



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

DESEMPENHO MECÂNICO DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS GROSSOS DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Pedro Jorge da Cruz Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Alves Dias
Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito
Vogal: Professor Doutor João Carlos de Oliveira Fernandes de Almeida

Outubro de 2012

Resumo

Em Portugal, a indústria das rochas ornamentais, nomeadamente de mármore, tem gerado grandes quantidades de desperdícios e não se tem conseguido dar utilidade a uma grande percentagem dos mesmos. Esses resíduos têm sido depositados em aterros ou escombreiras e a sua acumulação está a causar um grave problema ambiental e visual. Deste modo, torna-se importante encontrar uma solução para este problema que ameça aquíferos e os seres vivos que deles dependem. Por outro lado, a produção anual de betão pronto em Portugal em 2007 foi de cerca de onze milhões de metros cúbicos, gastando recursos naturais que têm vindo a mostrar sinais de esgotamento. Uma das vias de utilização dos referidos resíduos de mármore pode ser a sua incorporação em betão estrutural, o que poderá ser viável uma vez que a regulamentação actual já permite a utilização de outros agregados não primários, pelo menos em determinadas taxas de substituição consoante o tipo e destino do betão. Porém, para que a viabilidade desta hipótese possa ser confirmada, é necessário que sejam efectuados ensaios para estudo das propriedades dos agregados secundários de mármore e determinação das características mecânicas e de durabilidade dos betões que os integram.

Os poucos estudos existentes nesta área nem sempre têm os mesmos objectivos. A investigação associada à presente dissertação pretende atenuar essa lacuna e dar uma resposta quanto ao desempenho mecânico dos betões em função da taxa de substituição de agregados grossos primários por agregados grossos secundários de mármore.

Com a intenção de atingir os referidos objectivos, foram produzidas 3 famílias de betões com trabalhabilidades semelhantes, que incluem betões de referência com agregados primários de calcário, granito e basalto, e betões com substituição desses agregados primários por agregados secundários de mármore em taxas de substituição de 20, 50 e 100%. Para avaliação da qualidade e do desempenho mecânico, foram realizados ensaios aos betões, no estado fresco, de abaixamento no cone de Abrams e massa volúmica e, no estado endurecido, de resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão.

Os resultados sugerem uma tendência para a diminuição dos valores de todos os parâmetros mecânicos. Porém, a referida tendência é claramente mais ténue do que as registadas para a maioria das investigações com outros tipos de agregados secundários, sendo de referir que alguns desses agregados são já utilizados, em determinadas percentagens, em betões estruturais de acordo com os limites impostos pela regulamentação em vigor.

Palavras-chave: agregados grossos secundários de mármore; betão; taxa de substituição; desempenho mecânico

Mechanical performance of concrete with incorporation of coarse waste from the marble industry

Abstract

In Portugal, the industry of ornamental rocks, marble included, has generated large amounts of waste a large percentage of which is not reused. This waste has been disposed of in landfills or dumps and its accumulation is causing serious environmental and visual problems. Thus, it becomes important to seek a solution to this problem threatening aquifers and the living beings that depend on them. Moreover, the annual production of concrete in Portugal during 2007 was about eleven million cubic meters, spending natural resources that have been showing signs of depletion. One way of reusing marble waste can be their incorporation in structural concrete which may be viable since the current regulations already allows the use of other non-primary aggregates, at least in certain replacement rates according to the type and destination of concrete. However, for the viability of this assumption to be validated, it is necessary to carry out tests in order to study the properties of the waste marble aggregates and the mechanical properties and durability of concrete that integrates this kind of aggregates.

The few existing studies in this area do not always have the same concerns. The research program attempts to mitigate this gap and provide an answer concerning the mechanical performance of concrete as a function of the rate of replacement of primary coarse aggregates with coarse waste marble aggregates.

With these aims in mind, three concrete families with approximately the same slump (similar workability) were produced including a reference concrete with primary aggregates, limestone, granite and basalt, and concrete mixes with substitution rates of 20%, 50% and 100% of primary aggregates by coarse waste marble aggregates. To evaluate their quality and mechanical performance, the mixes were tested in the fresh state, slump (in the Abrams cone test) and specific density and, in the hardened state, compressive strength, splitting tensile strength, Young's modulus of elasticity and resistance to abrasion. The results suggest a trend towards a reduction of all mechanical properties values. However, this trend is clearly weaker than those observed for the majority of the researches involving other types of non-primary aggregates, and it is noted that some of these aggregates are already used in certain proportions in structural concrete according to the limits imposed by the regulation.

Keywords: coarse marble waste aggregates, concrete, substitution rate; mechanical performance

Agradecimentos

A execução da presente dissertação significou uma etapa de solidificação e amadurecimento dos conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico. Aproveito esta importante oportunidade para expressar a minha profunda gratidão a todos os que me apoiaram nesta importante e laboriosa fase da minha vida em que trabalhava e estudava simultaneamente.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador desta dissertação, expresso a minha enorme e profunda gratidão pela disponibilidade enorme, pelo apoio constante, pela partilha de conhecimentos e pela amizade e companheirismo demonstrados. Agradeço ainda por ter realizado as referidas ajudas sempre acompanhadas de paciência mas com um elevado nível de exigência e rigor.

Aos técnicos do Laboratório de Construção e Resistência de Materiais do IST, Sr. Leonel Silva, Sr. João Lopes e Sr. Fernando Costa, pela importante ajuda, acompanhamento das tarefas, disponibilidade e profissionalismo demonstrados ao longo de todas as fase experimentais.

Aos colegas de laboratório (António André, Micael Ferreira, Luís Ferreira e José Saraiva Lima), pela partilha de conhecimentos, companheirismo e demais ajudas na realização do trabalho experimental.

Aos meus colegas e amigos, em particular ao Jorge Vaz e Ricardo Canelas, pelas partilhas, camaradagem e inegável apoio ao longo desta aventura e trabalho que foi a realização do mestrado e presente dissertação.

À Laura Tavares pela amizade, pelos conselhos e aperitivos que nos davam energia para o trabalho no laboratório.

Ao Rubén Pinhão, Pedro Pedroso e ao Tibério Yan, pela amizade, companheirismo e pelos sentidos de humor demonstrados que ajudaram a superar várias etapas.

A todos os restantes amigos e companheiros que contribuíram para o sucesso desta caminhada.

À minha mãe, esposa, filha e a toda a minha família, pelo seu apoio, paciência e apoio nas tarefas domésticas que me permitiram mais tempo para dedicação ao trabalho e estudos.

Agradeço em especial ao meu cunhado Luís Cecília, pela amizade, camaradagem e sentido de humor que me ajudaram a ultrapassar e concretizar as importantes tarefas referidas.

Dedico este trabalho ao meu pai que partiu em 2008 e sempre me apoiou no concretização desta fase, lamentando que não possa ter assistido ao concretizar da mesma.

Índice geral

Resumo	.....	i
Abstract	.....	ii
Agradecimentos	.....	iii
Índice geral	.....	iv
Índice de figuras	.....	xi
Índice de quadros	.....	xvi
Abreviaturas	.....	xix
1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objectivos da dissertação.....	3
1.3	Metodologia e organização da dissertação	4
2	Estado da Arte.....	7
2.1	Introdução.....	7
2.2	Análise do processo extractivo e da indústria do mármore	7
2.2.1	Considerações gerais.....	7
2.2.2	Traçagem e levantamento topográfico.....	9
2.2.3	Furação.....	9
2.2.4	Corte de levante	10
2.2.5	Serragem das costas e dos topos (vertical)	10
2.2.6	Derrube	11
2.2.7	Esquadrejamento.....	11
2.2.8	Transporte	12
2.2.9	Beneficiamento	13
2.2.10	Medição, classificação e armazenagem	13
2.2.11	Breve análise da indústria do mármore.....	13
2.3	Influência de agregados grossos nas características do betão.....	14
2.4	Influência de agregados secundários nas características do betão.....	18
2.5	Betões com agregados grossos de mármore	19
2.5.1	Influência de agregados secundários (AS) de mármore no betão.....	19

Índices

2.5.2	Propriedades dos agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore	27
2.6	Conclusões	29
3	Campanha experimental.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Planeamento da campanha experimental	31
3.2.1	Primeira fase.	31
3.2.2	Segunda fase	32
3.2.3	Terceira fase.....	32
3.3	Formulação dos betões.....	33
3.3.1	Introdução.....	33
3.3.2	Máxima dimensão do agregado.....	34
3.3.3	Valor médio de tensão de rotura à compressão (fcm).....	34
3.3.4	Volume de vazios.....	35
3.3.5	Índice de vazios.....	36
3.3.6	Dosagem de água na amassadura.....	36
3.3.7	Dosagem de cimento.....	37
3.3.8	Relação água / cimento (A/C).....	37
3.3.9	Curva de referência de Faury	38
3.4	Ensaio aos agregados	38
3.4.1	Análise granulométrica	38
3.4.1.1	Objectivo do ensaio.....	38
3.4.1.2	Normas de ensaio	38
3.4.1.3	Aparelhos e utensílios	38
3.4.1.4	Amostras	39
3.4.1.5	Procedimento	39
3.4.1.6	Resultados	40
3.4.2	Massa volúmica e absorção de água	41
3.4.2.1	Objectivo do ensaio.....	41
3.4.2.2	Norma	41
3.4.2.3	Aparelhos e utensílios	41
3.4.2.4	Amostras de ensaio	42
3.4.2.5	Procedimentos de ensaio.....	42

3.4.2.6	Resultados	44
3.4.3	Massa volúmica aparente	44
3.4.3.1	Objectivo do ensaio.....	44
3.4.3.2	Normas de ensaio	45
3.4.3.3	Aparelhos e utensílios	45
3.4.3.4	Amostras	45
3.4.3.5	Procedimento do ensaio	46
3.4.3.6	Resultados	46
3.4.4	Desgaste de Los Angeles	46
3.4.4.1	Objectivo do ensaio.....	46
3.4.4.2	Normas de ensaio	46
3.4.4.3	Aparelhos e utensílios	46
3.4.4.4	Amostras	47
3.4.4.5	Procedimento de ensaio	47
3.4.4.6	Modo de obtenção e de apresentação dos resultados.....	48
3.4.5	Índice de forma	48
3.4.5.1	Objectivo do ensaio.....	48
3.4.5.2	Normas de ensaio	48
3.4.5.3	Aparelhos e utensílios	48
3.4.5.4	Amostras	49
3.4.5.5	Procedimento de ensaio	49
3.4.5.6	Resultados	49
3.5	Ensaio ao betão no estado fresco.....	49
3.5.1	Abaixamento do cone de Abrams	50
3.5.1.1	Objectivo	50
3.5.1.2	Norma do ensaio	50
3.5.1.3	Equipamentos utilizados	50
3.5.1.4	Amostras	51
3.5.1.5	Procedimentos de ensaio.....	51
3.5.1.6	Modo de obtenção e apresentação dos resultados.....	53
3.5.2	Massa volúmica	54
3.5.2.1	Objectivo e norma do ensaio do ensaio	54

Índices

3.5.2.2	Aparelhos e utensílios	54
3.5.2.3	Amostras	55
3.5.2.4	Procedimentos de ensaio	55
3.5.2.5	Modo de obtenção e apresentação dos resultados.....	55
3.6	Ensaio ao betão no estado endurecido.....	55
3.6.1	Resistência à compressão.....	55
3.6.1.1	Objectivo e norma do ensaio.....	55
3.6.1.2	Aparelhos e utensílios	56
3.6.1.3	Provetes de ensaio.....	56
3.6.1.4	Procedimentos de ensaio.....	57
3.6.1.5	Resultados	58
3.6.2	Resistência à tracção por compressão diametral.....	58
3.6.2.1	Objectivo do ensaio.....	58
3.6.2.2	Normas de ensaio	59
3.6.2.3	Aparelhos e utensílios	59
3.6.2.4	Provetes de ensaio.....	60
3.6.2.5	Procedimentos de ensaio.....	60
3.6.2.6	Resultados	61
3.6.3	Módulo de elasticidade	62
3.6.3.1	Objectivo do ensaio.....	62
3.6.3.2	Normas de ensaio	63
3.6.3.3	Aparelhos e utensílios	63
3.6.3.4	Provetes de ensaio.....	64
3.6.3.5	Procedimentos de ensaio.....	64
3.6.3.6	Resultados	65
3.6.4	Resistência à abrasão	65
3.6.4.1	Objectivo do ensaio.....	65
3.6.4.2	Normas de ensaio	66
3.6.4.3	Aparelhos e utensílios	66
3.6.4.4	Provetes de ensaio.....	66
3.6.4.5	Procedimento de ensaio	67
3.6.4.6	Resultados	68

4	Discussão dos resultados.....	69
4.1	Introdução	69
4.2	Ensaio de caracterização dos agregados.....	69
4.2.1	Análise granulométrica	69
4.2.2	Massa volúmica e absorção de água	73
4.2.3	Massa volúmica aparente	79
4.2.4	Desgaste de <i>Los Angeles</i>	80
4.2.5	Índice de forma	82
4.3	Propriedades do betão no estado fresco	85
4.3.1	Abaixamento do cone de Abrams	85
4.3.2	Massa volúmica	89
4.4	Propriedades do betão no estado endurecido	91
4.4.1	Resistência à compressão.....	92
4.4.2	Resistência à tracção por compressão diametral.....	100
4.4.3	Módulo de elasticidade	103
4.4.4	Resistência à abrasão	105
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	109
5.1	Considerações finais	109
5.2	Conclusões gerais.....	110
5.2.1	Propriedades dos agregados.....	110
5.2.2	Propriedades do betão no estado fresco	110
5.2.3	Propriedades mecânicas do betão no estado endurecido	111
5.3	Propostas de desenvolvimentos futuros	112
	Bibliografia	113
	Anexos	A1
	ANEXO A: Composição dos betões	A3
	ANEXO B: Análise granulométrica.....	A9
	ANEXO C: Massa volúmica e absorção de água.....	A17
	ANEXO D: Baridade e volume de vazios.....	A21
	ANEXO E: Desgaste de <i>Los Angeles</i>	A25
	ANEXO F: Teor em água total	A27
	ANEXO G: Índice de forma.....	A29

Índices

ANEXO H: Resistência à compressão	A33
ANEXO I: Resistência à tracção por compressão diametral.....	A37
ANEXO J: Módulo de elasticidade	A39
ANEXO L: Resistência ao desgaste por abrasão	A51

Índice de figuras

Figura 1.1 - Esquema ilustrativo das taxas de substituição para os 3 betões de referência	4
Figura 2.1 - Vista aérea da zona de exploração da pedreira na “Herdade da Vigária”	8
Figura 2.2 - Exploração a céu-aberto	8
Figura 2.3 - Etapas do processo produtivo	8
Figura 2.4 - Traçagem de uma massa mineral	9
Figura 2.5 - Furação	9
Figura 2.6 - Corte de levante através de roçadora	10
Figura 2.7 - Serragem de uma talhada com máquina de fio diamantado	10
Figura 2.8 - Afastamento com o colchão hidráulico	11
Figura 2.9 - Derrube com a escavadora giratória	11
Figura 2.10 - Esquadrejamento de um bloco.....	12
Figura 2.11 - Transporte de resíduos	12
Figura 2.12 - Transporte de blocos.....	12
Figura 2.13 - Beneficiamento de blocos.....	13
Figura 2.14 - Parque de blocos.....	13
Figura 2.15 - Densidade em função da taxa de substituição	20
Figura 2.16 - Trabalhabilidade	21
Figura 2.17 - Resistência à compressão, perfil G.....	21
Figura 2.18 - Resistência à tracção, perfil G	22
Figura 2.19 - Resistência à compressão, perfil F	22
Figura 2.20 - Resistência à tracção, perfil F.....	22
Figura 2.21 - Resistência à compressão, perfil M	23
Figura 2.22 - Resistência à tracção, perfil M	23
Figura 2.23 - Resistência à compressão, nível 25%	24
Figura 2.24 - Resistência à compressão, nível 50%	24
Figura 2.25 - Resistência à compressão, nível 75%	24
Figura 2.26 - Resistência à compressão, nível 100%	25
Figura 3.1 - Pesagem de agregado na balança	39
Figura 3.2 - Aspecto da estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C	40

Índices

Figura 3.3 - Coluna de peneiros	40
Figura 3.4 - Medição da temperatura da água no picnómetro.....	42
Figura 3.5 - Colocação de provete, de agregado grosso de basalto, sobre toalha para posterior secagem	43
Figura 3.6 - Molde troncocónico e pilão	43
Figura 3.7 - Indicações da norma NP EN 1097-6 para a avaliação do estado de saturação da amostra de agregados finos: a) agregado húmido - mantém a forma do molde; b) agregado ligeiramente húmido, deformação assinalável; c) agregado saturado com superfície seca; grande deformação, mas com vértice visível e linhas superficiais lineares - forma de cone perfeito; d) agregado quase seco, sem vértice distinto e com linhas superficiais aproximadamente curvilíneas	44
Figura 3.8 - Máquina de <i>Los Angeles</i>	47
Figura 3.9 - Paquímetro utilizado na medição das dimensões das partículas	48
Figura 3.10 - Molde onde com duas pegas e duas abas junto à base	51
Figura 3.11 - Utilização dos pés do operador para fixação do molde à placa metálica	51
Figura 3.12 - Colocação da amostra no carro de mão após realização da amassadura	51
Figura 3.13-Recolha de amostras, de forma homogénea, com a ajuda de pás.....	51
Figura 3.14 - Alisamento da superfície no topo do modo com o auxílio da colher de pedreiro ..	52
Figura 3.15 - Início da remoção do molde	52
Figura 3.16 - Remoção cuidadosa do molde	52
Figura 3.17 - Medição do abaixamento (h)	53
Figura 3.18 - Medição da diferença de alturas (h) entre o molde e o ponto mais alto do provete após desmoldagem	53
Figura 3.19 - Formas de abaixamento	53
Figura 3.20 - Recipiente para medição da massa volúmica do betão no estado fresco	54
Figura 3.21 - Agulha vibratória.....	54
Figura 3.22 - Varão de compactação.....	54
Figura 3.23 - Prensa hidráulica de 4 colunas	56
Figura 3.24 - Pesagem de provete cúbico	57
Figura 3.25 - Roturas satisfatórias dos provetes cúbicos	58
Figura 3.26 - Roturas não satisfatórias dos provetes cúbicos	58
Figura 3.27 - Faixa de cartão prensado colocada entre a peça de carga, em aço, e o provete cilíndrico	59

Figura 3.28 - Esquema de montagem do sistema para ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	60
Figura 3.29 - Vista de topo de provete cilíndrico colocado no posicionador, com este centrado ..	60
Figura 3.30 - Vista da extensão das faixas de cartão prensado colocadas entre o provete e o sistema posicionador	60
Figura 3.31 - Fases da rotura (as duas primeiras fotos correspondentes a betão com agregados grossos (100% basalto) e última a betão composto por agregados grossos de basalto e mármore (50%)	61
Figura 3.32 - Leitura de carga no mostrador do sistema acoplado à prensa hidráulica	61
Figura 3.33 - Relação tensão / deformação para o betão	62
Figura 3.34 - Declive para determinação do módulo de elasticidade: a) método da tangente; b) método da secante	62
Figura 3.35 - Montagem do sistema de medição de deformações	63
Figura 3.36 - Fixação dos anéis integrantes do sistema de medição de deformações.....	63
Figura 3.37 - Prensa hidráulica e parte do sistema (<i>data logger</i>) acoplado a esta e ao sistema medidor de deformações	64
Figura 3.38 - Extensómetros colocados em posições diametralmente opostas.....	65
Figura 3.39 - Rótula metálica para assegurar transmissão exclusiva de esforço normal	65
Figura 3.40 - Máquina de abrasão de Böhme.....	66
Figura 3.41 - Provete de ensaio	66
Figura 3.42 - Esquema da distribuição dos 9 pontos de medição do desgaste.....	67
Figura 3.43 - Distribuição dos 9 pontos de medição do desgaste num provete real (betão com agregados grossos de granito (100%))	67
Figura 3.44 - Provete com face de desgaste voltada para baixo e marcações na face de topo.....	68
Figura 3.45 - Detalhe do peso a criar carga sobre a face de topo do provete.....	68
Figura 3.46 - Provete sujeito a desgaste com rotação em pleno ensaio	68
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados de mármore	70
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados de calcário.....	71
Figura 4.3 - Curvas granulométricas dos agregados de granito	71
Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos agregados de basalto	72
Figura 4.5 - Curvas granulométricas das areias	73
Figura 4.6 - Massas volúmicas dos agregados de mármore.....	74
Figura 4.7 - Absorção de água para agregados de mármore	74
Figura 4.8 - Massas volúmicas dos agregados de calcário.....	75

Índices

Figura 4. 9 - Absorção de água dos agregados de calcário	75
Figura 4. 10 - Massas volúmicas dos agregados de granito	75
Figura 4. 11 - Absorção de água dos agregados de granito.....	75
Figura 4.12 - Massas volúmicas dos agregados de basalto	76
Figura 4.13 - Absorção de água dos gregados de basalto	76
Figura 4. 14 - Massas volúmicas das areias	77
Figura 4. 15 - Absorção de água das areias.....	77
Figura 4. 16 - Massa volúmica de todos os agregados.....	77
Figura 4. 17 - Absorção de água de todos os agregados	78
Figura 4.18 - Comparação da massa volúmica aparente dos agregados utilizados na presente campanha	79
Figura 4.19 - Desgaste de <i>Los Angeles</i> para todos os agregados	81
Figura 4.20 - Comparação dos valores, de diferentes campanhas, para o desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	82
Figura 4.21 - Índice de forma para todos os agregados	83
Figura 4.22 - Abaixamento do cone de Abrams.....	86
Figura 4.23 - Evolução do abaixamento do cone de Abrams, com a taxa de substituição	86
Figura 4.24 - Massa volúmica do betão no estado fresco para todos os tipos de betão (acrónimos-ver Quadro 4.27)	90
Figura 4.25 - Massa volúmica em função da taxa de substituição para as três famílias de betão .	90
Figura 4.26 - Evolução da massa volúmica em função da taxa de substituição para o betão de referência de calcário	91
Figura 4.27 - Resistência à compressão aos 7 dias: família calcário	93
Figura 4.28 - Resistência à compressão aos 7 dias: família granito.....	93
Figura 4.29 - Resistência à compressão aos 7 dias: família basalto.....	94
Figura 4.30 - Resistência à compressão aos 28 dias: família calcário	94
Figura 4.31 - Resistência à compressão aos 28 dias: família granito.....	94
Figura 4.32 - Resistência à compressão aos 28 dias: família basalto.....	95
Figura 4.33 - Resistência à compressão aos 56 dias: família calcário	95
Figura 4.34 - Resistência à compressão aos 56 dias: família granito.....	95
Figura 4. 35 - Resistência à compressão aos 56 dias: família basalto.....	96
Figura 4. 36 - Resistência à compressão à idade de 7 dias.....	96
Figura 4. 37 - Resistência à compressão à idade de 28 dias.....	96

Figura 4. 38 - Resistência à compressão à idade de 56 dias.....	97
Figura 4. 39 - Evolução da resistência à compressão com a idade de cura.....	97
Figura 4. 40 - Comparação dos resultados de Binici <i>et al.</i> (2008) com os da presente campanha	99
Figura 4. 41 - Evolução da resistência à tracção, aos 28 dias de idade, com a taxa de substituição de AP por AS	100
Figura 4.42 - Comparação de resultados de resistência à tracção por compressão diametral....	102
Figura 4.43 - Comparação dos estudos de Hebhouh et al. (2011) e da presente campanha para a resistência à tracção por compressão diametral	102
Figura 4.44 - Comparação da resistência à tracção por compressão diametral relativa ao betão de referência entre os estudos de Hebhouh et al. (2011) e da presente campanha	103
Figura 4.45 - Evolução, em função da taxa de substituição de AP por ASM, do módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, para todas as 3 famílias de betões	104
Figura 4.46 - Comparação gráfica dos resultados de Binici et al. (2008) e da presente campanha para o módulo de elasticidade	105
Figura 4.47 - Evolução, em função da taxa de substituição de AP por ASM, da profundidade do desgaste por abrasão, aos 91 dias de idade, para todas as 3 famílias de betões	106
Figura 4.48 - Percentagem do desgaste por abrasão relativamente ao betão de referência	106
Figura 4.49 - Percentagem de desgaste à abrasão, em função da substituição de AP por ASM, para várias idades	107

Índice de quadros

Quadro 1.1 - Ensaios e respectivas normas	5
Quadro 1.2 - Ensaios no estado fresco e endurecido.....	5
Quadro 2.1 - Quantidades de rocha desmontada na “Herdade da Vigária”	14
Quadro 2.2 - Produção de blocos e de britas.....	14
Quadro 2.3 - Percentagem do ganho de resistência à compressão aos 28 dias	25
Quadro 2.4 - Resistência à compressão.....	26
Quadro 2.5 - Características físicas e mecânicas; Estremoz-Borba e Vila Viçosa, 36 amostras ..	28
Quadro 2.6 - Massas volúmicas, porosidade e absorção.....	28
Quadro 2.7 - Velocidade das ondas sísmicas longitudinais e transversais.....	28
Quadro 2.8 - Ensaio na máquina de Los Angeles	28
Quadro 3.1 - Ensaios e respectivas normas	31
Quadro 3.2 - Ensaios e normas utilizados, na segunda fase, nos betões no estado fresco e endurecido	32
Quadro 3.3 - Ensaios no estado fresco e endurecido.....	32
Quadro 3.4 - Desvios padrão em função do tipo de produção	35
Quadro 3.5 - Volume de vazios em função do $D_{máx}$, de acordo com a ASTM.....	35
Quadro 3.6 - Valores de K e K' para a determinação do índice de vazios	36
Quadro 3.7 - Massa mínima dos provetes de ensaio (análise granulométrica).....	39
Quadro 3.8 - Massa mínima de provete em função de $D_{máx}$	42
Quadro 3.9 - Volume mínimo do recipiente de ensaio face à dimensão máxima do agregado ...	45
Quadro 3.10 - Massa mínima do provete de ensaio do índice de forma em função da máxima dimensão do agregado.....	49
Quadro 4.1 - Percentagem do material passado acumulado (mármore)	69
Quadro 4.2 - Percentagem do material passado acumulado (calcário)	70
Quadro 4.3 - Percentagem do material passado acumulado (granito).....	71
Quadro 4.4 - Percentagem do material passado acumulado (basalto).....	72
Quadro 4.5 - Percentagem do material passado acumulado (areias).....	73
Quadro 4.6 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de mármore.....	74
Quadro 4.7 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de calcário	74
Quadro 4.8 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de granito.....	75

Quadro 4.9 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de basalto.....	76
Quadro 4.10 - Massa volúmica e absorção de água: areias.....	76
Quadro 4.11 - Comparação dos resultados da massa volúmica de vários autores	78
Quadro 4.12 - Comparação dos resultados da absorção de água dos agregados de diferentes autores	78
Quadro 4.13 - Massa volúmica aparente dos agregados grossos	79
Quadro 4.14 - Massa volúmica aparente dos agregados finos	79
Quadro 4.15 - Comparação entre a massa volúmica aparente dos agregados da presente campanha e a dos agregados de outros estudos.....	80
Quadro 4.16 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de mármore	80
Quadro 4.17 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de granito	80
Quadro 4.18 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de basalto	80
Quadro 4.19 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de calcário	81
Quadro 4.20 - Resumo dos resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos	81
Quadro 4.21 - Comparação entre o desgaste de Los Angeles dos agregados da presente campanha e o dos agregados de outros estudos	1
82	
Quadro 4.22 - Índice de forma dos agregados grossos (%)	83
Quadro 4.23 - Comparação dos valores, de diferentes campanhas, para parâmetros relacionados com a forma das partículas (%).....	84
Quadro 4.24 - Abaixamento do cone de Abrams	85
Quadro 4.25 - Valor relativo do abaixamento, em função da taxa de substituição de agregados grossos de calcário por grossos de mármore	87
Quadro 4.26 - Abaixamento Δ (mm), em função do tipo de agregados grossos para substituição total	88
Quadro 4.27 - Massa volúmica do betão no estado fresco para todos os tipos de betão	89
Quadro 4.28 - Evolução da massa volúmica em função da taxa de substituição para o betão de referência de calcário	91
Quadro 4.29 - Comparação dos resultados de massa volúmica do betão no estado fresco nos estudos de Binici et al. (2008) e na presente campanha para substituição total.....	91

Índices

Quadro 4.30 - Resistência à compressão.....	92
Quadro 4.31 - Resultados médios do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, aos 28 dias de idade.....	100
Quadro 4.32 - Comparação entre a estimativa do EC2 e os resultados experimentais para a resistência à tracção na idade de 28 dias	101
Quadro 4.33 - Módulo de elasticidade, aos 28 dias, para todas as famílias de betões	103
Quadro 4.34 - Profundidade do desgaste por abrasão ΔL , aos 91 dias de idade, e variação percentual para os 3 betões de referência de AP	105

Abreviaturas

A/C	relação água / cimento;
AG	agregados grossos;
AGP	agregados grossos primários;
AGPB	agregados grossos primários de basalto;
AGPC	agregados grossos primários de calcário;
AGPG	agregados grossos primários de granito;
AGS	agregados grossos secundários;
AGSM	agregados grossos secundários de mármore;
BR	betão de referência;
BRC	betão de referência de calcário;
BC20	betão de calcário com 20% de substituição de grossos secundários por mármore;
BC50	betão de calcário com 50% de substituição de grossos secundários por mármore;
BRB	betão de referência de basalto;
BB20	betão de basalto com 20% de substituição de grossos secundários por mármore;
BB50	betão de basalto com 50% de substituição de grossos secundários por mármore;
BRG	betão de referência de granito;
BG20	betão de granito com 20% de substituição de grossos secundários por mármore;
BG50	betão de granito com 20% de substituição de grossos secundários por mármore;
B100M	betão com total substituição (100%) de agregados grossos primários por agregados grossos secundários de mármore;
CEVALOR	centro tecnológico para o aproveitamento e valorização das rochas ornamentais e industriais;
RO	rochas ornamentais.

