 prova que, para os valores obtidos durante a campanha experimental, a variação da altura de

ascensão capilar é insensível ao aumento da absorção de água por imersão, não existindo, de tal forma, uma relação estatisticamente significativa entre ambas, contrariando o obtido nos estudos anteriores.

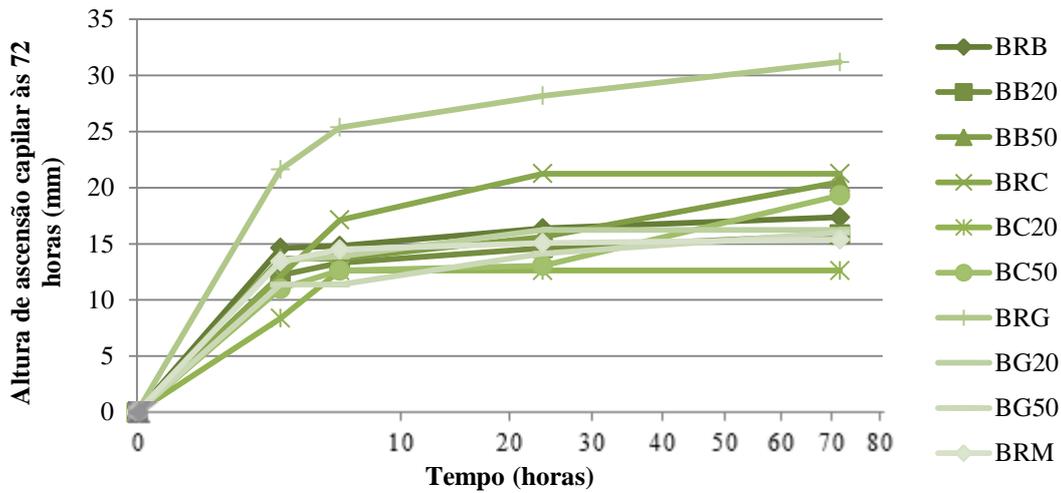


Figura 4.22 - Altura de água por ascensão capilar dos diversos betões em função da raiz do tempo

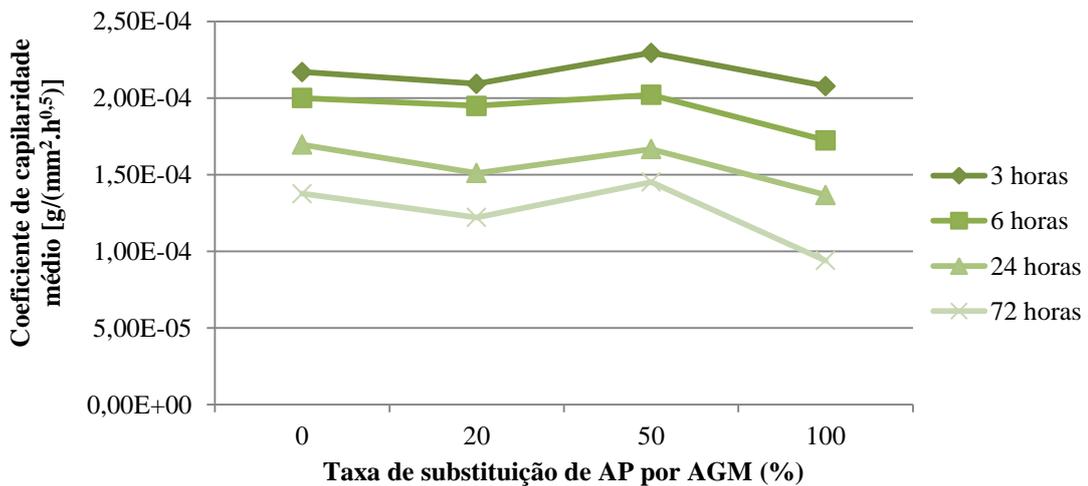


Figura 4.23 - Coeficiente de absorção capilar médio dos diversos betões

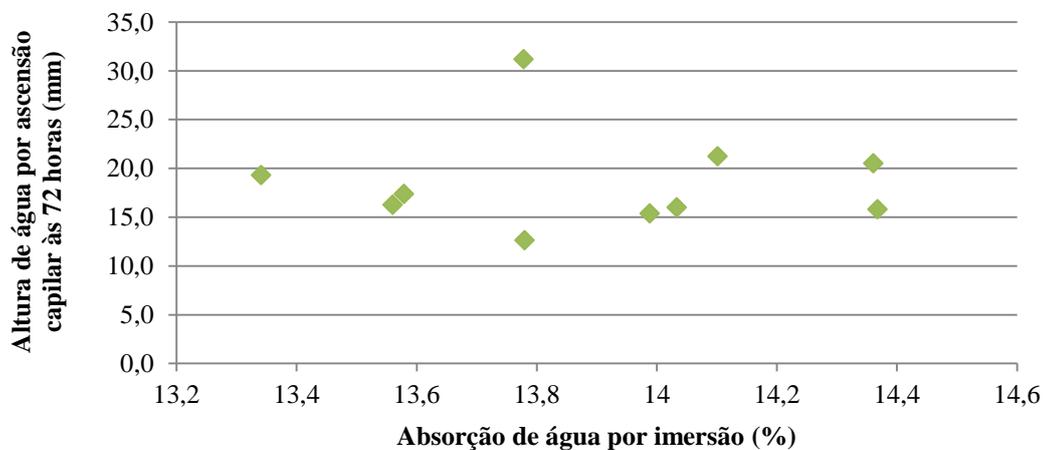


Figura 4.24 - Relação entre a absorção por imersão e a altura de água por ascensão capilar às 72 horas

De forma análoga ao realizado para a absorção de água por imersão, Alves (2007) avaliou a variação da relação entre as absorções de água por capilaridade com a relação entre as massas volúmicas ponderadas dos agregados reciclados. Os resultados obtidos nessa investigação, bem como os da presente campanha experimental podem ser consultados na Figura 4.25, onde se comprova que, de forma semelhante à campanha de Alves, a relação entre as absorções de água por capilaridade diminui com o aumento da relação da massa volúmica ponderada dos agregados. Ainda assim, os valores obtidos para o coeficiente de determinação são reduzidos, traduzindo-se numa relação não aceitável.

Como esperado, a relação entre as absorções de água por capilaridade aumenta com a relação da absorção ponderada dos agregados, como se pode comprovar na Figura 4.26. Apesar de esta relação apresentar um coeficiente de determinação superior à anterior, é ainda insuficiente para a considerar aceitável.

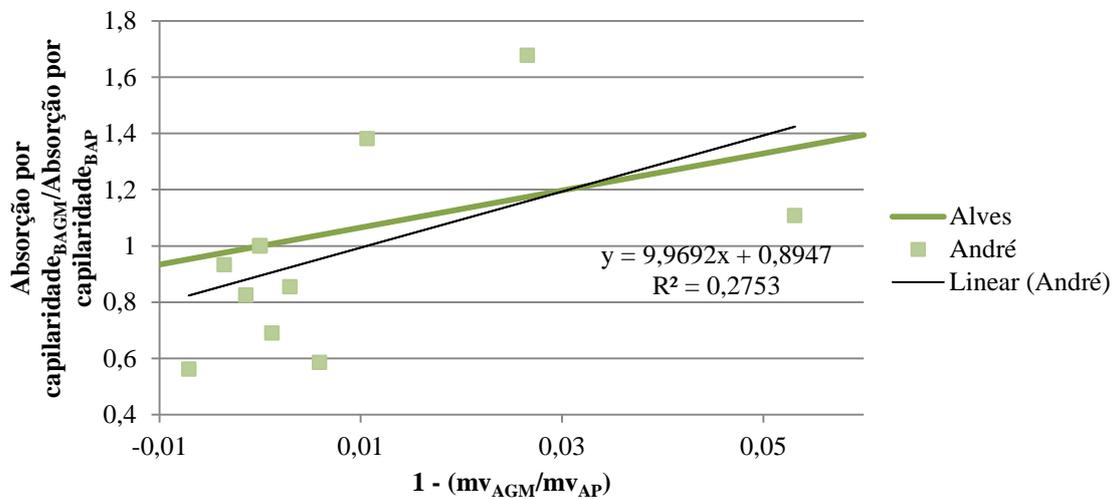


Figura 4.25 - Variação da relação entre absorções de água por capilaridade do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados

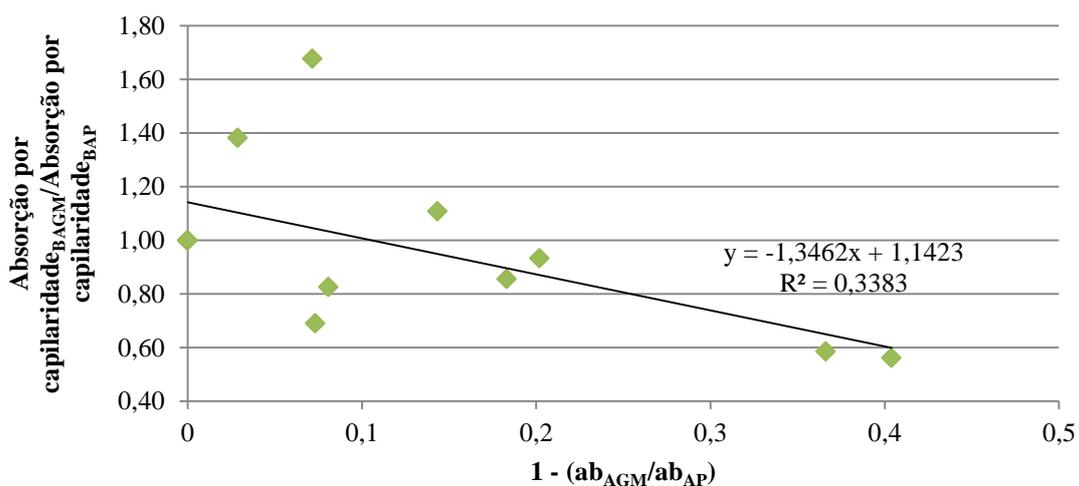


Figura 4.26 - Variação da relação entre absorções de água por capilaridade do betão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados

4.4.4. Resistência à carbonatação

O ensaio efectuado para a determinação da resistência à carbonatação adoptou os princípios presentes na especificação LNEC E 391 (1993), de acordo com o descrito no subcapítulo 3.7.4.

Com a realização deste ensaio, foi possível avaliar a susceptibilidade do betão à acção do dióxido de carbono. Este composto químico, existente na atmosfera no estado gasoso, penetra na matriz cimentícia do betão e reage, na presença de humidade, com os componentes do cimento hidratado, formando a denominada frente de carbonatação. Este fenómeno não causa, por si só, a deterioração do betão. Pelo contrário, a presença de dióxido de carbono no interior do betão aumenta, ligeiramente, a sua densidade e, conseqüentemente, a sua resistência. A penetração do dióxido de carbono está também relacionada com a permeabilidade ao ar e à água dos betões, dependendo de factores semelhantes e apresentando, de forma geral, as mesmas tendências. Os resultados obtidos, para a profundidade da frente de carbonatação nos diferentes betões produzidos podem ser consultados no Quadro 4.25, enquanto que as medições e cálculos efectuados estão presentes no Anexo J.

Quadro 4.25 - Variação da profundidade de carbonatação com a substituição de AP por AGM

Betão	Profundidade de carbonatação aos 7 dias (mm)	Varição (%)	Profundidade de carbonatação aos 28 dias (mm)	Varição (%)	Profundidade de carbonatação aos 56 dias (mm)	Varição (%)	Profundidade de carbonatação aos 91 dias (mm)	Varição (%)
BRB	3,47	0,0	8,49	0,0	10,68	0,0	13,54	0,0
BB20	3,56	2,4	7,74	-8,9	11,79	10,4	13,36	-1,3
BB50	3,81	9,6	8,28	-2,5	10,06	-5,8	11,12	-17,9
BRM	3,69	6,3	8,51	0,2	10,83	1,4	13,53	0,0
BRC	3,99	0,0	7,83	0,0	10,32	0,0	13,06	0,0
BC20	3,65	-8,6	7,36	-6,0	10,81	4,8	13,24	1,4
BC50	3,76	-5,7	7,38	-5,8	11,45	11,0	14,47	10,7
BRM	3,69	-7,5	8,51	8,6	10,83	4,9	13,53	3,6
BRG	3,75	0,0	8,29	0,0	10,51	0,0	12,61	0,0
BG20	3,96	5,6	8,03	-3,1	10,22	-2,8	14,04	11,3
BG50	4,70	25,1	9,08	9,5	12,15	15,6	14,01	11,1
BRM	3,69	-1,6	8,51	2,7	10,83	3,0	13,53	7,3

Através do Quadro 4.25, assim como das Figuras 4.27 a 4.29, onde se representam os valores de profundidade de carbonatação, em mm, para a substituição de AGB, AGC e AGG por AGM, respectivamente, constata-se que, de acordo com os valores obtidos, a introdução de AGM não influencia significativamente a profundidade da frente de carbonatação. A variação mais significativa ocorre para o BG50 aos 7 dias, relativamente ao BRG, onde assume um valor de 25,1%. No entanto, a mesma família, aos 91 dias, apresenta uma variação de apenas 11,1%.

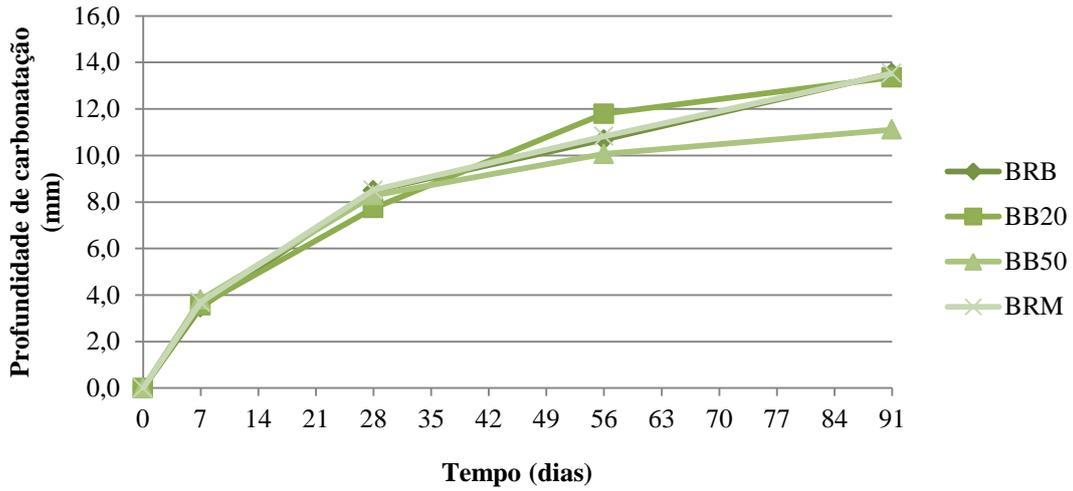


Figura 4.27 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGB

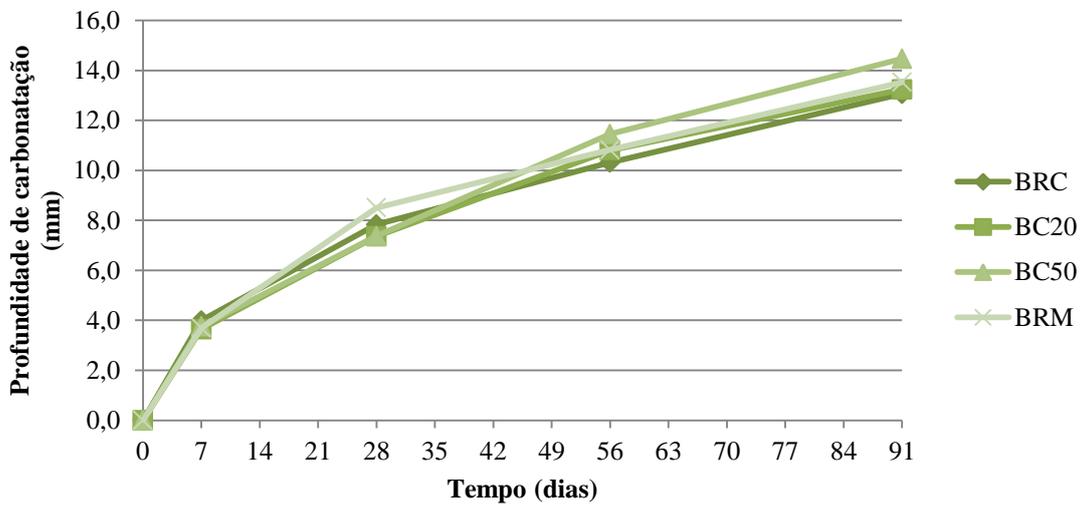


Figura 4.28 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGC

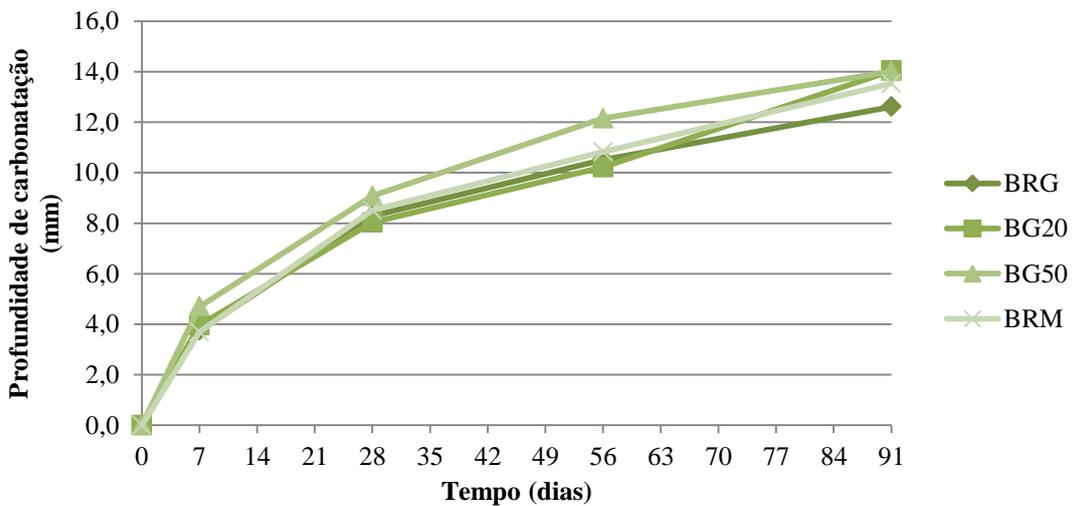


Figura 4.29 - Profundidade de carbonatação, em função do tempo, para betões produzidos com AGG

De uma forma geral, a profundidade de carbonatação dos diversos betões produzidos é semelhante, para qualquer idade, como seria esperado, uma vez que, quando se procedeu à análise da absorção de água, propriedade influenciada pelos mesmos factores, se alcançou uma conclusão semelhante. Através da análise da Figura 4.30, pode verificar-se que, apesar de pouco significativamente, a profundidade de carbonatação, das diferentes famílias de betão produzidas, diminui com o aumento da absorção de água por imersão. A relação linear entre estas duas grandezas não é aceitável, uma vez que apresenta um coeficiente de determinação de 0,365. Ainda assim, é possível afirmar que os betões produzidos com AGM possuem características semelhantes às dos betões produzidos com os restantes AP, relativamente a esta propriedade.