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Segundo dados de OSNET (Ornamental Stones Network), a produção mundial de pedra aumentou 118% entre 1986 e 1998 e a taxa de crescimento tem-se mantido semelhante desde essa altura (Midha, 2002). Devido ao crescimento da produção industrial e ao consequente aumento no consumo de recursos naturais, vem-se registando um esgotamento generalizado destes recursos. Por outro lado, este elevado volume de produção tem conduzido a uma considerável quantidade de desperdícios os quais tem um impacte nefasto no meio ambiente (UMTC, 1995 e OECD, 1997). Como um dos possíveis destinos a dar a estes resíduos, Cetin (1997) e Terzi e Karasahin (2003) referem que agregados produzidos a partir de resíduos resultantes do processamento em pedreiras de mármore poderiam ser utilizados como material de construção para pavimentos rodoviários de asfalto. Ainda na mesma linha de pensamento, Akbulut e Cahit (2007) citam Zorluer (2003) ao sugerir que os agregados de resíduos de mármore podem responder à enorme procura de agregados para aplicações em pavimentos. Apontam o sector dedicado à fabricação de produtos utilizados na construção civil como sendo especialmente capaz de incorporar e reutilizar diferentes tipos de resíduos como os provenientes das indústrias de rochas ornamentais (RO).

Como resultado da crescente procura de novas jazidas de agregados, a textura geral da superfície da Terra tem vindo a deteriorar-se, causando preocupações ambientais. A utilização de resíduos de pedreiras de mármore como agregados pode ajudar a atender à crescente procura e abrandar os seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

A indústria das RO, nomeadamente a do mármore, depara-se com alguns problemas ambientais. Um dos problemas, como referido, relaciona-se com o destino a dar aos resíduos resultantes do processamento nas pedreiras. Vários autores apontam esses problemas e a necessidade de encontrar um destino viável para os resíduos (Hebhoub *et al.*, 2010, Binici *et al.*, 2008, Akbulut e Cahit, 2007, Zorluer, 2003). Assim, a ideia de utilizar esses resíduos para incorporação em agregados grossos para produção de betão, constituindo um destino alternativo aos apontados por Cetin (1997), Terzi e Karasahin (2003), insere-se numa filosofia de política ambiental de forma a minimizar os impactes nefastos para o ambiente.

No caso da indústria de RO, outro dos problemas é o impacte visual. Como exemplo da dimensão do problema, a nível nacional, pode referir-se a situação das pedreiras do anticlinal de Estremoz - Borba - Vila Viçosa onde são produzidas grandes quantidades de mármore como rocha ornamental. Dados de 1992 (CEVALOR) apontavam já as pedreiras da referida região como responsáveis por mais de 50% do total em exploração no país. A grande preocupação prende-se, mais uma vez, com os destinos a dar aos resíduos do processo extractivo. O estudo pedido pelo CEVALOR em 1992 consistiu em caracterizar as escombreiras onde são depositados resíduos. Estes estudos visavam já na altura encontrar utilizações económicas para os desperdícios.

A composição das escombreyras, quer em termos granulométricos quer na própria natureza dos materiais, tem-se vindo a alterar a par da evolução tecnológica que tem acompanhado os meios de extracção e remoção de escombros envolvidos na exploração de uma pedreira. Isto deve-se, por um lado, à melhoria geral das técnicas utilizadas no arranque das massas e no esquadreamento dos blocos e à redução na utilização de explosivos que levou a um aumento de eficiência no aproveitamento dos blocos. Isto significou conseguir uma maior produtividade mas ainda assim uma diminuição dos desperdícios totais de mármore. Por outro lado, este aumento da capacidade tecnológica motivou o aproveitamento de zonas de jazida que antigamente não eram economicamente rentáveis por apresentarem maiores percentagens de dolomito ou xisto ou por apresentarem muita carsificação e fracturação. Esta situação teve o efeito contrário em relação à situação anterior pois, ao proporcionar o aproveitamento de zonas com menor qualidade, conduziu por esta via ao aumento da percentagem de resíduos a serem transportados para as escombreyras. Pode-se dizer que os efeitos de ambas as situações acabaram por se equilibrar. Deste modo, aceita-se que a percentagem de estéreis se manteve relativamente estabilizada entre 60 e 80% do volume total de rocha desmontada até à década de 90 (Martins, O.R. 1990) estimando-se os desperdícios actuais também nessa gama de valores.

Do ponto de vista qualitativo, a composição das escombreyras actuais difere das antigas por incorporar uma percentagem superior de rochas não marmóreas como dolomitos, rochas filoneanas e xistos que surgem intervaladas nos mármore. A composição granulométrica também difere das escombreyras antigas. Nas actuais, existe uma tendência para o predomínio das dimensões extremas, solos e grandes blocos em detrimento das dimensões intermédias do cascalho e dos pequenos blocos.

Também Aukour (2009) refere que a indústria de processamento do mármore produz grandes quantidades de resíduos sólidos ocupando extensas áreas com os escombros e que se espera que essa quantidade dos resíduos, com base no mármore, aumente ainda mais à medida que a construção civil continue a prosperar. De facto, a produção mundial da indústria do mármore tem vindo a aumentar nos últimos anos. O autor aponta valores de perda de 30% da pedra de mármore logo na primeira fase do processamento. Esta perda deve-se ao desaproveitamento de porções de tamanho insuficiente e/ou forma irregular. Hebhou et al. (2010) apontam o valor de 70% para o total de perdas no conjunto das fases de extracção de mármore, processamento e acabamentos.

Para além dos citados destinos a dar aos resíduos de rochas ornamentais, existem ainda outras possibilidades e estudos apontados na bibliografia. Como exemplo, cita-se Oliveira (2010) que aponta o sector dos cosméticos como destino. Sendo o Brasil o quinto produtor mundial de rochas ornamentais com cerca de 7 milhões de toneladas, o autor estima que, só no município de Cachoeiro de Itapemirim, no estado de Espírito Santo, sejam produzidas cerca de 400 toneladas por ano de resíduos em forma de polpa (lama). Escreve que esta quantidade de resíduos gerados no processamento de rochas ornamentais é explicada por 25 a 30% de um bloco ser reduzido a pó no processo de serragem, apresentando ameaças para o meio ambiente pois podem alcançar

rios, lagos e até mesmo reservatórios naturais de água, uma vez que são lançados no ecossistema sem o devido tratamento prévio. Além disso, são necessários espaços para armazenagem até que o resíduo seja recolhido, representando um custo adicional para o produtor. O autor indica, como possíveis destinos para os resíduos, sectores já referidos neste documento como a pavimentação asfáltica, onde existem diversas investigações que têm como objectivo substituir os agregados minerais convencionalmente utilizados pelos resíduos de rochas. Outro sector também referido pelo autor é o cerâmico, sendo um dos que mais quantidade de investigações sobre a aplicação de resíduos de rochas apresenta na literatura. O sector agrícola representa outro campo de estudos que visa aplicar resíduos provenientes do corte dos mármore para correcção do pH do solo e resíduos de granitos para fertilização do solo por libertação de potássio. O autor refere ainda a aplicação de resíduos no sector dos polímeros. Existem, assim, vários estudos disponíveis na literatura com fim a apresentar destinos viáveis para os resíduos que vão desde aplicações em betões até cosméticos, passando pelos sectores dos pavimentos rodoviários, cerâmico, agricultura e polímeros, o que demonstra a importância e urgente necessidade de encontrar soluções para os problemas de acumulação dos resíduos e problemas ambientais associados devido à crescente produção e processamento de rochas ornamentais.

1.2 Objectivos da dissertação

O principal objectivo desta dissertação prende-se com o estudo da viabilidade da utilização dos resíduos da indústria do mármore para incorporação em betão estrutural de modo a originar um possível destino para os mesmos. Este destino representa a oportunidade de diminuir o impacto ambiental e visual causado pelas escombrelas ou ainda outros problemas graves como a ameaça a aquíferos apontado por Hebhoub *et al.* (2010) na Turquia, país igualmente produtor de mármore a larga escala. É assim feita uma análise dessa viabilidade e, em caso positivo, de qual a melhor proporção de agregados secundários (origem nos resíduos de mármore) a incorporar num betão convencional (apenas com agregados primários). O estudo engloba o registo do comportamento mecânico do betão em função do nível de incorporação de grossos resultantes da indústria das pedras ornamentais, neste caso do mármore (grossos secundários).

Para o estudo, são utilizados 3 betões de referência (BR) de agregados grossos primários (AGP; granito AGPG, basalto AGPB e calcário AGPC). Para cada um dos BR, é utilizada uma taxa de substituição de 0, 20, 50 e 100% de grossos dos AGPs por grossos dos agregados secundários de mármore (AGSM), de acordo com o esquema representado na Figura 1.1. A partir deste esquema, são realizados os ensaios mecânicos, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão, tal como explicado em detalhe no capítulo 3 sobre a campanha experimental.

Paralelamente, António André desenvolveu uma dissertação relacionada com o mesmo tema, incidindo o seu estudo na componente relacionada com a durabilidade de betões com incorporação de grossos resultantes da indústria do mármore.

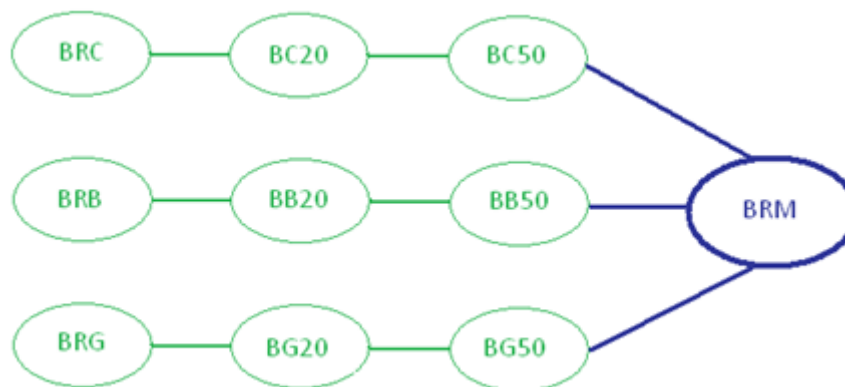


Figura 1.1 - Esquema ilustrativo das taxas de substituição para os 3 betões de referência.

1.3 Metodologia e organização da dissertação

A metodologia adoptada para a investigação foi dividida em 5 etapas.

A primeira etapa consistiu na concepção do Seminário de investigação, onde foi recolhida informação sobre os aspectos mais relevantes para a dissertação. Foi elaborada a estrutura e o planeamento dos trabalhos a realizar ao longo do processo de investigação. Foi feito um levantamento dos trabalhos relacionados com a sua temática de modo a justificar as escolhas da referida. Este levantamento geral da literatura serviu também para a elaboração do estado da arte.

A etapa seguinte passou pela preparação do plano de ensaios, com base nos elementos bibliográficos adequados, tais como normas e ensaios normalizados de agregados e de betão estrutural. Esta fase constituiu-se como um dos aspectos centrais desta dissertação, uma vez que foi delineada a estratégia de execução da campanha experimental. Foram também calculadas as quantidades de materiais necessárias e restantes recursos materiais e humanos, bem como elaborado um plano de logística para recolha dos mesmos e utilização em laboratório. A monitorização dos ensaios e dos respectivos resultados, foi outro dos aspectos tidos em conta nesta etapa.

Na terceira etapa, foi executada a campanha experimental propriamente dita com uma primeira fase que englobou a análise dos agregados grossos (AG) de granito, calcário, basalto e mármore e ainda dos finos (areias grossa e fina) para integração nos betões necessários para as fases da campanha experimental. Um resumo dos ensaios realizados nesta fase e das respectivas normas pode ser consultado no Quadro 1.1.

Na segunda fase desta etapa, foram realizadas as betonagens com os respectivos agregados acautelando que os vários betões apresentassem trabalhabilidades semelhantes, de modo a poderem ser comparados e garantir uma fluidez adequada. Foram realizados os ensaios ao betão no estado fresco, abaixamento no cone de Abrams e massa volúmica (Quadro 1.2), e numa outra fase foram realizados os ensaios mecânicos ao betão no estado endurecido, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, determinação do módulo de elasticidade e desgaste por abrasão (Quadro 1.2). A campanha experimental decorreu no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos do Instituto Superior Técnico.

Quadro 1.1 - Ensaios e respectivas normas

Ensaios	Normas
Análise granulométrica	NP EN 933-1 e NP EN 933-2
Massas volúmicas e absorção de água	NP EN 1097-6
Massa volúmica aparente ou baridade	NP EN 1097-3
Desgaste de “Los Angeles”	LNEC E 237
Teor de água total e superficial	NP 956
Índice volumétrico	NP EN 933-4

Quadro 1.2 - Ensaios no estado fresco e endurecido

Ensaios no estado fresco	Normas
Abaixamento (cone de Abrams)	NP EN 12350-2
Massa volúmica	NP EN 12350-6
Ensaios no estado endurecido	Normas
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6
Módulo de elasticidade	LNEC E397
Resistência à abrasão	DIN 52108

Na quarta etapa, foi feito o tratamento e análise integrada dos resultados dos ensaios tendo em conta o desempenho mecânico dos BAGSM (betões com incorporação de agregados grossos secundários de mármore), em função da taxa de substituição dos agregados e das propriedades destes. Foram discutidos os desempenhos e procuradas as respectivas explicações confrontando-as com as de outros autores.

Por fim, na última etapa, foi feita a integração e organização de toda a informação e passou-se à redacção do presente documento.

A estrutura da dissertação ficou organizada em 5 capítulos:

- capítulo 1 - apresenta uma introdução à problemática do tema e as considerações iniciais relacionadas com a justificação do presente trabalho; são também indicados a estrutura da dissertação, os objectivos traçados e a metodologia utilizada para a sua elaboração;
- capítulo 2 - neste capítulo, foi feito um levantamento do estado do conhecimento com a descrição e análise dos resultados publicados por outros investigadores em áreas relacionadas com as do presente trabalho, nomeadamente na avaliação do desempenho de betões com incorporação de agregados grossos em geral, num primeiro nível, de

betões com incorporação de agregados grossos secundários de mármore (AGSM), num segundo nível, e noutras investigações relevantes para o mesmo;

- capítulo 3 - aqui foi feita uma apresentação detalhada de toda a campanha experimental, desde o seu planeamento à realização dos ensaios de caracterização mecânica dos betões produzidos; foi feita uma descrição pormenorizada dos ensaios aos agregados, ao betão fresco e ao betão endurecido; foram também apresentados os cálculos correspondentes à determinação das composições dos betões ensaiados;
- capítulo 4 - este capítulo compreendeu a apresentação dos resultados obtidos durante a campanha experimental, para todos os ensaios descritos em detalhe no capítulo 3; foi feita uma análise dos referidos resultados de modo a apontar explicações para os mesmos, investigando a evolução do desempenho mecânico do betões e relacionando-os com os resultados dos ensaios relativos aos agregados; foi ainda feita uma comparação das tendências observadas com as de outros autores quando aplicável;
- capítulo 5 - neste capítulo, foi feita uma apresentação das principais ideias resultantes do capítulo 4 e foram tiradas as respectivas conclusões discutindo, sempre que possível, as ideias apontadas por outros investigadores; foram ainda propostos alguns assuntos, parâmetros a estudar e áreas com interesse de desenvolvimento no seguimento da presente investigação e que podem constituir um acréscimo à mesma.

Por último, a presente dissertação inclui as referências bibliográficas e os anexos que consistem fundamentalmente na apresentação dos resultados intermédios dos ensaios realizados ao longo da campanha experimental.

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

Neste capítulo, pretende-se abordar o que está a ser desenvolvido na área de investigação sobre a viabilidade de utilização de agregados grossos provenientes de resíduos, em especial de pedreiras de mármore (AGSM - agregados grossos secundários de mármore), para incorporação em betões com fins estruturais. Para tal, foi feito um levantamento geral dos estudos sobre as propriedades dos agregados, sobre a avaliação mecânica dos betões produzidos a partir de agregados não primários, incluindo os de mármore, e comparações entre os desempenhos mecânicos de betões tradicionais, fabricados a partir de agregados primários, e betões produzidos com incorporação de diferentes percentagens de agregados secundários.

Deste modo, no capítulo, são abordadas as campanhas experimentais de autores que desenvolveram estudos sobre propriedades dos betões quer no estado fresco quer no estado endurecido. Foram também consideradas as relações dessas propriedades com as dos agregados que lhes dão origem. Procurou-se fazer uma separação entre estudos incidentes sobre agregados grossos em geral e sobre agregados grossos de resíduos de mármore em particular, por ser este o tema central da presente dissertação. São exemplos dessas propriedades o teor de água, absorção de água, porosidade, resistências mecânicas, entre outras. São exemplos de propriedades dos betões com estes agregados o abaixamento ou “*slump*” e a massa volúmica no estado fresco e, no estado endurecido, propriedades mecânicas tais como resistência à compressão, tracção, módulo de elasticidade e resistência à abrasão.

2.2 Análise do processo extractivo e da indústria do mármore

2.2.1 Considerações gerais

Os resíduos de mármore da indústria extractiva de rochas ornamentais, utilizados como agregados na campanha experimental da presente dissertação, provêm da pedreira situada na “Herdade da Vigária”, freguesia de Bencatel, concelho de Vila Viçosa, distrito de Évora. A área licenciada da pedreira é de 937 835 m². Na Figura 2.1, pode ser visualizada uma vista aérea da zona de exploração.

A exploração desenvolve-se a céu aberto, em fosso ou poço, é efectuada por degraus direitos e de cima para baixo como pode ser observado na Figura 2.2.

A sequência do método de extracção (Figura 2.3) é concretizada pelas seguintes operações: traçagem (a), levantamento topográfico, corte de levante (b), furação (c), serragem (d-f), derrube (g), esquadrejamento, transporte, beneficiamento, mediação, classificação e armazenagem.



Figura 2. 1 - Vista aérea da zona de exploração da pedra na “Herdade da Vigária”



Figura 2. 2 - Exploração a céu-aberto

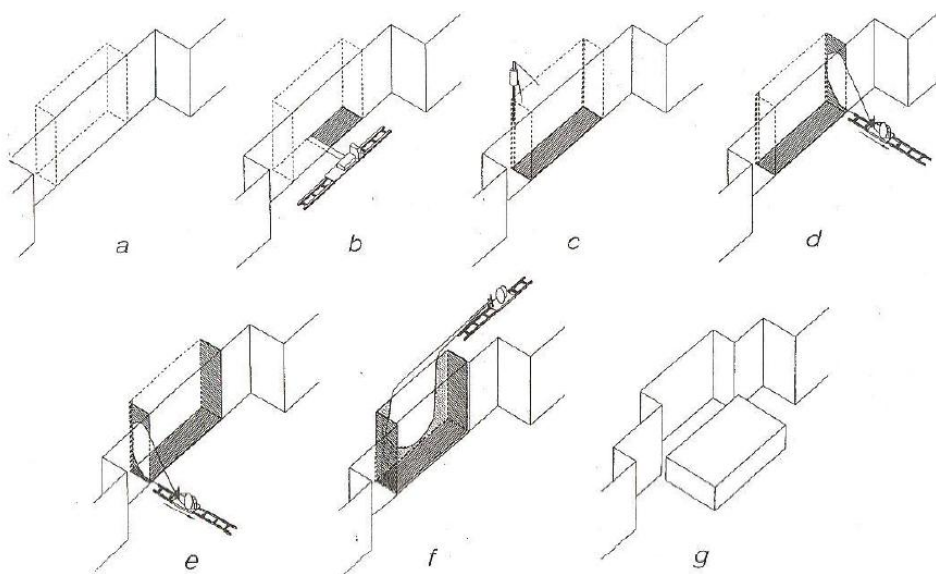


Figura 2. 3 - Etapas do processo produtivo

2.2.2 Traçagem e levantamento topográfico

A traçagem (Figura 2.4) consiste, em primeira análise, na caracterização da massa mineral a explorar, ou seja, na orientação dos canais e na definição dos sentidos de desmonte, das dimensões (comprimento, largura e altura), na identificação e no levantamento das descontinuidades existentes (corrume, fracturas, veias e litologia). Após a traçagem, as descontinuidades e as dimensões da massa mineral são levantadas através de métodos topográficos. Os dados topográficos são seguidamente inseridos e analisados em computador.



Figura 2.4 - Traçagem de uma massa mineral

2.2.3 Furação

A furação vertical é realizada através de martelos pneumáticos ou perfuradoras hidráulicas, a cerca de 3 m da frente livre. Uma imagem da execução desta operação pode ser observada na Figura 2.5.

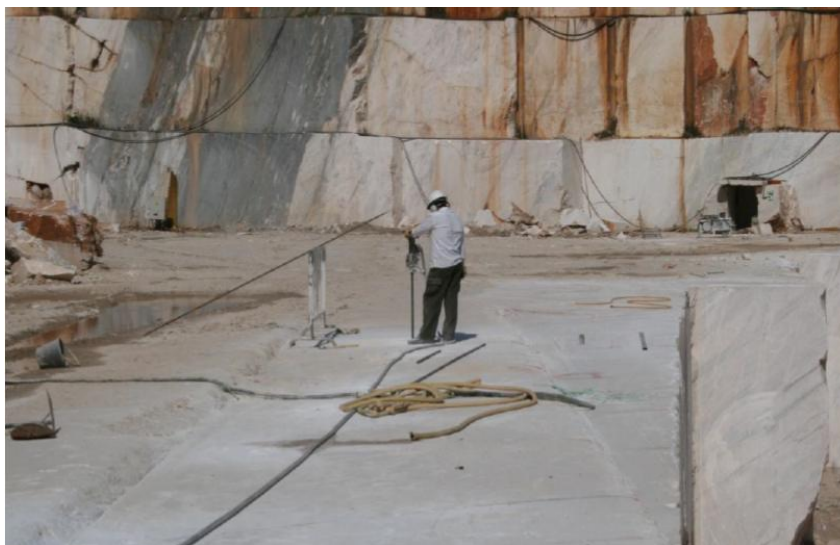


Figura 2.5 - Furação

2.2.4 Corte de levante

O corte de levante é executado por uma roçadora de cadeia a seco (Figura 2.6). O corte intersecta os furos verticais executados a cerca de 3 m, uma vez que a lâmina da roçadora tem 3,2 m, permitindo a passagem do fio diamantado. Os desperdícios resultantes do corte são recolhidos através de um aspirador que é acoplado à roçadora.

Nos locais mais fracturados, onde o risco de desabamento de pedras é maior, o corte de levante é realizado através de máquinas de fio diamantado. Nestes casos, é necessário realizar furação horizontal por intermédio da perfuradora hidráulica. Os furos horizontais têm que intersectar os furos verticais, de modo a que seja possível passar o fio diamantado para realizar o corte de levante.



Figura 2.6 - Corte de levante através de roçadora

2.2.5 Serragem das costas e dos topos (vertical)

A serragem é realizada por máquinas de fio diamantado como pode ser visto na Figura 2.7. Normalmente, realiza-se primeiro a serragem das costas e depois a serragem dos topos. Com o fim da serragem, a massa mineral fica separada do maciço rochoso. Normalmente, realizam-se cortes a meio da massa mineral, com espaçamento de 3 m, de modo a facilitar o derrube. Com essa divisão da massa mineral, resultam as talhadas.



Figura 2.7 - Serragem de uma talhada com máquina de fio diamantado

2.2.6 Derrube

O derrube das talhadas é efectuado com o auxílio de um colchão hidráulico provocando o afastamento da talhada do maciço rochoso como pode ser consultado na Figura 2.8. De seguida, através de uma escavadora giratória (Figura 2.9) ou pá carregadora, a talhada é derrubada para cima do entulho constituído por pequenos fragmentos de rocha e terra, denominada por “cama”. A função da “cama” é amortecer o impacto da queda, minimizando a quantidade de fracturas provocadas pela queda, minimizar a projecção de pedras e permitir a passagem do fio diamantado, sem que seja necessário proceder a nova furação.



Figura 2.8 - Afastamento com o colchão hidráulico



Figura 2.9 - Derrube com a escavadora giratória

2.2.7 Esquadrejamento

Uma vez derrubadas as talhadas, procede-se à limpeza dos blocos, ou seja, à eliminação das zonas com mais veios. Esta operação, denominada de esquadrejamento, é realizada por máquinas de fio diamantado de menores dimensões denominadas por corta-topos (Figura 2.10).



Figura 2.10 - Esquadreamento de um bloco

2.2.8 Transporte

A etapa seguinte consiste na remoção dos blocos, onde é feita a limpeza da frente de desmonte através de uma pá carregadora ou escavadora giratória. Os blocos comercializáveis são transportados pela pá carregadora para os centros de produção. Os restantes blocos são transportados, com o auxílio de *dumpers*, para as escombreiras como se pode observar nas Figuras 2.11 e 2.12.



Figura 2.11 - Transporte de resíduos



Figura 2.12 - Transporte de blocos

2.2.9 Beneficiamento

Nos centros de produção, é feita uma limpeza mais rigorosa aos blocos e uma regularização da sua forma, de modo a que se obtenha a forma mais regular possível. Esta operação é realizada com a ajuda de monofios ou monolâminas. Esta operação pode ser visualizada na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Beneficiamento de blocos

2.2.10 Medição, classificação e armazenagem

Após a beneficiação dos blocos, é necessário proceder à sua medição, classificação e armazenagem, ficando os blocos disponíveis para comercialização. A armazenagem (Figura 2.14) é realizada tendo em consideração a pedreira de origem e o padrão dos blocos.



Figura 2.14 - Parque de blocos

2.2.11 Breve análise da indústria do mármore

Em 1989, o volume de produção regional no eixo Estremoz - Borba - Vila Viçosa representou cerca de 58% da produção nacional de rochas ornamentais, em quantidade, e cerca de 72% do seu valor, estando as 241 pedreiras distribuídas do seguinte modo: Estremoz - 28; Borba - 53; Vila Viçosa - 160. Apesar do insuficiente conhecimento geológico-económico das reservas, admitia-se já na altura um enorme potencial para a indústria extractiva da região e estimava-se que a reserva ultrapassasse os 75 milhões de toneladas de blocos. Tal significaria, ao ritmo da altura, uma garantia de exploração para 200 anos.

Dados mais recentes sobre a produção na “Herdade da Vigária” podem ser consultados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Quantidades de rocha desmontada na “Herdade da Vigária”

Ano	Rocha desmontada
2006	380 000
2007	450 000
2008	540 000
2009	500 000
Total	1 870 000

Em relação às quantidades referentes à produção de blocos, de britas e percentagem que segue para aterros, os valores podem ser consultados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Produção de blocos e de britas

Ano	Produção de blocos (toneladas)	Produção de britas (toneladas)	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
Tota	133 500	720 000	54

As grandes percentagens de quantidades que seguem para aterro devem-se em grande parte aos desperdícios gerados nas fases de extracção e processamento. Como referido, também Aukour (2009) aponta a indústria de processamento do mármore como responsável pela produção de grandes quantidades de resíduos sólidos ocupando extensas áreas para os escombros e salienta que a produção mundial da indústria do mármore tem vindo a aumentar nos últimos anos. O autor indica valores de perda de 30% da pedra de mármore logo na primeira fase do processamento e destaca que esta perda deve-se ao desaproveitamento de porções de tamanho insuficiente e/ou forma irregular, como também referido. Hebhou et al. (2010) apontam o valor de 70%, valor semelhante ao registado para as pedreiras da região Estremoz – Borba – Vila Viçosa, para o total de perdas no conjunto de fases de extracção de mármore, processamento e acabamentos na indústria extractiva de rochas ornamentais na Argélia. Akbulut e Gurer (2007) apontam igualmente o valor de perdas de 70% no processo extractivo de mármore na Turquia.

2.3 Influência de agregados grossos nas características do betão

A propriedade mais importante para a caracterização um betão é a sua resistência à compressão, principalmente quando se trata de betões estruturais. É portanto natural encontrar

vários estudos sobre esta propriedade e a procura de factores que a possam influenciar. Na pesquisa efectuada neste trabalho, efectuou-se um levantamento geral do que foi feito até à data em termos da avaliação dos efeitos que as características dos agregados grossos têm nas propriedades de um betão e por comparação, relativamente a essa influência, entre a inclusão no betão de agregados naturais (denominados nesta dissertação de primários ou naturais - AP) e a inclusão de agregados grossos não tradicionais (não primários ou secundários - AS). Esta pesquisa foi dividida em dois níveis. Num primeiro, fez-se um levantamento geral sobre a inclusão de agregados, tradicionais ou não, com maior incidência em grossos e, num segundo nível, sobre agregados não tradicionais, derivados de mármore, igualmente com maior incidência em grossos. A este nível, pesquisou-se sobre as repercussões que o tipo e quantidade de agregado grosso, derivado do mármore, têm sobre o comportamento do betão.

Algumas características estudadas, em relação à influência do agregado no comportamento de um betão, são a sua natureza química e geológica, porosidade, permeabilidade, absorção de água, teor em água, forma, textura e resistência à compressão, tracção e desgaste ou, numa abordagem mais próxima da formulação de um betão, as características físicas como dimensão, forma e distribuição granulométrica. São encontrados estudos na literatura com o objectivo de analisar as citadas propriedades e a influência das mesmas no comportamento de um betão. Com a filosofia de encontrar destinos para o problema da acumulação de agregados de natureza não tradicional, esses estudos assumem relevo para a decisão sobre a viabilidade de incorporar tais agregados em betões quer estruturais quer não estruturais.

No seu estudo, Pereira *et al.* (2007) investigaram a influência da dimensão do agregado, da sua mineralogia e do seu teor em água na permeabilidade do betão. Utilizaram 4 tipos de agregados britados de origem portuguesa, mármore, granito, basalto e calcário para produzir betão estrutural com resistência alvo classe C30/37. Para poderem efectuar comparações credíveis, realizaram betões mantendo constantes a trabalhabilidade, proporções de volume bem como as condições de amassadura e de cura dos betões. Os autores suportam a ideia de que a selecção de um agregado, para a produção industrial de betão, reside essencialmente no critério da abundância relativa e localização perto da zona de aplicação mas defendem que o principal critério deverá considerar as qualidades mecânicas e físicas dos agregados de modo a obter as desejadas características de um betão, como sejam a resistência à compressão e abrasão ou densidade.

Como resultados, podem-se salientar os valores de desgaste de Los Angeles inferiores a 50% para todos os agregados, valor que é defendido pela maioria dos investigadores como o limite para um agregado ser aceite para incorporação num betão à semelhança do limite de 50%, para agregados em betões estruturais, que é estipulado pela norma LNEC E-373.

Em relação aos betões produzidos, Pereira *et al.* (2007) observaram que, utilizando agregados de maiores dimensões, foram atingidos maiores valores de absorção de água e permeabilidade ao ar do que os que se obtiveram utilizando agregados de menores dimensões, independentemente da natureza geológica do agregado. Este resultado pode ser explicado pelo facto de os agregados grossos obrigarem a um maior percurso para se percorrer os poros capilares e existir neles uma rede de conectividade mais ampla e também por aumentar a área da interface pasta ligante-agregado. Em relação ao comportamento mecânico dos betões, concluíram que o tipo, dimensão e o teor em água do agregado não influenciaram

significativamente a resistência para uma classe alvo C30/37. Em relação à durabilidade, concluíram que não foi influenciada pelas diferentes mineralogias dos agregados utilizados mas, em contrapartida, foi significativamente influenciada pela dimensão do agregado e pelo seu teor em água. Beshr *et al.* (2003) citam vários outros investigadores, Farran (1956), Maso (1969), Alexander e Davis (1991), Baalbaki *et al.* (1991) e Giaccio *et al.* (1993), que se dedicaram ao estudo da influência das características mineralógicas dos agregados sobre os betões, realçando a importância do tema. Casuccio *et al.* (2003) também defendem a forte correlação entre as características do agregado e o comportamento do betão a que dão origem.

Ainda no sentido de avaliar o grau e dimensão dessa influência, Wu *et al.* (2001) utilizaram quartzito triturado, granito triturado, calcário e mármore como agregados grossos nos seus estudos que os levaram a apresentar resultados que sugerem que a resistência, rigidez e energia de facturação do betão para uma determinada relação água / cimento (A/C) dependem do tipo de agregado, especialmente para betões de alta resistência. Esta ideia é igualmente defendida por Ozturan e Cecen (1997). Eles referem que o facto de a resistência do agregado ser mais importante nos betões de maior resistência advém de aí a rotura começar a ser condicionada também pelo agregado enquanto que, nos betões de menor resistência, em que se utiliza menos cimento, a rotura tende a ser condicionada pela ligação ligante-agregado. Neville (1981), citado por Ozturan e Cecen (1997), refere que, na mesma linha de pensamento, o tipo de agregado vai assumindo mais importância à medida que a qualidade dos outros componentes do betão aumenta uma vez que, se a qualidade destes for baixa, seja qual for a capacidade resistente do agregado, a rotura vai acontecer pelos mesmos valores já que essa rotura não se dá no agregado mas na ligação da pasta de cimento aos agregados. Deste modo, para betões com resistências alvo mais baixas, a rondar 30 MPa (valores usados nas experiências de Turan em 1997), o potencial resistente dos agregados não está a ser explorado, sendo inútil utilizar agregados com melhores características resistentes. Pode-se justificar esta ideia com o valor da tensão de rotura dos AP ser geralmente superior a 60 MPa. Deste modo, confirma-se que a resistência dos betões de baixo ou médio desempenho depende fundamentalmente da resistência da pasta de cimento (Brito, 2005; Coutinho, 1998). Quando se aumenta o valor alvo de resistência do betão, e para tal se aumenta a dosagem e qualidade do ligante, a qualidade do agregado passa a ter papel mais determinante. Di Maio *et al.* (1996) também explicam estas ideias referindo que, à medida que as diferenças entre as resistências das várias fases componentes do betão vão diminuindo, um mecanismo adicional de rotura, para além da rotura através das interfaces do betão, assume maior importância. Esse mecanismo deve-se ao alastramento e penetração da fendilhação através do corpo do agregado que até então era imune à fractura. Este fenómeno é especialmente significativo no caso de betões de elevada resistência o que volta a alertar para a importância da qualidade do agregado no caso de tais betões. Beshr *et al.* (2003), nos seus estudos de betões de elevada resistência, explicaram o pior desempenho mecânico do betão com agregados grossos de calcário, face a outros betões experimentados com outros agregados, dolomite, calcário quartzítico e escória de aciaria, pelas características mais fracas desse agregado, que provavelmente não se fariam sentir numa experiência com resistências alvo de betões mais baixas por aí as diferenças se atenuarem já que a rotura começa a ser condicionada, não pelo corpo do agregado, mas pela pasta de ligante e pela interface deste com o agregado, como amplamente referido por autores citados.

Gaccio e Zeberdino (1998) referem que o betão é um material compósito e, deste modo, as suas propriedades dependem das propriedades dos componentes do betão e das interações entre eles. Os autores apontam como exemplo a textura da superfície do agregado que é um dos factores preponderantes para a resistência do betão resultante pois uma textura rugosa promove uma ligação mais forte do que uma textura lisa. Ademais, as propriedades do agregado afectam as características do betão no estado fresco, como por exemplo a trabalhabilidade, que por sua vez se repercutem mais tarde nas propriedades do betão no estado endurecido, mostrando como a problemática da interligação entre as propriedades do agregado e as propriedades do betão resultante é complexa.

É salientado, pelos investigadores, que as interfaces entre as componentes são o elo mais fraco no betão, desempenhando um papel muito importante no processo de rotura. Esse processo estará relacionado com as características dos agregados (especialmente os grossos) e com as diferenças relativas de força entre matriz e inclusões. Analisaram o comportamento mecânico de betões de alta resistência e convencionais preparados com agregados grossos exibindo diferenças significativas nos valores de resistência, forma, textura da superfície, porosidade e absorção e resistência de conexão na interface. Foram utilizados 4 tipos de agregados, dois cascalhos de rio, um dos quais silicioso, e dois britados, um de granito e outro de quartzo. Foram experimentadas duas relações água / cimento de valores 0,30 e 0,50. Por fim, analisaram os efeitos do tipo de agregado e do nível de resistência do betão no mecanismo de rotura deste, incluindo resistência à tracção e compressão, rigidez, energia de fracturação e padrão de fendilhação. Como resultados mais relevantes, podem ser referidos a variação de cerca de 15 GPa nos valores do módulo de elasticidade entre os vários betões com diferentes tipos de agregado mantendo o nível de tensão de compressão constante. As gamas de tensão experimentadas variaram desde 10 a 90 MPa mantendo-se a variação acima referida (15 GPa) constante para cada nível de tensão aplicado, tendo obtido os valores mais altos de módulo de elasticidade para o betão com agregado silicioso de rio e os valores mais baixos para o betão com brita granítica. Da análise de restantes resultados, concluíram ainda que os betões com agregados de cascalho apresentaram valores mais baixos de tensão de compressão do que os obtidos com betões de agregados britados. Este resultado pode estar relacionado com a existência de uma melhor ligação entre os agregados e os restantes componentes do betão para o caso dos agregados britados face a agregados rolados. Esta classificação dos agregados, quanto à textura, em rolados e britados, é a principal, segundo Brito (2005), para AP, sendo comum encontrar, nos estudos referidos nesta dissertação, na área da influência do tipo de agregado sobre as características do betão, a preocupação dos investigadores em incluir estas duas principais formas de agregado para se poderem efectuar comparações abrangentes. Na presente dissertação, a comparação foi feita entre agregados não primários ou secundários (AS) e são de textura britada dado o objecto do estudo serem pedreiras. Di Maio et al. (1996) estudaram alguns aspectos fenomenológicos da avaliação da resistência do betão relacionados com o efeito dos agregados grossos na iniciação e propagação da fendilhação bem como a influência do nível de resistência do betão e do mecanismo de microfissuração. Os agregados grossos estudados foram de dois tipos, um de brita granítica e outro de cascalho de rio. Um dos resultados obtidos foi a variação da tensão resistente de compressão do betão, com a máxima dimensão do agregado (esta variando entre 5 e cerca de 70 mm), tendo-se registado valores, aos 7 dias de idade, entre

18 e 20 MPa para dimensões de 5 mm e valores entre 16 e 25 MPa para dimensões de cerca de 75 mm. Estes resultados confirmam a influência da máxima dimensão do agregado sobre a resistência à compressão do betão. Os resultados dos autores mostram uma tendência para a diminuição da resistência à compressão do betão com a diminuição da presença de agregados grossos. Estas conclusões estão de acordo com outras experiências e podem ser explicados pelo aumento de áreas de interface que, como é reconhecido por vários autores, são os locais de fraqueza preferencial por parte do betão, e que levam a um maior aparecimento de zonas de iniciação de fendilhação e propagação consequente. Os betões foram preparados pelos investigadores com uma relação água / cimento de 0.60, o que conduziu aos indicados valores de resistência relativamente baixos e permitiu que fossem relativamente próximos.

Beshr *et al.* (2003), no referido estudo sobre betões de elevada resistência, utilizaram 4 tipos diferentes de agregados grossos, nomeadamente calcário, dolomite, calcário quartzítico e escória de aciaria, tendo verificado que o tipo de agregado grosso influencia a resistência à compressão, a resistência à tracção e o módulo de elasticidade. Para a resistência à compressão, obtiveram, aos 28 dias, valores de 43, 45, 47 e 54 MPa para os betões com calcário, dolomite, calcário quartzítico e escória de aciaria, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, obtiveram, aos 28 dias, valores de 21.6, 24.5, 28.8, 29.6 GPa com os betões incorporando calcário, dolomite, calcário quartzítico e escória de aciaria, respectivamente. Atribuíram, como razão para o baixo valor com agregado calcário e como referido, a natureza mais macia deste à qual corresponde uma rotura mais dúctil para os betões preparados com este tipo de agregado. Nesta linha de pensamento, concluíram que agregados mais fracos tendem a produzir um betão mais dúctil do que agregados fortes.

Outros autores que podem ser referenciados com estudos sobre a influência das propriedades dos agregados no comportamento do betão são Meddah *et al.* (2010) e Garcia Alvarez *et al.* (2003). Os primeiros estudaram o efeito da composição e distribuição do tamanho das partículas de agregados grossos na resistência à compressão do betão, obtendo resultados de aumento da resistência à compressão, para betão de resistência normal, com o aumento da dimensão máxima do agregado grosso (obtiveram um acréscimo de até 12% para 4 combinações de agregados grossos utilizadas) enquanto que García Alvarez *et al.* (2003) analisaram a influência do tipo de agregado, quer pela forma quer pela origem mineralógica, sobre o comportamento dos betões de normal e alta resistência. Os seus estudos, que incidiram sobre agregados de origem em granitos, migmatitos e basaltos, sustentam as amplamente referidas conclusões de que o tipo de agregado tem influência no mecanismo de rotura e na resistência do betão.

2.4 Influência de agregados secundários nas características do betão

Existe uma grande variedade de estudos destinados à análise do comportamento de betões com incorporação de agregados não primários ou secundários (AS) onde se incluem os agregados reciclados. Estes estudos, sobre a incorporação de vários tipos de agregados não primários, inserem-se na referida filosofia ambiental. Exemplos destes materiais são desperdícios de borracha, vidro, plásticos e resíduos das indústrias das rochas ornamentais.

Entre os vários investigadores que trabalharam nesta área, pode citar-se Topçu (1995). Este autor estudou as propriedades do betão com incorporação de borracha proveniente de

trituração mecânica. A sua campanha experimental envolveu a análise da influência, quer ao nível da dimensão quer ao nível da quantidade de agregado substituído, tendo-se estudado as propriedades físicas e mecânicas dos betões resultantes.

Topçu (2009) estudou também a influência de agregados reciclados em betões auto-compactáveis onde substituiu ligante por pó de resíduos de mármore resultantes da actividade extractiva. Estudou, para várias taxas de substituição, as propriedades no estado fresco como o abaixamento no cone de Abrams, medida indirecta da importante propriedade trabalhabilidade, e propriedades no estado endurecido como resistência à compressão e flexão, porosidade e compacidade. Concluiu que, para níveis de substituição não superiores a 200 kg/m³, a trabalhabilidade de betões auto-compactáveis no estado fresco não foi afectada, sendo porém afectadas as propriedades mecânicas e acentuando-se a diminuição para taxas de substituição acima de 200 kg/m³.

Ainda Topçu (2004) incorporou desperdícios de vidro em betão, considerando-os como agregados grossos, concluindo que não existia uma influência significativa na trabalhabilidade e apenas uma ligeira diminuição no que diz respeito à resistência mecânica e comentando que a justificação para o seu estudo se prendia com considerações ambientais por demonstrar que os desperdícios de vidro podem ser incorporados no betão sem a necessidade de altos dispêndios de energia.

Como exemplo de estudo da influência da incorporação de resíduos de plástico no betão, pode citar-se o trabalho de Ismail e Hashmi (2008). Estes autores substituíram areia pelos agregados reciclados citados nas proporções de 0, 10, 15 e 20% e realizaram ensaios de desempenho tais como medições do abaixamento, densidade no estado fresco e resistência à compressão e flexão, estas duas últimas propriedades no estado endurecido. Os ensaios foram feitos para as idades de cura de 3, 7, 14 e 28 dias, tendo-se registado resultados que apoiam a viabilidade de reutilizar este tipo de agregados como substituto de finos (areia) de modo a reduzir o problema do custo dos materiais e o problema colocado pela acumulação de resíduos sólidos de plásticos.

2.5 Betões com agregados grossos de mármore

2.5.1 Influência de agregados secundários (AS) de mármore no betão

Ao contrário dos estudos envolvendo finos, não existem muitos estudos sobre betões com incorporação de agregados grossos de mármore. Alguns dos autores que se dedicaram a essa análise foram Hebhoub *et al.* (2011). O seu objectivo foi demonstrar a possibilidade de utilizar os desperdícios do mármore para substituição em betões em lugar de utilizar AP.

Como referido, Hebhoub *et al.* (2011) alegam que existem poucos estudos levados a cabo no sentido de entender as propriedades mecânicas e reológicas dos agregados provenientes dos resíduos de mármore e é difícil efectuar comparações entre os resultados encontrados, porque os poucos estudos existentes não têm sempre os mesmos alvos.

Na campanha citada, uma das que mais dados de comparação fornece para o trabalho de investigação de presente dissertação, Hebhoub *et al.* (2011) desenvolveram três linhas de estudo. Na designada por F, substituíram apenas finos (areia natural por finos resultantes dos desperdícios da indústria extractiva do mármore numa pedreira na Argélia); na designada por G,

substituíram apenas agregados grossos naturais de calcário por grossos resultantes dos desperdícios da indústria extractiva do mármore da mesma pedra; no terceiro estudo, designado por M, efectuaram os dois tipos de substituição simultaneamente. Os níveis de substituição, para os três tipos, correspondem a percentagens de 25, 50, 75 e 100%. Os autores concluíram que, para as substituições até 75%, houve bons resultados na resistência à compressão.

Fazendo um resumo da sua campanha experimental, pode observar-se na Figura 2.15 que, em relação à densidade do betão, os 3 tipos de substituição não conduziram a uma variação significativa na densidade do betão a que deram origem, apesar de ser expectável que os AS pudessem ter alguma influência na densidade do betão dado que a densidade deste é função das densidades iniciais dos materiais que o incluem, das proporções das misturas, do conteúdo inicial e final de água e do grau de hidratação. Os valores das densidades das diferentes misturas são diferentes devido às diferentes percentagens de substituição. Pode salientar-se que os valores obtidos por Hebhoub *et al.* (2011) apontam para densidade semelhante entre o betão com a substituição M no nível 50% e o betão com AP. A linha de substituição de grossos G conduziu aos menores valores de densidade.

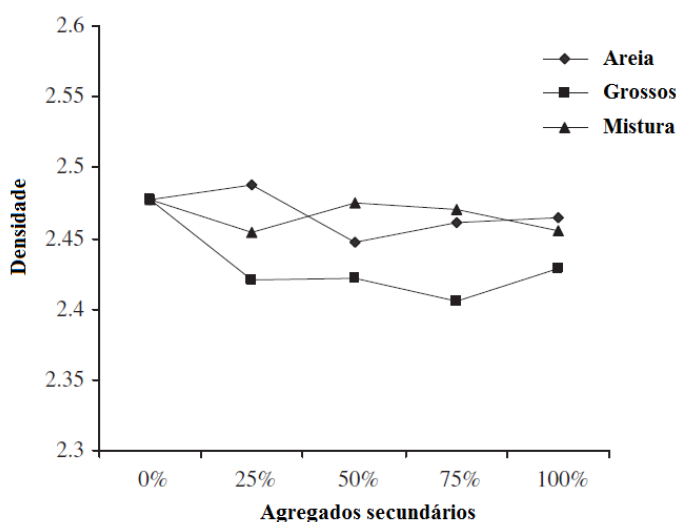


Figura 2.15 - Densidade em função da taxa de substituição (adaptado de Hebhoub *et al.* (2011))

Em relação à trabalhabilidade, sendo esta uma medida muito importante da qualidade do betão produzido, Hebhoub *et al.* (2011) registaram o abaixamento do betão no estado fresco. Os valores obtidos podem ser observados na Figura 2.16. Os resultados sugerem que a trabalhabilidade diminui para todos os tipos de substituição e a perda é tanto maior quanto maior for a taxa de substituição de agregado primário (AP) por agregado secundário (AS). Alguns dos factores que podem afectar a trabalhabilidade são a distribuição granulométrica e a forma dos agregados, a proporção relativa entre os agregados finos e os agregados grossos e as características dos componentes do betão. Os autores referem que o parâmetro crítico para a trabalhabilidade é que os AP absorvem mais água do que os agregados resultantes dos desperdícios da indústria do mármore. Desde modo, Hebhoub *et al.* (2011) acharam necessário que a correcta quantidade de água requerida para as misturas fosse corrigida e que dependesse

das proporções da mistura. Os investigadores referenciaram Binici *et al.* (2008), Belachia *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2007) como apoio a esta linha de pensamento.

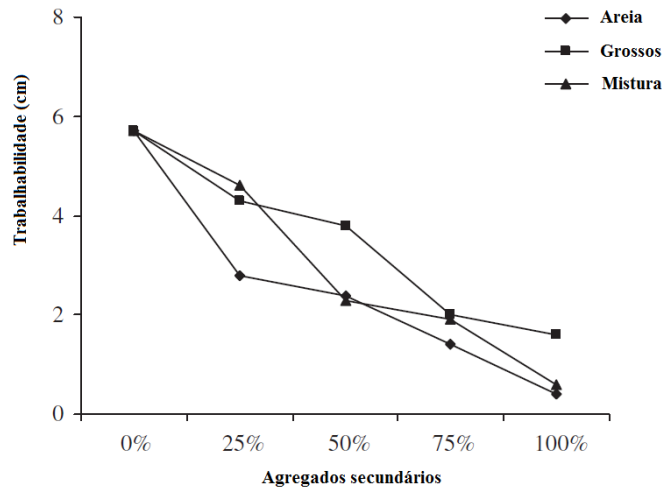


Figura 2.16 - Trabalhabilidade. (adaptado de Hebhoub *et al.* (2011))

Hebhoub *et al.* (2011) investigaram as tensões de resistência à compressão e tracção por flexão, salientando que estas são as mais importantes propriedades estudadas do betão. Os ensaios foram feitos em cilindros e submetidos a condições de cura de acordo com as normas europeias nas idades de 2, 14, 28 e 90 dias, tendo-se concluído que a introdução de AS, em certos níveis de substituição, afecta a resistência à compressão e à tracção. Hebhoub *et al.* (2011) referem que a formulação G deu origem a muito bons resultados para as várias taxas de substituição, apresentando o nível de 100% valores semelhantes aos dos agregados naturais (nível de 0% de substituição), como pode ser consultado nas Figuras 2.17–2.22, do que se salienta, na opinião dos autores, que as taxas de substituição de 25, 50 e 75% melhoram a resistência do betão. Salientam ainda a existência de uma boa relação entre o comportamento resistente à compressão e o comportamento resistente à tracção para todos os três tipos de substituição, F, G e M, acrescentando que, para a tracção, é bastante visível um crescimento mesmo após 28 dias, não tendo a mesma visibilidade o crescimento da resistência à compressão para essas idades de cura.

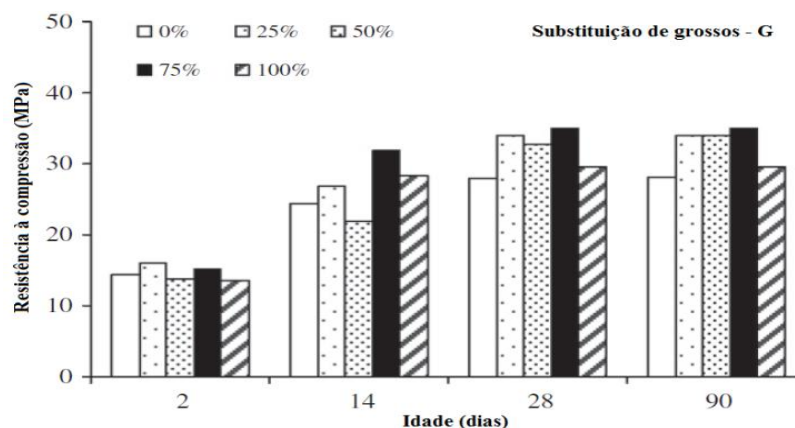


Figura 2.17 - Resistência à compressão, perfil G (adaptado de Hebhoub *et al.* (2011))

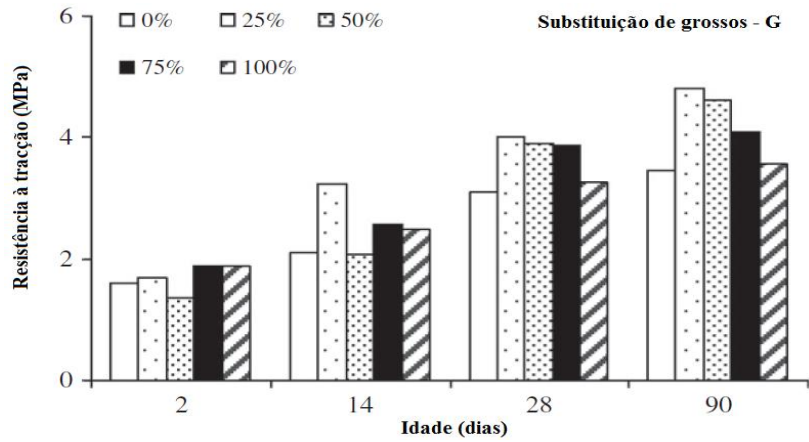


Figura 2.18 - Resistência à tração, perfil G (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

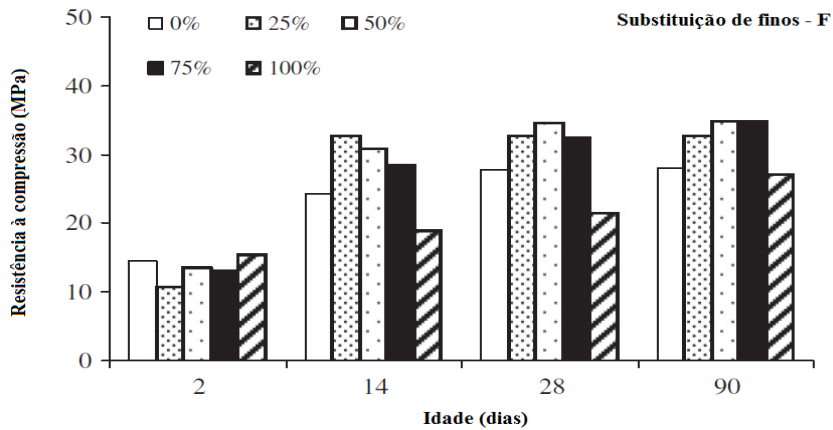


Figura 2.19 - Resistência à compressão, perfil F (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

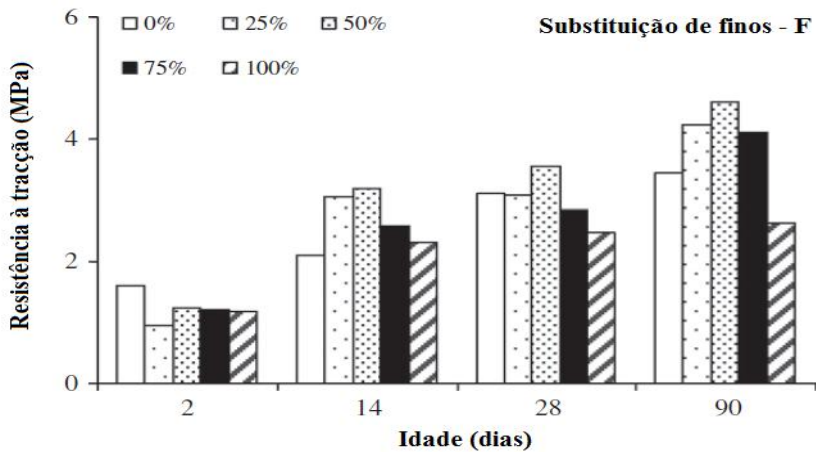


Figura 2.20 - Resistência à tração, perfil F (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

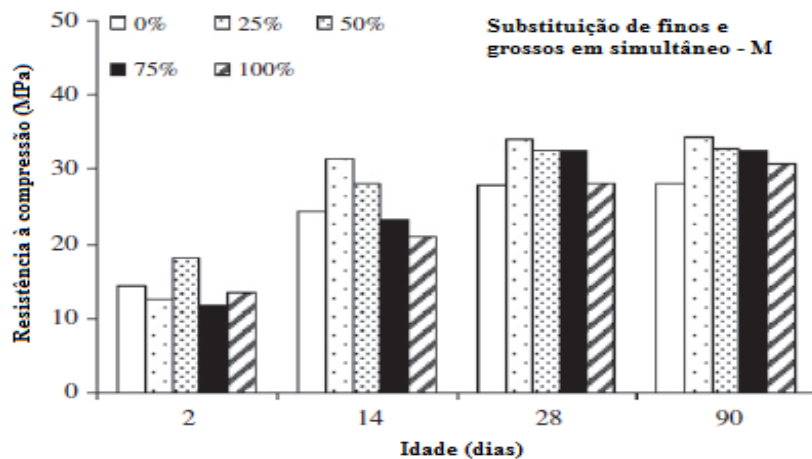


Figura 2.21 - Resistência à compressão, perfil M (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

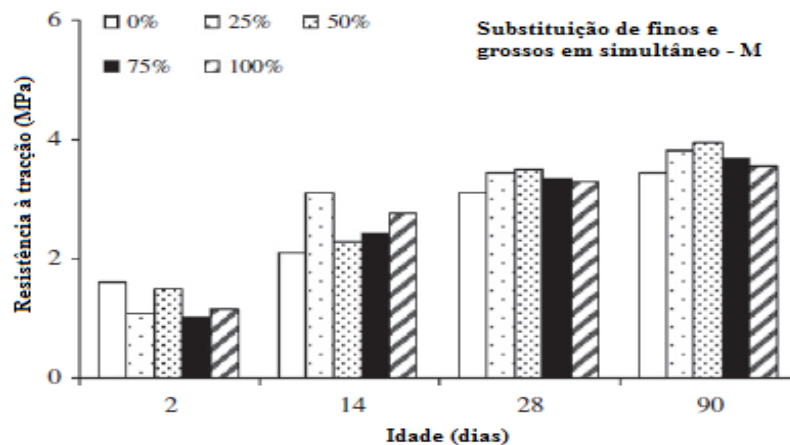


Figura 2.22 - Resistência à tração, perfil M (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

A resistência à compressão (Figuras 2.23 e 2.24) para os níveis de substituição de 25% e 50% em todas as formulações (F, G e M), apresenta valores relativamente próximos mas Hebhouh *et al.* (2011) resalvam que existe uma diferença para as idades mais jovens do betão (2 e 14 dias). Os valores de resistência obtidos por Hebhouh *et al.* (2011) no nível de substituição 75% (Figura 2.25) para as 3 formulações (F, G e M) são nitidamente maiores do que para o betão com agregados exclusivamente primários. As formulações G e M, com uma taxa de substituição de 100%, fornecem valores próximos dos do betão com agregados exclusivamente primários. O perfil de substituição de finos forneceu os valores mais baixos no que diz respeito à resistência à compressão. Hebhouh *et al.* (2011) concluíram, portanto, que a substituição de AP por AS, resultantes dos resíduos da indústria do mármore na Argélia, parece ser favorável, excepto para o nível de substituição de 100% (Figura 2.26), o qual provoca a redução da resistência. Esta tendência pode ser explicada por a influência da distribuição granulométrica dos agregados ser diferente consoante o grau de substituição.