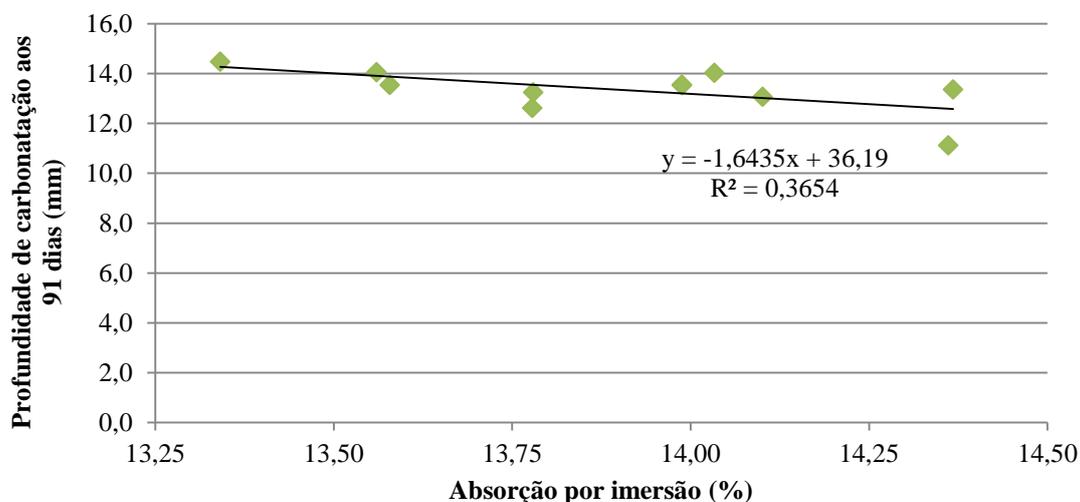


Figura 4.30 - Relação entre a absorção de água por imersão e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

Pela análise das Figuras 4.27 a 4.29, é também possível verificar, como exposto no subcapítulo 2.5.5, que a profundidade de carbonatação varia em função da raiz quadrada do tempo. Como se constata, para as misturas produzidas, a profundidade de carbonatação inicia-se de uma forma mais rápida, ou seja, o declive da recta é mais elevado, seguindo-se um abrandamento para as idades mais avançadas, neste caso 56 e 91 dias.

No entanto, como se observa pela Figura 4.31, a profundidade de carbonatação aos 91 dias demonstra ser insensível ao aumento da absorção de água por capilaridade, para esta campanha experimental.

A Figura 4.32 permite constatar que, com o incremento da taxa de substituição de AP por AGM, a profundidade da frente de carbonatação não varia significativamente, tal como assumido. Conclui-se ainda que, para os intervalos de permanência na câmara de carbonatação estudados, não é possível obter uma relação estatisticamente relevante entre as grandezas em análise.

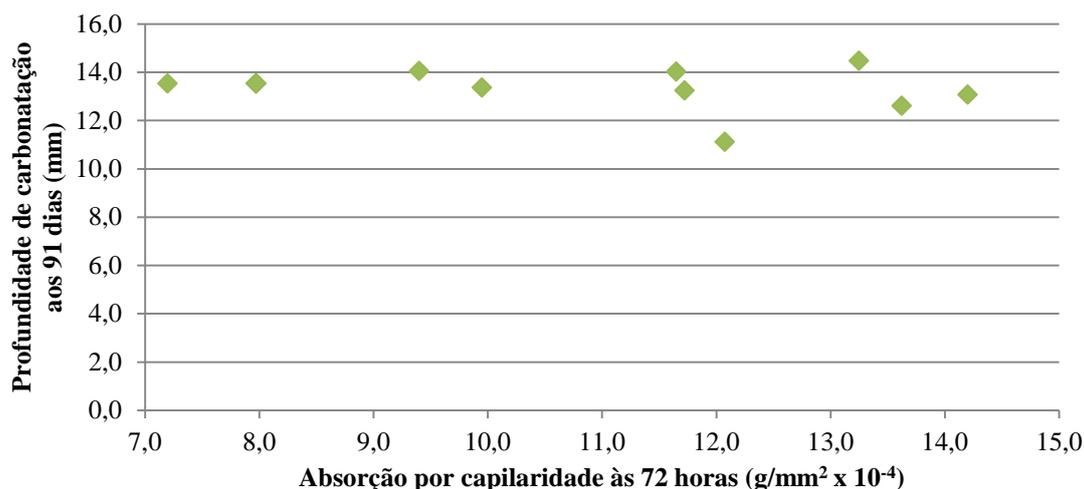


Figura 4.31 - Relação entre a absorção de água por capilaridade às 72 horas e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

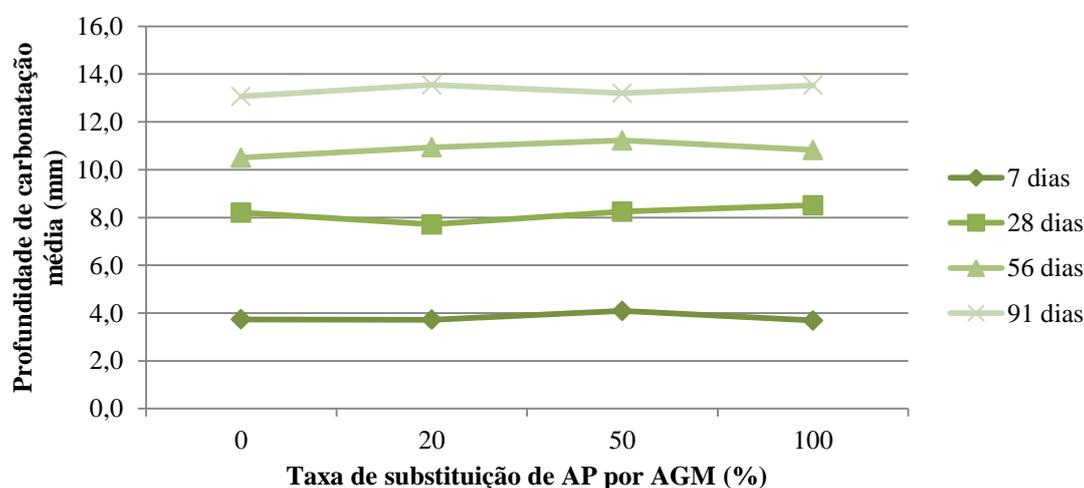


Figura 4.32 - Profundidade de carbonatação média para as diferentes taxas de substituição de AP por AGM

Observando a Figura 4.33, verifica-se que, com o aumento da resistência à compressão aos 28 dias, existe uma ligeira tendência para a redução da profundidade de carbonatação aos 91 dias. Contudo, contrariamente ao verificado por outros autores, essa tendência não é estatisticamente significativa, exibindo reduzida sensibilidade à variação da resistência à compressão.

Como realizado para outras propriedades, Alves (2007), Robles (2007) e Amorim (2008) também avaliaram a variação da relação entre as resistências à carbonatação, com a relação entre as massas volúmicas ponderadas dos agregados reciclados. Os resultados obtidos para essas investigações, assim como os da presente dissertação, estão presentes na Figura 4.34.

Nesta, verifica-se que, contrariamente ao obtido nas restantes campanhas, com a diminuição da massa volúmica, a profundidade de carbonatação também diminui. Tal pode ser explicado pela influência considerável dos AGM na diminuição da massa volúmica ponderada dos betões produzidos com AGB, os quais registam uma ligeira diminuição da profundidade da frente de carbonatação com a introdução de AGM.

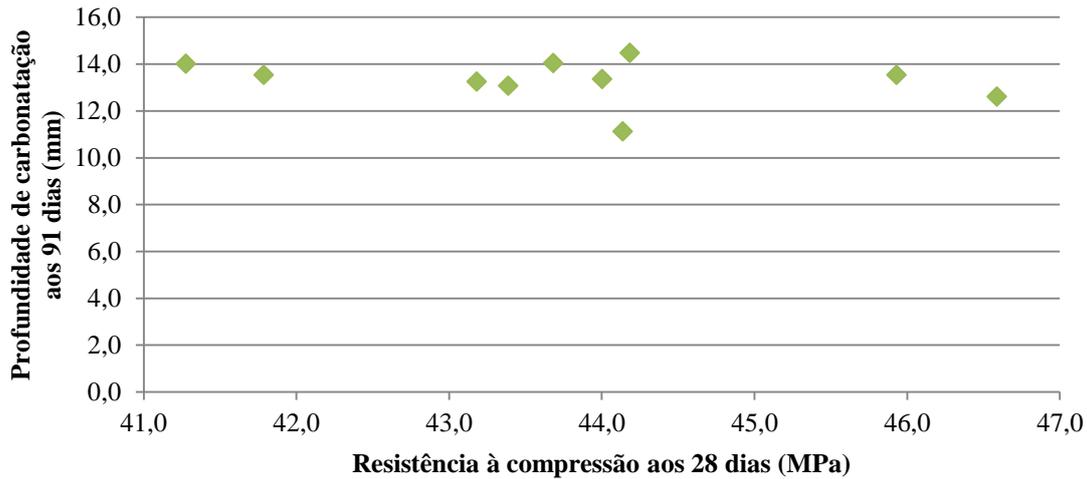


Figura 4.33 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

De forma similar, verificou-se um aumento da profundidade da frente de carbonatação com a incorporação de AGM nos betões produzidos com AGC, essa incorporação originou um aumento da massa volúmica ponderada. Observa-se ainda que não existe uma clara tendência linear entre estas grandezas, como comprova o coeficiente de determinação de 0,2.

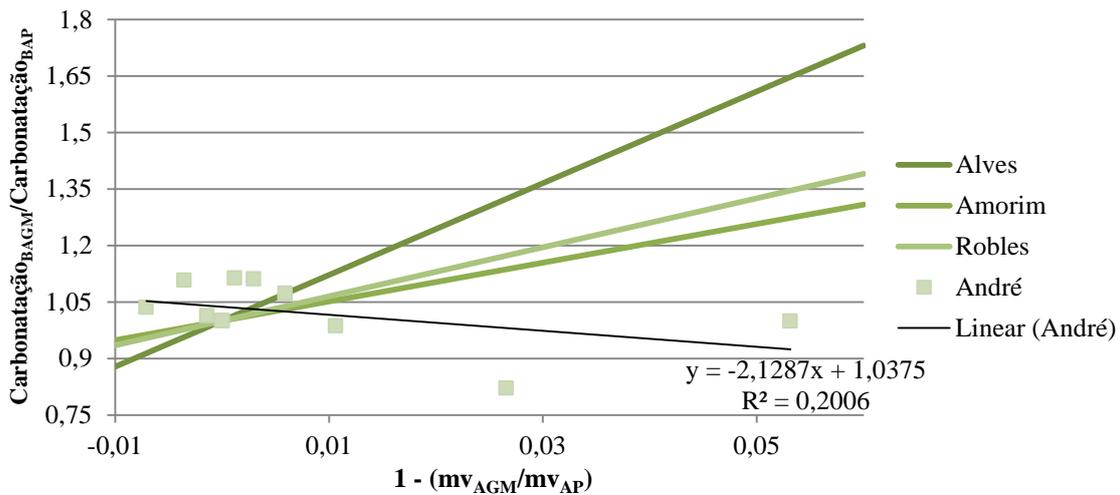


Figura 4.34 - Variação da relação entre resistências à carbonatação do betão, com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados

Pelos motivos apresentados, é expectável que a resistência à carbonatação do betão aumente quando a absorção de água ponderada dos agregados diminui, uma vez que a introdução de AGM, em betões produzidos com AGB, diminui ligeiramente a profundidade da frente de carbonatação, enquanto aumenta consideravelmente a absorção ponderada destes. Esta conclusão está patente na Figura 4.35, onde, novamente, se verifica que não existe uma tendência linear nesta relação, corroborado pelo coeficiente de determinação de 0,14.

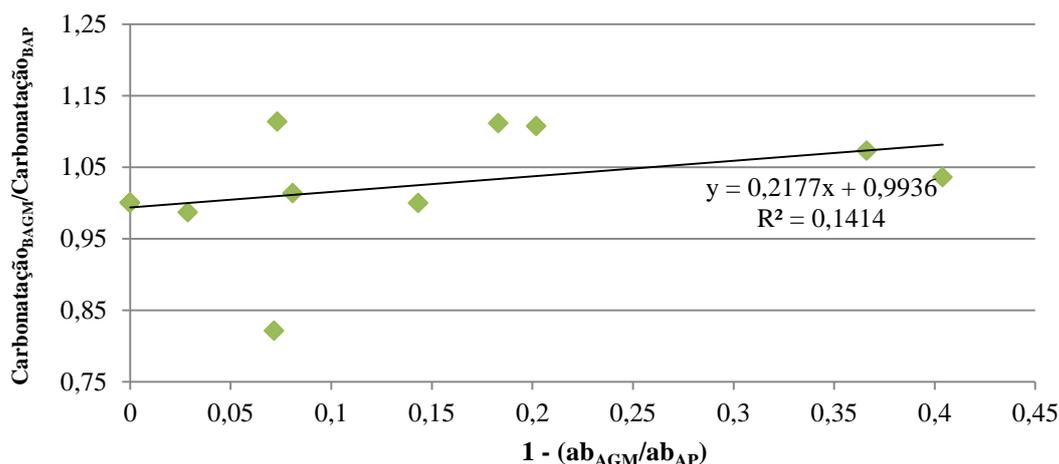


Figura 4.35 - Variação da relação entre resistências à carbonatação do betão, com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados

4.4.5. Resistência à penetração de cloretos

Como registado no subcapítulo 3.7.5, o ensaio de determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário foi realizado de acordo com a metodologia proposta na especificação LNEC E 463 (2004).

A penetração de cloretos, tal como a carbonatação, são as principais responsáveis pela despassivação das armaduras. No entanto, o mecanismo de transporte dos iões cloreto no betão é bastante complexo, contrariamente à penetração do dióxido de carbono, podendo envolver processos de difusão e de absorção capilar, estando sempre dependente da estrutura dos poros da matriz cimentícia, a qual varia ao longo do tempo, devido às reacções de hidratação do cimento. Os valores do coeficiente de difusão dos cloretos, para as diversas famílias de betões produzidas, são apresentados no Quadro 4.26 e as medições e cálculos efectuados podem ser consultados no Anexo K.

Quadro 4.26 - Variação do coeficiente de difusão dos cloretos com a substituição de AP por AGM

Betão	Coefficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Variação (%)	Coefficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Variação (%)
BRM	^a	-	17,91	-
BRB	13,51	0,0	^a	-
BB20	^a	-	^a	-
BB50	15,24	12,8	^a	-
BRC	17,92	0,0	14,34	0,0
BC20	21,49	19,9	14,86	3,6
BC50	^a	-	16,27	13,5
BRG	^a	-	15,21	0,0
BG20	18,73	0,0	17,39	14,3
BG50	20,51	9,5	19,86	30,5

^a Durante a realização do ensaio, em alguns provetes, não foi possível assegurar a correcta concentração das soluções utilizadas, bem como garantir uma temperatura constante e estável, tanto nos provetes como na câmara, a qual permitisse uma perfeita difusão dos iões cloreto, optando-se, como tal, por não apresentar os seus resultados.

Pela observação da Figura 4.36, bem como do Quadro 4.26, pode-se verificar que a introdução de AGM, em geral, aumenta o coeficiente de difusão dos cloretos, relativamente a cada um dos betões de referência. O facto de a introdução de AGM agravar a penetração de cloretos pode dever-se à baixa percentagem de alumina, Al_2O_3 , presente no mármore utilizado, cerca de 0,64%, conforme descrito no subcapítulo 2.4. A presença de alumina beneficia a formação de aluminato tricálcico, C_3A , e este produto das reacções do cimento fixa os iões cloreto, originando complexos insolúveis. Ora, como referido no subcapítulo 2.5.6, apenas os iões livres destroem a camada de passivação, contribuindo para a corrosão das armaduras, pelo que a presença de uma percentagem superior de alumina origina, desta forma, um menor coeficiente de difusão dos cloretos, como ficou demonstrado nos estudos de Missau (2004), Amrutha *et al.* (2011) e Uysal *et al.* (2012).

Este resultado é contrário ao obtido para a campanha experimental de Binici *et al.* (2008), que obtém uma resistência à penetração de cloretos significativamente superior nos betões produzidos com AGM, do que nos produzidos com AGC. Analisando as propriedades químicas dos AGM, utilizados naquela campanha, verifica-se que o teor em alumina dos AGM apresenta um valor de 21,9%, enquanto que os AGC apenas de 2,1%. Tal pode confirmar a hipótese anterior que, de facto, o teor em alumina influencia a resistência à penetração dos cloretos.

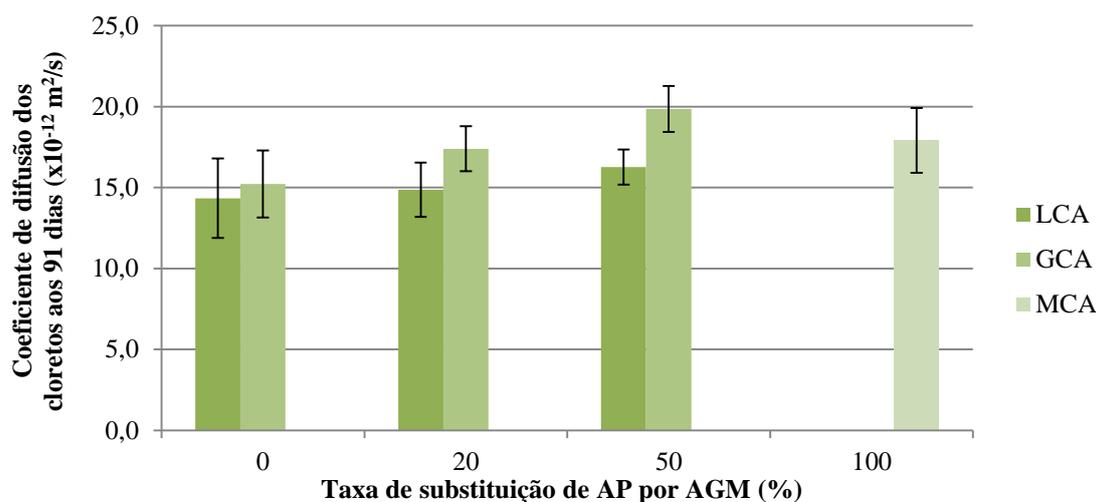


Figura 4.36 - Coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias para os diversos betões

A Figura 4.37, apesar dos resultados obtidos, permite demonstrar a influência que o tempo de cura exerce sobre a resistência à penetração dos iões cloreto. A diminuição da penetração dos iões cloreto, com o aumento do número de dias de cura do betão, é compatível com o obtido nas diversas campanhas experimentais analisadas no levantamento bibliográfico.