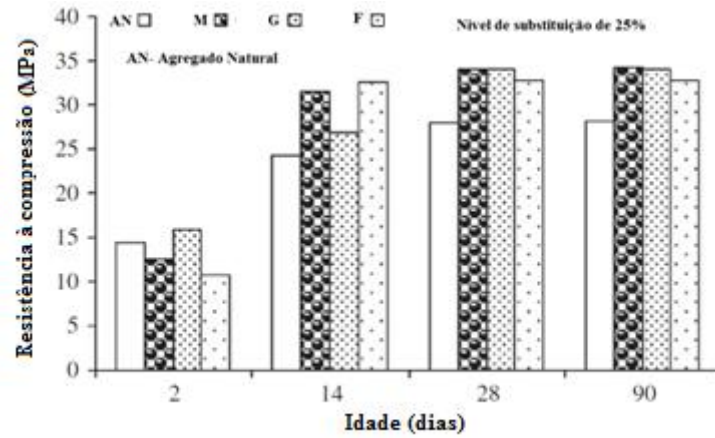


Figura 2.23 - Resistência à compressão, nível 25% (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

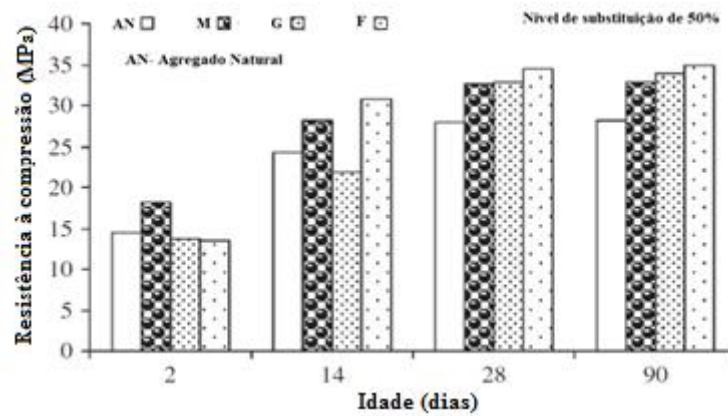


Figura 2.24 - Resistência à compressão, nível 50% (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

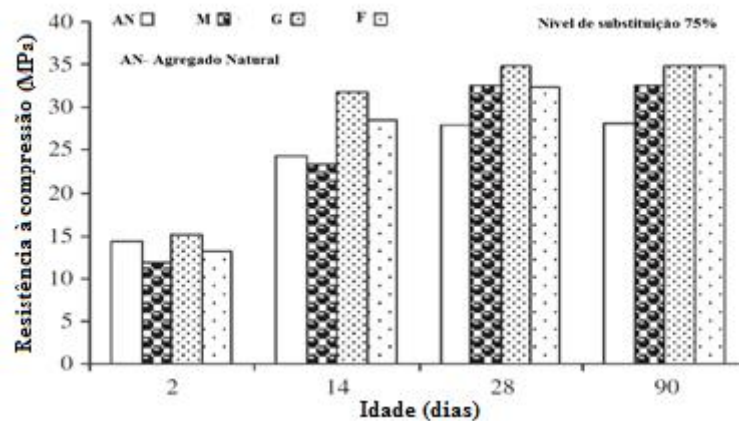


Figura 2.25 - Resistência à compressão, nível 75% (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

O Quadro 2.3 traduz um resumo do ganho em resistência do betão aos 28 dias de idade de cura para os três tipos de substituição (F,G e M) nas várias taxas dos ensaios de Hebhouh *et al.* (2011). Para os autores, fica claro que os três tipos de substituição conduzem todos a um

significativo ganho na resistência. Contudo, como referido, uma substituição no nível de 100% para a formulação F pode provocar uma considerável diminuição da resistência.

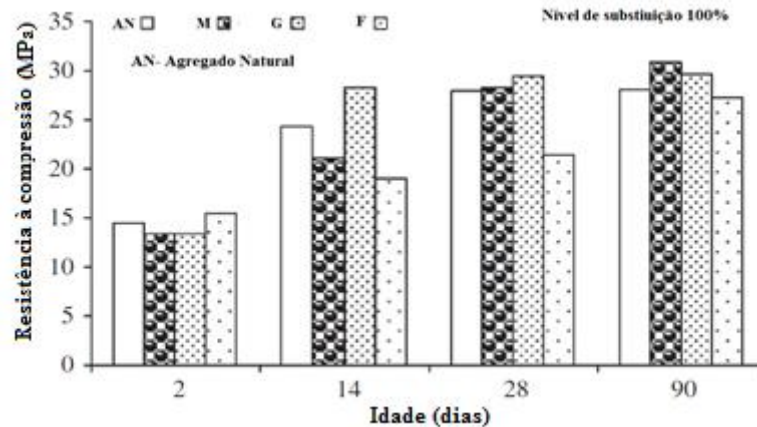


Figura 2.26 - Resistência à compressão, nível 100% (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011))

Quadro 2.3 - Percentagem do ganho de resistência à compressão aos 28 dias (adaptado de Hebhouh *et al.* (2011)).

Tipo de substituição (Formulações)	Taxa de substituição			
	25%	50%	75%	100%
F	17,2 %	<u>23,65</u> %	16,1 %	-23,29 %
G	21,86 %	17,56 %	<u>25,08</u> %	5,7 %
M	<u>22,2</u> %	16,84 %	16,84 %	1,07 %

Nas conclusões sobre a sua campanha experimental, com objectivo de analisar a viabilidade da utilização de substituir agregados naturais por agregados resultantes de resíduos da indústria do mármore, Hebhouh *et al.* (2011) salientam o carácter mais científico do que económico ou ambiental da mesma. Sublinham ainda que a orientação dos seus estudos sobre o comportamento dos agregados secundários demonstra que, fixando determinados parâmetros, consegue-se escolher qual a melhor percentagem de substituição para cada tipo de agregado e que a análise dos seus resultados revela que a apropriada incorporação de agregados resultantes dos resíduos da indústria do mármore pode levar a interessantes características em relação à resistência, como revelam os resultados de ganho significativo nesta propriedade para as taxas de substituição de 25, 50 e 75%. Concluíram ainda que a trabalhabilidade pode ser melhorada pela escolha da correcta quantidade de água e das correctas proporções e distribuição granulométrica dos agregados secundários. Por fim, referem que os seus estudos necessitam de ser suplementados por estudos de durabilidade tais como resistência à carbonatação e permeabilidade e que existem ainda outros destinos possíveis para os desperdícios de mármore para além do betão estrutural, como por exemplo os sectores da cerâmica, construção de vias de comunicação e aterros.

Ainda na mesma linha de estudos, Binici *et al.* (2008) apontam a possibilidade da utilização dos sub-produtos da indústria das rochas ornamentais (mármore e granito) na Turquia para incorporá-los na produção de betões com fins construtivos. Binici *et al.* (2008) utilizaram

dois tipos de agregados, mármore e granito proveniente dos resíduos de rochas ornamentais na Turquia. Como controlo utilizaram agregados grossos convencionais de origem calcária. No trabalho, os investigadores salientaram alguns aspectos técnicos ligados à utilização desses resíduos. Investigaram a viabilidade e adequabilidade do uso combinado de mármore, granito e escórias de alto forno como substitutos dos agregados convencionais. Estudaram a resistência à compressão, tracção por flexão, determinando as respectivas tensões de rotura. Determinam também o módulo de elasticidade ou de Young e a resistência à abrasão. Como referido, os autores analisaram a influência quer dos agregados grossos (granito e mármore) quer dos finos (areia de rio e escória de alto forno) na resistência do betão. Para cada agregado grosso (incluindo o de referência de calcário), obtiveram dois tipos de betões: um com finos de areia de rio e outro com escórias de alto forno resultando no total em seis tipos de betões. Empregaram super-plastificante em todas as amostras, o qual foi ajustado para produzir um abaixamento de aproximadamente 80-150 mm.

Estes investigadores não consideraram diferentes percentagens de substituição, ao contrário do estudo de Hebhoub *et al.* (2011) e do que é considerado na presente dissertação. Deste modo, o trabalho de Binici *et al.* (2008) não permite tirar conclusões sobre a influência da taxa de substituição dos agregados primários pelos agregados secundários.

A amostra onde obtiveram maior valor de resistência à compressão, aos 356 dias, foi a da combinação mármore e escórias de alto forno (M-E) com o valor médio de 62,1 MPa, e o menor valor obtido aos 356 dias foi para a combinação de controlo calcário e areia de rio, com o valor de 36,8 MPa. Da análise do Quadro 2.4, pode sugerir-se que, quer o tipo de agregado grosso quer o tipo de agregado fino, parecem influenciar a resistência à compressão, obtendo-se os valores mais favoráveis com mármore e escórias de alto forno.

Quadro 2.4 - Resistência à compressão (adaptado de Binici *et al.* (2008))

Combinação	Densidade do betão endurecido (1 dia) (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)				
		1 Dia	7 dias	28 dias	90 dias	365 dias
M-A	2355	29,2	38,2	44,3	49,2	57,6
M-E	2339	30,1	40,1	47,2	54,1	62,1
G-A	2343	28,4	37,5	43,5	49,3	56,8
G-E	2325	29,6	38,6	44	50,5	59,4
C-A	2391	8,4	16,4	25,1	32,3	36,8
C-E	2377	13,7	28,4	35,2	41,2	47,2

M - mármore, G - Granito, C - Calcário (controlo), A - Areia, E - Escórias de alto forno.

Em relação ao módulo de elasticidade, o maior valor obtido foi também para a amostra contendo mármore e escórias de alto forno: 39,6 GPa aos 90 dias. No global, registaram-se maiores valores de módulo de elasticidade para as amostras contendo mármore e granito do que para as amostras de controlo contendo agregados grossos convencionais de calcário. Em relação ao desgaste à abrasão, o menor valor foi obtido também para a combinação mármore e escórias de alto forno. Os autores sugerem que a resistência à abrasão é função da resistência à compressão o que está de acordo com os resultados de desgaste à abrasão dos betões de controlo serem 2,2 vezes superiores aos valores obtidos com os betões de mármore e granito. Concluíram

dos seus resultados que a substituição por mármore e escórias de alto forno leva a uma matriz densa conferindo boas características tal como referido. Sugeriram ainda que os resíduos de mármore e granito podem ser utilizados para melhorar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a resistência química das misturas dos betões convencionais, pelo que, produzindo a Turquia uma grande quantidade de resíduos da indústria do mármore e granito, fará sentido, do ponto de vista económico e ambiental, utilizar estes materiais como agregados na produção de betões. Estes resultados abrem perspectivas para a utilização dos resíduos na produção de betão inclusive para fins estruturais onde são exigidas determinadas classes de resistência e durabilidade.

2.5.2 Propriedades dos agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore

Neste subcapítulo, é apresentada uma caracterização mecânica dos resíduos provenientes do processo extractivo do mármore que são encaminhados para as escomboreiras. Saliente-se que estes são os locais de onde foram retirados os AGSM para substituição em percentagens de 0, 20, 50 e 100% em três betões de referência com AGPC (agregados grossos primários de calcário), AGPB (agregados grossos primários de calcário) e AGPG (agregados grossos primários de granito) para a campanha experimental da presente dissertação.

É consensual, entre os vários autores citados, que as propriedades dos agregados influenciam de forma significativa os betões a que dão origem. Refira-se, a título de exemplo, Casuccio *et al.* (2003) que afirmam que as características do agregado influenciam o comportamento do betão.

Esta relação entre a composição do betão e as propriedades mecânicas do mesmo têm sido, desde há muito tempo, objecto de grande interesse na área da investigação científica (Wu, 2005). Este autor salienta que a resistência do betão é determinada, essencialmente, pelas propriedades dos finos, dos grossos e pela interface. Neste subcapítulo, faz-se um levantamento sobre a informação disponível relacionada com agregados de mármore, pois é esse o material central no estudo da presente dissertação. Nos parágrafos seguintes, é feito um resumo sobre os estudos envolvendo propriedades gerais de vários agregados, principalmente grossos, por ser essa a dimensão no estudo central da dissertação. São apontados alguns exemplos de agregados utilizados por vários investigadores e conclusões sobre as propriedades estudadas.

Nos Quadros 2.5 a 2.8, é apresentado um resumo da informação fornecida por um estudo efectuado pelo LNEC em 1991 e encomendado pelo CEVALOR (Rodrigues *et al.*, 1990). Esta instituição, cujos objectivos incluem encontrar destinos economicamente viáveis para o tratamento / valorização dos resíduos de sector extractivo e implementar soluções técnicas para tal, acompanha as pedreiras de rochas ornamentais desde há muitos anos. Por consulta dessa informação, podem ser observadas algumas das mais importantes propriedades físicas e mecânicas de amostras de mármore recolhidas. Essas propriedades relacionam-se com a resistência mecânica, resistência ao desgaste, massa volúmica, porosidade e absorção, velocidades das ondas sísmicas longitudinais e transversais, resistência à compressão simples e ensaio na máquina de Los Angeles para avaliação do desgaste.

Quadro 2.5 - Características físicas e mecânicas; Estremoz-Borba e Vila Viçosa, 36 amostras (adaptado de Rodrigues *et al.* (1990))

	Resistência à compressão	Resistência à compressão após teste de geleidade	Resistência à tracção por flexão	Densidade aparente	Absorção de água à pressão atmosférica normal	Porosidade aberta	Resistência ao desgaste	Resistência ao choque
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ³)	(% do peso)	(% do vol)	(mm)	(cm)
Valor médio e desvio padrão	858 ± 115	880 ± 83	225 ± 43	2713 ± 4	0,07 ± 0,2	0,20 ± 0,05	2,6 ± 0,6	55 ± 7
Valor máximo	1107	1057	301	2726	0,11	0,32	3,8	70-75
Valor mínimo	602	685	148	2703	0,03	0,05	1,4	45

Quadro 2.6 - Massas volúmicas, porosidade e absorção (adaptado de Rodrigues *et al.* (1990))

	Massa volúmica real	Massa volúmica aparente	Massa volúmica saturada	Porosidade aparente	Absorção
	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	(%)
Valor médio	27,21	27,10	27,14	0,42	0,16
Valor máximo	27,25	27,27	27,27	1,18	0,44
Valor mínimo	27,14	26,82	26,93	26,93	0,08

Quadro 2.7 - Velocidade das ondas sísmicas longitudinais e transversais (adaptado de Rodrigues *et al.* (1990))

	Estado seco		Estado saturado	
	Velocidades longitudinais	Velocidades transversais	Velocidades longitudinais	Velocidades transversais
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
Valor médio	4815	2885	6250	3120
Valor máximo	6670	3840	7430	3730
Valor mínimo	3320	1660	4180	2560

Quadro 2.8 - Ensaio na máquina de Los Angeles (adaptado de Rodrigues *et al.* (1990))

Tipo de rocha		Desgaste (%)
Mármore	Cerca de S. António (Estremoz)	42-45
	Olival Grande (Vila Viçosa)	34-41
Dolomite		29
Dolerito		17

Relativamente às propriedades referidas no Quadro 2.5, pode ser destacado o valor médio de resistência à compressão que se situa em 858 kg/cm^2 (cerca de 84 MPa). Isto cumpre o limite inferior de 50 MPa referido por Coutinho (1988) para a tensão de rotura da rocha que constitui o agregado utilizado no fabrico de betões usuais, de acordo com as normas NP ENV 206,1993 e E 373,1993. Neste quadro, podem ainda ser destacados o valor de densidade a rondar 2,7 e o valor relativamente baixo de absorção de água. No Quadro 2.6, podem ser observados os valores de massa volúmica real, aparente e saturada. Esta última não é muito superior à real (cerca de 27 kN/m^2) o que está de acordo com os baixos valores de absorção de água indicados no mesmo Quadro. No Quadro 2.7, podem ser comparadas as velocidades das ondas longitudinais e transversais nos estados seco e saturado. A diferença está relacionada com o preenchimento dos poros por parte da água que permite criar um meio de maior continuidade para a propagação das ondas. Sem água, as ondas encontram mais interrupções nos poros verificando-se uma menor velocidade. Deste modo, a diferença de velocidade entre os dois estados constitui-se como uma medida indirecta do grau de porosidade.

Em relação aos valores de desgaste por Los Angeles indicados no Quadro 2.8, pode observar-se que são inferiores ao valor limite de 50%, referenciado por muitos autores, e estipulado na norma LNEC E-373 para um agregado ser aceite para incorporação em betões estruturais.

Os valores indicados nos quadros correspondem a informação obtida com amostras de materiais seleccionados para serem utilizados como rochas ornamentais. Admite-se que os desperdícios de mármore que constituem as escombrelas, material semelhante ao que dará origem aos AGM utilizados na campanha experimental desta dissertação, apresentem resultados menos favoráveis do ponto de vista físico e mecânico.

2.6 Conclusões

Este estudo bibliográfico permitiu construir uma ideia geral da investigação que tem vindo a ser desenvolvida neste âmbito e estabelecer bases comparativas com a presente dissertação.

Os efeitos dos agregados grossos, primários ou secundários, sobre o comportamento do betão, a viabilidade de incorporar agregados secundários e em que taxa de substituição constituem uma matéria complexa como foi amplamente debatido neste capítulo.

A maior parte dos investigadores referidos sustenta a ideia de os agregados assumirem especial importância à medida que a resistência alvo dos betões aumenta, ou seja, quando aumenta a qualidade dos outros componentes do betão.

Em relação à viabilidade da incorporação de agregados secundários provenientes de pedreiras de mármore, os poucos estudos existentes indicam uma melhoria nas características mecânicas do betão, nomeadamente resistência à compressão e módulo de elasticidade, para taxas específicas de substituição, mas tais estudos necessitam de ser verificados ou sustentados por estudos adicionais que englobem outras vias de estudo e outros tipos de mármore, já que pode existir alguma variabilidade entre as características, quer mineralógicas, químicas, físicas

ou mecânicas dos mármore, de Portugal e Turquia por exemplo, que se repercute nas propriedades do betão.

3 Campanha experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo, descrevem-se os procedimentos executados ao longo da campanha experimental. Durante a mesma, foram criadas as condições para se avaliar o comportamento mecânico dos betões e a influência da substituição, em diferentes níveis, de agregados primários por agregados secundários de mármore provenientes, como subproduto, da indústria das rochas ornamentais.

3.2 Planeamento da campanha experimental

A campanha experimental foi dividida nas 3 fases que se apresentam de seguida. Na primeira, foram caracterizados os agregados utilizados na produção dos betões. Na segunda fase, foram estudadas as composições e relação água / cimento de modo a se uniformizar o abaixamento através do cone de Abrams. Deste modo, pretende-se que os betões apresentem a mesma trabalhabilidade para que se possam fazer comparações. Na terceira fase, foram executados os ensaios mecânicos no estado endurecido num total de dez composições.

3.2.1 Primeira fase

Esta fase passou pela análise dos agregados grossos de granito, calcário, basalto e mármore e ainda dos finos (areias grossa e fina) para integração nos betões necessários para as fases da campanha experimental. Um resumo dos ensaios a realizar e respectivas normas pode ser consultado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Ensaios e respectivas normas

Ensaios	Normas
Análise granulométrica	NP EN 933-1 e NP EN 933-2
Massas volúmicas e absorção de água	NP EN 1097-6
Baridade	NP EN 1097-3
Desgaste de “Los Angeles”	LNEC E 237
Teor de água total e superficial	NP 956
Índice volumétrico	NP EN 933-4

De modo a assegurar uma adequada quantidade de material (agregados) a ser ensaiado, foi aplicado um coeficiente de segurança de 1,8 no cálculo das quantidades a extrair das pedreiras. Com isto pretendeu-se contemplar as perdas nos transportes, a necessidade de repetição de ensaios e outras situações.

Optou-se, nesta fase, por utilizar os agregados na forma original, sem lavagem, apesar de apresentarem grandes quantidades de pó. A justificação para esta opção relaciona-se com o objectivo da dissertação que é estudar a adequabilidade da utilização de agregados resultantes de

resíduos de modo a servir como um destino viável. Deste modo, pretende-se avaliar o comportamento dos agregados, vindos directamente das escombreyras no seu estado natural, sem acréscimo de qualquer tratamento adicional como lavagem, para averiguar as propriedades de betões que os venham a incorporar em escala industrial.

3.2.2 Segunda fase

A segunda fase teve como objectivo controlar o correcto funcionamento da fase seguinte, ou seja, pretendeu-se produzir três betões para que, aquando da realização da terceira fase, existisse um ponto de comparação que facilitasse a detecção de algum problema que pudesse ocorrer. É nesta fase que se estabelece como alvo definir qual a relação água / cimento efectiva que se vai exigir a todos os betões analisados, de forma a se uniformizar, se possível, o abaixamento destes através do cone de Abrams. No estado fresco, foi ainda realizado o ensaio respectivo à massa volúmica. Os ensaios e as respectivas normas estão indicados no Quadro 3.2.

Os betões foram produzidos com agregados primários (AP) e agregados secundários (AS) provenientes de resíduos da indústria do mármore e foram ainda sujeitos, no estado endurecido, a ensaios de resistência à compressão aos 28 dias. A respectiva norma está, igualmente, indicada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Ensaio e normas utilizados, na segunda fase, nos betões no estado fresco e endurecido

Ensaio	Normas
Abaixamento (cone de Abrams)	NP EN 12350-2
Determinação da massa volúmica	NP EN 12350-6
Resistência à compressão aos 28 dias	NP EN 12390-3

3.2.3 Terceira fase

Na fase de experimentação propriamente dita, foram realizados todos os ensaios necessários para atingir os objectivos propostos de acordo com o plano esquematizado no Quadro 3.3. Pretendeu-se, deste modo, caracterizar os diferentes espécimes de betão tanto no estado fresco como no endurecido.

Quadro 3.3 - Ensaio no estado fresco e endurecido

Ensaio no estado fresco	Normas
Abaixamento (cone de Abrams)	NP EN 12350-2
Massa volúmica	NP EN 12350-6
Ensaio no estado endurecido	Normas
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6
Módulo de elasticidade	LNEC E397
Resistência à abrasão	DIN 52108

Para esta fase, foi desenvolvido um planeamento dos dias de betonagem de forma a obter-se um calendário viável com a logística disponível no laboratório, de modo a ter

disponíveis os equipamentos, nomeadamente a cofragem (Anexo 3.3), e os meios humanos disponíveis para o normal desenvolvimento da campanha experimental.

Foram criadas três famílias de betões partindo de três betões de referência (BR): um com 100% de grossos de granito, outro com 100% de grossos de basalto e outro com 100% de grossos de calcário indo-se progressivamente substituindo a taxa de agregados grossos primários (AGP) por 20, 50 e 100% de agregados grossos secundários de mármore (AGSM) até convergirem no betão só com inclusão de agregados grossos secundários de mármore (B100M). Para os vários betões, foi tido o cuidado de calibrar o processo de execução de modo a que os vários betões apresentassem semelhantes curvas granulométricas, abaixamento no cone de Abrams e consequente trabalhabilidade bem como relação água / cimento efectiva.

3.3 Formulação dos betões

3.3.1 Introdução

O betão resulta de uma mistura ponderada composta por cimento e uma cuidada selecção de agregados (finos e grossos) que, após diversas reacções químicas, fazem presa e dão origem a um material compósito durável. Pode ainda incorporar adjuvantes e adições. A adição de água desempenha um papel vital neste processo. A mistura ganha coesão à medida que se desenvolvem reacções complexas, o ligante é hidratado e as suas propriedades aglutinantes são activadas.

A escolha do tipo de componentes e a sua dosagem relativa nunca poderá constituir um processo aleatório. Terá de cumprir as exigências dos dois principais vértices no que diz respeito à qualidade de um betão, a trabalhabilidade e a compacidade. É necessário chegar a um compromisso entre estes 2 vértices uma vez que se pretende maximizá-los. Porém, muitos factores que potenciam um decrescem o outro.

Na presente dissertação, procedeu-se à formulação dos betões recorrendo-se às curvas de referencia de Faury. Deste modo, com base na norma NP EN 206-1 (2005), definiram-se os seguintes dados para o cálculo dos betões de referência:

- classe de resistência - C 30/37;
- classe de consistência - S3 (100 a 150 mm);
- classe de exposição: XC3 (moderadamente húmido);
- relação água / cimento = 0,54;
- ligante - CEM II A-L 42.5 R da cimenteira de Outão, Setúbal, SECIL;
- tipo de agregados primários - calcários, granitos e basaltos;
- tipo de agregados secundários - mármore;
- máxima dimensão do agregado - 22,4 mm;
- água de amassadura - potável, da rede de abastecimento pública;
- local de fabrico - laboratório;

- adjuvantes e adições - nenhuns.

3.3.2 Máxima dimensão do agregado

A menor abertura do peneiro através do qual passa, pelo menos, 90% da massa dos agregados é designada por máxima dimensão do agregado ($D_{m\acute{a}x}$).

O aumento desta grandeza origina complicações no que diz respeito à vibração do betão no seu estado fresco. Com isto, surge um aumento no índice de vazios, o que tem como consequência um aumento do efeito de parede. Este efeito é definido como o fenómeno de movimentação da argamassa para zonas adjacentes às cofragens e armaduras (no caso de existirem), sendo que se trata de um fenómeno prejudicial ao betão, já que resulta na perda da sua homogeneidade. Segundo Faury, este efeito pode ser contrariado conseguindo-se que a máxima dimensão do agregado não exceda em mais de 1/3 o raio médio do molde (R), ou seja, que a seguinte condição seja verificada:

$$\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} > 0.75 \Leftrightarrow D_{m\acute{a}x} < \frac{4}{3} R \quad (3.1)$$

O raio médio do molde pode ser definido como:

$$R = \frac{\text{volume a encher de betão}}{\text{área total da parede e das armaduras em contacto com o betão}} \quad (3.2)$$

Considerando todos os tipos de moldes utilizados na presente campanha laboratorial, os cubos de 100 mm de aresta são os que condicionam este parâmetro. Assim sendo,

$$R = \frac{L^3}{6 \times L^2} = \frac{L}{6} = \frac{100}{6} = 16,7 \text{ mm}$$

$$D_{m\acute{a}x} < \frac{4}{3} R = \frac{4}{3} \times 16,7 \approx 22,3 \text{ mm}$$

O valor de $D_{m\acute{a}x}$ considerado foi 22,4 mm por estar muito perto de 22,3, apesar de o ultrapassar, e por apresentar a vantagem de corresponder a um valor de abertura de peneiro normalizado.

3.3.3 Valor médio de tensão de rotura à compressão (f_{cm})

O valor médio de resistência à compressão foi determinado recorrendo à seguinte expressão:

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda S_n \quad (3.3)$$

onde, f_{cm} , f_{ck} , λ e S_n representam, respectivamente, o valor médio da resistência à compressão (MPa), o valor característico superior da resistência à compressão (MPa), o parâmetro estatístico que depende do nível de probabilidade associado ao número de amostras, e

que tende para 1,64, e desvio padrão (MPa), o qual depende da variabilidade prevista para o betão (função do nível de resistência e do controlo de produção).

No Quadro 3.4, podem ser consultados, de acordo com Nepomuceno, vários valores de desvio padrão que variam segundo o grau de controlo de produção.

Quadro 3.4 - Desvios padrão em função do tipo de produção (Nepomuceno, 1999)

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

Uma vez que a produção dos betões é realizada em laboratório, é aceitável classificar a sua execução como boa. O valor de S_n correspondente é 4,4. Deste modo, admitindo para λ o valor para o qual o parâmetro tende (1,64), e dado que o valor característico da resistência alvo para a compressão é 37 MPa, pode ser encontrada uma estimativa de f_{cm} :

$$f_{cm} = 37 + 1.64 \times 4,4 = 44 \text{ MPa}$$

3.3.4 Volume de vazios

Segundo relações obtidas empiricamente, baseadas na ASTM, este parâmetro, volume de vazios (V_v), pode ser estimado em função de $D_{m\acute{a}x}$. No Quadro 3.5, podem ser consultadas essas relações. Interpolando para o valor de $D_{m\acute{a}x}$ considerado, 22,4 mm, é obtido o volume de 17,4 l/m³:

$$V_v = 15 + (25.4 - 22.4) \times \frac{20 - 15}{25.4 - 22.4} \approx 17,4 \text{ [l/m}^3\text{]}$$

Quadro 3.5 - Volume de vazios em função do $D_{m\acute{a}x}$, de acordo com a ASTM

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	Volume de vazios (l/m ³)
9.52	30
12.7	25
19.1	20
25.4	15
38.1	10
50.8	5
76.1	3
152.4	2
Volume de vazios para $D_{m\acute{a}x} = 22.4$ mm	17.4

3.3.5 Índice de vazios

O índice de vazios representa o volume de materiais não sólidos presentes no betão. Corresponde, portanto, à soma do volume de água e de vazios, por unidade de volume do material. A seguinte expressão permite criar uma estimativa do parâmetro:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}}} + \frac{K'}{D_{m\acute{a}x} \times 0,75} \quad [l/m^3] \quad (3.4)$$

K e K' (Quadro 3.6) representam parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade que se deseja e dos meios de colocação utilizados. D_{máx} representa a máxima dimensão do agregado (mm) e R o raio médio do molde que contém o betão (mm).

Quadro 3.6 - Valores de K e K' para a determinação do índice de vazios

Trabalhabilidade	Meios de Colocação	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 0,26	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Sem nada	≥ 0,36	≥ 0,38	≥ 0,38	0,004

Considerando os agregados grossos britados e agregados finos rolados utilizados no presente trabalho e a classe de abaixamento pretendida, S3 (mole), foram assumidos os valores de 0,36 e 0,003 para as constantes K e K', respectivamente. Como usual, na maior parte dos estudos, o valor considerado para R / D foi 1. Deste modo, a estimativa para índice de vazios é obtida por:

$$I_v = \frac{0,36}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{1 - 0,75} = 0,205 \quad [l/m^3]$$

3.3.6 Dosagem de água na amassadura

Para cálculo da dosagem de água da amassadura (A), foi efectuada a subtracção da quantidade de ar no interior do betão (volume de vazios, V_v) ao volume total de materiais não sólidos do do betão (índice de vazios, I_v):

$$A = I_v - V_v = 205 - 17,4 = 187,6 \quad [l/m^3]$$

Onde A, I_v e V_v representam, respectivamente, a dosagem de água de amassadura (l/m³), índice de vazios de Faury (l/m³) e volume de vazios presentes no betão (l/m³).

3.3.7 Dosagem de cimento

Uma primeira estimativa para a dosagem de cimento pode ser conseguida pela equação proposta por Feret:

$$f_{cm} = K \left(\frac{C}{C+A+V_V} \right)^2 \quad (3.5)$$

em que K, C, A e V_V representam, respectivamente, o parâmetro empírico de Feret (adimensional), o volume de cimento, por metro cúbico de betão (l/m^3), volume de água, por metro cúbico de betão (l/m^3) e volume de vazios, por metro cúbico de betão (l/m^3).

Para o valor do parâmetro empírico de Feret (K), foi assumida a média entre os valores mínimo e máximo correspondentes ao cimento 42,5 R, sem nenhuma adição:

$$K = \frac{315 + 350}{2} = 332,5 \text{ [l/m}^3\text{]}$$
$$f_{cm} = K \left(\frac{C}{C + A + V_V} \right)^2 \Leftrightarrow 44 = 332,5 \left(\frac{C}{C + 187,6 + 17,4} \right)^2 \Leftrightarrow C = 117,21 \text{ [l/m}^3\text{]}$$

considerando a massa volúmica do cimento 42,5R, chega-se à dosagem de cimento kg/m^3 .

$$C = 117,2 \times 3,05 = 357,5 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Porém, o valor considerado foi 350 kg/m^3 por ser um valor comumente utilizado, correspondente a um betão economicamente atractivo, por não incorporar mais cimento do que os betões com os quais pretende ser comparado, e por estar muito perto do valor calculado.

3.3.8 Relação água / cimento (A/C)

Se, por um lado, a água, presente na mistura que dá origem ao betão, é necessária para as reacções de hidratação, por outro, a água em excesso é prejudicial dado que tem como consequência a criação de vazios. Torna-se, assim, importante quantificar e analisar a relação água / cimento, uma vez que o aparecimento de vazios tem nítidas implicações a nível das qualidades mecânicas e durabilidade do betão. Outra medida importante da qualidade do betão é a trabalhabilidade e, sobre esta, também a relação água / cimento tem óbvias implicações, pelo que a análise referida assume ainda maior importância.

Atendendo às dosagens de água e cimento obtidas nos pontos anteriores, chega-se ao valor de:

$$A/C = \frac{187,6}{350} \approx 0,54$$

A dosagem de água foi corrigida para o valor de 189 l/m^3 , a que corresponde o valor exacto de 0,54 para a relação água / cimento.

3.3.9 Curva de referência de Faury

De modo a obter a máxima compacidade para os betões, propriedade desejável já que tem nítidas implicações em termos de qualidade mecânica e durabilidade, recorreu-se à curva de referência de Faury. O recurso a esta curva visa a determinação da quantidade ponderada de cada um dos agregados na composição final do betão, de modo a cumprir o referido objectivo. Com este método, foram determinadas as percentagens de fracções de material para incorporar os betões.

3.4 Ensaios aos agregados

Uma vez que as propriedades mecânicas dos betões são fortemente influenciadas pelas características físicas dos agregados, é imprescindível dispor de ensaios que avaliem tais características. Deste modo, torna-se importante descrever os métodos e normas seguidas para os ensaios de caracterização dos agregados.

3.4.1 Análise granulométrica

3.4.1.1 Objectivo do ensaio

Neste ensaio, pretende-se quantificar estatisticamente as diferentes dimensões e correspondentes fracções das partículas constituintes de cada um dos agregados a serem incorporados nos betões. A areia fina, areia grossa, agregados grossos primários e secundários constituem essas partículas.

Em relação aos agregados grossos, dado que foram peneirados e separados nas diferentes fracções granulométricas, este ensaio não assume especial importância a não ser pela caracterização dos agregados.

3.4.1.2 Normas de ensaio

Neste ensaio, foram seguidas as indicações e princípios descritos na norma europeia / portuguesa NP EN 933-1 (2000) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”. A NP EN 933-2 (1999) encontra-se ligada a esta norma e nela são encontradas as especificações relativas às dimensões nominais das aberturas, formato da tela de arame e chapas perfuradas dos peneiros de ensaio a utilizar na análise granulométrica.

3.4.1.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de (110 ± 5) °C;
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2;
- máquina de agitação para realização da peneiração;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Pesagem de agregado na balança

3.4.1.4 Amostras

A norma NP EN 933-1 exige massas mínimas, para as amostras, de acordo com a máxima dimensão do agregado ($D_{m\acute{a}x}$). Esta corresponde à menor abertura do peneiro pelo qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado.

Após secagem, o provete deverá possuir uma massa superior à mínima, mas sem valor exacto pré-determinado. Os valores limite, correspondentes às diferentes dimensões máximas dos agregados, encontram-se no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Massa mínima dos provetes de ensaio (análise granulométrica)

Ensaio	Normas
Dimensão máxima do agregado [mm]	Massa mínima do provete [kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

3.4.1.5 Procedimento

O primeiro passo consistiu na secagem da amostra em estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C até se obter massa constante. O aspecto da estufa pode ser observado na Figura 3.2. Após arrefecimento, a amostra foi pesada a massa ficou registada como M_1 . Posteriormente, a amostra foi lavada sobre o peneiro de 0,063 mm, de modo a eliminar a maior parte das partículas muito finas. A lavagem ficou concluída quando a água, escoada pelo peneiro, se tornou límpida. Posteriormente, o material lavado, foi colocado na estufa para nova secagem até alcançar massa constante. Após arrefecimento, a amostra foi pesada e a sua massa registada como M_2 .

A amostra foi colocada na coluna dos peneiros (Figura 3.3), previamente dispostos de acordo com a norma NP EN 933-2, e procedeu-se à peneiração do provete, com o auxílio da máquina de agitação mecânica, até que a massa, retida em qualquer peneiro, não variasse mais de 1% durante 1 minuto de agitação. O material retido no peneiro de maior dimensão nominal foi

pesado e a massa registada como R_1 . A mesma operação foi repetida para os restantes peneiros e a massa das diferentes fracções foi registada como R_2, R_3, \dots, R_n . Por último, foi pesado o refugo, material retido no fundo da coluna de peneiros, e a sua massa foi registada como P .



Figura 3.2 - Aspecto da estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C



Figura 3.3 - Coluna de peneiros

3.4.1.6 Resultados

A percentagem retida em cada peneiro é dada pela seguinte equação:

$$R_{i\%} = 100 \times \frac{R_i}{M_1} \quad (3.6)$$

onde $R_i\%$, R_i e M_1 representam a percentagem de material retido no peneiro i , a massa retida no peneiro i e a massa total da amostra seca (g), respectivamente.

Com as percentagens retidas em todos os peneiros, foi possível traçar a curva granulométrica da amostra. A percentagem de finos (f) que atravessou o peneiro 0,063 mm resultou da aplicação da seguinte expressão:

$$f = \frac{R(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (3.7)$$

onde f , M_1 , M_2 e P representam a quantidade de finos que passa pelo peneiro de 0,063 mm (%), a massa total da amostra seca (g), a massa da amostra após lavagem e secagem (g) e a massa do material peneirado retido no fundo da coluna de peneiros (g), respectivamente.

O ensaio foi considerado válido sempre que a diferença entre a soma das massas R_i e P e a massa M_2 fosse inferior a 1%.

Estes resultados permitiram ainda calcular o módulo de finura (MF) da amostra, somando as percentagens totais retidas nos peneiros da série normal e dividindo esse valor por 100. Entende-se por série normal o conjunto de peneiros com abertura de malha correspondente à progressão geométrica de razão 2, começando no peneiro 0,125 mm e estendendo até ao correspondente à máxima dimensão do agregado.

3.4.2 Massa volúmica e absorção de água

3.4.2.1 Objectivo do ensaio

Por razões de precisão e simplicidade, a medição dos agregados é feita por pesagem, sendo, portanto, necessário possuir o conhecimento da massa volúmica dos mesmos. Além disto, dado que a massa volúmica dos agregados influencia nitidamente a mesma propriedade do betão, interessa caracterizá-los correctamente para a poder relacionar com a do betão, servindo assim de controlo.

O cálculo da absorção de água pelos agregados é igualmente relevante, visto que se reflecte directamente na trabalhabilidade do betão. A maior ou menor absorção de água por parte dos agregados dá origem a uma maior ou menor correcção das quantidades de água a adicionar na mistura, na altura da amassadura, de forma a se obterem betões com a mesma trabalhabilidade, condição necessária para se poderem efectuar comparações válidas sobre as qualidades dos betões.

3.4.2.2 Norma

Os ensaios para a determinação da capacidade de absorção e das massas volúmicas dos agregados foram realizados em conformidade com a norma NP EN 1097-6 (2003): “*Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e absorção de água*”. Refira-se que foi utilizado o método do picnómetro. Porém, face à escassez de picnómetros de vidro e ao elevado número de amostras, foram usados contentores de plástico. Usaram-se contentores de 5 l para as britas 1 e 2 e de 1,5 l para os restantes agregados.

3.4.2.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados na realização do ensaio foram os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de 110 °C;
- estufa ventilada à temperatura de 65 °C;
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2, com as seguintes aberturas: 0,063 / 4,0 / 31,5 (mm);
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- termómetro graduado;
- molde troncocónico e pilão;
- picnómetro de volume adequado à dimensão da amostra (de acordo com a norma NP EN 1097-6).

3.4.2.4 Amostras de ensaio

Partículas de agregado de dimensão entre 4 mm e 31.5 mm

As amostras foram lavadas sobre os peneiros 31,5 e 4 mm de modo a remover as partículas mais finas, rejeitou-se qualquer material retido no peneiro 31,5 mm e deixaram-se escorrer as restantes partículas.

A massa dos provetes de agregado deve respeitar os valores mínimos apresentados no Quadro 3.8. Caso o valor não fosse encontrado no referido quadro, a massa mínima poderia ser determinada por interpolação a partir dos valores ali especificados. A massa do provete de ensaio foi registada como M_0 .

Quadro 3.8 - Massa mínima de provete em função de $D_{máx}$

Dimensão máxima do agregado [mm]	Massa mínima do provete [kg]
31,5	5
16	2
8	1

Partículas de agregado com dimensão entre 0.063 mm e 4 mm

Garantiu-se que a massa do provete do agregado fosse igual ou superior a 1 kg. As amostras foram lavadas sobre os peneiros 4 e 0,063 mm de modo a remover as partículas mais finas. Foi rejeitada qualquer material retido no peneiro 4 mm e deixaram-se escorrer as restantes partículas. A massa do provete de ensaio ficou registada como M_0 .

3.4.2.5 Procedimentos de ensaio

Partículas de agregado de dimensão entre 4 mm e 31.5 mm

Posteriormente ao indicado em 3.4.2.4, o picnómetro foi colocado, com água, a uma temperatura de 22 ± 3 °C durante 24 h. A temperatura da água foi medida (Figura 3.4) e transbordou-se o picnómetro, sendo fechado e tendo-se removido a água do exterior.



Figura 3.4 - Medição da temperatura da água no picnómetro

A massa do conjunto, picnómetro com água, foi pesada e registada como M_3 . O provete foi introduzido no picnómetro com água a 22 ± 3 °C e eliminou-se o ar ocluído. Durante as seguintes 24 h, o picnómetro foi mantido, com a amostra, à temperatura de 22 ± 3 °C. Após este período, o ar ocluído foi removido através de agitação do picnómetro. Fez-se transbordar o

picnómetro por adição de água, à mesma temperatura, e o picnómetro foi fechado sem deixar ar no seu interior. A superfície do picnómetro foi seca e a massa do conjunto, picnómetro, provete de ensaio e água, registada como M_2 . O agregado foi removido do picnómetro e foi deixado escorrer. Foi medida a temperatura da água tendo-se o cuidado de não permitir que a diferença, entre os valores da temperatura da água dentro do picnómetro durante as pesagens de M_2 e M_3 , ultrapassasse $2\text{ }^\circ\text{C}$. A água foi decantada e o provete foi escorrido e transferido para cima de uma toalha, como pode ser observado na Figura 3.5, tendo-se procedido à secagem da sua superfície. O provete saturado com superfície seca foi pesado e o valor ficou registado como M_1 . Por fim, o agregado foi completamente seco, colocado em estufa a $110\text{ }^\circ\text{C}$ e, após ser atingida massa constante, registou-se o valor como M_4 .



Figura 3.5 - Colocação de provete, de agregado grosso de basalto, sobre toalha para posterior secagem

Partículas de agregado com dimensão entre 0.063 mm e 4 mm

Até à etapa que envolve a extracção da amostra do interior do picnómetro, o procedimento foi semelhante ao descrito para as partículas com dimensão entre 4 mm e 31.5 mm. A partir dessa altura, adoptou-se o procedimento que a seguir se descreve. A amostra saturada foi uniformemente espalhada sobre um tabuleiro e foi submetida a uma corrente de ar morno, tendo sido remexida várias vezes de modo a se conseguir que todas as partículas fossem igualmente secas. Com o auxílio do molde troncocónico e do pilão (Figura 3.6), o molde foi colocado com a abertura de maior diâmetro em baixo. O volume foi preenchido com amostra e foi compactado de modo suave com o pilão, tendo-se efectuado 25 pancadas.



Figura 3.6 - Molde troncocónico e pilão

No final desta etapa, o molde foi removido. A deformação da amostra foi analisada e, quando coincidiu com a forma com vértice visível e linhas superficiais, a qual pode ser consultada na Figura 3.7 c), e que corresponde à situação pretendida de agregado saturado com superfície seca, a amostra foi pesada e a sua massa registada como M_1 . Por último, a amostra foi

seca em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, até ser atingida massa constante, e a sua massa foi registada como M_4 .

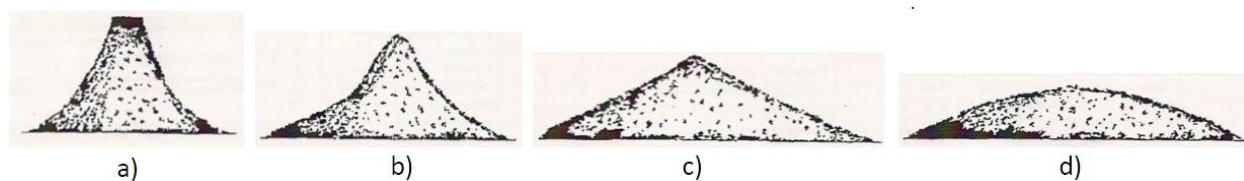


Figura 3.7 - Indicações da norma NP EN 1097-6 para a avaliação do estado de saturação da amostra de agregados finos: a) agregado húmido - mantém a forma do molde; b) agregado ligeiramente húmido, deformação assinalável; c) agregado saturado com superfície seca; grande deformação, mas com vértice visível e linhas superficiais lineares - forma de cone perfeito; d) agregado quase seco, sem vértice distinto e com linhas superficiais aproximadamente curvilíneas

3.4.2.6 Resultados

O valor da massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a) foi obtido recorrendo à seguinte expressão:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.8)$$

A massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) foi calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.9)$$

A massa volúmica material das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}) foi obtida recorrendo à seguinte expressão:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.10)$$

O valor da absorção de água (em percentagem da massa seca) após imersão durante 24 h (WA_{24}) foi obtido recorrendo à seguinte expressão:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 [\%] \quad (3.11)$$

em que M_1 , M_2 , M_3 e M_4 representam, respectivamente, a massa do agregado saturado com superfície seca (g), a massa do picnómetro, contendo o agregado saturado imerso em água (g), a massa do picnómetro cheio de água (g) e a massa do provete de ensaio após secagem em estufa (g).

3.4.3 Massa volúmica aparente

3.4.3.1 Objectivo do ensaio

A massa volúmica aparente, também denominada de baridade, traduz a relação entre a massa e o volume aparente de um dado agregado, sendo um parâmetro de vital importância para

a análise dos componentes do betão. A massa volúmica aparente depende do grau de compactação dos agregados, da sua curva granulométrica e da forma dos agregados e é esperado que a qualidade do betão aumente com a massa volúmica aparente dos agregados.

3.4.3.2 Normas de ensaio

O ensaio segue a norma NP EN 1097-3 (2000) “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*”.

3.4.3.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados na realização do ensaio foram os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de 110 °C;
- estufa ventilada à temperatura de 65 °C;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- varão de compactação;
- régua;
- contentor cilíndrico estanque em aço inoxidável, de volume variável em função da máxima dimensão dos agregados a ensaiar.

3.4.3.4 Amostras

Na realização deste ensaio, procedeu-se à preparação de 3 amostras por cada agregado. As amostras foram secas em estufa ventilada a (110 ± 5) °C até atingirem massa constante. Por massa constante entende-se massa cuja variação, medida em pesagens sucessivas e intervaladas de pelo menos 1 hora, é inferior a 0,1%.

A redução da massa da amostra, após secagem, deve permitir obter um provete de ensaio com uma massa compreendida entre 120 e 150% da massa necessária para encher o recipiente de ensaio. O seu volume mínimo, em função da máxima dimensão do agregado, pode ser consultado no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Volume mínimo do recipiente de ensaio face à dimensão máxima do agregado

Dimensão máxima do agregado [mm]	Massa mínima do provete [kg]
63	20
32	10
16	5
8	3
≤ 4	1

3.4.3.5 Procedimento do ensaio

As amostras para a realização do ensaio foram preparadas de acordo com o descrito em 3.4.3.4. Posteriormente, o recipiente, vazio e limpo, foi pesado e a sua massa apontada como M_1 . O recipiente, sem qualquer compactação, foi cheio até transbordar. Com o auxílio do varão de aço, a superfície do material foi nivelada. A massa do conjunto, recipiente e amostra foi anotada como M_2 . O procedimento foi repetido para os restantes provetes de ensaio.

3.4.3.6 Resultados

A massa volúmica de cada agregado foi obtida pela média das 3 amostras:

$$\rho_{MVA} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{V_r} \quad (3.12)$$

em que, para cada amostra, o cálculo corresponde à seguinte expressão:

$$\rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad (3.13)$$

Onde ρ_{MVA} , ρ_i , M_1 , M_2 e V_r correspondem, respectivamente, à massa volúmica aparente do agregado (kg/dm^3), à massa volúmica da amostra i (kg/dm^3), à massa do recipiente de ensaio (kg), à massa do recipiente de ensaio com a amostra de ensaio (kg) e ao volume do recipiente de ensaio (dm^3).

3.4.4 Desgaste de Los Angeles

3.4.4.1 Objectivo do ensaio

O objectivo do ensaio consiste na determinação da perda de massa dos agregados por desgaste. Este objectivo pode ser relacionado com a resistência do agregado à abrasão, quando incorporado na matriz cimentícia, e podem, eventualmente, ser desenvolvidas correlações entre esta propriedade e as tensões de rotura do betão.

3.4.4.2 Normas de ensaio

Os ensaios para a determinação do desgaste de “Los Angeles” foram realizados de acordo com a especificação LNEC E-237 (1970): “Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”.

3.4.4.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$;

- peneiros da série ASTM;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão com limites de erro de ± 1 g;
- carga abrasiva constituída por esferas de aço (de 6 a 12 mm, dependendo da composição granulométrica da amostra de ensaio);
- máquina de *Los Angeles* (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Máquina de *Los Angeles*

3.4.4.4 Amostras

As amostras foram lavadas e secas em estufa ventilada, à temperatura de 110 °C, até atingirem massa constante. De seguida, a amostra foi separada segundo as fracções granulométricas, por peneiração com a série de peneiros ASTM, de forma a constituir o provete de ensaio que consistiu na reunião das diversas quantidades correspondentes às fracções indicadas pela especificação LNEC E-237.

3.4.4.5 Procedimento de ensaio

As amostras para ensaio foram preparadas de acordo com o ponto 3.3.5.4 e a massa da amostra registada como M_1 . A carga abrasiva, correspondente à amostra a ensaiar, foi constituída de acordo com a norma LNEC E-237 (1970). A amostra e a carga abrasiva foram colocadas na máquina de Los Angeles, de maneira a que a carga abrasiva ficasse uniformemente distribuída pelo comprimento do cilindro.

A abertura foi fechada e a máquina foi ligada, trabalhando a uma velocidade de 30 a 33 r.p.m. No final, foi removido o material do interior da máquina e a amostra foi peneirada no peneiro de malha 1,68 mm, protegido por um peneiro de malha superior. O material foi lavado, ainda sobre o peneiro 1,68 mm, e a amostra foi seca em estufa ventilada a 110 °C, até atingir massa constante. Depois de pesado o material, a sua massa foi anotada como M_2 .

3.4.4.6 Modo de obtenção e de apresentação dos resultados

O valor da perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* foi calculado recorrendo à expressão:

$$P_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 [\%] \quad (3.14)$$

onde P_d , M_1 e M_2 representam, respectivamente, a perda por desgaste na máquina de Los Angeles (%), a massa do provete de ensaio (g) e a massa do material retido no peneiro de 1,68 mm (g).

3.4.5 Índice de forma

3.4.5.1 Objectivo do ensaio

Este parâmetro reflete estatisticamente a geometria das partículas de um determinado agregado, para fracções granulométricas superiores a 4 mm.

Esta propriedade é importante uma vez que permite distinguir os agregados rolados, que favorecem a compactidade e trabalhabilidade do betão, dos agregados britados, característica que pode contribuir para o aumento da resistência mecânica do betão.

3.4.5.2 Normas de ensaio

O ensaio seguiu as especificações indicadas pela NP EN 933-4 (2002) “*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma*”.

3.4.5.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados ao longo do ensaio foram as seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- peneiros de ensaio, de acordo com o especificado na norma NP EN 933-2;
- máquina de peneiração;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- paquímetro (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Paquímetro utilizado na medição das dimensões das partículas

3.4.5.4 Amostras

A preparação das amostras consistiu em colocá-las em estufa ventilada a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante. Após esta secagem, o material com dimensões fora do intervalo compreendido entre 4 e 63 mm foi rejeitado. Para tal, foi utilizada a série de peneiros normalizada (NP EN 933-2) compreendida entre as malhas correspondentes às dimensões referidas

A massa mínima da amostra da amostra resultante é função de $D_{\text{máx}}$, como indicado na norma, e pode ser consultado no Quadro 3.10. No caso de o valor de $D_{\text{máx}}$ não se encontrar no referido quadro, deve ser efectuada uma interpolação aos valores de massa correspondentes.

Quadro 3.11 - Massa mínima do provete de ensaio do índice de forma em função da máxima dimensão do agregado

Dimensão máxima do agregado [mm]	Massa mínima do provete [kg]
63	45
32	6
16	1
8	0.1

3.4.5.5 Procedimento de ensaio

A massa total da amostra, obtida em 3.4.5.4, foi registada como M_0 e a massa de cada fracção granulométrica como M_1 . Foi também calculada a percentagem de cada uma das fracções referidas, V_{1i} , relativamente à massa total da amostra de ensaio (M_0). Foram desprezadas todas as fracções granulométricas que representaram menos de 10% de M_0 . Utilizando um paquímetro, foram medidas a maior (L) e a menor (E) dimensão de cada partícula. As que apresentaram uma relação dimensional $L/E \geq 3$, classificadas como não cúbicas, foram separadas das restantes. A massa daquelas foi apontada como M_{2i} .

3.4.5.6 Resultados

O índice de forma SI é calculado pela seguinte equação:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad (3.15)$$

$\sum M_{1i}$ e $\sum M_{2i}$ representam, respectivamente, o somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g) e o somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g).