De acordo com o procedimento de ensaio, os provetes são, inicialmente, sujeitos a um processo em todo semelhante ao efectuado para determinar a absorção de água por imersão sob vácuo, pelo que é possível inferir que a porosidade aberta vai condicionar a penetração de cloretos, na realização deste ensaio.

A Figura 4.38 permite verificar que a penetração de cloretos aumenta muito ligeiramente com a absorção de água por imersão, método utilizado nesta dissertação para avaliar a porosidade aberta do betão, como seria expectável. Contudo, esta ligeira tendência não é estatisticamente significativa, como comprova o coeficiente de determinação muito reduzido.

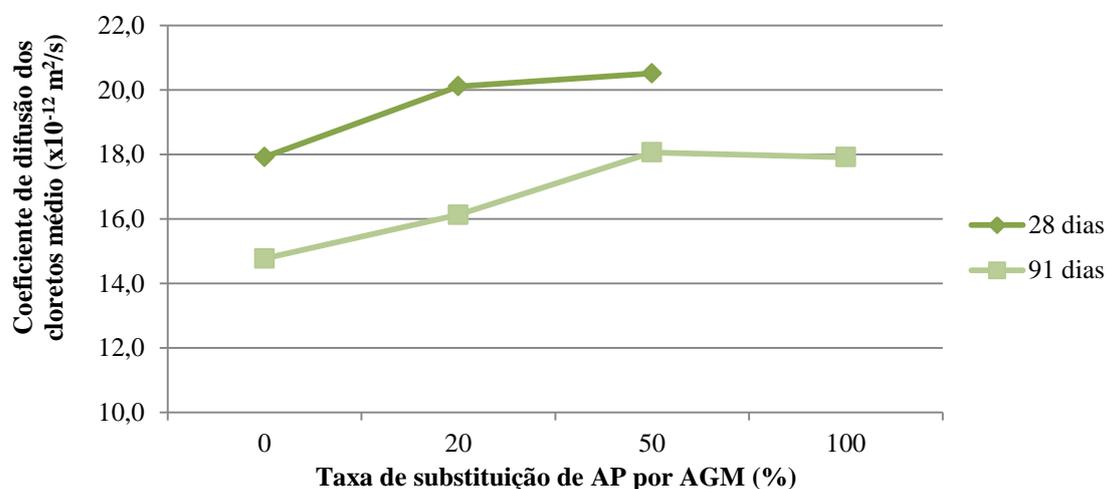


Figura 4.37 - Coeficiente de difusão médio dos cloretos para as diferentes taxas de substituição de AP por AGM

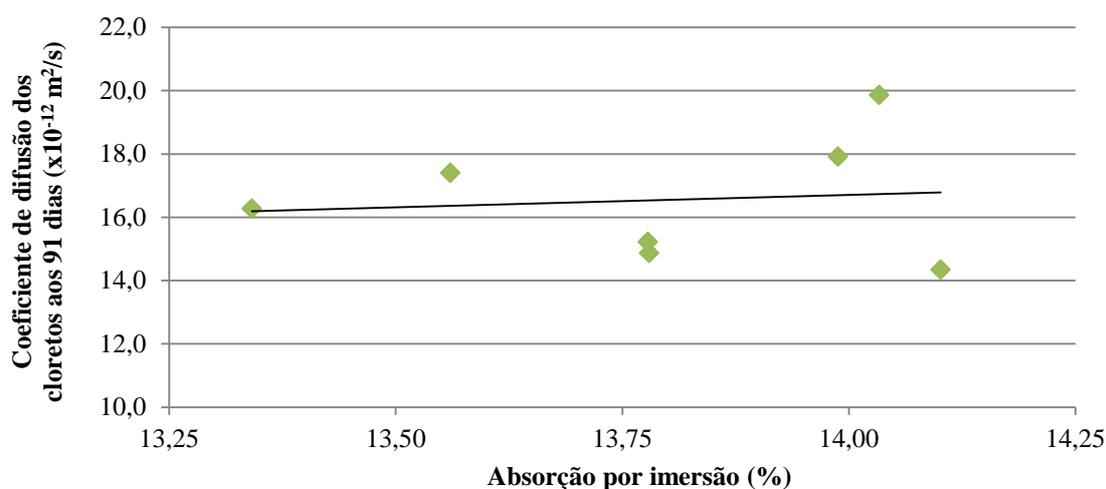


Figura 4.38 - Relação entre a absorção de água por imersão e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias

Ferreira (2000) e Bravo (2009) efectuaram estudos onde concluíram que o coeficiente de difusão dos cloretos e a absorção de água por capilaridade possuem uma relação linear. Na Figura 4.39, apresentam-se os resultados obtidos para a relação destas propriedades na presente dissertação. Pela sua análise, verifica-se que a penetração de cloretos diminui com o aumento da absorção por capilaridade. Tal facto é expectável atendendo a que a taxa de substituição de AP por AGM influencia as propriedades de forma distinta. Com o aumento da percentagem de AGM no betão, a absorção por capilaridade diminui, enquanto que a penetração de cloretos aumenta, para os AGC e AGG utilizados nesta dissertação.

Tal permite assumir que as características químicas têm um papel mais preponderante, na resistência à penetração de cloretos, do que as propriedades físicas. A tendência linear registada apresenta um coeficiente de determinação de 0,34, o que se traduz numa relação não aceitável entre estas duas grandezas.

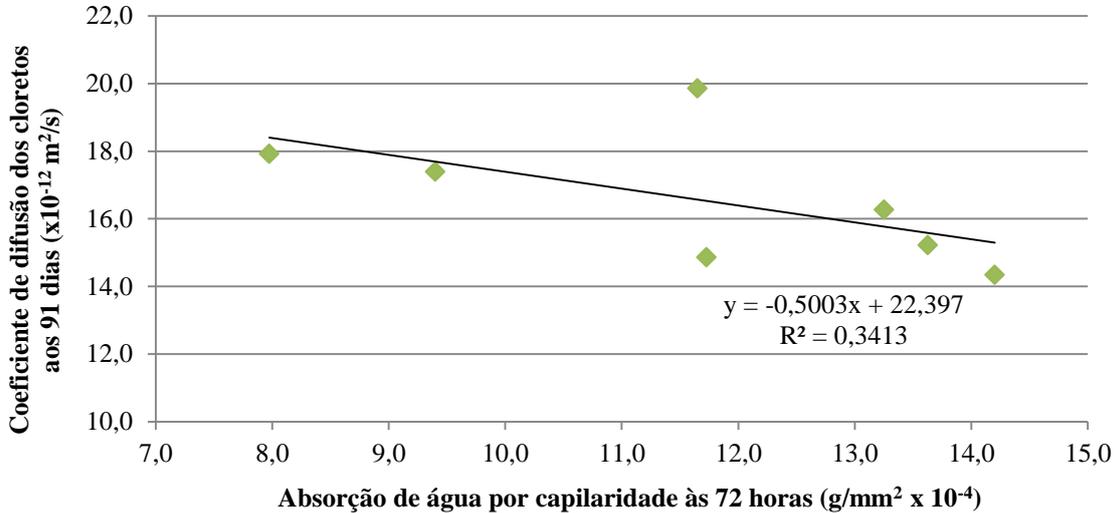


Figura 4.39 - Relação entre a absorção de água por capilaridade às 72 horas e o coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias

Também para esta propriedade, Alves (2007) e Amorim (2008) avaliaram a variação da relação entre coeficientes de difusão de cloretos, com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados utilizados para gerar a diversas famílias. Os resultados obtidos nas duas campanhas apresentadas, bem como da presente dissertação, podem ser consultados na Figura 4.40. Nesta, observa-se que o coeficiente de difusão parece ser insensível à variação da massa volúmica ponderada dos agregados, contrariando os estudos apresentados, não apresentando uma tendência estatisticamente significativa.

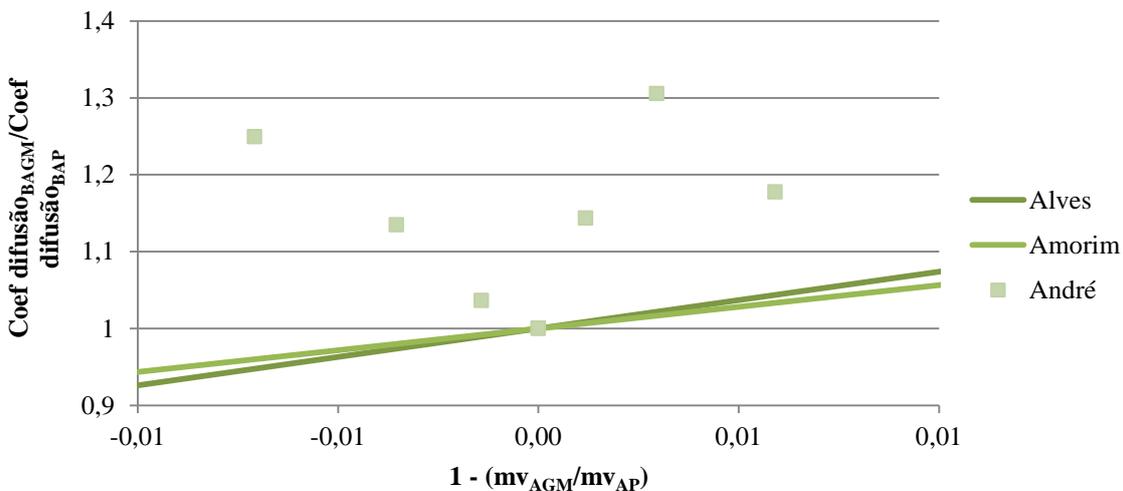


Figura 4.40 - Variação da relação entre coeficientes de difusão de cloretos do betão, com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados

A Figura 4.41 demonstra que, com o aumento da relação entre as absorções de água ponderadas, a relação entre o coeficiente de difusão de cloretos diminui. A absorção de água ponderada é tanto menor quanto maior for a percentagem de AGM presentes na mistura. Como tal, a sua relação cresce com a diminuição destes agregados. Assim, é possível assumir, novamente, que as propriedades químicas dos AGM são o factor que mais influencia, negativamente, o coeficiente de difusão de cloretos. A tendência apresentada por estas duas grandezas apresenta um razoável coeficiente de determinação e pode, por isso, ser considerada aceitável.

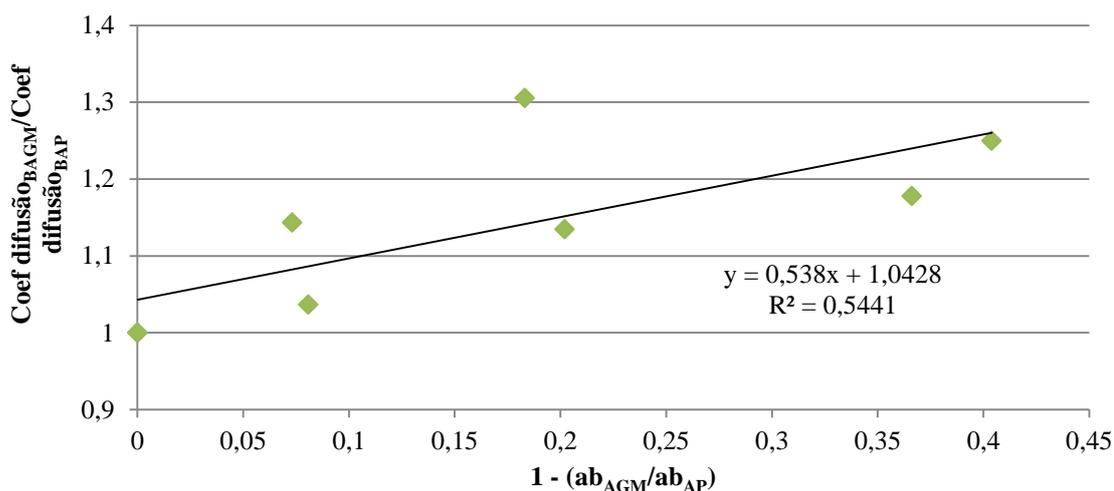


Figura 4.41 - Variação da relação entre coeficientes de difusão de cloretos do betão, com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados

4.5. Conclusões

O desenvolvimento desta campanha experimental permitiu conhecer as propriedades dos betões produzidos com AP, tanto no estado fresco como no endurecido, bem como a influência que os AGM podem exercer nestas, relativamente à durabilidade. Assim, de forma sucinta, resta apresentar as conclusões conseguidas, da análise dos resultados obtidos, durante a realização de cada ensaio.

4.5.1. Propriedades dos agregados

Os AGM, como seria expectável, não se diferenciaram significativamente dos AP. Analisando os resultados desta dissertação, verifica-se que ostentam uma massa volúmica semelhante à dos AGC e aos AGG, não apresentando uma variação superior a 1,3%. Esta variação aumenta ligeiramente quando comparados com os AGB, para aproximadamente 9,1%. Relativamente à absorção de água, os AGM são os que apresentam a menor absorção, cerca de 0,66%. Este valor representa uma redução de quase 42,5%, quando comparado com o dos AGC. A baridade apresenta resultados em tudo semelhantes com a massa volúmica, sendo a principal diferença a baridade superior dos AGC, comparativamente aos AGG e AGM. Este facto é atribuído à maior continuidade da curva granulométrica deste agregado, estando a percentagem de vazios em concordância com os resultados obtidos para a baridade.

Pode concluir-se que os AGM apresentaram o maior desgaste, quando sujeitos ao ensaio de *Los Angeles*, 38,5% e 39,1%, para a brita 0,5 e brita 2, respectivamente. Este valor, apesar de aquém do limite imposto para agregados para betão, é consideravelmente elevado e pode influenciar o seu desempenho, especialmente ao nível das suas propriedades mecânicas. À excepção dos AGC, os restantes agregados estudados apresentaram valores do índice de forma desaconselháveis, possuindo uma forma significativamente alongada e angular. Este facto pode contribuir para o aumento do ângulo de atrito interno e conseqüente perda de trabalhabilidade, prejudicando a compacidade do betão no estado endurecido e reduzindo a sua durabilidade.

4.5.2. Propriedades do betão no estado fresco

Um dos requisitos aquando do início desta dissertação, de forma a proceder-se a uma comparação válida das diferentes propriedades dos betões produzidos, foi garantir uma trabalhabilidade semelhante em todas as composições. Definiu-se assim um intervalo de 115 ± 10 mm para o valor do abaixamento desejado, o qual foi garantido em todas as famílias.

Foi possível verificar que a trabalhabilidade não apresentava uma tendência definida. Nos betões produzidos com AGG, a introdução de AGM não afectou significativamente esta propriedade. Tal facto pode dever-se ao elevado índice de forma dos AGG, que contribui para um elevado ângulo de atrito, não alterado com a introdução dos AGM.

Verificou-se também uma ligeira melhoria para uma taxa de substituição de 20% nos betões produzidos com AGB e AGC, possivelmente devido à superfície lisa dos AGM e à sua reduzida absorção, o que contribui para o aumento da fluidez do betão. Com uma taxa de substituição de 50%, a trabalhabilidade diminui. Supõe-se que, para maiores quantidades de AGM, a influência do índice de forma é superior ao aumento da fluidez introduzida e como tal regista-se esta redução.

Relativamente à massa volúmica, conclui-se que, para betões produzidos com AGB, a introdução de AGM origina uma diminuição desta propriedade. Este resultado era expectável, atendendo à diferença de massas volúmicas de cada um dos agregados intervenientes. No que respeita aos betões com AGG ou AGC, constata-se que as suas massas volúmicas são similares e não variam significativamente com a introdução de AGM. Este facto parece lógico, uma vez que as massas volúmicas dos agregados incorporados é similar, e os betões foram produzidos com a mesma trabalhabilidade e sem a adição extra de água. A ligeira subida na massa volúmica verificada para a taxa de substituição de 20% pode dever-se ao melhor arranjo espacial das partículas, tal como observado para a trabalhabilidade.

4.5.3. Propriedades do betão no estado endurecido

Os ensaios realizados ao betão no estado endurecido, ao nível da durabilidade, permitiram concluir que a substituição de AP por AGM não provoca uma variação significativa da absorção de água por imersão, dos diversos betões. Este facto era esperado, uma vez que todos os betões foram

produzidos e curados de forma similar. Os agregados apresentam um valor reduzido de absorção e podem existir semelhanças a nível microestrutural. A diminuição mais significativa dos valores de absorção de água é alcançada quando se substituem AGC por AGM. No entanto, a variação da absorção de água, apesar de apresentar uma relação linear, encontra-se dentro do desvio padrão, o que pode demonstrar que o aumento da taxa de substituição não influencia significativamente esta grandeza.

Relativamente à absorção de água por capilaridade, verifica-se que a introdução de AGM diminui este fenómeno nos betões produzidos com AGC e AGG e aumenta-o para os betões produzidos com AGB. Este aumento pode ser justificado pela pior aderência entre os AGM e a pasta cimentícia, comparativamente à dos AGB, aumentando, desta forma, os poros na zona de interface, onde o fenómeno de absorção é mais frequente. Em geral, verifica-se um bom comportamento de todas as famílias de betão produzidas, no que respeita a esta grandeza. Observa-se ainda que o fenómeno é consideravelmente mais intenso durante as primeiras horas de contacto do provete com a água, e vai diminuindo com o tempo. O coeficiente de capilaridade apresenta um comportamento aproximadamente constante, para as diferentes taxas de substituição, e seria importante avaliar se apresenta uma tendência claramente decrescente para taxas de substituição de AP por AGM mais próximas de 100%.

O ensaio de resistência à carbonatação permitiu verificar que a introdução de AGM não influencia significativamente a profundidade da frente de carbonatação dos diversos betões produzidos. Esta é semelhante, para qualquer idade, em todas as famílias de betões. Esta era uma conclusão esperada, uma vez que a absorção de água apenas variou ligeiramente e estes dois fenómenos são influenciados pelos mesmos factores. Assim, pode-se concluir que, para a resistência à carbonatação, os AGM apresentam características semelhantes aos AP.

Em relação ao ensaio de resistência à penetração de cloretos, verifica-se que o aumento da taxa de substituição de AP por AGM aumenta o coeficiente de difusão dos cloretos, ainda que sem pôr em causa a utilização de betões com estes agregados, mesmo em ambientes marítimos. Este evento pode dever-se à reduzida percentagem de alumina existente nos AGM. A alumina beneficia a formação de aluminato tricálcico, responsável pela fixação de iões cloreto. Quando a quantidade deste diminui, aumenta a percentagem de cloro livre no interior da matriz e, como tal, intensifica-se a difusão de cloretos. Assume-se que este é o principal factor, uma vez que as absorções de água dos diversos betões apresentam valores similares.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Com este capítulo, pretende-se sintetizar as conclusões obtidas com a realização da campanha experimental, enfatizando a problemática da tendência crescente de volume de mármore transportado para aterro, com potencial para outras indústrias que não exclusivamente a da produção de rochas ornamentais, e apresentar propostas de desenvolvimento futuro, para possíveis investigações sobre este tema.