3.5 Ensaios ao betão no estado fresco

As propriedades do betão no estado endurecido são influenciadas pelas do estado fresco. Além disso, as propriedades no estado fresco, aqui avaliadas, trabalhabilidade e massa volúmica, são desde logo importantes, a curto prazo, para a caracterização da qualidade do betão do ponto de vista do transporte e colocação em obra.

Os ensaios realizados para avaliar tais características, do betão no estado fresco, foram o ensaio de abaixamento do cone de Abrams e o ensaio de determinação da massa volúmica (densidade). O ensaio de abaixamento possui elevada importância, uma vez que permite verificar a conformidade da consistência previamente definida para as várias composições do betão ($S3 - 115 \pm 15$ mm).

3.5.1 Abaixamento do cone de Abrams

3.5.1.1 Objectivo

O objectivo do ensaio é avaliar a trabalhabilidade. Para que os vários tipos de betões, fabricados neste trabalho, apresentassem trabalhabilidades semelhantes, dentro dos limites referidos, efectuou-se, quando necessário, um ajuste da relação água / cimento. Tal exigência é muito importante uma vez que se pretendeu efectuar uma adequada e válida comparação entre os betões.

3.5.1.2 Norma do ensaio

Na realização deste ensaio, seguiu-se a norma NP EN 12350-2 (2002) “*Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento*”.

3.5.1.3 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados durante os ensaios indicam-se de seguida:

- molde de metal de forma tronco-cónica com diâmetro interno da base de (200 ± 2) mm, diâmetro interno do topo de (100 ± 2) mm e altura de (300 ± 2) mm; como pode ser observado na Figura 3.10, existem, no molde, duas pegas junto ao topo e elementos de fixação junto à base para o operador colocar os pés (Figura 3.11), de modo a que o sistema fique fixo à placa metálica e imóvel;
- varão de compactação com extremidades arredondadas, com um diâmetro de (16 ± 1) mm e um comprimento de (600 ± 5) mm;
- funil que permitisse ser acoplado no topo do molde tronco-cónico;
- régua metálica graduada de 300 mm;
- placa metálica;
- colher de pedreiro;
- pá;
- espátula;
- carrinho de mão;
- pano molhado;
- cronómetro.



Figura 3.10 - Molde onde com duas pegas e duas abas junto à base



Figura 3.11 - Utilização dos pés do operador para fixação do molde à placa metálica

3.5.1.4 Amostras

Para manter válida a representatividade das amostras para o ensaio, estas foram recolhidas, após a realização da amassadura (Figuras 3.12), de uma forma homogénea com a utilização de pás, como pode ser observado na Figuras 3.13. Foi também tido o cuidado de proteger as amostras de qualquer contaminação, ganho ou perda de água e variações extremas de temperatura.



Figura 3.12 - Colocação da amostra no carro de mão após realização da amassadura



Figura 3.13 - Recolha de amostras, de forma homogénea, com a ajuda de pás

3.5.1.5 Procedimentos de ensaio

Após a homogeneização do betão fresco, foi preparado o molde tronco-cónico, tendo-se o cuidado de o tornar húmido para não absorver água pertencente ao betão. De seguida, foi fixado à chapa metálica, numa zona em que a superfície ficasse horizontal. O molde foi enchido com betão em três camadas, cada uma delas com aproximadamente um terço da altura do molde e compactada em 25 pancadas com a ajuda do varão. Durante o processo de compactação de

uma determinada camada, houve o cuidado de compactar toda a sua secção transversal, evitando ultrapassar a sua espessura. Após a compactação da última camada, houve também o cuidado de compensar uma eventual falta de betão no topo do molde, tendo-se adicionado uma quantidade suplementar de betão nessa zona. A superfície foi alisada através de movimentos de rolamento, com a utilização do varão de compactação, e da colher de pedreiro como pode ser observado na Figura 3.14. O excesso de betão na chapa metálica foi removido e o molde foi cuidadosamente retirado (Figuras 3.15 e 3.16). Esta operação foi executada através de um movimento vertical e uniforme, sem transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional, num intervalo de tempo compreendido entre 5 e 10 segundos.



Figura 3.14 - Alisamento da superfície no topo do modo com o auxílio da colher de pedreiro



Figura 3.15 - Início da remoção do molde



Figura 3.16 - Remoção cuidadosa do molde

Após a remoção do molde, foi verificada a validade do abaixamento e o seu valor foi registado como h (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Medição do abaixamento (h)

3.5.1.6 Modo de obtenção e apresentação dos resultados

A medição do abaixamento (h) é feita pela diferença entre a altura do molde, 300 mm, e o ponto mais alto do provete após desmoldagem, como pode ser observado na Figura 3.18.

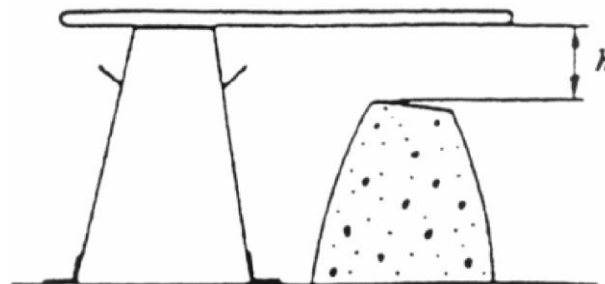


Figura 3.18 - Medição da diferença de alturas (h) entre o molde e o ponto mais alto do provete após desmoldagem

O ensaio é apenas válido caso o betão permaneça intacto e simétrico sem distorção significativa. Quando estas condições não foram integralmente verificadas, houve recurso a repetição do procedimento.



(a) Abaixamento verdadeiro

(b) Abaixamento deformado

Figura 3.4719 - Formas de abaixamento (NP EN 12350-2 (2002))

3.5.2 Massa volúmica

3.5.2.1 Objectivo e norma do ensaio do ensaio

Este ensaio destina-se a quantificar a massa volúmica do betão, propriedade que influencia a necessidade de compactação do compósito pela sua interferência na trabalhabilidade. A massa volúmica tem também importantes implicações no desempenho do betão no estado endurecido. A norma seguida na realização do ensaio foi a NP EN 12350-6 (2002) “*Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica*”.

3.5.2.2 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes:

- recipiente estanque, de volume conhecido (10 l), de rigidez relativamente elevada, resistente à pasta de cimento, com a face interna lisa e com bordo superior passível de acabamento (Figura 3.20);
- dispositivo de compactação do betão; no presente trabalho, foi utilizada uma agulha vibratória (Figura 3.21);
- balança de precisão superior ou igual a $\pm 0,1$ % da massa a determinar;
- varão de compactação com extremidades arredondadas, com um diâmetro de 16 ± 1 mm e comprimento de 600 ± 5 mm (Figura 3.22);
- colher de pedreiro; e
- pano húmido.



Figura 3.20 - Recipiente para medição da massa volúmica do betão no estado fresco



Figura 3.21 - Agulha vibratória



Figura 3.22 - Varão de compactação.

3.5.2.3 Amostras

As amostras utilizadas no ensaio de determinação da massa volúmica foram retiradas do carrinho de mão (Figura 3.12) e colocadas no recipiente. Neste processo, houve o cuidado de homogeneizar o betão com a ajuda de uma pá de pedreiro, procurando manter a representatividade das amostras.

3.5.2.4 Procedimentos de ensaio

O recipiente cilíndrico foi pesado vazio e a massa registada como M_1 . De seguida, o recipiente foi preenchido com metade do seu volume, compactando-se com a agulha vibratória, tendo havido o cuidado de não vibrar durante demasiado tempo, de modo a não provocar segregação excessiva. A segunda metade do volume foi preenchida repetindo-se o procedimento de vibração. Após o preenchimento total, a superfície do recipiente foi nivelada com o auxílio da colher de pedreiro. Os restos de betão, presentes no exterior do recipiente, foram removidos com o pano molhado, e o conjunto, recipiente e betão, foi pesado tendo sido anotada a sua massa como M_2 .

3.5.2.5 Modo de obtenção e apresentação dos resultados

O valor da massa volúmica foi calculado com recurso à seguinte fórmula:

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad (3.16)$$

onde D , M_1 , M_2 , V_r representam, respectivamente a massa volúmica do betão fresco (kg/m^3), a massa do recipiente (kg), a massa do conjunto formado pelo recipiente e o provete de betão fresco (kg) e o volume do recipiente (m^3).

3.6 Ensaio ao betão no estado endurecido

Para se poder tirar conclusões sobre o comportamento mecânico de determinados betões, objectivo primeiro da presente dissertação, é necessário proceder a determinados ensaios, que se indicam a seguir. Com isto, pretende-se elaborar uma caracterização sobre o betão e as suas qualidades como elemento estrutural. Consoante o destino para o qual o betão foi dimensionado, as exigências variam sendo, portanto, importante definir rigorosamente os ensaios e tirar ilações sobre os mesmos. A presente dissertação incide fundamentalmente sobre o comportamento mecânico do betão em função de várias taxas de substituição de 3 tipos de AP por AS de mármore.

3.6.1 Resistência à compressão

3.6.1.1 Objectivo e norma do ensaio

O ensaio tem como objectivo determinar a capacidade resistente dos diferentes betões sob tensão uniforme de compressão. Para tal, os provetes, correspondentes aos vários betões, foram levados até à rotura e o máximo valor atingido foi registado

A metodologia de ensaio seguida foi a indicada na norma NP EN 12390-3 (2003) “*Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*”.

Os aspectos relativos à geometria e dimensões dos provetes de ensaio podem ser consultados na NP EN 12390-1 (2003) “*Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*”.

No que respeita à execução e cura dos provetes de ensaio, os métodos encontram-se especificados na NP EN 12390-2 (2003) “*Ensaio ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica*”.

3.6.1.2 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes:

- prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma NP EN 12390-3 (Figuras 3.23);
- pano de limpeza dos provetes; e
- balança com uma precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar.



Figura 3.23 - Prensa hidráulica de 4 colunas

3.6.1.3 Provetes de ensaio

O ensaio foi realizado em provetes de forma cúbica com 150 mm de aresta (Figura 3.23), a três tempos de cura (7, 28 e 56 dias).

Para o programa de ensaios, foram considerados 3 provetes ensaiados aos 7 dias, 5 aos 28 dias e 3 aos 56 dias, o que perfaz um total de 110 provetes de ensaio, tendo em consideração as 10 amassaduras diferentes (3 BR com 100% de AP, 3 betões com taxa de 20% de substituição de AP por AS, 3 betões com taxa de 50% de substituição de AP por AS e um integral com AS).

É importante lembrar que, durante a 2.^a fase da campanha experimental, com o principal objectivo de assegurar a trabalhabilidade pretendida para as diferentes amassaduras,

foram executados 4 provetes cúbicos para realizar ensaios de compressão aos 28 dias de idade. Estes provetes, complementares aos da 3.^a fase, forneceram a possibilidade de comparar os resultados e detectar eventuais anomalias durante a amassadura e cura do betão.

Todos os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem de modo a adquirirem resistência suficiente para ser desmoldados e transportados até à zona de cura.

3.6.1.4 Procedimentos de ensaio

Após o período de cura, o provete foi retirado do ambiente de cura e o excesso de humidade e/ou sujidade do provete foi removido. O provete foi pesado e a sua massa registada como M. Uma ilustração deste procedimento pode ser observada na Figura 3.24. Apesar de esta grandeza não ter influência directa na determinação do valor de resistência à compressão, a sua medição corresponde a um procedimento habitual de modo a detectar alguma eventual situação anómala. Se aparecessem resultados díspares, isso poderia ser indício de existência de vazios em dimensão ou quantidade anormal.



Figura 3.24 - Pesagem de provete cúbico

Posteriormente, o provete foi colocado na máquina de ensaio, previamente limpa, numa posição central relativamente ao prato inferior e de forma a que a carga fosse aplicada perpendicularmente à direcção de moldagem, sem uso de calço entre o provete e os pratos da máquina de ensaio (Figura 3.23).

A carga foi aplicada a uma velocidade constante de 0.2 a 1 MPa/s, de forma contínua e sem alterações bruscas, até o provete não conseguir absorver mais energia. O valor da velocidade de carga utilizado foi de 11.3 kN/s, que corresponde a aproximadamente a 0.5 MPa/s). O valor da carga máxima atingida ficou registado como F e os procedimentos descritos foram repetidos para todos os provetes a ensaiar.

Após o ensaio de cada provete, foi avaliada a configuração de rotura do mesmo, de modo a decidir se esta estaria conforme (Figura 3.25) ou não (Figura 3.26), segundo o indicado na norma NP EN 12390-3.

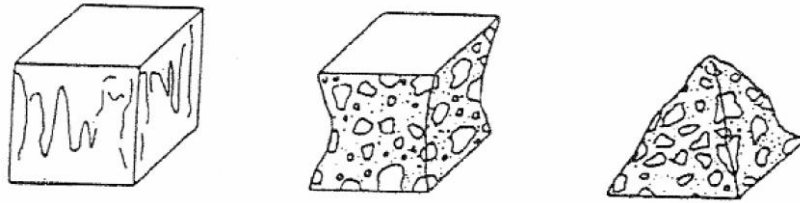


Figura 3.25 - Roturas satisfatórias dos provetes cúbicos (NP EN 12390-3, 2001)

3.6.1.5 Resultados

A resistência à compressão de cada provete é dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.17)$$

onde f_c , F , A_c representam, respectivamente, a resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm^2), a carga máxima (N) e a área de contacto com a superfície (secção transversal do provete cúbico) sobre a qual foi distribuída a força de compressão (mm^2).

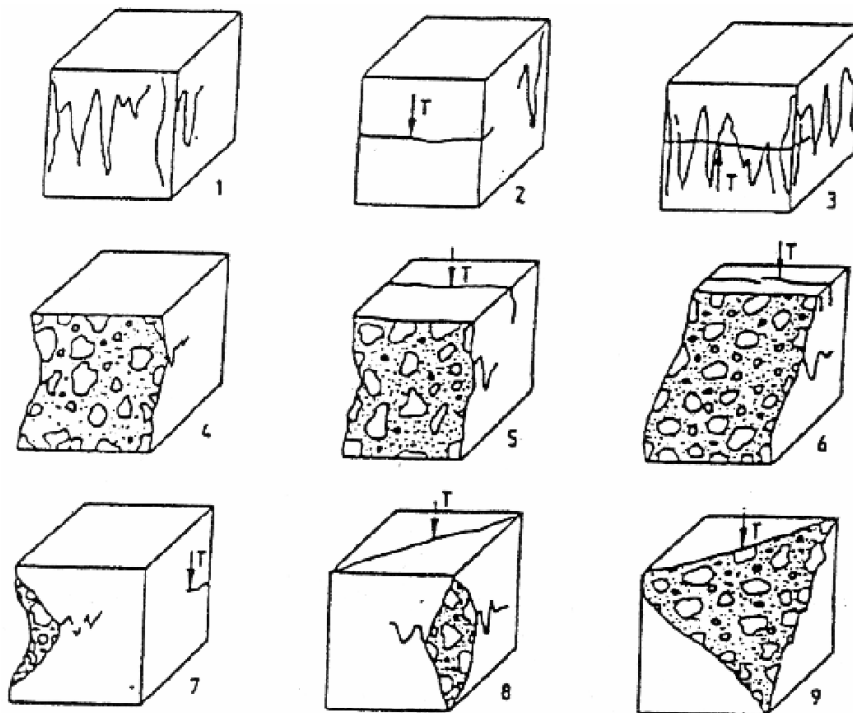


Figura 3.26 - Roturas não satisfatórias dos provetes cúbicos (NP EN 12390-3, 2001)

3.6.2 Resistência à tracção por compressão diametral

3.6.2.1 Objectivo do ensaio

A tensão de rotura à tracção do betão pode ser determinada por tracção pura, por flexão simples ou por compressão diametral. Este último foi o método escolhido no presente trabalho. Uma das vantagens apontadas para esta escolha foi a de os provetes cilíndricos, utilizados para o ensaio do módulo de elasticidade, poderem ser reutilizados no ensaio de tracção por compressão

diametral. Devem, contudo, ser apontadas as reticências referidas por alguns autores em relação a esta reutilização. Os autores justificam estas apreensões com a possível fendilhação que o ensaio do módulo de elasticidade pode gerar nos provetes cilíndricos. Deste modo, para cada tipo de betão, foram planeados três provetes cilíndricos. Dois foram utilizados no ensaio do módulo de elasticidade e, na mesma idade, reutilizados no ensaio por tracção por compressão diametral. O terceiro foi exclusivamente ensaiado à tracção por compressão diametral, de modo a se poder controlar o processo e detectar alguma possível anomalia no caso de os resultados serem díspares.

A essência do ensaio por compressão diametral consiste em submeter o provete cilíndrico a uma força de compressão, aplicada numa estreita zona ao longo do seu comprimento (carga de faca distribuída ao longo da sua geratriz), o que gera tensões ortogonais que, por sua vez, provocam a rotura do provete por tracção.

3.6.2.2 Normas de ensaio

O ensaio segue as especificações indicadas na NP EN 12390-6 (2003) “*Ensaaios do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes*”.

Em termos de características geométricas e dimensões dos provetes de ensaio, a norma seguida foi a NP EN 12390-1 (2003) “*Ensaaios ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*”. Por outro lado, no que respeita à execução e cura dos provetes de ensaio, as especificações seguidas foram as referentes à norma NP EN 12390-2 (2003).

3.6.2.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes:

- prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma NP EN 12390-4;
- posicionador dos provetes, em aço (opcional);
- peça de carga, em aço (Figura 3.27);
- faixas de cartão prensado (Figura 3.27), conforme a NP EN 316;
- régua; e
- pano de limpeza dos provetes e da máquina de ensaio.

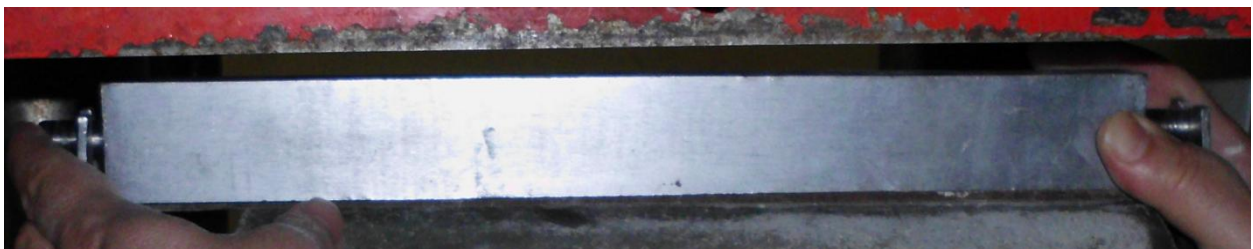


Figura 3.27 - Faixa de cartão prensado colocada entre a peça de carga, em aço, e o provete cilíndrico

Um esquema do sistema de montagem pode ser observado na Figura 3.28.

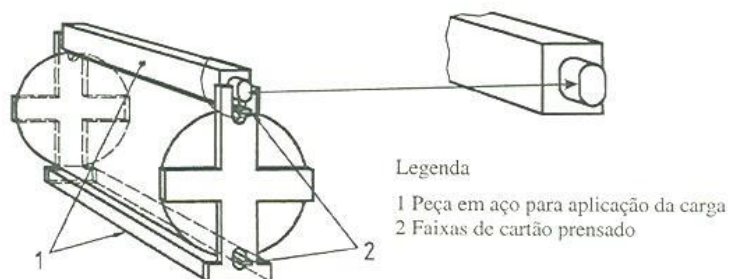


Figura 3.28 - Esquema de montagem do sistema para ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

3.6.2.4 Provetes de ensaio

O ensaio foi realizado com provetes cilíndricos, com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O período de cura, igual para todos os provetes, estava previamente estabelecido em 28 dias.

O programa de ensaios planeou, para cada composição de betão, 3 ensaios. Deste modo, tendo em conta as 10 amassaduras diferentes, chegou-se a um total de 30 provetes ensaiados.

Todos os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem de modo a adquirirem resistência suficiente para uma correcta desmoldagem. De seguida, foram transportados até à zona de cura.

3.6.2.5 Procedimentos de ensaio

Após atingida de cura determinada, o provete foi retirado do ambiente de cura e foi removido o excesso de humidade e/ou sujidade do provete.

Na preparação da máquina de ensaio, foram limpas todas as superfícies da mesma e o provete foi colocado no posicionador, de modo perfeitamente centrado em relação aos pratos para evitar qualquer tipo de excentricidade (Figura 3.29). As faixas de cartão prensado foram posicionadas nas geratrizes de base e de topo e, nesta última, a peça de carga foi sobreposta (Figura 3.30).



Figura 3.29 - Vista de topo de provete cilíndrico colocado no posicionador, com este centrado

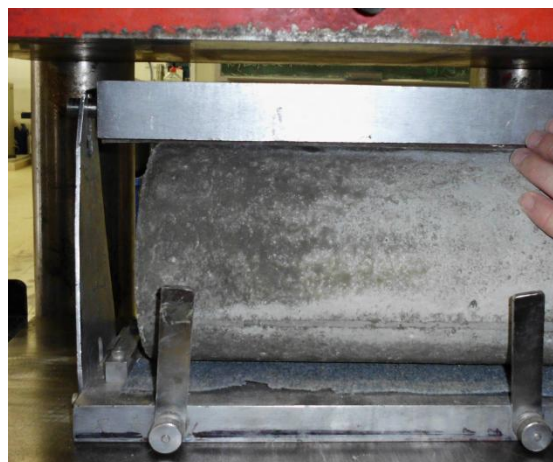


Figura 3.30 - Vista da extensão das faixas de cartão prensado colocadas entre o provete e o sistema posicionador

A carga foi aplicada a uma velocidade constante de 0,045 MPa/s (a que corresponde a velocidade de carregamento de 1,3 kN/s), de forma contínua e sem choques, até se atingir a rotura (Figura 3.31). Durante toda a execução do ensaio, foi também tido o cuidado de colocar os pratos paralelos entre si. Por fim, a carga máxima atingida, foi lida e registada como F (Figura 3.32).



Figura 3.31 - Fases da rotura (as duas primeiras fotos correspondentes a betão com agregados grossos (100% basalto) e última a betão composto por agregados grossos de basalto e mármore (50%))



Figura 3.32 - Leitura de carga no mostrador do sistema acoplado à prensa hidráulica

3.6.2.6 Resultados

O cálculo do valor da resistência à tracção por compressão de cada provete foi efectuado recorrendo à seguinte expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad [MPa \text{ ou } N/m^2] \quad (3.18)$$

em que f_{ct} , F , L e d representam a resistência à tracção por compressão diametral, a carga máxima (N), o comprimento da linha de contacto do provete (mm) e a dimensão da secção transversal (mm), respectivamente.

O valor da resistência à tracção por compressão diametral, para cada um dos tipos de betões, foi obtido pela média simples dos resultados dos correspondentes 3 provetes.

3.6.3 Módulo de elasticidade

3.6.3.1 Objectivo do ensaio

O módulo de elasticidade é um parâmetro de particular importância porque permite quantificar a deformabilidade do material. O seu valor corresponde ao declive do gráfico tensão / extensão. No caso do betão, a relação afasta-se da linearidade para valores crescentes de tensão, como pode ser observado na Figura 3.33.

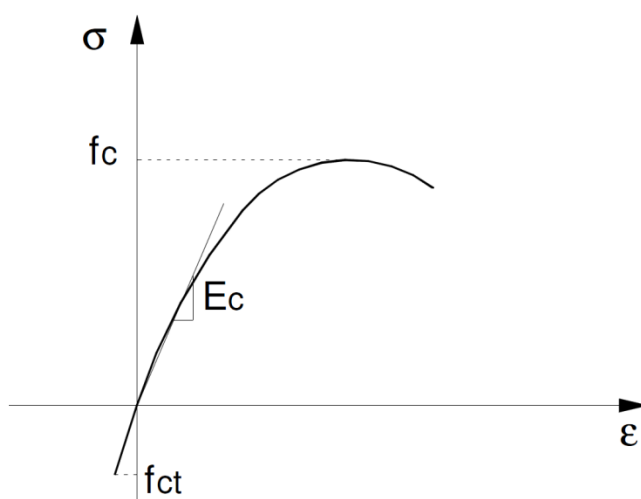


Figura 3.33 - Relação tensão / deformação para o betão

Assim sendo, para este material, existem diferentes modos utilizados para o cálculo do parâmetro. Os mais encontrados na literatura são o método da tangente, em que o declive considerado é o da recta tangente à curva σ/ϵ num ponto perto da origem, onde o comportamento ainda se admite aproximadamente linear (Figura 3.34-a) e o método da secante, em que o declive considerado é o da recta que cruza a origem e passa num ponto do diagrama σ versus ϵ , a um pré-definido nível de tensão (Figura 3.34-b).

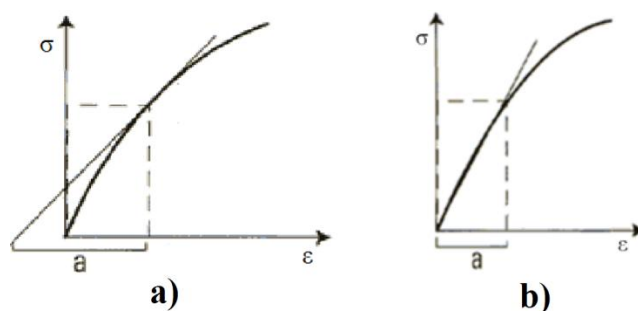


Figura 3.34 - Declive para determinação do módulo de elasticidade: a) método da tangente; b) método da secante

No presente trabalho, o método utilizado foi o da secante considerando, para segundo ponto da recta, o correspondente à ordenada a um nível de tensão na ordem de $1/3$ da resistência média à compressão. Para a obtenção do valor do módulo de elasticidade, o ensaio considerou um número específico de ciclos de carga.

3.6.3.2 Normas de ensaio

A metodologia de ensaio seguida foi a indicada pela norma LNEC E-397 “*Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão*”.

3.6.3.3 Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados na realização do ensaio foram os seguintes:

- sistema de medição de deformações composto por anéis com duas bases de medida e fixáveis ao provete por três pontos (Figuras 3.35 e 3.36);
- prensa hidráulica (Figura 3.37);
- *data logger*, acoplado à prensa hidráulica e ao medidor de deformações (Figura 3.37)¹;
- computador portátil;
- pano para limpeza dos provetes e da máquina de ensaio.



Figura 3.35 - Montagem do sistema de medição de deformações



Figura 3.36 - Fixação dos anéis integrantes do sistema de medição de deformações

¹ O *data logger* interpreta e transmite para um PC os sinais eléctricos emitidos pelos equipamentos onde, por sua vez, estes são tratados e convertidos em valores de E.



Figura 3.37 - Prensa hidráulica e parte do sistema (*data logger*) acoplado a esta e ao sistema medidor de deformações

3.6.3.4 Provetes de ensaio

Os provetes, de forma cilíndrica, apresentam dimensões com diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm. Após a betonagem, todos os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona da mesma, de modo a adquirirem resistência suficiente para serem desmoldados e transportados até à zona de cura.

Os provetes foram ensaiados após uma idade de 28 dias, idêntica para todos os espécimes.

Considerando 2 provetes, para cada tipo de betão, e um total de 10 amassaduras, chegou-se a um valor total de 20 provetes destinados a este ensaio. Como referido, tirando partido de este ser não destrutivo, os provetes foram reaproveitados para o ensaio de tracção por compressão diametral, realizado no mesmo dia.

3.6.3.5 Procedimentos de ensaio

Após atingida a idade de 28 dias, os provetes foram retirados do ambiente de cura estabelecida. Ambas as faces de ensaio do provete foram rectificadas de modo a ficarem perfeitamente lisas e paralelas. Como a rectificação ocorreu em ambiente molhado, foi necessário esperar que o provete secasse e fosse removido o excesso de humidade e/ou sujidade do provete. Já na zona da máquina de ensaio, foram colocados 2 extensómetros no provete em posições diametralmente opostas, como pode ser observado na Figura 3.38.

As superfícies da máquina de ensaio foram limpas e o provete foi colocado de modo a evitar qualquer excentricidade de carregamento. Foi utilizada uma rótula metálica para assegurar a transmissão exclusiva de esforço axial para o provete como pode ser observado na Figura 3.39. O correcto posicionamento do provete foi controlado observando a diferença registada nos dois extensómetros. Esse controlo foi garantido, após cada ciclo de carga, não permitindo que a diferença ultrapassasse 10%.

Cada ciclo de carga consistiu em uma tensão inicial de 0,5 a 1 MPa que, de seguida, foi aumentada de forma contínua, a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa/s, até ser atingido o valor de 1/3 da tensão média de resistência à compressão. As extensões e tensões iniciais e finais foram

registadas em cada ciclo. Após cada ciclo, foi verificado se a diferença entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$) era inferior a 10^{-5} . Nos casos em que tal limite não foi verificado, o ciclo de carga foi repetido. Foram efectuados os ciclos necessários até que o ponto anterior ficasse verificado ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| < 10^{-5}$).



Figura 3.38 - Extensómetros colocados em posições diametralmente opostas



Figura 3.39 - Rótula metálica para assegurar transmissão exclusiva de esforço normal

3.6.3.6 Resultados

A partir do momento em que a diferença entre as médias das variações de extensão, entre dois ciclos consecutivos, verificou a seguinte condição:

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_i - \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_{i+1} \right| \leq 1 \times 10^{-5} \quad (3.19)$$

o ensaio passou a ser validado e o valor do módulo de elasticidade em compressão foi calculado recorrendo à seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad (3.20)$$

onde E_c , $\sigma_{i,n}$, $\sigma_{f,n}$, $\varepsilon_{i,n}$, e $\varepsilon_{f,n}$ representam, respectivamente, o módulo de elasticidade em compressão (GPa), a tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa), a tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa), a extensão para a tensão $\sigma_{i,n}$, registada no ciclo n e a extensão para a tensão $\sigma_{f,n}$ registada no ciclo n .

3.6.4 Resistência à abrasão

3.6.4.1 Objectivo do ensaio

A importância de conhecer a resistência à abrasão reside no projecto de estruturas com elementos de betão à vista. Nestas situações, agentes agressivos como a erosão e outras acções que podem causar desgaste ou perda de secção podem assumir papel preponderante. Aponta-se, como exemplo, o caso de pavimentos e canais hidráulicos. Mesmo em situações em que se

utilizam betões não estruturais, apenas com funções de revestimento, existe interesse em conhecer a capacidade resistente à abrasão.

3.6.4.2 Normas de ensaio

A metodologia de ensaio é fixada pela norma DIN 52108 “*Testing of inorganic non-metallic materials. Wear test with grinding wheel according to Böhme*”.

3.6.4.3 Aparelhos e utensílios

No ensaio, recorreu-se aos seguintes aparelhos e utensílios:

- máquina de abrasão de Böhme (Figura 3.40);
- pó abrasivo;
- estufa ventilada à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- balança com precisão igual ou superior a 0,1 g;
- paquímetro (Figura 3.9);
- escova para limpeza da máquina de abrasão e provetes; e
- pano para limpeza dos provetes.

3.6.4.4 Provetes de ensaio

Os provetes utilizados neste ensaio apresentam forma paralelepípedica de dimensões com base quadrada de (71 ± 1.5) mm de aresta (a que corresponde a uma área de teste de (50 ± 2) cm²) e altura de ± 50 mm. Uma imagem de um provete pode ser observada na Figura 3.41. É de salientar que a altura do provete não é normalizada.



Figura 3.40 - Máquina de abrasão de Böhme



Figura 3.41 - Provete de ensaio

Para cada uma das 10 amassaduras diferentes, ficou decidido reservar 3 provetes de 100 x 100 x 100 mm que, depois de cortados, deram origem a 6 espécimes, por cada tipo de betão, com as dimensões referidas. Na totalidade, foram, portanto, ensaiados 60 espécimes. Após a serragem, os provetes foram colocados em estufa ventilada a 110 °C até que atingissem massa constante. Por massa constante deve ser entendido que a variação, no valor lido na balança, não foi superior a 0,1%, após pesagens sucessivas com intervalos mínimos de 1 hora.

3.6.4.5 Procedimento de ensaio

Depois da exposição ao respectivo ambiente e tempo de cura (91 dias), e procedimento referido em 3.6.4.4, foi removida a sujidade dos provetes, tendo especial cuidado com a face de teste. Foi medida a altura inicial do provete em 9 pontos (Figuras 3.42 e 3.43) marcados na face oposta à de teste, conforme pode ser observado na Figura 3.44. Todas as superfícies da máquina de abrasão foram cuidadosamente limpas e foram distribuídas 20 g de pó abrasivo ao longo do trilho de abrasão. O provete foi posicionado no mecanismo de fixação e a face de topo foi submetida a um carga vertical (Figura 3.45), centrada e com uma pressão de contacto de $30 \pm 0,3$ kPa, de modo a assegurar a existência de atrito suficiente entre o provete e o conjunto abrasivo constituído pelo pó e disco.

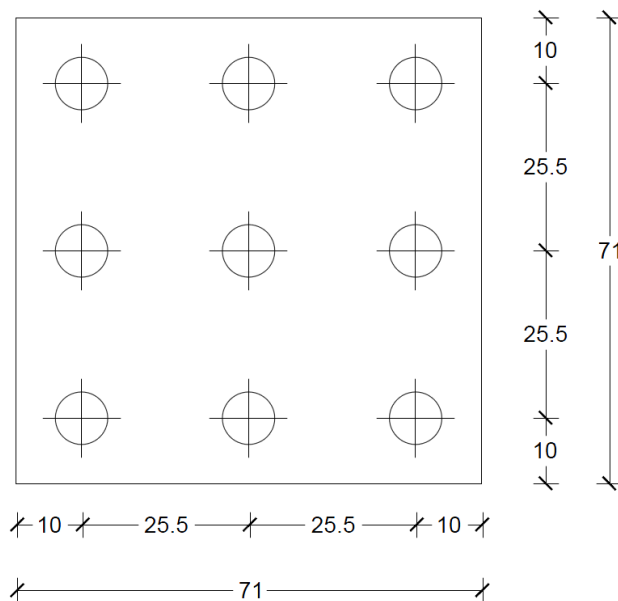


Figura 3.42 - Esquema da distribuição dos 9 pontos de medição do desgaste



Figura 3.43 - Distribuição dos 9 pontos de medição do desgaste num provete real (betão com agregados grossos de granito (100%))

A partir desta etapa, pode dar-se início à rotação do disco de Böhme, garantindo 22 voltas a uma velocidade de 30 ± 1 rpm (Figura 3.46). Este processo designa-se por ciclo de teste. No total, o ensaio de resistência à abrasão compreendeu 16 ciclos de teste por provete.

Após cada ciclo de teste, a superfície de teste do provete e o disco de Böhme foram limpos e o provete sofreu uma rotação de 90° em torno do seu eixo vertical, sempre no mesmo sentido, e foram, de novo, distribuídas 20 g de pó abrasivo no trilho de abrasão (previamente

limpo). Deste modo, uma vez concluídos os 16 ciclos, o provete já tinha realizado 4 voltas em torno do seu eixo vertical e consumido 320 g de pó abrasivo.

Após o término dos 16 ciclos de teste, o provete foi limpo e a altura, dos 9 pontos medidos anteriormente, foi novamente medida.



Figura 3.44 - Provete com face de desgaste voltada para baixo e marcações na face de topo



Figura 3.45 - Detalhe do peso a criar carga sobre a face de topo do provete



Figura 3.46 - Provete sujeito a desgaste com rotação em pleno ensaio

3.6.4.6 Resultados

O cálculo da perda devida ao ensaio de desgaste por abrasão foi feito recorrendo aos valores de redução da espessura do provete. A perda média foi obtida a partir da diferença entre a média das n alturas iniciais ($L_{i,j}$) e a média das n alturas finais ($L_{f,j}$), como é indicado na seguinte expressão:

$$\Delta L = \frac{\sum_{j=1}^n (L_{i,j} - L_{f,j})}{n} \quad (3.21)$$

onde ΔL , $L_{i,j}$, $L_{f,j}$ e n representam, respectivamente, a perda média de espessura (mm), a espessura inicial do provete, medida no ponto j (mm), a espessura final do provete, medida no ponto j (mm) e o número de pontos marcados no provete.

4 Discussão dos resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo, é feita a apresentação e análise dos resultados correspondentes aos ensaios descritos no capítulo 3 e que foram realizados durante a campanha experimental. O principal objectivo desta análise é relacionar as variações de comportamento mecânico, em face das diferentes taxas de substituição de agregados grossos primários (AP) por agregados secundários de mármore (ASM).

4.2 Ensaios de caracterização dos agregados

Este subcapítulo concentra-se nos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados, quer os denominados primários (AP) quer os secundários (AS). Os agregados grossos de mármore foram considerados secundários (AGSM) por serem proveninetes de um resíduo ou desperdício de uma indústria cujo principal objectivo não é a produção de agregados. Os ensaios realizados foram os seguintes: análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água, massa volúmica aparente, desgaste de *Los Angeles* e índice de forma.

4.2.1 Análise granulométrica

A metodologia utilizada nos ensaios e na obtenção de valores para a análise granulométrica foi baseada na norma NP EN 933-1 (2000). Os detalhes relativos ao ensaio encontram-se descritos no capítulo 3.

Quadro 4.1 - Percentagem do material passado acumulado (mármore)

Malha do peneiro (mm)	Massa acumulada passante (%)		
	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
64	100%	100%	100%
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0
16	50,5	100,0	100,0
11,2	2,5	87,6	100,0
8	1,5	30,4	100,0
5,6	1,5	1,3	94,1
4	1,5	0,6	18,7
2	1,5	0,6	1,3
1	1,5	0,6	1,3
0,5	1,5	0,6	1,2
0,25	1,5	0,6	1,2
0,125	1,5	0,6	1,1
0,0625	1,5	0,6	1,1
Refugo	0,1	0,0	0,1
Módulo de finura	7,4	6,7	5,8

Os agregados ensaiados foram, no que respeita aos finos, areia grossa e areia fina, sempre do mesmo tipo para as 10 diferentes amassaduras e, no que respeita aos grossos, brita 2, brita 1 e bago de arroz. Os agregados grossos primários (AGP) utilizados foram o calcário, o

granito e o basalto. O agregado grosso mármore foi classificado, na presente dissertação, como secundário por ser oriundo de uma indústria que se destina, em primeira instância, à produção de rochas ornamentais. Trata-se portanto, como referido, de um desperdício.

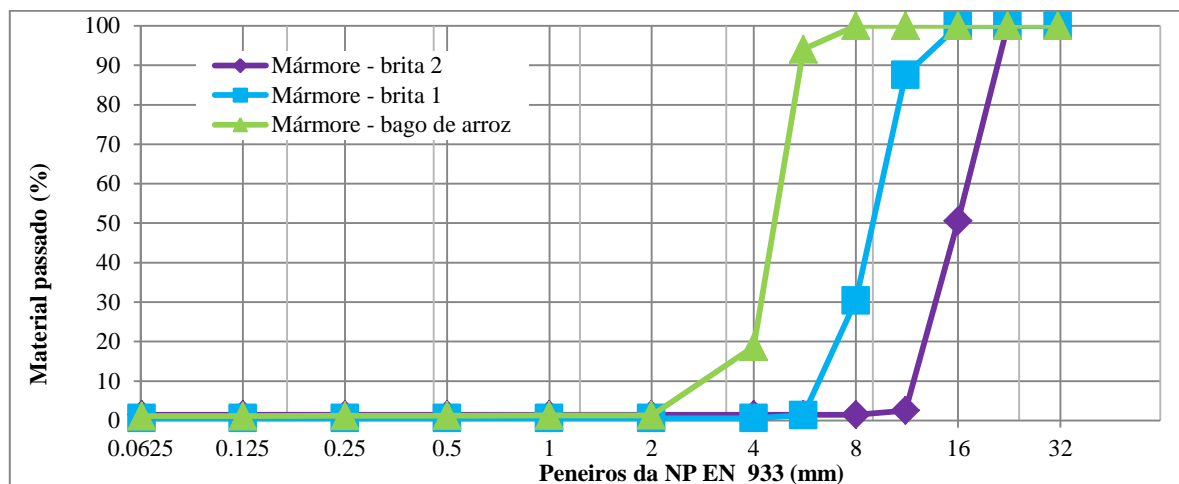


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados de mármore

Quadro 4.2 - Percentagem do material passado acumulado (calcário)

Malha do peneiro (mm)	Massa acumulada passante (%)		
	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
64	100	100	100
31,5	100	100	100
22,4	91,9	100	100
16	56	98,5	100
11,2	20	76,3	100
8	7,1	30,3	99,9
5,6	0,6	5	80,7
4	0,1	1,2	40,7
2	0,1	0,1	5,7
1	0,1	0	0,4
0,5	0,1	0	0,1
0,25	0,1	0	0
0,125	0,1	0	0
0,0625	0,1	0	0
Refugo	0,0	0,0	0,0
Módulo de finura	7,36	6,7	5,53

Nota: Os dados referentes aos agregados primários de calcário e areias foram disponibilizados pelos investigadores do laboratório, que utilizaram previamente os mesmos materiais utilizados na presente dissertação.

O agregado basalto chegou, a partir da pedra, separado em quatro conjuntos de dimensões, brita 3, brita 2 (classificada por alguns como 1,5 na pedra), brita 1 e bago de arroz. Deste modo, existiram em laboratório 15 tipos de amostras a serem ensaiadas. Nos Quadros 4.1 a 4.5, podem ser consultados os resultados obtidos e as respectivas curvas granulométricas podem ser visualizadas nas Figuras 4.1 a 4.5.

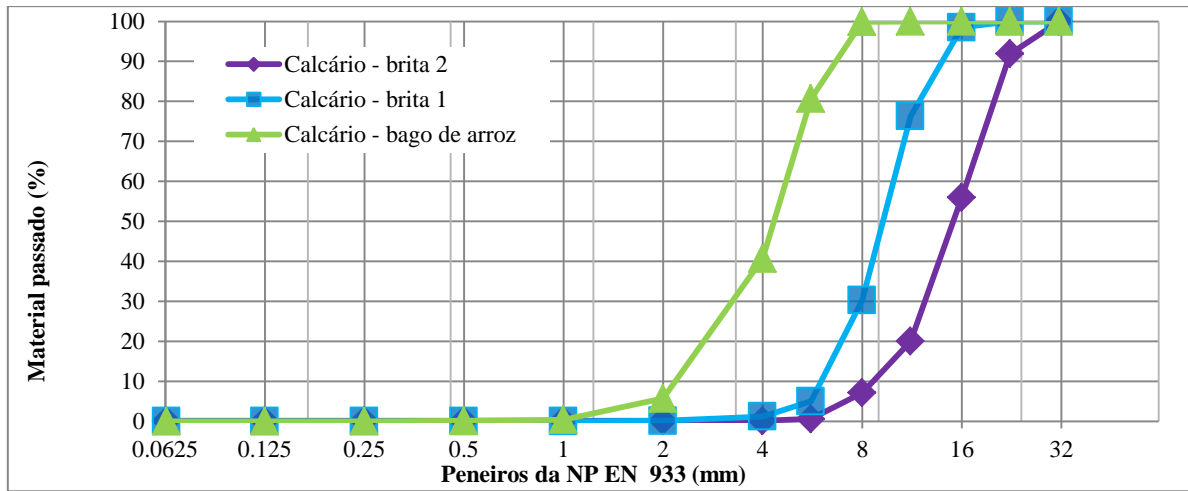


Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados de calcário

Quadro 4.3 - Percentagem do material passado acumulado (granito)

Malha do peneiro (mm)	Massa acumulada passante (%)		
	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
64	100,0	100,0	
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	99,7	100,0	100,0
16	47,3	97,9	100,0
11,2	1,9	65,4	100,0
8	1,1	28,9	100,0
5,6	0,9	4,8	99,2
4	0,9	2,5	65,7
2	0,9	2,2	21,1
1	0,9	2,1	13,1
0,5	0,9	2,0	10,0
0,25	0,9	2,0	8,6
0,125	0,9	2,0	7,8
0,0625	0,9	2,0	7,8
Refugo	0,0	0,1	0,0
Módulo de finura	7,5	6,6	4,7

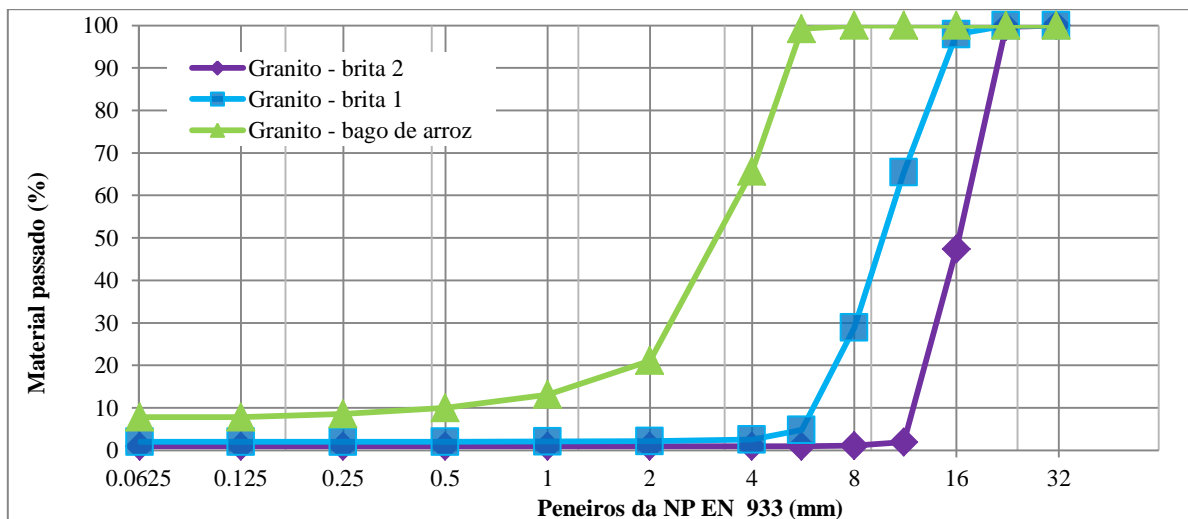


Figura 4.3 - Curvas granulométricas dos agregados de granito

Quadro 4.4 - Percentagem do material passado acumulado (basalto)

Malha do peneiro (mm)	Massa acumulada passante (%)			
	Brita 3	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
64		100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	92,9	100,0	100,0	100,0
16	44,0	9,4	92,9	100,0
11,2	4,0	0,2	32,3	100,0
8	0,4	0,2	0,4	100,0
5,6	0,3	0,1	0,3	72,8
4	0,3	0,1	0,3	21,9
2	0,3	0,1	0,3	0,8
1	0,3	0,1	0,3	0,6
0,5	0,3	0,1	0,3	0,6
0,25	0,3	0,1	0,3	0,6
0,125	0,3	0,1	0,3	0,6
0,0625	0,3	0,1	0,1	0,6
Refugo	0,0	0,1	0,1	0,0
Módulo de finura	7,5	7,0	6,7	5,7

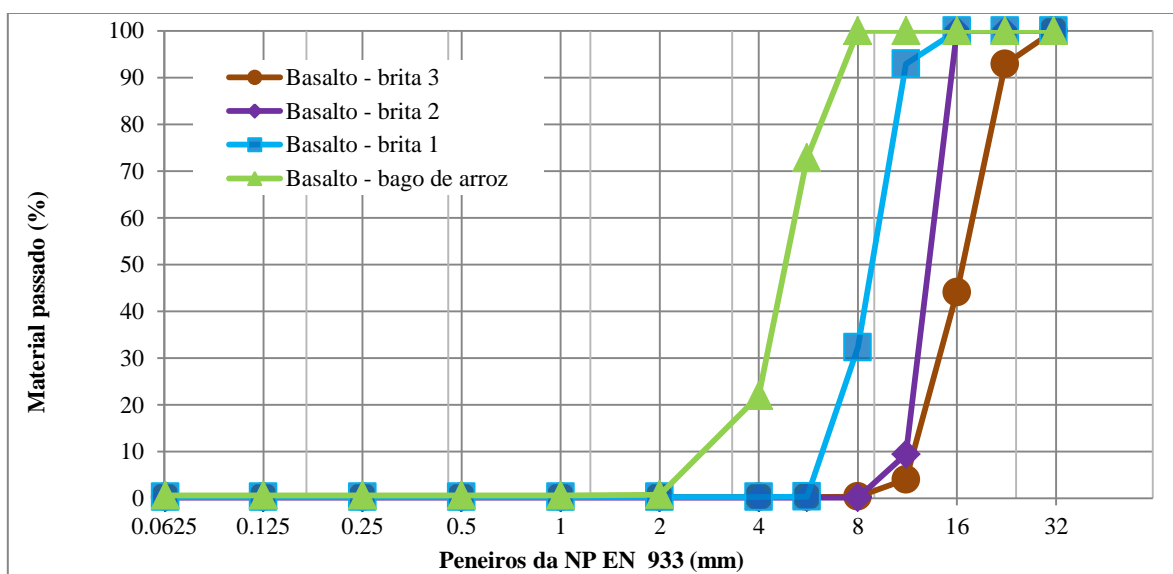


Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos agregados de basalto

Nas figuras relativas às curvas granulométricas, a dimensão das partículas foi representada no eixo das abcissas recorrendo, como usual, a uma escala logarítmica e a percentagem de material passante em cada peneiro foi representada no eixo das ordenadas.

Quadro 4.5 - Percentagem do material passado acumulado (areias)

Malha do peneiro (mm)	Massa acumulada passante (%)	
	Areia grossa	Areia fina
64	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0
16	100,0	100,0
11,2	100,0	100,0
8	100,0	100,0
5,6	98,9	100,0
4	96,2	100,0
2	94,7	99,9
1	57,9	99,5
0,5	17,1	74,3
0,25	4,9	15,4
0,125	2,5	4,2
0,0625	1,9	3,9
Refugo	0,2	0,6
Módulo de finura	3,3	2,1

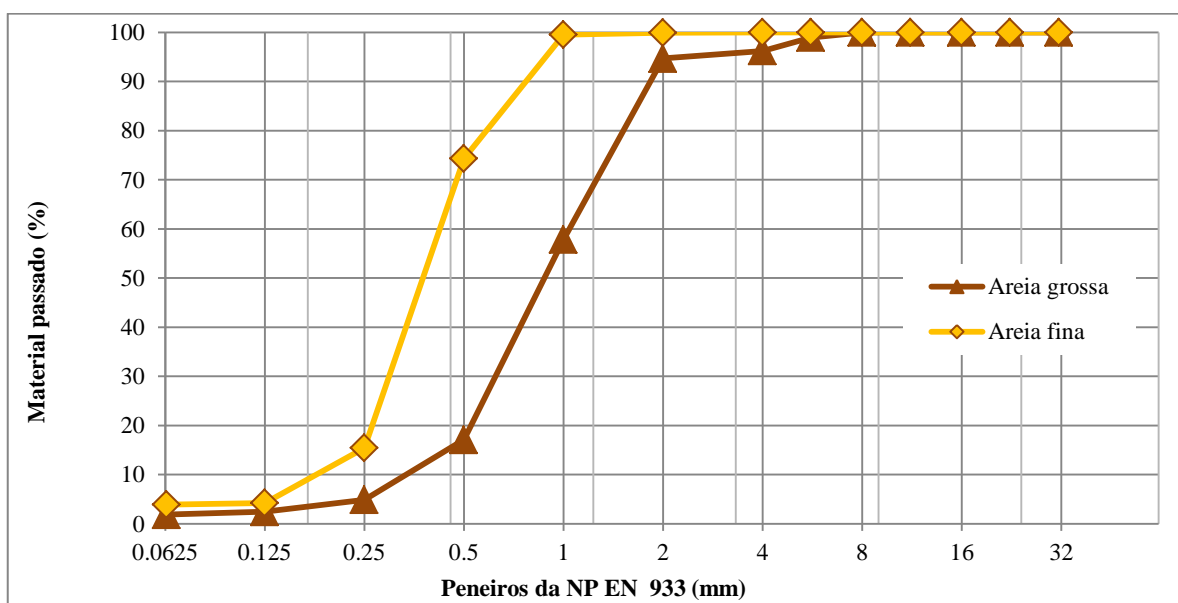


Figura 4.5 - Curvas granulométricas das areias

4.2.2 Massa volúmica e absorção de água

A metodologia utilizada nos ensaios e obtenção de valores para a massa volúmica foi baseada na norma NP EN 1097-6 (2003). Como descrito em detalhe no capítulo 3, a metodologia diferiu ligeiramente consoante se tratou de agregados grossos ou finos. No ensaio, foram determinados valores para três tipos de massa volúmica, massa volúmica impermeável (ρ_a), massa volúmica de partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}). Foi também determinada a absorção de água (WA_{24}). Com o intuito de diminuir os erros inerentes ao ensaio, foram utilizadas três amostras por cada tipo de agregado (15 tipos de agregado no total; AP de calcário (brita 2, brita 1 e bago de arroz), AP de granito (brita 2, brita 1 e bago de arroz), AP de basalto (brita 3, brita 2, brita 1 e bago de arroz), ASM de

mármore (brita 2, brita 1 e bago de arroz), areia grossa e areia fina). Esta opção conduziu a uma soma de $3 \times 15 = 45$ amostras.

Os resultados finais, correspondentes a cada tipo de agregado, foram conseguidos realizando a média simples dos valores respeitantes a 3 amostras por cada género de agregado. Nos Quadros 4.6 a 4.10, podem ser consultados os resultados correspondentes aos referidos valores médios (massas volúmicas e absorção de água) para os vários agregados. Para mais fácil comparação, podem ser visualizadas as representações gráficas nas Figuras 4.6 a 4.16. Os resultados relativos a cada amostra podem ser consultados no Anexo 4.1.