5.1. Considerações finais

A produção de rochas ornamentais é dos sectores mais activos do planeta e, apesar de condicionada pelas tendências do mercado, tem apresentado um aumento progressivo do volume de produção e exportação ao longo dos anos. Portugal acompanha a tendência dos restantes países ocupando a quinta posição no mercado mundial de exportações, assumindo o sector das rochas ornamentais um papel fundamental, não só na indústria extractiva, mas também na economia nacional. A região do Alentejo contribui sobremaneira para os valores registados, já que o seu contributo é superior a um quarto do valor global da produção das pedreiras do país, sendo esta expressividade potenciada pela localização privilegiada das pedreiras nesta região. Um dos principais centros mundiais de extracção de mármore localiza-se precisamente no anticlinal de Estremoz, na faixa de Estremoz - Borba - Vila Viçosa, e o seu contributo para o volume produzido e valor global gerado é inquestionável. No entanto com o avanço da exploração das pedreiras, os blocos extraídos apresentam mais impurezas e afloramentos de pior qualidade, o que reduz o seu valor comercial. É assim necessário aumentar a quantidade de rocha desmontada, originando um maior volume transportado para aterro, o que agrava ainda mais o problema da gestão de fim de vida destes materiais.

Se no passado esta prática não seria problemática, actualmente a Sociedade mostra-se cada vez mais sensibilizada para as questões ambientais e começa a consciencializar-se de que o consumo desregrado de recursos naturais está a tornar-se insustentável, aumentando a necessidade de encontrar mais e melhores soluções que permitam reutilizar / reciclar os materiais por outros produtos que desempenhem as mesmas funções e, no caso em estudo, não apenas depositá-los em escombrelas, ignorando os elevados impactes ambientais causados.

É indubitável que a indústria da construção, pelo elevado consumo de recursos naturais e pela variabilidade de soluções que pode apresentar, possui um enorme potencial para absorver este subproduto da indústria extractiva. Com a sua utilização, pode-se reduzir o consumo dos restantes recursos naturais e também contribuir de forma decisiva para o fim das escombrelas, que tanto impacte causam na envolvente ambiental em que se integram. Sendo o mármore também um recurso natural, pode apresentar resultados semelhantes aos demais utilizados nesta indústria, não originando as questões que outros materiais têm gerado.

Algumas soluções foram propostas para a utilização deste resíduo na indústria da construção. Sobre a forma de pó estudou-se a possibilidade de ser utilizado como estabilizante para solos, adição e fíler em betão, argamassa e misturas asfálticas, o incorporar em tijolo cerâmico e como adição na produção de cimento ou mesmo substituto deste. Contudo, esta solução requer um elevado consumo energético e económico para realizar, não sendo viável para reduzir drasticamente o volume acumulado durante anos. Como tal, surgiram outras aplicações com agregados de maiores dimensões, incorporando-os em pavimentos rodoviários e blocos de betão para pavimentos. Ainda assim, revelaram-se insuficientes para diminuir o volume a transportar para aterro e nem a legislação em vigor em Portugal desde 2002, para o ordenamento do território conseguiu inverter esta tendência.

Esta investigação surge com o intuito de contribuir com aquilo que pode ser mais uma utilização válida destes resíduos, contribuindo para a redução do volume depositado em aterro, e aprofundar o conhecimento das propriedades a nível da durabilidade dos betões produzidos com agregados de mármore. O conhecimento generalizado do desempenho dos agregados de mármore em termos de durabilidade e de resistência mecânica, relativos à influência do volume a incorporar, permitirá concluir sobre a sua adequabilidade às aplicações correntes.

5.2. Conclusões gerais

Durante o levantamento do estado de arte, foi realizada uma consulta da bibliografia disponível, que revelou a quase inexistência de investigação relativamente ao desempenho em termos de durabilidade dos betões produzidos com agregados grossos de mármore (AGM). Esta dissertação pretende contribuir para o aprofundar do conhecimento sobre esta temática, de modo a colmatar a lacuna verificada nos estudos desenvolvidos sobre AGM.

Os resultados obtidos com os ensaios aos agregados utilizados para produzir os diversos betões permitem demonstrar que os AGM não diferem significativamente dos agregados primários (AP). A variação da massa volúmica, relativamente aos agregados grossos de calcário (AGC) e aos agregados grossos de granito (AGG), não ultrapassa 1,3% e aumenta para 9,1% para os agregados grossos de basalto (AGB). Os AGM registaram apenas 0,66% de absorção de água, o equivalente a uma redução de 42,5% relativamente aos AGC, registando o melhor desempenho entre todos os agregados grossos. Demonstram ainda uma fraca resistência ao desgaste de *Los Angeles*, com um valor médio de 38,8%, o qual significa um aumento de 20,1% relativo aos AGC.

5.2.1. Betão no estado fresco

Desde o seu início, esta dissertação pretendeu apenas comparar betões com a mesma trabalhabilidade, onde a única variável em estudo fosse a variação da percentagem de AGM a introduzir, sem recorrer a qualquer correcção da relação *a/c*, ou ao uso de adjuvantes e adições. Este objectivo foi cumprido na íntegra ao garantir que todas as composições se mantiveram no intervalo definido de 115 ± 10 mm.

Nos betões produzidos com AGB e AGC, observou-se um ligeiro aumento da trabalhabilidade para uma taxa de substituição de 20%, possivelmente devido à superfície mais lisa dos AGM e à sua menor absorção, originando um aumento da fluidez do betão, e observou-se também uma diminuição da trabalhabilidade para uma taxa de substituição de 50%, provavelmente devido à contribuição superior do índice de forma relativamente ao aumento da fluidez introduzido. Para os betões produzidos com AGG, esta propriedade parece manter-se inalterada com a introdução de AGM, podendo esse facto dever-se ao elevado índice de forma dos AGG que se traduz num elevado ângulo de atrito do betão.

Conforme esperado, a massa volúmica do betão no estado fresco reflecte a massa volúmica de cada um dos seus componentes e o seu grau de compactação. Para betões produzidos com AGC e AGG, as variações registadas foram inferiores a 0,8%, expectável atendendo à produção de betão com a mesma trabalhabilidade e sem adição de água, utilizando agregados com massas volúmicas similares. Nos betões produzidos com AGB, a introdução de AGM origina uma diminuição em cerca de 1,5% da massa volúmica, para uma taxa de substituição de 50%, o que era esperado, uma vez que a massa volúmica dos AGB é superior à dos AGM.

5.2.2. Betão no estado endurecido

De forma semelhante ao verificado para o betão no estado fresco, os ensaios de durabilidade realizados ao betão no estado endurecido permitem concluir que a introdução de AGM em betão não provoca uma variação significativa das suas propriedades.

Relativamente à absorção de água por imersão, o desempenho dos betões produzidos com AGM foi semelhante ao registado para os betões produzidos com AP. Os resultados obtidos encontram-se contidos no nível de rigor do ensaio, o que pode demonstrar que esta propriedade não é significativamente influenciada pelo aumento da taxa de substituição. Tal seria esperado, atendendo à reduzida absorção dos agregados, à produção e cura semelhantes em todas as famílias e a uma possível similaridade a nível microestrutural, a qual não foi estudada no âmbito desta dissertação.

Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, constata-se que a introdução de AGM diminui este fenómeno em betões produzidos com AGC e AGG, registando uma maior expressividade para a taxa de substituição de 20%, o que se pode justificar pela maior compacidade do betão para esta taxa de substituição, como ficou demonstrado nos ensaios no estado fresco. No que concerne aos betões produzidos com AGB, a introdução de AGM conduz a um aumento da absorção por capilaridade. A pior aderência entre os AGM e a pasta cimentícia, quando comparada com a dos AGB, traduz-se num aumento dos poros na zona de interface, onde o fenómeno de absorção é mais frequente e intenso. Quando comparadas com outras campanhas experimentais, pode-se considerar que todas as famílias produzidas apresentam um bom comportamento relativamente à absorção por capilaridade.

A introdução de AGM não influencia significativamente a profundidade da frente de carbonatação dos diversos betões produzidos. Ainda assim, observa-se uma ligeira diminuição para os betões produzidos com AGB e um aumento para a introdução de AGM nas famílias com AGC e AGG, aos 91 dias. À semelhança do que se registou no ensaio de absorção por imersão, os resultados obtidos fazem prever uma semelhança a nível microestrutural entre as diversas composições, uma conclusão expectável sabendo que estas propriedades dependem dos mesmos factores.

Finalmente, observa-se que a introdução de AGM nos betões produzidos aumenta o coeficiente de migração de cloretos. Tal pode dever-se à reduzida percentagem de alumina existente nestes agregados. Este composto beneficia a formação de aluminato tricálcico, que favorece a fixação de iões cloreto. Se a sua quantidade diminui, a percentagem de cloro livre no interior da matriz cimentícia aumenta, e assim intensifica-se o fenómeno de migração de cloretos. A reduzida percentagem de alumina aparenta ser o principal factor explicativo para este acontecimento, uma vez que as absorções de água dos diversos betões produzidos foram semelhantes.

De uma forma geral, as propriedades no estado endurecido dos betões produzidos com AGM, ao nível da durabilidade, não diferem significativamente das propriedades dos betões produzidos com os restantes AP, com excepção feita aos resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos, onde a introdução de AGM origina um aumento significativo do coeficiente de migração.

5.3. Propostas de desenvolvimento futuro

A realização da presente dissertação permitiu avaliar as propriedades e características dos betões produzidos com AGM, relativamente à sua durabilidade. Deste modo, e identificadas as lacunas existentes na actualidade relativas a esta temática, espera-se ter contribuído de forma decisiva para o início da utilização sustentada desta solução, bem como reduzido a diferença temporal entre a investigação deste tema e a sua real aplicação em situações correntes.

No entanto, esta investigação é ainda insuficiente para suprimir todas as dúvidas existentes, permanecendo por analisar algumas propriedades importantes e a influência que algumas variáveis podem causar nas propriedades dos betões produzidos com AGM. Apenas a continuação dos estudos experimentais, análises técnicas e estudos e análises de viabilidade económica pode conduzir a uma aplicação generalizada desta solução e à sua introdução no mercado da construção como uma alternativa viável.

Nesse sentido, considera-se oportuno que se desenvolvam os seguintes temas futuramente:

- avaliação do desempenho de durabilidade de betão com substituição por agregados finos e por finos e grossos de mármore;
- avaliação do efeito das condições de cura nas propriedades de durabilidade de betões com agregados de mármore;
- avaliação do efeito de plastificantes e adições nas propriedades de durabilidade de betões com agregados de mármore;
- avaliação das reacções álcalis-sílica em betões com agregados de mármore;

- análise da resistência dos betões com mármore a condições extremas, como o fogo e os ciclos de gelo / degelo;
- mais-valia económica da utilização de mármore em betões.

Bibliografia

Livros / Textos / Dissertações

- Aïtcin, P.-C.** (1998) - *High-performance concrete*. Modern concrete technology 5, E. & F.N. Spon, London and New York;
- Akbulut, H., Gürer, C.** (2007) - *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*. Building and Environment, 42 (5), pp. 1921-1930;
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., Gutierrez, A.** (2009) - *Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios*. Waste Management, 29 (10), pp. 2707-2716;
- Alves, F.** (2007) - *Betões com agregados reciclados: levantamento do “state-of-the-art” experimental nacional*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa;
- Amorim, P.** (2008) - *Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Amrutha, Nayak, G., Narasimhan, M., Rajeeva, S. V.,** (2011) - *Chloride-ion impermeability of self-compacting high-volume fly ash concrete mixes*. International Journal of Civil & Environmental Engineering, 11 (4), pp. 29-35;
- Aruntaş, H. Y., Gürü, M., Dayi, M., Tekin, I.** (2010) - *Utilization of waste marble dust as an additive in cement production*. Materials and Design, 31 (8), pp. 4039-4042;
- Balázs, G. L., Kausay, T., Simon, T. K.** (2005) - *Technical guideline for recycled aggregate concrete in Hungary*. Fédération Internationale du Béton, Hungary;
- Barra, M.** (1996) - *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 223 p.;
- Binici, H., Kaplan, H., Yilmaz, S.** (2007) - *Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete*. Scientific Research and Essay, 2 (9), pp. 372-379;
- Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., Kaplan, H.** (2008) - *Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*. Journal of Materials Processing Technology, 208 (1-3), pp. 299-308;
- Bravo, M.** (2009) - *Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados provenientes da trituração de borracha de pneus usados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Brito, J. de,** (2005) - *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de síntese, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Brodtkom, F.** (2000) - *As boas práticas ambientais na indústria extractiva: um guia de referência*. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro;

- Buttler, A. M.** (2003) - *Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo, São Carlos; Versão Online no site do INETI: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/praticas_ambientais/indice.htm;
- Carrijo, P.** (2005) - *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo;
- Carvalho, J., Henriques, P., Falé, P., Luís, G.** (2008) - *Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45 (8), pp. 1306-1319;
- Chaikaew, C., Sukontasukkul, P.** (2006) - *Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber*. Construction and Building Materials, 20 (7), pp. 450-457;
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R.** (2010) - *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*. Construction and Building Materials, 24 (1), pp. 113-117;
- Costa, A., Appleton, J.** (2002) - *Parte II - Materiais*. Folhas da disciplina de estruturas de betão I, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 66 p.;
- Coutinho, A. S., Gonçalves, A.** (1994) - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I, LNEC, Lisboa;
- Coutinho, A. S., Gonçalves, A.** (1997) - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume II, LNEC, Lisboa;
- Dinis da Gama, C.** (2005) - *A obstrução ambientalista à indústria extractiva mineral*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 8 p.;
- Ergün, A.** (2011) - *Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials, 25 (2), pp. 806-812;
- Evangelista, L.** (2007) - *Betões executados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Fernandes, P.** (2005) - *Vigas de grande vão prefabricadas em betão de alta resistência pré-esforçado. Viabilidade, dimensionamento, fabrico e comportamento*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra;
- Fernandes, S.** (2011) - *Avaliação em termos de durabilidade de betões com agregados provenientes da trituração do vidro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Ferreira, R.** (2000) - *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*. Trabalho final de curso, Universidade do Minho, Guimarães;
- 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;
- Figueiredo, F.** (2005) - *Gestão integrada dos resíduos de construção e demolição*. FEUP, Porto;
- Fraj, A. B., Kismi, M., Mounanga, P.** (2010) - *Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 24 (6), pp. 1069-1077;

- Garros, M., Turatsinze, A.** (2008) - *On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates*. Resources, Conservation and Recycling, 52 (10), pp. 1209-1215;
- Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., Brostow, W.** (2012) - *Properties of concrete paving blocks made with waste marble*. Journal of Cleaner Production, 21 (1), pp. 62-70;
- Gesoglu, M., Guneyisi, E.** (2007) - *Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without sílica fume*. Materials and Structures, 40 (9), pp. 953-964;
- Giacobbe, S.** (2008) - *Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 105 p.;
- 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;
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E.** (2011) - *Use of waste marble aggregates in concrete*. Construction and Building Materials, 25 (3), pp. 1167-1171;
- Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A.** (2008) - *Use of waste plastic in concrete mixtures as aggregate replacement*. Waste Management, 28 (11), pp. 2041-2047;
- Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A.** (2009) - *Recycling of waste glass as partial replacement for fine aggregate in concrete*. Waste Management, 29 (2), pp. 655-659
- Jain, J. A., Neithalath, N.** (2009) - *Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes- Influence of test methods in microstructure*. Cement and Concrete Composites, 32 (2), pp. 148-156;
- Karavaşin, M., Terzi, S.** (2005) - *Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete*. Construction and Building Materials, 21 (3), pp. 616-620;
- Kew, H., Kenny, M.** (2009) - *Developing viable products using recycled rubber tyres in concrete*. Excellence in Concrete Construction through Innovation, Kingston University, pp. 523-531;
- Korkanç, M., Tuğrul, A.** (2004) - *Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate*. Engineering Geology, 75 (3-4), pp. 291-307;
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L.** (2009) - *Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes*. Waste Management, 29 (2), pp. 621-628;
- Kovler, K., Roussel, N.** (2011) - *Properties of fresh and hardened concrete*. Cement and Concrete Research, 41 (7), pp. 775-792;
- Levy, S.** (2001) - *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo;
- LNEC** (1991) - *Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz - Borba - Vila Viçosa (1º Estudo)*. CEVALOR, Borba, 48 p.;

- LNEC** (1992) - *Caracterização das escombreyras das explorações de mármore da região de Estremoz - Borba - Vila Viçosa (2º Estudo)*. CEVALOR, Borba, 37 p.;
- Lo, T** (2005) - *Carbonation & chloride penetration of concrete structures*. City University of Hong Kong, Annual Concrete Seminar presentation;
- Lopes, L., Silva, J. B.** (2004) - *Controle estrutural e constrangimentos geológicos na exploração de mármore no anticlinal de Estremoz - Alentejo - Portugal*, 5 p.;
- Missau, F.** (2004) - *Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS;
- Montgomery, D. G.** (1998) - *Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate*. Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate, Concrete Technology Unit International Symposium, University of Dundee, London, UK;
- Moura, A. Casal, Carvalho, C., Almeida, I. A., Saúde, J. G., Ramos, J. M. F., Augusto, J. P., Rodrigues, J. D., Carvalho, J. M. F., Martins, L. P., Matos, M. J., Machado, M. J. C., Sobreiro, M. J., Peres, M., Martins, N. A., Bonito, N., Henriques, P., Sobreiro, S.** (2007) - *Mármore e calcários ornamentais de Portugal*. Porto: INETI, 383 p.;
- Nepomuceno, P.** (1999) - *Estudo da composição de betões: provas de aptidão pedagógica e capacidade científica*. Universidade da Beira Interior, Covilhã;
- Neville, A.** (2002) - *Properties of concrete*. 4th Edition. Pearson, Prentice Hall, Essex, England;
- Okagbue, C. O., Oneyobi, T. U. S.** (1999) - *Potential of marble dust to stabilize red tropical soils for road construction*. Engineering Geology, 53 (3-4), pp. 371-380;
- Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., Santos, P.** (2008) - *Mechanical and durability properties of concrete with ground waste glass sand*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components, Istanbul, Turkey, CD-ROM;
- OSNET Editions** (2004) - *Environmental friendly practices for natural stone exploitation*. Risk Assessment, Safety and Environment Sector, European Commission, 124 p.;
- Pacheco Torgal, F., Castro-Gomes, J. P.** (2006) - *Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete*. Construction and Building Materials, 20 (10), pp. 1079-1088;
- Park, S. B., Lee, B. C., Kim, J. H.** (2004) - *Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregates*. Cement and Concrete Research, 34 (12), pp. 2181-2189;
- Pereira, C. G., Castro-Gomes, J., Oliveira, L.** (2009) - *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete*. Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 602-608;
- Popovics, S.** (1998) - *Strength and related properties of concrete: a quantitative approach*. Wiley. 535 p.;

- Rajabipour, F.** (2003) - *Fundamental investigations on utilizing electrical sensing to improve life cycle modeling of concrete structures*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Purdue, Estados Unidos da América;
- Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C., Spiratos, N.** (1998) - *Superplasticizers: properties and applications in concrete*. CANMET, Ottawa, Canada;
- 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;
- Rosa, A. P.** (2002) - *Utilização de agregados grossos cerâmicos na produção de betão*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- Rutley, F.** (1916) - *Elements of mineralogy*. T. Murby &co., 19th edition, 394 p.;
- Saboya Jr., F., Xavier, G. C., Alexandre, J.** (2005) - *The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic*. Construction and Building Materials, 21 (10), pp. 1950-1960;
- Senthamarai, RM., Manoharan, P. D., Gobinath, D.** (2011) - *Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties*. Construction and Building Materials, 25 (5), pp. 2413-2419;
- Solubema - Sociedade Luso - Belga de mármore S.A.** (2010) - *Processo produtivo (Extracção de mármore a céu aberto)*. Vila Viçosa, 19 p.;
- Sousa Coutinho, J.** (1999) - *Agregados para argamassas e betões*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 135 p.;
- Sousa Coutinho, J.** (2007) - *1ª Parte - Ligantes e caldas (actualização 2006)*. Folhas de disciplina de materiais de construção 2, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 152 p.;
- Spiesz, P., Brouwers, H. J. H.** (2010) - *Analysis of the theoretical model of the rapid chloride migration test*. 8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Kongens Lyngby, Dinamarca;
- Topçu, İ. B.** (1997) - *Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete*. Cement and Concrete Research, 27 (12), pp. 1817-1823;
- Topçu, İ. B., Bilir, T., Uygunoğlu, T.** (2009) - *Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 23 (5), pp. 1947-1953;
- Topçu, İ. B., Canbaz, M.** (2003) - *Properties of concrete containing waste glass*. Cement and Concrete Research, 34 (2), pp. 267-274;
- Topçu, İ. B., Günçan, N. F.** (1995) - *Using waste concrete as aggregate*. Cement and Concrete Research, 25 (7), pp. 1385-1390;
- Uysal, M., Yilmaz, K., Ipek, M.,** (2012) - *The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 27 (1), pp. 263-270;
- Wang, H.** (2008) - *A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete*. Waste Management, 29 (1), pp. 335-341;

Wang, H., Huang, W. (2010) - *Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass*. Construction and Building Materials, 24 (6), pp. 1008-1013.