Quadro 4.6 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de mármore

Agregados	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Massa volúmica impermeável ρ_a (kg/m ³)	2743	2738	2725
Massa volúmica de partículas secas em estufa ρ_{rd} (kg/m ³)	2710	2686	2625
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{ssd} (kg/m ³)	2722	2705	2687
WA ₂₄ (%)	0,443	0,715	0,827

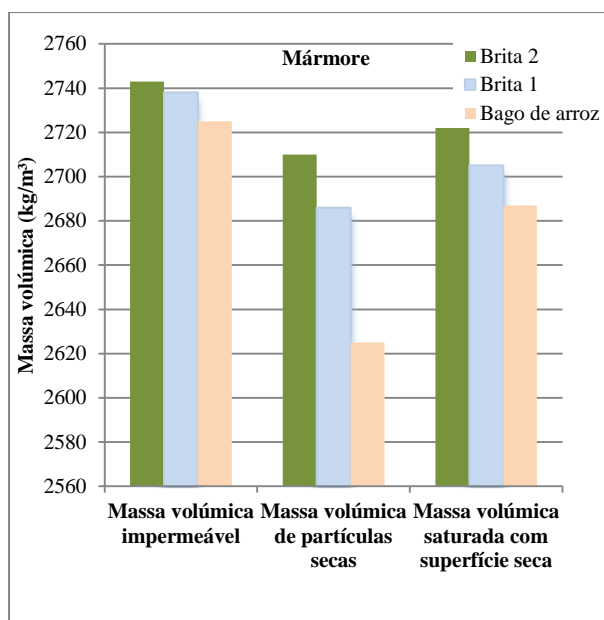


Figura 4.6 - Massas volúmicas dos agregados de mármore

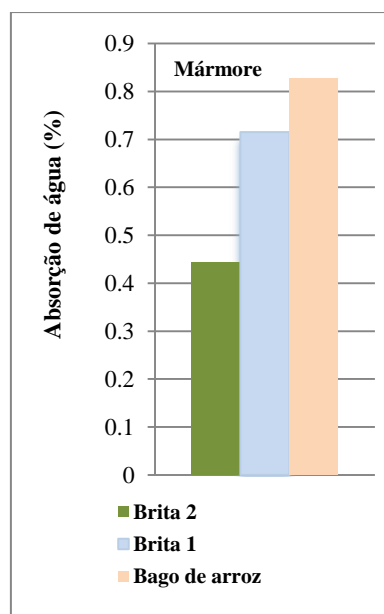


Figura 4.7 - Absorção de água para agregados de mármore

Quadro 4.7 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de calcário

Agregados	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Massa volúmica impermeável ρ_a (kg/m ³)	2720	2740	2741
Massa volúmica de partículas secas em estufa ρ_{rd} (kg/m ³)	2649	2648	2654
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{ssd} (kg/m ³)	2675	2682	2686
WA ₂₄ (%)	0,980	1,270	1,190

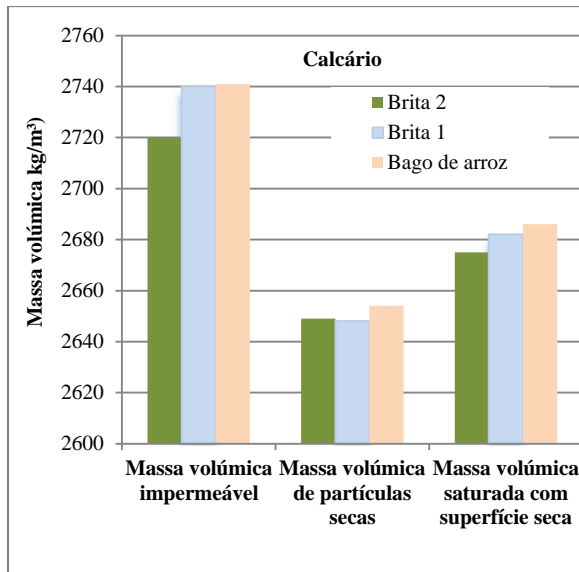


Figura 4.8 - Massas volúmicas dos agregados de calcário

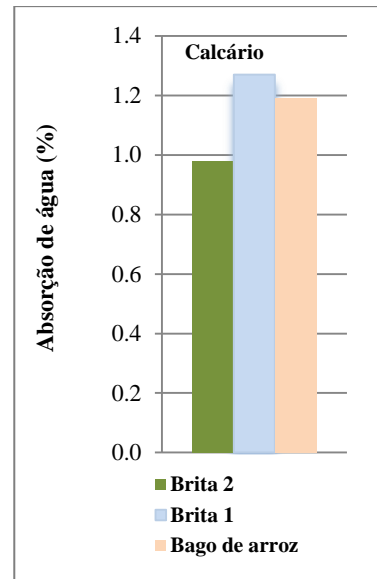


Figura 4.9 - Absorção de água dos agregados de calcário

Quadro 4.8 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de granito

Agregados	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Massa volúmica impermeável ρ_a (kg/m³)	2787	2794	2775
Massa volúmica de partículas secas em estufa ρ_{rd} (kg/m³)	2740	2724	2650
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{ssd} (kg/m³)	2757	2749	2695
WA ₂₄ (%)	0,611	0,919	1,701

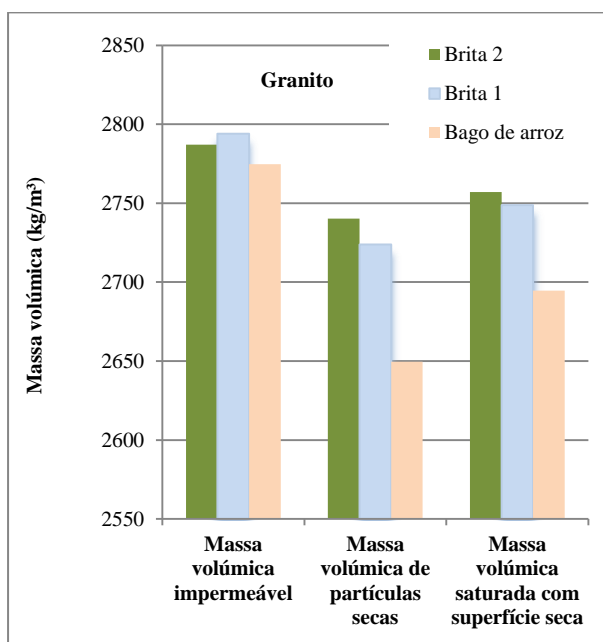


Figura 4.10 - Massas volúmicas dos agregados de granito

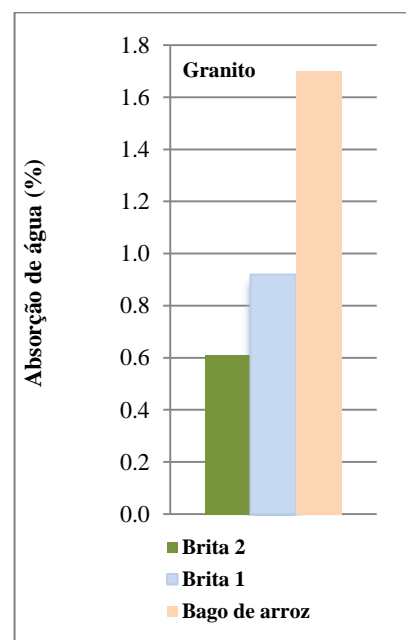


Figura 4.11 - Absorção de água dos agregados de granito

Quadro 4.9 - Massa volúmica e absorção de água: agregados de basalto

Agregados	Brita 3	Brita 2	Brita 1	Bago d'arroz
Massa volúmica impermeável ρ_a (kg/m ³)	3032	3001	3047	3012
Massa volúmica de partículas secas em estufa ρ_{rd} (kg/m ³)	2979	2938	2964	2931
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{ssd} (kg/m ³)	2997	2959	2991	2958
WA ₂₄ (%)	0,591	0,706	0,913	0,918

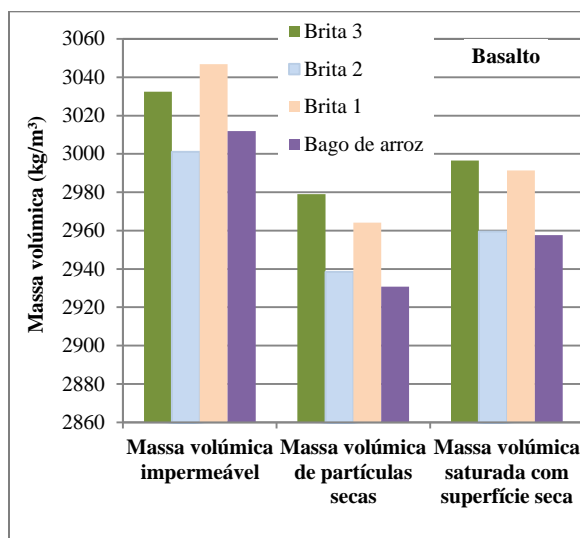


Figura 4.12 - Massas volúmicas dos agregados de basalto

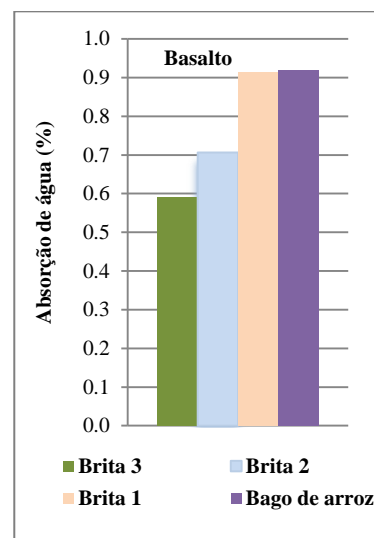


Figura 4.13 - Absorção de água dos agregados de basalto

Quadro 4.10 - Massa volúmica e absorção de água: areias

Agregados	Areia grossa	Areia fina
Massa volúmica impermeável ρ_a (kg/m ³)	2627	2585
Massa volúmica de partículas secas em estufa ρ_{rd} (kg/m ³)	2624	2579
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{ssd} (kg/m ³)	2625	2582
WA ₂₄ (%)	0,050	0,090

Os valores mais elevados, dos vários géneros de massa volúmica, foram obtidos para os agregados de basalto, como seria esperado (Figura 4.16). Os agregados de granito apresentaram, em média, valores ligeiramente mais elevados do que os dos agregados de calcário e de mármore. Os agregados que apresentaram mais baixos valores foram as areias. Se estes resultados forem comparados com os de outros autores (Quadro 4.11), pode-se reparar que os valores são relativamente semelhantes mas não se nota uma supremacia nos valores do granito, face aos de calcário e mármore, ao contrário do que acontece no presente trabalho.

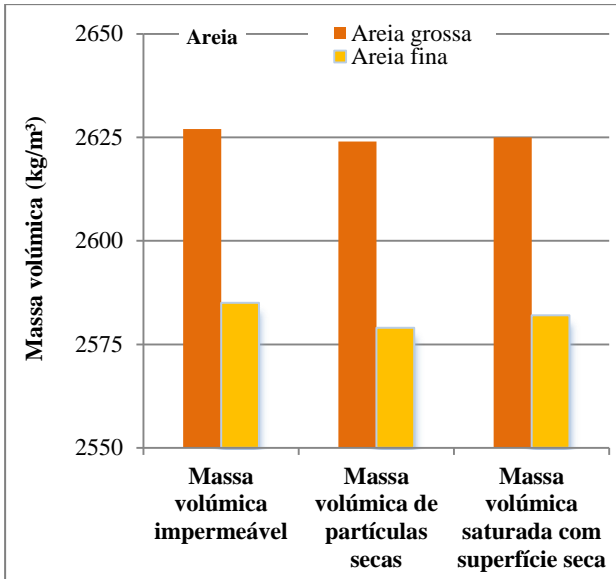


Figura 4.14 - Massas volúmicas das areias

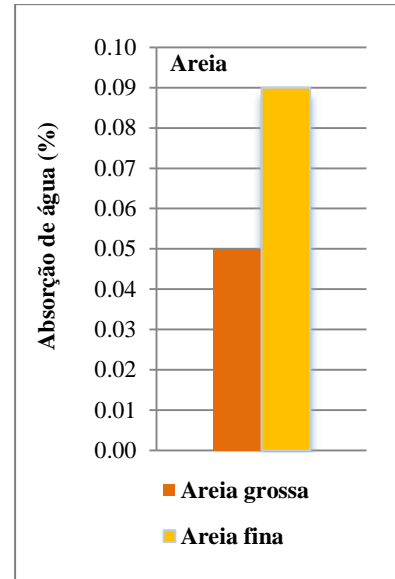


Figura 4.15 - Absorção de água das areias

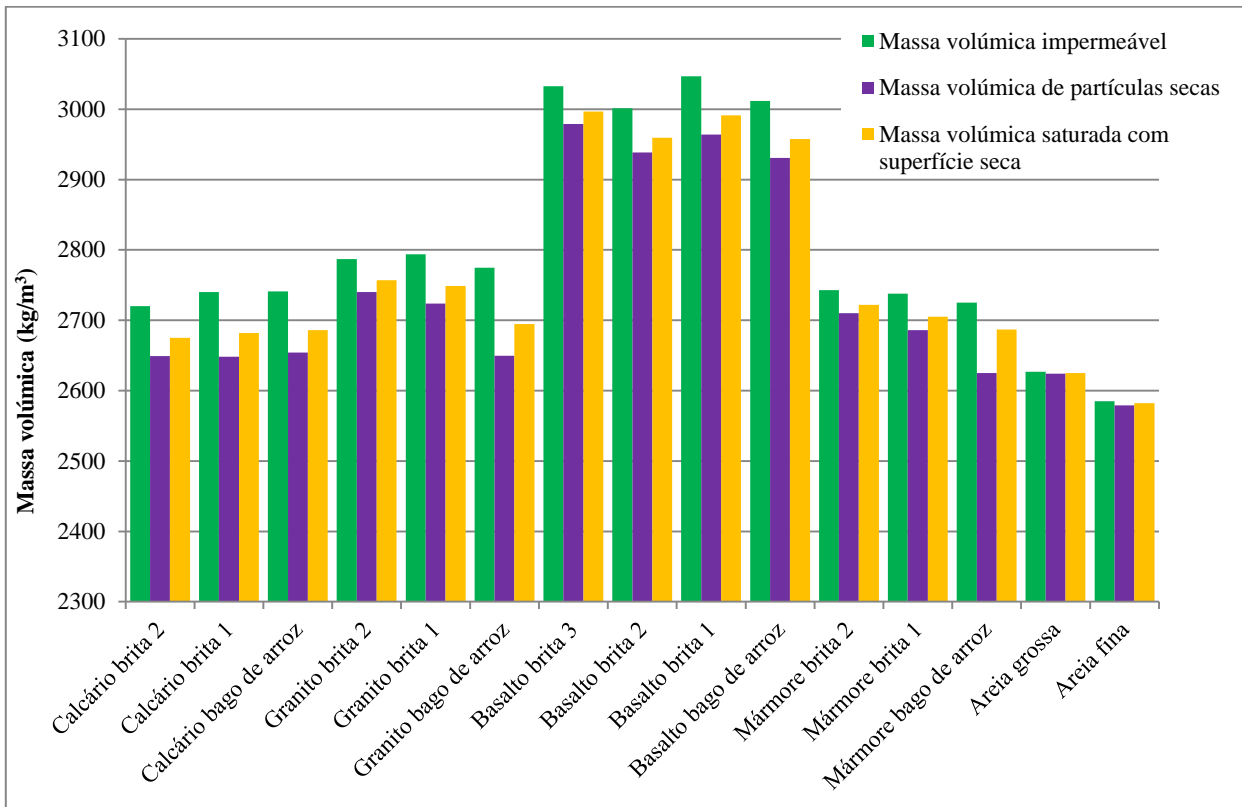


Figura 4.16 - Massa volúmica de todos os agregados

Em relação à absorção de água (Figura 4.17), repara-se numa acentuada diminuição dos valores para os agregados finos, as areias, sem que tal fosse expectável. As grandes diferenças, relativamente aos agregados grossos, poderão ser devidas a erros associados ao procedimento que é de execução mais difícil para agregados finos, particularmente na etapa de secagem da superfície das partículas.

No caso dos grossos, nota-se uma concordância entre os valores da presente campanha e as referidas no Quadro 4.12, destacando-se invariavelmente o calcário com os valores mais elevados de absorção de água. Tal poderá estar relacionado com a sua formação geológica e a natureza química distintas dos restantes. O calcário é uma rocha sedimentar enquanto que o mármore é de natureza metamórfica e o granito e o basalto são de natureza ígnea. Esta natureza pode contribuir para uma estrutura relativamente mais porosa e mais absorvente por parte do calcário.

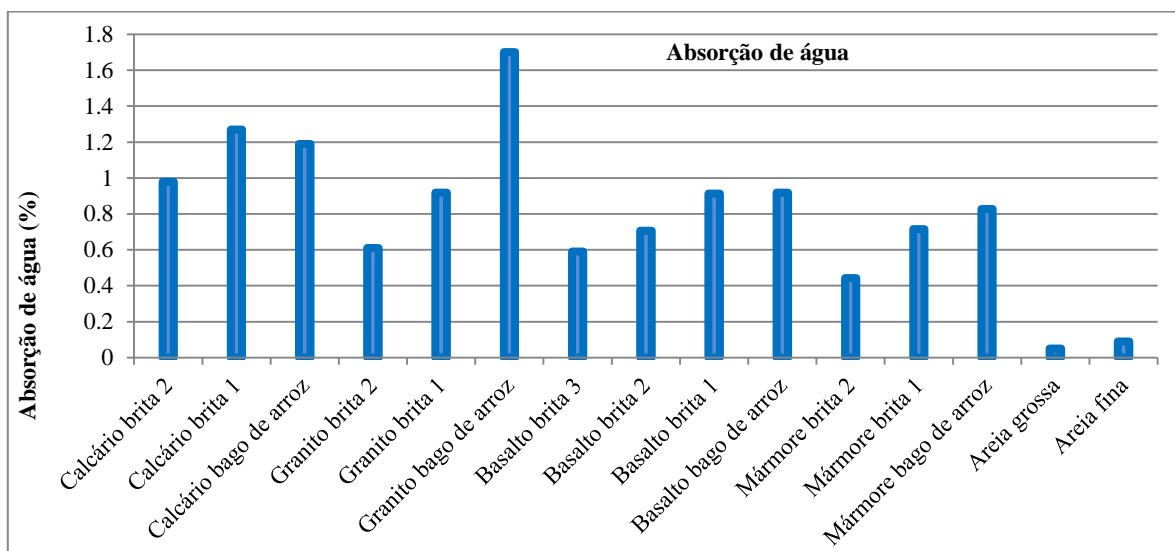


Figura 4.17 - Absorção de água de todos os agregados

Quadro 4.11 - Comparação dos resultados da massa volúmica de vários autores

Referências/autores	Massa volúmica (kg/m ³)				
	Brita de mármore	Brita de calcário	Brita de granito	Brita de basalto	Areia
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	2736	2666	-	-	2591
Binici <i>et al.</i> (2008)	2720	2710	2650	-	2600
Giaccio e Zeberdino (1998)	-	-	2650	-	-
Akbulut e Gurer (2007)	2705	2693/2691 ¹	-	-	2685
Pereira <i>et al.</i> (2009)	2750	2540	2640	2850	2620
Martins (2012) (valores médios)	2687	2650	2705	2953	2602

¹ Estes autores utilizaram dois tipos de calcário

Quadro 4.12 - Comparação dos resultados da absorção de água dos agregados de diferentes autores

Referências/autores	Absorção de água (%)				
	Brita de mármore	Brita de calcário	Brita de granito	Brita de basalto	Areia
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	0,39	-	-	-	-
Binici <i>et al.</i> (2008)	1,40	2,30	1,50	-	2,40
Giaccio e Zeberdino (1998)	-	-	0,80	-	-
Akbulut e Gurer (2007)					
Pereira <i>et al.</i> (2009)	0,015 ²	1,30 ²	0,03 ²	0,03 ²	0,50
Martins (2012) (valores médios)	0,662	1,147	1,077	0,782	0,070

² Valores de coeficiente de absorção (kg/m²h^{0,5})

4.2.3 Massa volúmica aparente

Para apoio à metodologia de execução e determinação dos valores de massa volúmica aparente, também denominada baridade, foi seguida a norma NP EN 1097-3 (2003). A metodologia foi descrita em detalhe no capítulo 3.

Nos Quadros 4.13 e 4.14, podem ser consultados os resultados relativos à massa volúmica aparente e, na Figura 4.18, pode ser visualizada uma representação gráfica dos mesmos.

Quadro 4.13 - Massa volúmica aparente dos agregados grossos

Agregados grossos	Massa volúmica aparente (kg/m ³)			
	Brita 3	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Calcário	-	1430	1430	1440
Granito	-	1340	1326	1384
Basalto	1514	1508	1470	1409
Mármore	-	1363	1378	1314

Quadro 4.14 - Massa volúmica aparente dos agregados finos

Agregados finos	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	
	Areia grossa	Areia fina
Areia	1550	1500

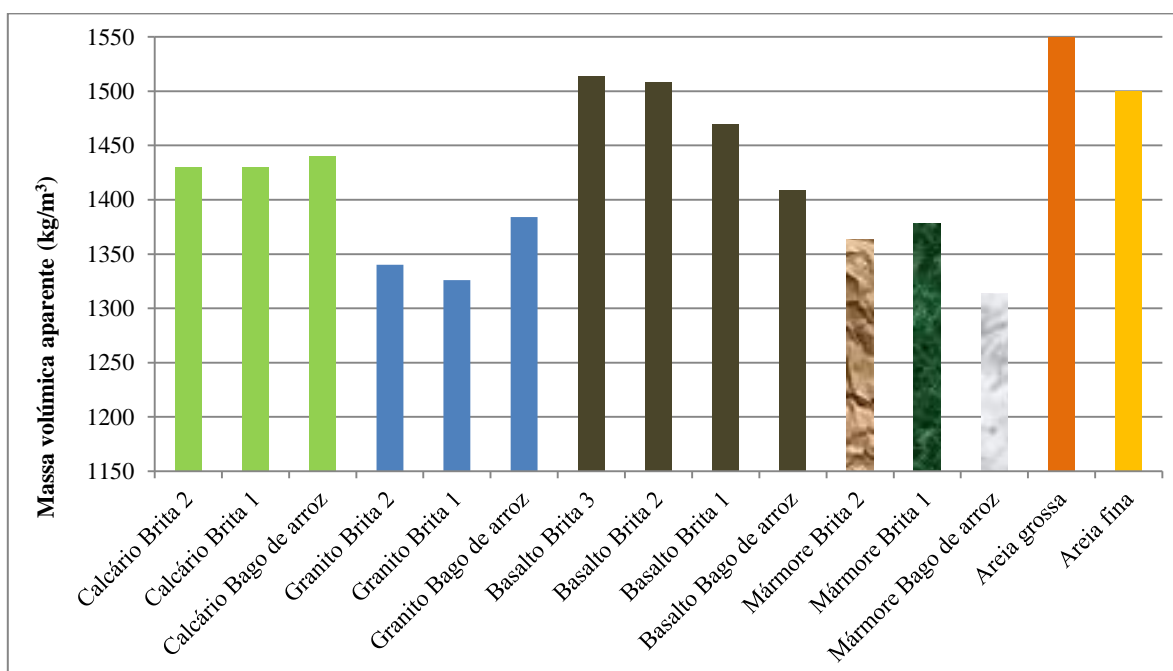


Figura 4.18 - Comparação da massa volúmica aparente dos agregados utilizados na presente campanha

No caso dos agregados grossos, foram os de basalto que apresentaram os valores mais elevados da massa volúmica aparente, à semelhança do que já tinha acontecido com a massa volúmica. Os valores mais baixos dizem respeito ao agregados de granito e mármore, sendo estes semelhantes.

No Quadro 4.15, podem ser observados alguns valores de massa volúmica aparente, obtidos por outros autores. Efectuando uma breve comparação, parece existir uma tendência para o basalto apresentar o valor mais elevado, no caso dos agregados grossos. Em geral, nota-se, porém, uma maior discrepância entre os valores aqui obtidos e os obtidos no caso da massa volúmica, sendo de referir que alguns autores nem apresentam os resultados referentes a este parâmetro, não o considerando tão relevante para a caracterização física de um agregado como a massa volúmica nos estudos em causa. De facto, a massa volúmica aparente, ou baridade, terá uma maior importância no âmbito da conversão de volumes em massa.

No caso dos finos, salientam-se os valores mais elevados do que os dos grossos. A justificação para tal poderá estar relacionada com a maior continuidade da curva granulométrica destes agregados, conforme pode ser consultado em 4.2.1, o que permite um melhor rearranjo espacial das partículas e, conseqüentemente, uma maior baridade.

Quadro 4.15 - Comparação entre a massa volúmica aparente dos agregados da presente campanha e a dos agregados de outros estudos

Referências / autores	Massa volúmica aparente (kg/m ³)				
	Brita de mármore	Brita de calcário	Brita de Granito	Brita de basalto	Areia
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	1578/1672 ³	1575/1551 ³	-	-	1723
Pereira <i>et al.</i> (2009)	1490	1360	1420	1630	1690
Martins (2012) (valores médios)	1352	1433	1350	1475	1525

³os dois valores resultam de fracções de dimensões diferentes.

4.2.4 Desgaste de *Los Angeles*

A especificação que serviu como fonte de indicações e princípios, para a determinação do desgaste de Los Angeles, foi a LNEC E-237 (1970). O processo abrasivo a que os agregados foram sujeitos e o modo de cálculo dos resultados foram descritos em detalhe no capítulo 3. A perda percentual de massa resultante do processo, para os vários agregados, pode ser consultada nos Quadros 4.16 a 4.20. Para mais fácil comparação dos resultados, pode ser observada uma representação gráfica na Figura 4.19.

De acordo com as indicações oriundas da referida especificação, o ensaio foi apenas realizado para os agregados grossos naturais, britas e bago de arroz.

Quadro 4.16 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de mármore

Agregados	Brita 2	Bago de arroz
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	39,10	38,52

Quadro 4.17 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de granito

Agregados	Brita 2	Bago de arroz
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	21,94	27,42

Quadro 4.18 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de basalto

Agregados	Brita 3	Brita 2	Bago de arroz
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	11,28	9,22	14,79

Quadro 4.19 - Resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos de calcário

Agregados	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	31,92	30,84	34,16

Quadro 4.20 - Resumo dos resultados do ensaio de desgaste de Los Angeles dos agregados grossos

Agregados	Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)			
	Brita 3	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Calcário	-	31,92	30,84	34,16
Granito	-	21,94	-	27,42
Basalto	11,28	9,22	-	14,79
Mármore	-	39,10	-	38,52

Nota: As amostras de britas 1 de granito, basalto e mármore não foram ensaiadas por inexistência, em laboratório, de quantidades suficientes para produzir as massas mínimas nas respectivas fracções exigidas pela norma. Devido à distribuição granulométrica, revelada pela análise do ensaio em laboratório, após o transporte a partir das pedreiras, seriam necessárias quantidades de matéria prima de brita 1 muito superiores às disponíveis nesta gama de dimensões.

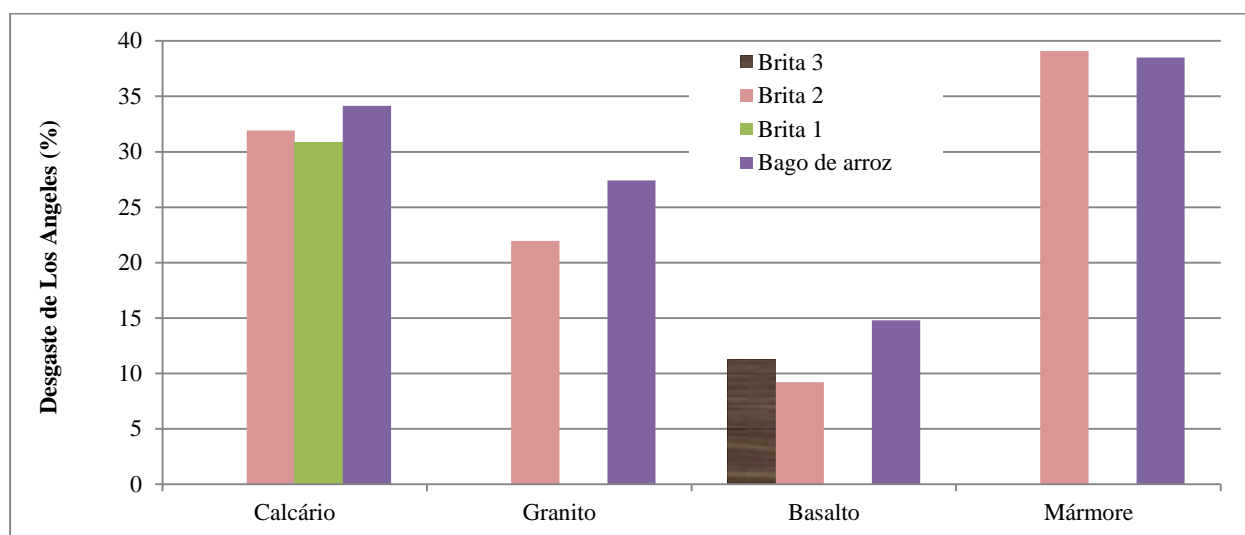


Figura 4.19 - Desgaste de Los Angeles para todos os agregados

Pode observar-se que existe uma tendência para os agregados de mármore apresentarem os valores mais elevados de desgaste de Los Angeles, logo seguidos pelos de calcário, enquanto que os de basalto se revelam como os mais resistentes a este desgaste. Poderá existir algum grau de relação entre esta propriedade e a massa volúmica, pois é esperado que uma estrutura mais densa possa ser mais resistente ao desgaste por existir uma maior massa e/ou um maior número de ligações entre as partículas por unidade de volume. Também o arranjo espacial entre as partículas, a nível macroscópico, traduzido na massa volúmica aparente, poderá conferir alguma defesa ao conjunto de partículas durante a realização do ensaio uma vez que a área de contacto exposta às esferas será maior de caso de massas volúmicas aparentes menores, a que corresponde um inferior arranjo entre as partículas. De facto, comparando os dados da Figuras 4.19 com as Figuras 4.16 e 4.18, nota-se, quer a nível de massa volúmica e massa volúmica aparente, quer a nível da resistência ao desgaste, um destaque por parte dos valores médios dos agregados de basalto relativamente aos valores dos restantes agregados, calcário, granito e mármore. Os valores mais baixos do basalto e do granito relativamente ao mármore e calcário poderão ainda

traduzir as naturezas de formação dessas rochas, de origem vulcânica ou ígnea onde a sua génese é acompanhada por ambientes de elevada pressão e temperatura conduzindo, em geral, a estruturas densas e compactas.

No Quadro 4.21, podem ser comparados os resultados da presente campanha com os de outros autores. Pode observar-se que os valores obtidos pelos vários autores são relativamente semelhantes e que os da presente campanha se enquadram no conjunto. Mais uma vez, salienta-se a tendência geral para os agregados de basalto se evidenciarem pelos menores valores de desgaste e os de mármore pelos maiores valores, dentro de cada estudo e no global (Figura 4.19). Por último, é aqui sublinhado o facto de todos os valores serem inferiores a 50%, o que respeita o limite máximo imposto pela especificação LNEC E-237 (1970), não sendo por aqui, portanto, que se pode apontar algum motivo para a não inclusão de qualquer destes tipos de agregados em betão.

Quadro 4.21 - Comparação entre o desgaste de *Los Angeles* dos agregados da presente campanha e o dos agregados de outros estudos.

Referências	Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)			
	