Normas / Especificações de ensaios

- NP EN 206-1** (2007) - *Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, IPQ, Lisboa;
- LNEC E 237** (1971) - *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 463** (2004) - *Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*, LNEC, Lisboa;
- NF B 10-502** (1980) - *Produits de carrières. Pierres calcaires. Mesure de l'absorption d'eau par capillarité*, AFNOR, França;
- NP 956** (1973) - *Inertes para argamassas e betões: Determinação dos teores em água total e em água superficial*, IGPAL, Portugal;
- NP EN 933-1** (2000) - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração*, IPQ, Lisboa;
- NP EN 933-2** (1999) - *Ensaio das propriedades 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** (2003) - *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*, 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** (2002) - *Ensaio do betão fresco: Ensaio de Abaixamento*, IPQ, Lisboa;
- NP EN 12350-6** (2002) - *Ensaio do betão fresco: Massa Volúmica*, IPQ, Lisboa;
- NP EN 12390-3** (2003) - *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaios*, IPQ, Lisboa;
- NP EN 12620** (2002) + **A1** (2010) - *Agregados para betão*, IPQ, Lisboa.

Anexos

A. Composição dos betões

Identificação	BRM
Tipo de agregado secundário	Mármore
Percentagem de agregados grossos substituídos	100

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	-	-	0,121	331,5
	11,2-16	-	-	0,120	327,9
	8-11,2	-	-	0,046	127,2
	5,6-8	-	-	0,046	125,8
	4-5,6	-	-	0,040	110,7
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1816,8	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2355,8	

Identificação	BRC
Tipo de agregado primário	Calcário
Percentagem de agregados grossos substituídos	-

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,121	324,9	-	-
	11,2-16	0,120	321,3	-	-
	8-11,2	0,046	124,6	-	-
	5,6-8	0,046	123,3	-	-
	4-5,6	0,040	108,5	-	-
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1796,3	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2335,3	

Identificação	BC20
Tipo de agregado primário	Calcário
Percentagem de agregados grossos substituídos	20

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,097	259,9	0,024	66,3
	11,2-16	0,096	257,0	0,024	65,6
	8-11,2	0,037	99,7	0,009	25,4
	5,6-8	0,037	98,6	0,009	25,2
	4-5,6	0,032	86,8	0,008	22,1
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1800,4	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2339,4	

Identificação	BC50
Tipo de agregado primário	Calcário
Percentagem de agregados grossos substituídos	50

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,061	162,4	0,061	165,8
	11,2-16	0,060	160,7	0,060	163,9
	8-11,2	0,023	62,3	0,023	63,6
	5,6-8	0,023	61,6	0,023	62,9
	4-5,6	0,020	54,2	0,020	55,4
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1806,5	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2345,5	

Identificação	BRG
Tipo de agregado primário	Granito
Percentagem de agregados grossos substituídos	-

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,121	337,5	-	-
	11,2-16	0,120	333,8	-	-
	8-11,2	0,046	129,5	-	-
	5,6-8	0,046	128,0	-	-
	4-5,6	0,040	112,7	-	-
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1835,1	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2374,1	

Identificação	BG20
Tipo de agregado primário	Granito
Percentagem de agregados grossos substituídos	20

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,097	270,0	0,024	66,3
	11,2-16	0,096	267,0	0,024	65,6
	8-11,2	0,037	103,6	0,009	25,4
	5,6-8	0,037	102,4	0,009	25,2
	4-5,6	0,032	90,2	0,008	22,1
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1831,5	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2370,5	

Identificação	BG50
Tipo de agregado primário	Granito
Percentagem de agregados grossos substituídos	50

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,061	168,7	0,061	165,8
	11,2-16	0,060	166,9	0,060	163,9
	8-11,2	0,023	64,7	0,023	63,6
	5,6-8	0,023	64,0	0,023	62,9
	4-5,6	0,020	56,3	0,020	55,4
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1826,0	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2365,0	

Identificação	BRB
Tipo de agregado primário	Basalto
Percentagem de agregados grossos substituídos	-

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,121	366,4	-	-
	11,2-16	0,120	362,4	-	-
	8-11,2	0,046	140,6	-	-
	5,6-8	0,046	139,0	-	-
	4-5,6	0,040	122,4	-	-
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1924,5	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2463,5	

Identificação	BB20
Tipo de agregado primário	Basalto
Percentagem de agregados grossos substituídos	20

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,097	293,1	0,024	66,3
	11,2-16	0,096	289,9	0,024	65,6
	8-11,2	0,037	112,5	0,009	25,4
	5,6-8	0,037	111,2	0,009	25,2
	4-5,6	0,032	97,9	0,008	22,1
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1903,0	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2442,0	

Identificação	BB50
Tipo de agregado primário	Basalto
Percentagem de agregados grossos substituídos	50

Tipo de agregado	Intervalo de peneiros (mm)	Agregados primários		Agregados secundários	
		Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (m ³ /m ³)	Massa (kg/m ³)
Agregados grossos	16-22,4	0,061	183,2	0,061	165,8
	11,2-16	0,060	181,2	0,060	163,9
	8-11,2	0,023	70,3	0,023	63,6
	5,6-8	0,023	69,5	0,023	62,9
	4-5,6	0,020	61,2	0,020	55,4
Agregados finos	Areia grossa	0,238	619,1	-	-
	Areia fina	0,067	174,6	-	-
Total de agregados		0,679		1870,7	
Cimento		0,115		350,0	
Água		0,189		189,0	
Vazios		0,017		0,0	
Volume total		1,000		2409,7	

B. Análise granulométrica

Material	Basalto - Brita 3
Massa da amostra (g)	7158,5
Massa da amostra após lavagem (g)	7148,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	509,3	7,1	92,9	-
16	3496,2	48,9	44,0	56,0
11,2	2863,8	40,1	3,9	-
8	263,0	3,7	0,2	99,8
5,6	5,5	0,1	0,2	-
4	0,8	0,0	0,1	99,9
2	0,0	0,0	0,1	99,9
1	0,0	0,0	0,1	99,9
0,5	0,0	0,0	0,1	99,9
0,25	0,0	0,0	0,1	99,9
0,125	0,0	0,0	0,1	99,9
0,063	0,0	0,0	0,1	99,9
Refugo	10,5	0,1	-	-
Total	7148,8	100,0		
f (%)			0,28	
Módulo de finura			7,55	

Material	Basalto - Brita 1,5
Massa da amostra (g)	7044,6
Massa da amostra após lavagem (g)	7044,2

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	6380,8	90,6	9,4	-
8	654,0	9,3	0,1	99,9
5,6	0,0	0,0	0,1	-
4	1,2	0,0	0,1	99,9
2	1,0	0,0	0,1	99,9
1	1,2	0,0	0,1	99,9
0,5	0,0	0,0	0,1	99,9
0,25	0,0	0,0	0,1	99,9
0,125	0,0	0,0	0,1	99,9
0,063	0,0	0,0	0,1	99,9
Refugo	6,0	0,1	-	-
Total	7044,2	100,0		
f (%)			0,09	
Módulo de finura			6,99	

Material	Basalto - Brita 1
Massa da amostra (g)	1737,6
Massa da amostra após lavagem (g)	1734,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	122,9	7,1	92,9	-
8	1053,6	60,7	32,2	67,8
5,6	555,5	32,0	0,2	-
4	1,1	0,1	0,1	99,9
2	0,0	0,0	0,1	99,9
1	0,0	0,0	0,1	99,9
0,5	0,0	0,0	0,1	99,9
0,25	0,0	0,0	0,1	99,9
0,125	0,0	0,0	0,1	99,9
0,063	0,0	0,0	0,1	99,9
Refugo	1,6	0,1	-	-
Total	1734,8	100,0		
f (%)			0,25	
Módulo de finura			6,67	

Material	Basalto - Brita 0,5
Massa da amostra (g)	1559,8
Massa da amostra após lavagem (g)	1551,1

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	0,0	0,0	100,0	0,0
5,6	423,9	27,3	72,7	-
4	793,6	51,2	21,5	78,5
2	329,9	21,3	0,2	99,8
1	1,9	0,1	0,1	99,9
0,5	0,0	0,0	0,1	99,9
0,25	0,0	0,0	0,1	99,9
0,125	0,0	0,0	0,1	99,9
0,063	0,0	0,0	0,1	99,9
Refugo	1,6	0,1	-	-
Total	1551,1	100,0		
f (%)			0,66	
Módulo de finura			5,78	

Material	Calcário - Brita 2
Massa da amostra (g)	10233,7
Massa da amostra após lavagem (g)	10230,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	827,9	8,1	91,9	-
16	3675,1	35,9	56,0	44,0
11,2	3681,6	36,0	20,0	-
8	1317,8	12,9	7,1	92,9
5,6	667,7	6,5	0,6	-
4	52,9	0,5	0,1	99,9
2	0,9	0,0	0,1	99,9
1	0,0	0,0	0,1	99,9
0,5	0,0	0,0	0,1	99,9
0,25	0,0	0,0	0,1	99,9
0,125	0,0	0,0	0,1	99,9
0,063	0,0	0,0	0,1	99,9
Refugo	6,9	0,1	-	-
Total	10230,8	100,0		
f (%)			0,10	
Módulo de finura			7,36	

Material	Calcário - Brita 1
Massa da amostra (g)	3983,9
Massa da amostra após lavagem (g)	3983,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	59,8	1,5	98,5	1,5
11,2	885,5	22,2	76,3	-
8	1832,8	46,0	30,3	69,7
5,6	1007,3	25,3	5,0	-
4	148,8	3,7	1,2	98,8
2	46,5	1,2	0,1	99,9
1	1,6	0,0	0,0	100,0
0,5	0,4	0,0	0,0	100,0
0,25	0,3	0,0	0,0	100,0
0,125	0,2	0,0	0,0	100,0
0,063	0,5	0,0	0,0	100,0
Refugo	0,2	0,0	-	-
Total	3983,8	100,0		
f (%)			0,01	
Módulo de finura			6,70	

Material	Calcário - Brita 0,5
Massa da amostra (g)	894,6
Massa da amostra após lavagem (g)	894,6

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	1,3	0,1	99,9	0,1
5,6	171,7	19,2	80,7	-
4	357,8	40,0	40,7	59,3
2	312,8	35,0	5,7	94,3
1	47,2	5,3	0,4	99,6
0,5	3,2	0,4	0,1	99,9
0,25	0,4	0,0	0,0	100,0
0,125	0,1	0,0	0,0	100,0
0,063	0,1	0,0	0,0	100,0
Refugo	0,0	0,0	-	-
Total	894,6	100,0		
f (%)	0,00			
Módulo de finura	5,53			

Material	Granito - Brita 2
Massa da amostra (g)	6851,0
Massa da amostra após lavagem (g)	6823,9

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	20,8	0,3	99,7	-
16	3587,8	52,6	47,1	52,9
11,2	3109,8	45,6	1,5	-
8	57,2	0,8	0,7	99,3
5,6	12,3	0,2	0,5	-
4	0,3	0,0	0,5	99,5
2	0,0	0,0	0,5	99,5
1	0,0	0,0	0,5	99,5
0,5	0,0	0,0	0,5	99,5
0,25	0,0	0,0	0,5	99,5
0,125	0,0	0,0	0,5	99,5
0,063	0,0	0,0	0,5	99,5
Refugo	35,6	0,5	-	-
Total	6823,9	100,0		
f (%)	0,92			
Módulo de finura	7,49			

Material	Granito - Brita 1
Massa da amostra (g)	2430,9
Massa da amostra após lavagem (g)	2404,8

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	50,9	2,1	97,9	2,1
11,2	789,9	32,8	65,0	-
8	889,0	37,0	28,1	71,9
5,6	585,9	24,4	3,7	-
4	55,4	2,3	1,4	98,6
2	9,3	0,4	1,0	99,0
1	2,4	0,1	0,9	99,1
0,5	2,1	0,1	0,8	99,2
0,25	0,0	0,0	0,8	99,2
0,125	0,0	0,0	0,8	99,2
0,063	0,0	0,0	0,8	99,2
Refugo	19,5	0,8	-	-
Total	2404,8	100,0		
f (%)			1,88	
Módulo de finura			6,68	

Material	Granito - Brita 0,5
Massa da amostra (g)	2396,3
Massa da amostra após lavagem (g)	2237,2

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	0,0	0,0	100,0	0,0
5,6	19,0	0,9	99,1	-
4	804,0	35,9	63,2	36,8
2	1067,7	47,7	15,5	84,5
1	191,2	8,5	6,9	93,1
0,5	74,6	3,3	3,6	96,4
0,25	34,6	1,5	2,1	97,9
0,125	18,0	0,8	1,2	98,8
0,063	0,0	0,0	1,2	98,8
Refugo	27,9	1,2	-	-
Total	2237,2	100,0		
f (%)			7,80	
Módulo de finura			5,07	

Material	Mármore - Brita 2
Massa da amostra (g)	5872,9
Massa da amostra após lavagem (g)	5821,6

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	2906,1	49,9	50,1	49,9
11,2	2820,5	48,4	1,6	-
8	63,7	1,1	0,5	99,5
5,6	2,1	0,0	0,5	-
4	0,0	0,0	0,5	99,5
2	0,0	0,0	0,5	99,5
1	0,0	0,0	0,5	99,5
0,5	0,0	0,0	0,5	99,5
0,25	0,0	0,0	0,5	99,5
0,125	0,0	0,0	0,5	99,5
0,063	0,0	0,0	0,5	99,5
Refugo	29,0	0,5	-	-
Total	5821,6	100,0		
f (%)	1,37			
Módulo de finura	7,46			

Material	Mármore - Brita 1
Massa da amostra (g)	1885,4
Massa da amostra após lavagem (g)	1878,4

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	234,7	12,5	87,5	-
8	1078,4	57,4	30,1	69,9
5,6	547,5	29,1	1,0	-
4	14,7	0,8	0,2	99,8
2	0,0	0,0	0,2	99,8
1	0,0	0,0	0,2	99,8
0,5	0,0	0,0	0,2	99,8
0,25	0,0	0,0	0,2	99,8
0,125	0,0	0,0	0,2	99,8
0,063	0,0	0,0	0,2	99,8
Refugo	3,2	0,2	-	-
Total	1878,4	100,0		
f (%)	0,54			
Módulo de finura	6,69			

Material	Mármore - Brita 0,5
Massa da amostra (g)	2025,4
Massa da amostra após lavagem (g)	2009,2

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
			Passado	Retido
	(g)	(%)	(%)	(%)
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	0,0	100,0	-
16	0,0	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	0,0	100,0	-
8	0,0	0,0	100,0	0,0
5,6	120,7	6,0	94,0	-
4	1526,2	76,0	18,0	82,0
2	352,8	17,6	0,5	99,5
1	1,5	0,1	0,4	99,6
0,5	1,1	0,1	0,3	99,7
0,25	1,2	0,1	0,3	99,7
0,125	1,5	0,1	0,2	99,8
0,063	0,0	0,0	0,2	99,8
Refugo	3,9	0,2	-	-
Total	2009,2	100,0		
f (%)	0,99			
Módulo de finura	5,80			

C. Massa volúmica e absorção de água

Basalto**Brita 3**

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	7926,2	22,0	5279,9	21,5	3961,7	3937,8	3042,4	2987,1	3005,2	0,607
A2	7862,6	21,5	5153,5	21,5	4079,9	4056,1	3005,0	2952,8	2970,1	0,587
A3	8065,0	22,0	5250,4	21,5	4209,7	4185,5	3046,4	2993,6	3010,9	0,578

Brita 1,5

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	8960,4	20,0	5159,9	20,0	5735,5	5692,7	3003,2	2936,8	2958,9	0,752
A2	9115,4	20,0	5140,5	20,0	5976,7	5936,7	3020,9	2960,5	2980,4	0,674
A3	9271,1	20,0	5303,0	20,5	6009,3	5968,0	2978,9	2918,7	2938,9	0,692

Brita 1

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	7349,8	20,0	5275,1	20,5	3130,4	3102,8	3012,7	2933,9	2960,0	0,890
A2	7184,1	20,0	5263,3	20,0	2853,1	2827,9	3112,1	3027,9	3054,9	0,891
A3	8298,8	20,0	5144,4	20,0	4760,4	4715,2	3015,7	2930,9	2958,9	0,959

Brita 0,5

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	2509,9	21,5	1553,6	21,5	1441,4	1429,5	3014,7	2940,7	2965,2	0,832
A2	2809,5	21,5	1563,2	22,0	1882,8	1866,1	3004,6	2925,7	2951,9	0,895
A3	2726,7	21,5	1547,5	22,0	1781,1	1763,0	3013,6	2923,0	2953,0	1,027

Calcário**Brita 2**

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	8348,7	18,0	5148,7	18,5	5164,9	5113,5	2668,7	2598,9	2625,0	1,005
A2	8357,4	17,0	5148,7	17,0	5130,0	5083,0	2708,7	2642,5	2666,9	0,925
A3	8359,0	17,0	5148,7	17,0	5122,8	5071,3	2721,8	2648,5	2675,4	1,016

Brita 1

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	7099,7	21,0	5213,9	20,5	3005,0	2968,7	2736,1	2647,3	2679,7	1,223
A2	7120,2	21,0	5221,8	19,5	3039,7	2997,9	2721,3	2621,6	2658,1	1,394
A3	7103,9	21,0	5223,5	19,5	2989,0	2953,7	2746,6	2659,1	2690,9	1,195

Brita 0,5

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	2262,8	21,0	1542,7	20,5	1150,8	1137,8	2718,6	2636,6	2666,7	1,143
A2	2266,1	20,5	1554,6	21,0	1128,4	1113,8	2763,4	2666,7	2701,6	1,311
A3	2271,7	20,5	1551,3	20,0	1149,7	1136,9	2724,6	2643,4	2673,1	1,126

Granito

Brita 2

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	8174,2	20,0	5060,9	20,0	4870,0	4842,9	2795,1	2752,0	2767,4	0,560
A2	8730,2	20,0	5220,3	20,0	5506,3	5473,5	2782,6	2736,9	2753,3	0,599
A3	8861,8	20,0	5135,4	20,0	5849,5	5810,4	2783,2	2732,0	2750,3	0,673

Brita 1

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	6917,8	20,0	5145,2	20,0	2783,2	2759,7	2790,9	2726,0	2749,2	0,852
A2	7335,8	20,0	5155,5	20,0	3436,8	3404,4	2776,3	2704,7	2730,4	0,952
A3	7241,0	20,0	5110,3	20,0	3333,3	3301,8	2814,5	2740,7	2766,9	0,954

Brita 0,5

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	2634,3	20,0	1558,9	20,0	1702,2	1677,1	2782,4	2671,0	2710,9	1,497
A2	2629,4	20,0	1555,7	20,0	1715,0	1679,0	2769,0	2613,5	2669,6	2,144
A3	2642,6	20,0	1547,7	20,0	1735,9	1710,9	2772,6	2664,4	2703,4	1,461

Mármore

Brita 2

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	7930,2	20,0	5117,9	20,5	4455,7	4436,5	2726,7	2694,9	2706,5	0,433
A2	8061,9	20,0	5148,7	20,5	4597,5	4576,4	2746,7	2712,3	2724,8	0,461
A3	7823,7	20,0	5136,7	20,5	4231,3	4213,0	2756,0	2723,3	2735,2	0,434

Brita 1

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	7300,4	20,0	5139,1	20,0	3436,9	3407,8	2729,1	2666,9	2689,6	0,854
A2	7122,6	20,0	5219,0	20,0	3009,2	2990,2	2747,1	2699,9	2717,0	0,635
A3	6683,5	20,0	5086,5	20,0	2529,5	2513,0	2738,6	2690,2	2707,9	0,657

Brita 0,5

Amostra	M ₂ (g)	T ₁ (°C)	M ₃ (g)	T ₂ (°C)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (kg/m ³)	ρ _{rd} (kg/m ³)	ρ _{ssd} (kg/m ³)	WA ₂₄ (%)
A1	2529,8	20,0	1563,6	20,0	1540,7	1527,1	2717,8	2653,5	2677,1	0,891
A2	2570,3	20,0	1561,0	20,0	1601,5	1589,2	2735,7	2678,9	2699,6	0,774
A3	2554,1	20,0	1562,1	20,0	1579,0	1566,2	2722,8	2663,5	2685,2	0,817

Areia grossa

Amostra	M₂ (g)	T₁ (°C)	M₃ (g)	T₂ (°C)	M₁ (g)	M₄ (g)	ρ_a (kg/m³)	ρ_{rd} (kg/m³)	ρ_{ssd} (kg/m³)	WA₂₄ (%)
A1	2260,5	18,0	1508,3	16,0	1214,1	1212,6	2630,2	2621,7	2633,5	0,124
A2	2116,5	18,0	1508,3	17,0	982,2	982,0	2623,5	2622,1	2624,0	0,020
A3	2141,2	17,0	1510,3	17,0	1020,1	1020,1	2617,9	2617,9	2617,9	0,000

Areia fina

Amostra	M₂ (g)	T₁ (°C)	M₃ (g)	T₂ (°C)	M₁ (g)	M₄ (g)	ρ_a (kg/m³)	ρ_{rd} (kg/m³)	ρ_{ssd} (kg/m³)	WA₂₄ (%)
A1	1982,9	19,0	1249,6	17,0	1201,5	1200,0	2567,3	2559,0	2570,5	0,125
A2	1860,0	18,0	1249,6	17,0	999,9	999,3	2566,1	2562,1	2567,6	0,060
A3	2051,8	17,0	1481,2	17,0	924,7	923,9	2612,0	2606,1	2614,2	0,087

D. Baridade e volume de vazios

Basalto

	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{G}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{G}_b (%)
Brita 3	23842	8647	10	1519,5	49,0	1514,1	49,2
	23802			1515,5	49,1		
	23719			1507,2	49,4		
Brita 1,5	23716	8647	10	1506,9	48,7	1507,9	48,7
	23742			1509,5	48,6		
	23721			1507,4	48,7		
Brita 1	23273	8650	10	1462,3	50,7	1470,3	50,4
	23410			1476,0	50,2		
	23376			1472,6	50,3		
Brita 0,5	6083	1858	3	1408,1	51,9	1408,5	51,9
	6089			1410,3	51,9		
	6080			1407,2	52,0		

Calcário

	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{G}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{G}_b (%)
Brita 2	22784	8587	10	1419,7	46,0	1426,2	45,8
	22955			1436,8	45,4		
	22808			1422,1	45,9		
Brita 1	22891	8571	10	1432,0	45,8	1424,9	46,1
	22706			1413,5	46,5		
	22862			1429,1	45,9		
Brita 0,5	22884	8564	10	1432,0	45,9	1438,3	45,7
	22699			1413,5	46,6		
	23257			1469,3	44,5		

Granito

	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{G}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{G}_b (%)
Brita 2	21936	8647	10	1328,9	51,5	1339,7	51,1
	22027			1338,0	51,2		
	22168			1352,1	50,7		
Brita 1	21980	8598	10	1338,2	50,9	1325,5	51,3
	21861			1326,3	51,3		
	21718			1312,0	51,8		
Brita 0,5	6100	1859	3	1413,8	46,6	1383,6	47,8
	5962			1367,7	48,4		
	5966			1369,2	48,3		

Mármore

	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{S}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{S}_b (%)
Brita 2	22227	8650	10	1357,7	49,9	1363,3	49,7
	22368			1371,8	49,4		
	22253			1360,3	49,8		
Brita 1	22555	8654	10	1390,1	48,2	1378,1	48,7
	22406			1375,2	48,8		
	22344			1369,0	49,0		
Brita 0,5	5808	1859	3	1316,4	50,6	1313,6	50,7
	5768			1303,1	51,1		
	5823			1321,5	50,4		

Areia grossa

Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{S}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{S}_b (%)
2689	1176	1	1513,0	42,3	1543,0	41,1
2723			1547,0	41,0		
2745			1569,0	40,1		

Areia fina

Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	\mathcal{S}_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	\mathcal{S}_b (%)
2681	1176	1	1505,0	41,6	1500,0	41,8
2673			1497,0	41,9		
2674			1498,0	41,8		

E. Desgaste de *Los Angeles*

		Composição	N.º de esferas	Massa das esferas recomendada	Massa do provete de ensaio	Massa do material retido após desgaste	P _a (%)
Basalto	Brita 3	B	11	4584 ± 25	5000,4	4436,3	11,28
	Brita 1,5	B	11	4584 ± 25	5001,4	4540,4	9,22
	Brita 0,5	D	6	2500 ± 15	5000,3	4260,7	14,79
Calcário	Brita 2	A	12	5000 ± 25	5003,8	3406,7	31,92
	Brita 1	B	11	4587 ± 25	5000	3458,0	30,84
	Brita 0,5	C	8	3330 ± 20	5000,3	3292,4	34,16
Granito	Brita 2	B	11	4589 ± 25	5000,4	3903,4	21,94
	Brita 0,5	D	6	2500 ± 15	5000,3	3629,4	27,42
Mármore	Brita 2	B	11	4591 ± 25	5000,7	3045,5	39,10
	Brita 0,5	D	6	2500 ± 15	5000,1	3074,3	38,52

F. Teor em água total

		M_1 (g)	M_2 (g)	w_t (%)	w_{tb} (%)
Basalto	Brita 3	7750,4	7706,8	0,57	0,57
		10205,3	10147,2	0,57	
		7010,2	6970,1	0,58	
	Brita 1,5	4098,4	4076,5	0,54	0,53
		3850,3	3830,0	0,53	
		3313,7	3296,5	0,52	
	Brita 1	3708,2	3686,7	0,58	0,58
		3836,3	3814,7	0,57	
		3492,7	3472,3	0,59	
	Brita 0,5	3881,9	3848,2	0,88	0,89
		3710,9	3677,9	0,90	
		2384,0	2362,6	0,91	
Granito	Brita 2	5843,5	5831,1	0,21	0,21
		5567,5	5555,4	0,22	
		4878,2	4867,9	0,21	
	Brita 1	2973,3	2953,3	0,68	0,66
		2923,9	2905,0	0,65	
		3014,3	2995,2	0,64	
	Brita 0,5	3038,4	2967,6	2,39	2,44
		3043,1	2969,1	2,49	
		3034,0	2961,3	2,46	
Mármore	Brita 2	4153,9	4152,9	0,02	0,02
		5418,8	5417,5	0,02	
		4685,8	4685,0	0,02	
	Brita 1	2543,9	2543,3	0,02	0,02
		2449,5	2448,8	0,03	
		2835,1	2834,5	0,02	
	Brita 0,5	2821,8	2821,0	0,03	0,05
		2716,6	2714,7	0,07	
		2430,0	2428,4	0,07	

G. Índice de forma

Basalto					
Brita 3					
Fracção	M₀ (g)	M_{li} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	3085,9	110,4	3,6	-	21,8
22,4-16		1548,6	50,2	249,4	
16-11,2		1290,7	41,8	370,2	
11,2-8		136,0	4,4	-	
8-5,6		0,2	0,0	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	
Brita 1,5					
Fracção	M₀ (g)	M_{li} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	3070,8	0,0	0,0	-	17,0
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		2673,7	87,1	366,3	
11,2-8		397,1	12,9	156	
8-5,6		0,0	0,0	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	
Brita 1					
Fracção	M₀ (g)	M_{li} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	506,2	0,0	0,0	-	25,4
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		46,8	9,2	-	
11,2-8		357,1	70,5	73,3	
8-5,6		102,1	20,2	43,4	
5,6-4		0,2	0,0	-	
Brita 0,5					
Fracção	M₀ (g)	M_{li} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	190,2	0,0	0,0	-	29,4
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		0,0	0,0	-	
11,2-8		0,0	0,0	-	
8-5,6		98,1	51,6	22,0	
5,6-4		92,1	48,4	34,0	

Calcário

Brita 2

Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	6049,8	473,2	7,8	-	12,7
22,4-16		2162,8	35,7	214,6	
16-11,2		2488,4	41,1	376,6	
11,2-8		601,5	9,9	-	
8-5,6		298,4	4,9	-	
5,6-4		25,5	0,4	-	

Brita 1

Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	1001,9	22,7	2,3	-	18,2
22,4-16		239,0	23,9	26,9	
16-11,2		489,2	48,8	100,2	
11,2-8		222,4	22,2	46,1	
8-5,6		28,6	2,9	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	

Brita 0,5

Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	123,0	0,0	0,0	-	17,6
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		0,0	0,0	-	
11,2-8		38,0	30,9	6,7	
8-5,6		85,0	69,1	14,9	
5,6-4		0,0	0,0	-	

Granito					
Brita 2					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	3049	0,0	0,0	-	40,1
22,4-16		1387,4	45,5	315,4	
16-11,2		1621,0	53,2	889,5	
11,2-8		39,4	1,3	-	
8-5,6		1,2	0,0	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	
Brita 1					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	550,3	0,0	0,0	-	48,1
22,4-16		11,6	2,1	-	
16-11,2		201,2	36,6	88	
11,2-8		207,0	37,6	115,3	
8-5,6		120,5	21,9	51,2	
5,6-4		10,0	1,8	-	
Brita 0,5					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	116,3	0,0	0,0	-	24,9
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		0,0	0,0	-	
11,2-8		1,9	1,6	-	
8-5,6		3,1	2,7	-	
5,6-4		111,3	95,7	27,7	

Mármore

Brita 2					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	3499,9	24,8	0,7	-	28,8
22,4-16		1150,7	32,9	208,2	
16-11,2		2199,6	62,8	755,8	
11,2-8		121,8	3,5	-	
8-5,6		2,6	0,1	-	
5,6-4		0,4	0,0	-	
Brita 1					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	721,8	0,0	0,0	-	31,5
22,4-16		62,7	8,7	-	
16-11,2		181,5	25,1	52,4	
11,2-8		391,1	54,2	123,9	
8-5,6		85,5	11,8	31,1	
5,6-4		1,0	0,1	-	
Brita 0,5					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4	136,1	0,0	0,0	-	30,1
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2		0,0	0,0	-	
11,2-8		0,0	0,0	-	
8-5,6		10,1	7,4	-	
5,6-4		126,0	92,6	37,9	

H. Absorção de água por imersão

AP	Betão	Provete	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	A_i (%)	$A_{i,médio}$ (%)
Basalto	BRB	1	2553,7	1548,4	2418,0	13,5	13,6
		2	2560,9	1555,2	2427,1	13,3	
		3	2541,8	1538,9	2406,0	13,5	
		4	2522,8	1524,4	2383,3	14,0	
	BB20	1	2578,8	1556,4	2434,7	14,1	14,4
		2	2518,3	1507,8	2368,2	14,9	
		3	2546,8	1536,6	2405,0	14,0	
		4	2535,4	1521,4	2388,5	14,5	
	BB50	1	2484,7	1480,2	2342,6	14,1	14,4
		2	2464,6	1455,6	2314,8	14,8	
		3	2499,1	1487,4	2357,2	14,0	
		4	2477,9	1469,3	2332,4	14,4	
Calcário	BRC	1	2462,0	1440,8	2319,9	13,9	14,1
		2	2440,7	1428,0	2299,1	14,0	
		3	2424,1	1411,3	2277,4	14,5	
		4	2437,2	1423,9	2295,1	14,0	
	BC20	1	2454,5	1435,5	2312,0	14,0	13,8
		2	2439,7	1425,8	2294,2	14,4	
		3	2459,3	1444,1	2322,5	13,5	
		4	2452,2	1441,6	2317,7	13,3	
	BC50	1	2472,2	1456,5	2339,7	13,0	13,3
		2	2461,1	1446,0	2323,1	13,6	
		3	2456,0	1443,2	2318,7	13,6	
		4	2473,0	1459,2	2339,5	13,2	
Granito	BRG	1	2444,0	1439,5	2301,1	14,2	13,8
		2	2488,1	1471,7	2352,6	13,3	
		3	2475,7	1459,7	2336,1	13,7	
		4	2454,7	1445,0	2315,2	13,8	
	BG20	1	2466,4	1456,3	2332,0	13,3	13,6
		2	2500,1	1473,4	2360,5	13,6	
		3	2493,2	1472,0	2355,8	13,5	
		4	2485,7	1465,1	2344,0	13,9	
	BG50	1	2414,6	1412,2	2271,3	14,3	14,0
		2	2446,0	1435,0	2305,9	13,9	
		3	2418,9	1415,6	2277,5	14,1	
		4	2433,4	1425,3	2293,4	13,9	
Mármore	BRM	1	2434,3	1426,6	2299,3	13,4	14,0
		2	2427,1	1417,6	2283,9	14,2	
		3	2437,1	1426,5	2294,4	14,1	
		4	2446,4	1426,8	2301,1	14,3	

I. Absorção de água por capilaridade

Agregado primário: Basalto							
Betão	Provete	Área (mm²)	M₀ (g)	t_i (h)	M_i (g)	h_i (mm)	Ac_i (g/mm²)
BRB	1	10000	6213,3	3	6216,0	12,0	0,00027
				6	6216,5	12,0	0,00032
				24	6218,7	12,0	0,00054
				72	6220,1	12,0	0,00068
	2		6298,7	3	6301,3	18,3	0,00026
				6	6301,7	18,3	0,00030
				24	6304,0	19,8	0,00053
				72	6305,3	22,0	0,00066
	3		6279,5	3	6282,7	16,0	0,00032
				6	6283,7	16,8	0,00042
				24	6286,3	19,8	0,00068
				72	6288,1	19,8	0,00086
	4		6308,1	3	6311,1	12,3	0,00030
				6	6311,5	12,3	0,00034
				24	6313,5	14,0	0,00054
				72	6314,9	15,8	0,00068
BB20	1	10000	6313,8	3	6317,4	12,8	0,00036
				6	6318,0	12,8	0,00042
				24	6320,7	13,3	0,00069
				72	6323,6	13,3	0,00098
	2		6196,0	3	6200,0	12,8	0,00040
				6	6200,9	12,8	0,00049
				24	6203,7	14,3	0,00077
				72	6206,8	14,3	0,00108
	3		6266,8	3	6270,2	10,8	0,00034
				6	6270,8	10,8	0,00040
				24	6273,0	10,8	0,00062
				72	6275,8	15,5	0,00090
	4		6093,5	3	6097,5	12,5	0,00040
				6	6098,4	17,0	0,00049
				24	6100,9	20,3	0,00074
				72	6103,7	20,3	0,00102
BB50	1	10000	5973	3	5976,2	13,0	0,00032
				6	5977,3	13,0	0,00043
				24	5979,8	13,0	0,00068
				72	5984,7	17,0	0,00117
	2		6098,5	3	6102,2	15,3	0,00037
				6	6103,4	15,3	0,00049
				24	6106,4	15,8	0,00079
				72	6111,5	24,8	0,00130
	3		6079,1	3	6082,7	16,3	0,00036
				6	6083,8	16,3	0,00047
				24	6086,3	23,5	0,00072
				72	6091,0	25,3	0,00119
	4		6042,8	3	6046,5	10,3	0,00037
				6	6047,4	10,3	0,00046
				24	6049,8	10,3	0,00070
				72	6054,5	15,0	0,00117

Agregado primário: Calcário

Betão	Provete	Área (mm ²)	M ₀ (g)	t _i (h)	M _i (g)	h _i (mm)	Ac _i (g/mm ²)
BRC	1	10000	6054,5	3	6059,4	15,5	0,00049
				6	6061,6	17,5	0,00071
				24	6065,6	19,8	0,00111
				72	6068,9	19,8	0,00144
	2		5937,0	3	5941,2	13,0	0,00042
				6	5942,1	16,8	0,00051
				24	5946,6	20,8	0,00096
				72	5949,6	20,8	0,00126
	3		6033,6	3	6039,0	10,8	0,00054
				6	6040,3	16,5	0,00067
				24	6044,8	23,3	0,00112
				72	6049,0	23,3	0,00154
	4		6065,3	3	6070,2	9,3	0,00049
				6	6071,6	17,8	0,00063
				24	6076,0	21,3	0,00107
				72	6079,7	21,3	0,00144
BC20	1	10000	6034,5	3	6037,8	7,8	0,00033
				6	6039,6	11,5	0,00051
				24	6042,1	11,5	0,00076
				72	6045,8	11,5	0,00113
	2		5915,3	3	5919,2	7,5	0,00039
				6	5920,8	13,8	0,00055
				24	5922,9	13,8	0,00076
				72	5926,9	13,8	0,00116
	3		6110,9	3	6115,4	10,8	0,00045
				6	6117,3	13,0	0,00064
				24	6119,3	13,0	0,00084
				72	6122,9	13,0	0,00120
	4		5996,7	3	6000,8	7,5	0,00041
				6	6002,4	12,3	0,00057
				24	6004,8	12,3	0,00081
				72	6008,7	12,3	0,00120
BC50	1	10000	6031,3	3	6036,1	11,3	0,00048
				6	6037,1	11,3	0,00058
				24	6041,0	13,0	0,00097
				72	6045,1	17,5	0,00138
	2		5939,5	3	5944,3	12,8	0,00048
				6	5945,4	13,5	0,00059
				24	5949,6	13,5	0,00101
				72	5953,4	21,3	0,00139
	3		6016,2	3	6020,7	10,8	0,00045
				6	6021,7	12,8	0,00055
				24	6025,7	12,8	0,00095
				72	6029,3	19,8	0,00131
	4		5953,9	3	5958,0	9,3	0,00041
				6	5959,0	13,0	0,00051
				24	5962,8	13,0	0,00089
				72	5966,1	18,8	0,00122

Agregado primário: Granito

Betão	Provete	Área (mm ²)	M ₀ (g)	t _i (h)	M _i (g)	h _i (mm)	Ac _i (g/mm ²)
BRG	1	10000	6105,5	3	6109,5	25,5	0,00040
				6	6110,8	32,0	0,00053
				24	6114,6	34,8	0,00091
				72	6119,8	37,5	0,00143
	2		6151,3	3	6154,3	20,5	0,00030
				6	6155,7	23,3	0,00044
				24	6159,1	25,5	0,00078
				72	6164,2	28,3	0,00129
	3		6109,1	3	6112,6	16,8	0,00035
				6	6114,1	21,5	0,00050
				24	6117,6	21,5	0,00085
				72	6122,3	23,8	0,00132
	4		6061,7	3	6065,4	23,8	0,00037
				6	6066,8	24,8	0,00051
				24	6070,5	31,0	0,00088
				72	6075,8	35,3	0,00141
BG20	1	10000	6022,3	3	6026,7	17,3	0,00044
				6	6027,9	18,3	0,00056
				24	6031,2	19,5	0,00089
				72	6033,6	19,5	0,00113
	2		6002,1	3	6005,2	13,0	0,00031
				6	6006,1	13,0	0,00040
				24	6009,0	14,3	0,00069
				72	6011,3	14,3	0,00092
	3		5977,8	3	5980,6	11,5	0,00028
				6	5981,4	12,0	0,00036
				24	5984,7	16,3	0,00069
				72	5986,8	16,3	0,00090
	4		6016,1	3	6018,5	12,3	0,00024
				6	6019,5	12,3	0,00034
				24	6022,3	15,0	0,00062
				72	6024,2	15,0	0,00081
BG50	1	10000	5968,8	3	5972,1	7,8	0,00033
				6	5972,9	7,8	0,00041
				24	5975,9	12,5	0,00071
				72	5979,9	12,5	0,00111
	2		6117,1	3	6121,2	8,0	0,00041
				6	6121,7	8,0	0,00046
				24	6125,2	12,3	0,00081
				72	6129,5	15,3	0,00124
	3		6039,5	3	6043,3	15,0	0,00038
				6	6044,2	15,0	0,00047
				24	6047,1	15,0	0,00076
				72	6050,6	18,3	0,00111
	4		5989,3	3	5993,4	14,8	0,00041
				6	5994,5	14,8	0,00052
				24	5997,4	16,8	0,00081
				72	6001,3	18,0	0,00120

Agregado secundário: Mármore

Betão	Proвете	Área (mm ²)	M ₀ (g)	t _i (h)	M _i (g)	h _i (mm)	Ac _i (g/mm ²)
BRM	1	10000	5934,2	3	5937,6	13,0	0,00034
				6	5938,1	13,0	0,00039
				24	5940,6	14,3	0,00064
				72	5941,4	14,3	0,00072
	2		5899,6	3	5903,1	14,8	0,00035
				6	5903,8	17,8	0,00042
				24	5906,6	18,8	0,00070
				72	5908,2	18,8	0,00086
	3		5972,0	3	5975,6	11,8	0,00036
				6	5976,3	12,0	0,00043
				24	5978,9	12,0	0,00069
				72	5980,1	12,0	0,00081
	4		5925,4	3	5929,3	14,3	0,00039
				6	5929,9	15,3	0,00045
				24	5931,9	15,3	0,00065
				72	5933,4	16,5	0,00080

J. Resistência à carbonatação

BRB							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	3,57	7,00	3,24	4,66	3,66	5,43
	2	3,76	4,46	3,15	5,87	3,61	6,16
	3	3,08	4,47	3,17	10,86	3,59	4,44
	4	3,76	5,74	3,12	5,64	3,34	5,56
	5	4,16	5,07	3,63	5,45	3,57	5,63
	6	3,69	5,61	2,88	4,13	3,74	5,61
	7	3,80	4,68	2,83	3,84	3,73	5,93
	8	3,55	5,87	3,36	4,97	3,34	6,39
28	1	8,33	10,51	8,97	11,35	7,22	9,96
	2	8,21	10,99	8,32	1,30	8,64	10,24
	3	9,00	12,26	8,23	11,66	9,28	10,15
	4	8,53	11,68	8,25	10,30	7,46	9,45
	5	9,20	12,48	8,20	10,65	7,30	10,83
	6	9,80	11,86	7,69	11,11	9,76	12,88
	7	9,58	11,29	7,85	10,80	9,20	12,33
	8	8,57	11,49	9,00	12,91	7,25	10,54
56	1	9,09	11,59	11,83	15,10	11,33	13,83
	2	9,35	11,54	12,71	14,08	9,93	12,00
	3	9,86	11,33	12,94	14,48	9,79	11,72
	4	10,20	14,16	10,42	12,49	11,17	18,26
	5	10,52	13,94	10,63	12,11	10,58	17,68
	6	10,79	12,34	10,98	14,79	10,26	12,22
	7	10,37	11,41	10,75	13,92	10,23	13,35
	8	9,25	12,12	12,06	16,33	11,31	13,78
91	1	14,56	19,05	14,07	17,30	14,78	17,34
	2	14,97	17,88	11,71	15,28	14,94	17,46
	3	13,82	17,89	12,00	16,03	15,94	18,33
	4	13,86	17,48	12,79	16,95	11,81	15,11
	5	14,06	16,60	13,76	16,16	11,93	16,78
	6	13,82	19,38	12,78	16,14	12,19	15,37
	7	13,85	19,09	12,42	16,27	11,72	15,09
	8	14,23	18,66	14,19	16,80	14,68	18,31

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,67	5,36	3,47	5,56
	2	3,17	5,68		
	3	3,57	5,64		
28	1	8,90	11,57	8,49	10,79
	2	8,31	10,01		
	3	8,26	10,80		
56	1	9,93	12,30	10,68	13,52
	2	11,54	14,16		
	3	10,58	14,11		
91	1	14,15	18,25	13,54	17,11
	2	12,97	16,37		
	3	13,50	16,72		

BB20							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	2,98	4,41	3,81	4,82	3,81	5,01
	2	3,63	5,10	3,35	4,80	3,64	5,47
	3	4,25	5,84	3,81	7,81	4,10	4,86
	4	2,44	2,87	2,91	3,97	3,63	5,26
	5	2,89	5,23	3,16	3,87	3,44	5,10
	6	3,68	5,50	4,39	7,36	4,11	6,58
	7	3,57	7,75	3,76	7,61	3,80	5,87
	8	3,21	5,26	3,42	4,64	3,54	5,08
28	1	6,72	8,13	7,71	10,35	6,86	8,36
	2	6,39	8,67	7,90	9,52	7,19	10,41
	3	6,59	9,42	8,39	9,94	8,84	11,58
	4	6,05	7,78	8,78	10,70	8,13	9,86
	5	6,26	7,88	9,59	11,15	7,94	9,74
	6	7,36	10,06	9,54	11,67	7,25	8,38
	7	7,88	10,14	10,72	11,99	6,93	8,33
	8	6,32	7,94	8,50	10,44	7,87	13,41
56	1	10,16	13,27	11,86	13,70	9,66	12,92
	2	11,57	13,14	12,41	15,68	11,03	14,06
	3	11,15	12,63	12,65	16,16	10,66	13,44
	4	11,12	13,78	12,15	16,93	11,07	16,10
	5	11,77	14,44	12,19	17,28	11,19	15,23
	6	12,65	14,30	13,10	16,15	13,81	16,56
	7	12,65	14,01	12,50	15,51	13,49	17,95
	8	11,82	13,79	12,32	14,66	10,03	12,87
91	1	14,84	20,39	12,31	15,44	12,89	14,50
	2	14,17	17,47	14,81	17,25	12,04	14,17
	3	14,36	17,71	14,88	17,11	11,77	15,35
	4	14,26	16,54	13,40	15,56	11,81	16,27
	5	14,44	16,54	13,81	14,95	12,36	15,39
	6	9,73	13,18	15,68	20,00	15,52	18,99
	7	9,85	13,73	14,40	16,95	13,97	17,72
	8	13,71	19,73	12,26	15,97	13,25	16,38

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,33	5,25	3,56	5,42
	2	3,58	5,61		
	3	3,76	5,40		
28	1	6,70	8,75	7,74	9,83
	2	8,89	10,72		
	3	7,63	10,01		
56	1	11,61	13,67	11,79	14,77
	2	12,40	15,76		
	3	11,37	14,89		
91	1	13,17	16,91	13,36	16,55
	2	13,94	16,65		
	3	12,95	16,10		

BB50							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)
7	1	3,79	6,09	4,01	8,31	4,03	5,67
	2	5,03	8,76	3,96	5,49	4,31	7,12
	3	4,96	7,57	4,04	5,31	4,27	7,87
	4	5,13	9,35	2,43	3,91	2,71	5,46
	5	4,61	8,88	2,37	3,63	2,93	5,94
	6	4,57	5,93	3,09	3,60	3,18	6,10
	7	4,11	6,15	2,80	5,87	4,05	5,78
	8	4,55	5,80	3,48	8,44	2,91	5,41
28	1	7,96	11,30	9,90	12,96	9,02	11,28
	2	7,75	10,80	9,52	12,77	9,41	12,24
	3	7,45	10,18	9,49	11,45	9,86	12,00
	4	7,88	9,73	6,68	11,51	7,35	9,74
	5	8,17	9,57	7,32	12,30	8,06	9,78
	6	9,05	11,33	7,82	8,89	6,50	9,21
	7	9,09	11,59	7,69	9,53	6,40	11,43
	8	7,78	11,46	10,34	12,52	8,34	9,00
56	1	10,08	11,99	9,16	12,17	9,42	13,28
	2	9,72	12,88	10,61	14,24	11,37	17,06
	3	9,90	12,76	10,71	13,77	10,08	16,67
	4	10,87	13,44	9,38	10,88	10,05	12,25
	5	10,98	12,41	9,28	10,45	10,06	13,92
	6	10,59	13,75	12,36	13,98	7,24	10,12
	7	10,45	13,54	12,54	14,56	7,71	10,35
	8	10,69	16,88	9,00	12,24	9,30	12,84
91	1	10,83	15,52	11,20	13,12	7,97	9,95
	2	13,20	16,33	11,72	15,57	10,00	15,31
	3	12,02	17,15	11,34	14,81	10,46	15,41
	4	11,14	15,61	11,78	16,89	12,26	17,45
	5	11,59	15,09	11,49	16,26	12,53	18,01
	6	10,43	12,62	12,47	15,59	11,59	13,43
	7	10,32	12,63	12,55	16,57	10,20	13,03
	8	10,53	13,37	11,41	12,66	7,73	9,97

t (dia)	Provete	d _k (mm)	d _{k,máx} (mm)	d _{k,méd} (mm)	d _{k,máx,méd} (mm)
7	1	4,59	7,32	3,81	6,35
	2	3,27	5,57		
	3	3,55	6,17		
28	1	8,14	10,75	8,28	10,94
	2	8,60	11,49		
	3	8,12	10,59		
56	1	10,41	13,46	10,06	13,18
	2	10,38	12,79		
	3	9,40	13,31		
91	1	11,26	14,79	11,12	14,68
	2	11,75	15,18		
	3	10,34	14,07		

BRC							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	d_{ki,máx} (mm)	d_{ki} (mm)	d_{ki,máx} (mm)	d_{ki} (mm)	d_{ki,máx} (mm)
7	1	4,26	5,22	3,38	7,27	4,79	6,72
	2	4,59	8,13	3,64	5,16	4,21	6,26
	3	4,31	6,65	3,19	4,88	4,08	6,15
	4	4,48	6,07	2,91	5,00	4,89	8,52
	5	4,3	5,56	3,26	4,78	4,50	6,94
	6	4,29	4,79	3,17	6,76	3,92	5,05
	7	4,78	7,58	3,07	6,22	3,66	5,41
	8	4,75	6,99	2,89	6,62	4,47	8,74
28	1	8,05	12,27	6,58	8,04	8,31	10,10
	2	8,71	11,70	6,55	9,07	7,98	10,37
	3	8,83	11,05	6,39	9,16	8,13	9,95
	4	8,73	11,01	6,40	9,18	8,15	9,69
	5	8,32	12,66	6,62	9,39	9,10	10,15
	6	8,38	12,33	6,97	9,77	8,64	9,79
	7	8,93	12,98	6,44	10,50	8,91	10,45
	8	8,35	12,76	6,22	7,22	8,34	9,94
56	1	11,20	12,68	11,11	13,30	10,79	13,43
	2	10,88	13,13	8,80	10,10	11,84	12,79
	3	11,04	14,10	9,11	11,65	11,32	12,40
	4	11,74	17,31	9,66	12,19	11,40	13,60
	5	11,48	18,08	9,83	11,49	11,90	13,34
	6	12,62	16,19	4,81	8,31	8,77	12,85
	7	11,62	16,02	4,84	8,55	8,70	12,39
	8	12,09	14,25	10,75	12,15	11,30	12,94
91	1	13,39	17,46	12,61	13,47	14,23	18,77
	2	12,97	16,65	8,72	14,35	13,88	15,63
	3	12,79	17,36	8,74	14,00	13,87	15,35
	4	13,19	21,46	11,81	18,51	12,16	13,51
	5	13,66	23,33	12,04	17,79	12,50	14,83
	6	14,37	15,27	15,11	17,16	13,18	15,66
	7	13,94	15,45	15,09	17,65	13,46	15,09
	8	14,02	17,90	12,45	14,11	15,37	18,82

t (dia)	Provete	d_k (mm)	d_{k,máx} (mm)	d_{k,méd} (mm)	d_{k,máx,méd} (mm)
7	1	4,47	6,37	3,99	6,31
	2	3,19	5,84		
	3	4,32	6,72		
28	1	8,54	12,10	7,83	10,40
	2	6,52	9,04		
	3	8,45	10,06		
56	1	11,58	15,22	10,32	13,05
	2	8,61	10,97		
	3	10,75	12,97		
91	1	13,54	18,11	13,06	16,65
	2	12,07	15,88		
	3	13,58	15,96		

BC20							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	2,99	6,33	4,23	7,16	3,20	4,80
	2	4,81	5,22	3,79	6,79	3,93	8,01
	3	3,89	5,96	4,63	6,60	4,14	7,77
	4	2,82	4,57	4,43	7,28	3,63	7,07
	5	2,34	4,37	4,01	7,21	4,21	6,84
	6	2,85	4,54	3,47	5,46	3,96	5,67
	7	2,94	4,09	3,77	5,43	4,57	6,15
	8	2,60	6,17	3,70	7,18	2,62	4,61
28	1	6,70	8,33	6,26	9,17	8,31	11,04
	2	7,05	11,01	6,72	7,94	8,18	9,56
	3	7,37	11,21	6,29	8,02	8,04	9,13
	4	9,18	14,33	6,02	8,20	8,29	10,63
	5	6,58	7,72	6,23	8,44	8,86	10,75
	6	9,51	15,32	6,39	9,48	7,49	9,40
	7	6,28	8,14	6,94	10,12	7,73	9,27
	8	6,68	8,41	6,53	9,35	9,06	10,82
56	1	8,61	12,78	10,18	12,42	10,62	14,09
	2	11,80	14,78	9,86	11,75	11,01	12,11
	3	12,07	14,33	10,35	11,67	11,23	12,62
	4	11,61	13,41	10,39	12,73	10,79	13,90
	5	11,77	14,26	10,56	12,98	10,55	13,57
	6	13,88	16,55	9,61	10,91	10,71	15,47
	7	13,83	15,93	9,45	11,29	10,65	13,21
	8	9,51	13,03	9,84	12,44	10,49	15,00
91	1	13,84	17,82	14,71	16,43	11,88	14,05
	2	13,31	18,87	13,11	15,42	14,51	18,62
	3	13,46	18,84	12,47	14,79	14,25	18,11
	4	15,82	21,91	13,40	15,94	13,58	17,20
	5	15,84	20,89	13,10	15,82	13,77	17,26
	6	14,28	16,26	12,97	15,95	7,65	14,16
	7	14,24	16,98	13,12	16,86	7,61	10,63
	8	14,39	17,44	14,94	16,42	11,55	14,27

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,16	5,16	3,65	6,05
	2	4,00	6,64		
	3	3,78	6,37		
28	1	7,42	10,56	7,36	9,82
	2	6,42	8,84		
	3	8,25	10,08		
56	1	11,64	14,38	10,81	13,38
	2	10,03	12,02		
	3	10,76	13,75		
91	1	14,40	18,63	13,24	16,71
	2	13,48	15,95		
	3	11,85	15,54		

BC50							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	3,69	5,01	4,09	5,73	3,55	5,85
	2	3,51	5,94	3,50	4,97	3,79	8,59
	3	3,61	5,85	3,81	4,47	4,15	8,67
	4	4,25	5,88	3,54	6,58	3,89	6,37
	5	4,00	5,57	3,59	6,67	3,52	4,78
	6	4,25	7,81	4,32	6,59	3,11	4,41
	7	4,08	7,73	4,00	5,34	2,79	3,34
	8	3,36	7,49	4,52	5,56	3,39	5,50
28	1	9,98	14,23	6,25	11,08	7,95	10,06
	2	7,85	9,64	6,93	8,65	7,01	8,55
	3	7,40	9,57	6,62	8,61	6,92	8,78
	4	8,11	9,20	7,18	9,41	6,84	8,82
	5	7,21	8,57	7,37	9,00	6,93	8,99
	6	7,45	8,61	6,35	8,97	7,35	8,82
	7	7,49	8,67	7,25	9,33	6,88	8,88
	8	9,39	12,72	6,68	11,50	7,71	9,27
56	1	12,63	13,91	11,75	16,73	11,15	16,87
	2	10,69	13,49	10,86	13,39	12,17	14,85
	3	10,22	12,92	11,25	13,47	11,97	15,23
	4	10,42	13,86	9,75	12,38	12,25	15,14
	5	10,84	14,42	8,89	12,79	11,47	14,06
	6	13,14	15,84	10,87	13,90	12,18	14,30
	7	12,87	15,59	11,51	14,29	12,40	14,30
	8	12,01	13,45	12,33	15,88	11,20	16,34
91	1	13,13	16,14	14,24	17,47	13,99	16,74
	2	13,82	22,28	15,31	19,72	15,55	19,64
	3	13,48	21,94	15,08	20,13	16,25	18,84
	4	15,39	17,97	14,34	17,99	13,15	16,31
	5	15,28	17,77	14,67	18,13	13,44	15,78
	6	14,39	17,82	15,73	16,46	13,93	16,79
	7	15,20	18,19	15,38	16,95	13,35	16,30
	8	13,21	16,74	14,72	17,95	14,19	16,54

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,84	6,41	3,76	6,03
	2	3,92	5,74		
	3	3,52	5,94		
28	1	8,11	10,15	7,38	9,58
	2	6,83	9,57		
	3	7,20	9,02		
56	1	11,60	14,19	11,45	14,48
	2	10,90	14,10		
	3	11,85	15,14		
91	1	14,24	18,61	14,47	17,94
	2	14,93	18,10		
	3	14,23	17,12		

BRG							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	3,37	6,27	3,52	6,86	3,22	4,90
	2	3,84	7,99	5,13	6,07	4,63	8,02
	3	4,85	8,27	4,65	5,42	4,30	8,97
	4	2,93	4,87	3,98	5,52	4,32	6,18
	5	2,92	4,59	3,99	5,89	4,10	6,33
	6	3,45	6,58	2,82	5,01	3,33	4,73
	7	4,30	6,62	2,61	4,42	3,95	5,52
	8	3,05	4,80	3,50	6,77	3,30	4,02
28	1	7,72	9,64	7,24	8,96	9,37	11,76
	2	9,26	11,96	7,88	9,58	8,36	9,88
	3	9,81	13,27	7,71	10,02	8,94	10,55
	4	8,49	10,05	7,26	9,66	8,26	10,08
	5	8,13	8,85	7,56	8,87	8,81	11,08
	6	8,99	10,93	7,46	8,96	8,54	10,63
	7	9,38	12,39	7,25	9,10	7,94	10,23
	8	8,38	9,73	6,97	9,33	9,15	11,97
56	1	10,96	12,21	11,46	13,84	10,90	13,04
	2	8,39	10,54	10,34	12,65	10,28	12,62
	3	8,74	10,39	10,78	12,21	10,37	12,19
	4	10,55	12,74	10,90	13,13	10,39	17,76
	5	10,93	13,46	11,37	14,06	10,54	17,09
	6	11,10	14,28	11,78	14,72	7,64	12,03
	7	11,44	14,94	12,32	14,43	7,33	11,82
	8	10,68	12,78	12,14	14,70	10,96	14,83
91	1	12,97	15,25	12,70	16,04	12,80	15,59
	2	11,22	13,58	12,79	14,79	13,21	15,26
	3	11,02	13,37	12,57	14,15	13,16	14,96
	4	14,15	15,30	13,55	16,70	10,71	14,61
	5	14,02	15,11	13,67	17,40	10,66	14,32
	6	13,19	15,05	13,10	16,12	11,17	14,22
	7	12,98	14,24	13,01	15,46	11,29	14,59
	8	13,48	16,09	13,17	15,67	12,03	15,87

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,59	6,25	3,75	6,03
	2	3,78	5,75		
	3	3,89	6,08		
28	1	8,77	10,85	8,29	10,31
	2	7,42	9,31		
	3	8,67	10,77		
56	1	10,35	12,67	10,51	13,44
	2	11,39	13,72		
	3	9,80	13,92		
91	1	12,88	14,75	12,61	15,16
	2	13,07	15,79		
	3	11,88	14,93		

BG20							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)
7	1	4,01	5,09	4,44	7,10	3,78	7,11
	2	4,21	6,15	3,21	6,04	3,31	5,99
	3	3,82	6,52	5,05	6,56	3,47	6,26
	4	3,32	4,43	4,19	6,41	4,26	5,22
	5	2,99	4,96	3,81	6,51	3,68	5,89
	6	3,72	6,30	4,69	7,03	4,06	5,78
	7	4,35	5,95	4,87	6,76	3,95	4,96
	8	3,96	5,83	4,26	6,58	3,65	5,35
28	1	8,44	12,32	7,24	9,27	7,83	9,50
	2	8,68	12,24	7,47	8,88	8,54	10,74
	3	8,72	11,43	7,39	10,31	8,50	11,21
	4	8,83	10,36	7,62	10,28	7,75	11,01
	5	8,73	10,89	7,26	9,77	8,32	10,80
	6	8,19	11,07	7,31	9,39	7,80	9,92
	7	8,70	11,76	7,88	10,10	7,78	9,96
	8	8,21	11,37	7,21	10,78	8,24	9,91
56	1	10,38	14,01	11,72	19,03	7,38	12,16
	2	10,33	13,68	10,71	14,14	11,43	13,76
	3	10,92	13,84	10,46	13,83	1,74	13,68
	4	10,21	12,54	11,77	13,76	11,41	18,84
	5	10,26	14,09	11,56	14,70	10,13	16,49
	6	8,94	15,08	11,95	15,23	11,21	16,52
	7	8,55	15,34	12,08	15,93	11,39	16,13
	8	10,28	13,88	11,47	17,84	8,96	12,30
91	1	13,57	16,70	15,00	17,57	13,38	14,71
	2	13,53	16,69	14,21	18,50	13,14	16,91
	3	13,87	16,40	14,80	18,90	12,85	17,13
	4	16,72	20,37	15,22	20,35	12,27	16,45
	5	16,41	20,21	15,01	20,92	12,33	15,37
	6	12,79	17,90	14,49	16,68	14,57	16,05
	7	12,23	17,83	14,36	16,77	14,42	15,51
	8	13,70	17,44	14,96	19,04	13,11	15,01

t (dia)	Provete	d _k (mm)	d _{k,máx} (mm)	d _{k,méd} (mm)	d _{k,máx,méd} (mm)
7	1	3,80	5,65	3,96	6,03
	2	4,32	6,62		
	3	3,77	5,82		
28	1	8,56	11,43	8,03	10,55
	2	7,42	9,85		
	3	8,10	10,38		
56	1	9,98	14,06	10,22	14,87
	2	11,47	15,56		
	3	9,21	14,99		
91	1	14,10	17,94	14,04	17,48
	2	14,76	18,59		
	3	13,26	15,89		

BG50							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)	d _{ki} (mm)	d _{ki,máx} (mm)
7	1	5,40	7,59	5,51	8,21	4,53	7,60
	2	1,90	4,82	4,96	6,94	4,47	7,12
	3	2,64	4,79	4,26	6,96	4,70	6,68
	4	4,55	6,07	6,02	6,88	3,52	5,34
	5	3,99	5,75	5,84	7,13	3,74	4,46
	6	4,35	8,94	5,97	7,84	5,51	9,22
	7	4,15	7,43	5,75	7,75	5,13	7,81
	8	5,21	7,15	5,98	8,51	4,63	7,16
28	1	9,76	11,72	9,93	13,85	8,59	10,18
	2	9,18	11,14	9,92	13,58	8,68	10,11
	3	9,19	10,78	10,09	12,32	9,20	11,31
	4	9,80	11,42	7,75	10,41	8,61	9,85
	5	10,52	12,40	7,95	10,90	8,58	9,97
	6	9,44	11,86	8,06	9,65	9,32	10,62
	7	8,85	11,54	7,98	10,13	8,78	10,07
	8	9,16	10,58	9,76	13,23	8,72	9,57
56	1	14,75	18,71	12,93	16,14	16,94	16,00
	2	11,63	14,87	12,12	14,35	10,86	13,10
	3	12,43	15,32	12,01	14,02	10,80	13,62
	4	13,01	14,47	9,00	12,15	11,81	15,71
	5	12,21	13,90	9,52	11,81	11,32	15,18
	6	10,41	13,12	12,23	15,74	12,27	14,86
	7	10,50	13,42	13,04	15,77	11,33	14,27
	8	15,38	19,54	11,87	16,64	13,16	16,45
91	1	13,57	16,83	13,24	15,93	13,60	16,77
	2	13,08	15,39	14,60	18,18	13,34	15,84
	3	13,68	17,72	13,36	17,92	13,56	15,96
	4	16,47	20,55	14,32	17,56	13,95	17,85
	5	15,55	19,48	14,30	18,00	13,70	16,58
	6	14,38	15,96	12,63	15,40	15,45	16,86
	7	13,83	16,12	12,74	14,81	14,94	17,16
	8	13,52	17,32	13,56	15,12	14,97	18,45

t (dia)	Provete	d _k (mm)	d _{k,máx} (mm)	d _{k,méd} (mm)	d _{k,máx,méd} (mm)
7	1	4,02	6,57	4,70	7,01
	2	5,54	7,53		
	3	4,53	6,92		
28	1	9,49	11,43	9,08	11,13
	2	8,93	11,76		
	3	8,81	10,21		
56	1	12,54	15,42	12,15	14,97
	2	11,59	14,58		
	3	12,31	14,90		
91	1	14,26	17,42	14,01	16,99
	2	13,59	16,62		
	3	14,19	16,93		

BRM							
t (dia)	Face	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
		d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)	d_{ki} (mm)	$d_{ki,máx}$ (mm)
7	1	3,15	4,12	3,34	4,49	4,85	5,67
	2	3,24	5,42	3,68	5,01	3,85	5,45
	3	3,33	5,21	2,92	5,08	4,11	5,68
	4	3,31	4,70	3,33	5,93	4,92	6,76
	5	2,54	3,28	3,63	5,14	4,72	6,36
	6	3,21	5,88	4,21	5,77	3,73	4,34
	7	3,36	4,81	4,30	5,53	3,87	4,60
	8	2,92	4,21	3,57	5,22	4,49	6,28
28	1	7,90	9,49	8,22	9,66	10,28	11,34
	2	8,96	11,45	7,06	9,11	9,02	12,08
	3	9,29	12,25	7,41	8,52	9,51	11,17
	4	9,07	14,43	8,10	9,88	7,78	8,85
	5	9,55	14,26	8,62	10,45	7,11	8,73
	6	9,34	11,85	8,06	9,90	7,78	9,22
	7	9,80	12,20	7,64	9,39	8,23	10,46
	8	7,99	10,01	7,92	9,40	9,59	11,56
56	1	11,44	13,81	10,46	16,56	11,61	13,96
	2	9,05	14,14	11,15	13,97	12,30	15,01
	3	9,37	13,71	11,08	13,92	11,83	16,07
	4	9,72	13,41	9,56	12,56	11,79	15,38
	5	9,62	12,86	9,60	11,67	11,83	15,95
	6	10,51	12,65	10,59	12,34	11,80	15,44
	7	10,03	12,26	10,74	12,18	11,75	15,53
	8	11,28	14,11	10,52	16,97	12,19	14,05
91	1	13,23	16,01	12,79	15,78	14,33	16,72
	2	13,95	18,22	14,36	16,71	15,66	18,65
	3	13,52	17,95	14,65	16,51	15,51	18,83
	4	11,08	14,01	10,82	14,11	15,44	16,71
	5	10,80	13,87	10,62	14,45	15,04	16,12
	6	12,65	17,43	13,86	16,69	14,65	21,78
	7	12,40	15,67	13,67	17,70	15,10	23,73
	8	12,95	15,93	13,01	15,78	14,64	16,85

t (dia)	Provete	d_k (mm)	$d_{k,máx}$ (mm)	$d_{k,méd}$ (mm)	$d_{k,máx,méd}$ (mm)
7	1	3,13	4,70	3,69	5,21
	2	3,62	5,27		
	3	4,32	5,64		
28	1	8,99	11,99	8,51	10,65
	2	7,88	9,54		
	3	8,66	10,43		
56	1	10,13	13,37	10,83	14,10
	2	10,46	13,77		
	3	11,89	15,17		
91	1	12,57	16,14	13,53	16,93
	2	12,97	15,97		
	3	15,05	18,67		

K. Resistência à penetração de cloretos

Penetração de cloretos aos 28 dias																	
Betão	Proveite	Espessura (mm)	I _{30V} (mA)	U (V)	I _{ajust} (mA)	T _i (°C)	Duração (h)	I _r (mA)	T _r (°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)
BRB	1	50,97	220	10	50	19,9	24	40	16,6	Ag _r	14,74	10,49	10,47	14,46	13,16	Ag _r	12,66
	2	51,87				19,3			16,6	7,41	Ag _r	8,28	13,01	9,17	8,48	11,26	9,60
	3	52,02				19,8			16,7	7,09	7,96	9,49	13,04	10,77	10,62	6,99	9,42
BB50	1	51,02	190	10	50	19,7	24	40	15,7	11,58	13,42	12,24	12,92	12,78	13,24	12,14	12,62
	2	51,35				20,2			15,8	10,48	9,02	10,18	10,37	Ag _r	9,15	10,65	9,98
	3	52,67				19,9			16,1	11,13	12,29	13,43	14,85	12,66	11,18	10,72	12,32
BRC	1	51	200	10	50	23,2	24	200	17,3	13,70	16,59	12,94	14,02	13,74	17,27	18,04	15,19
	2	51				22,9			17,3	15,63	11,75	Ag _r	11,91	12,61	10,36	11,83	12,35
	3	51				22,2			17,5	13,32	Ag _r	10,90	13,25	11,14	13,42	13,39	12,57
BC20	1	51	210	10	50	18,7	24	50	16,7	16,78	Ag _r	16,48	17,94	16,20	16,21	12,80	16,01
	2	49				18,7			16,7	16,02	18,05	15,31	16,74	15,64	Ag _r	16,30	16,34
	3	50				18,7			16,9	15,08	16,34	16,06	14,08	Ag _r	15,11	15,01	15,28
BG20	1	50,95	190	10	50	20,7	24	40	16,6	16,03	15,87	14,72	16,12	14,01	11,88	15,62	14,89
	2	51,14				21,2			16,6	13,85	12,32	12,98	15,74	13,37	13,69	13,33	13,61
	3	51,42				21,6			16,7	13,69	11,69	13,41	13,85	12,75	13,41	13,29	13,16
BG50	1	50,74	210	10	60	19,8	24	40	16,6	14,05	18,89	17,71	Ag _r	16,62	14,35	15,71	16,22
	2	49,66				19,6			16,7	14,18	13,01	15,70	16,57	13,50	12,79	Ag _r	14,29
	3	53,03				19,5			16,7	11,12	13,07	14,85	17,06	17,15	13,96	14,72	14,56

Beirão	Provetete	Espessura (mm)	I _{30V} (mA)	U (V)	I _{ajust} (mA)	T _i (°C)	Duração (h)	I _f (mA)	T _f (°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)																	
BRM	1	50,43	160	15	70	19	24	70	17,30	Agr	16,28	Agr	17,72	17,37	18,84	16,53	17,35																	
		49,25				18,3			16,04	19,21	23,47	Agr	20,82	20,06																				
		51,97				18,2			22,46	18,90	20,97	21,87	20,37	20,75																				
	2	51,65	120	15	60	20,2	24	50	17,80	11,78	12,78	13,55	14,42	14,76	13,67	14,01	13,57																	
		51,66				20,7			16,58	17,56	18,64	18,30	20,57	18,15																				
		51,59				20,6			12,11	19,30	15,02	12,13	Agr	14,99																				
	3	49,56	130	15	60	19,8	24	60	18,30	Agr	14,54	16,12	12,84	14,65	16,60	13,54	14,72																	
		50,49				19,7			17,37	18,05	17,45	16,67	16,37	17,62																				
		51,21				19,6			14,08	Agr	17,69	Agr	16,92	16,89	16,79																			
BC20	1	51,93	140	15	60	18,4	24	50	18,40	Agr	12,49	13,88	19,64	20,95	19,53	17,85	17,39																	
		52,33				18,2			18,63	17,22	19,93	24,24	15,27	14,43	18,32																			
		51,97				18,5			14,09	15,95	14,25	17,98	16,17	16,41	16,34																			
	2	52,96	140	15	60	18,7	24	60	18,60	15,49	20,02	21,12	19,01	17,80	14,41	Agr	17,98																	
		52,35				18,6			10,94	13,31	16,74	18,58	20,03	18,15	16,44																			
		50,58				18,6			Agr	14,21	13,74	19,69	14,81	13,33	14,60																			
	3	52,42	140	15	60	22,1	24	60	18,60	16,50	17,93	20,41	19,34	17,54	17,36	16,15	17,89																	
		50,16				22,3			18,23	19,37	21,85	22,89	21,10	17,78	20,37																			
		49,91				23,8			18,93	16,11	16,28	19,42	16,11	17,00	17,76																			
BG20	1	50,98	500	10	100	22,3	24	60	18,80	14,51	Agr	12,73	11,76	13,66	13,91	15,10	13,61																	
		50,09				22,8			16,39	14,70	13,47	17,83	18,16	12,61	15,53																			
		52,11				22,6			Agr	14,87	14,63	Agr	13,18	12,21	14,50																			
	2	50,09	10	100	100	24	60	60	18,80	18,80	14,87	14,63	17,62	Agr	Agr	Agr	Agr	Agr																
																			3	52,11	10	100	24	60	60	18,80	18,80	14,87	14,63	17,62	Agr	Agr	Agr	Agr

Penetração de clorretos aos 91 dias

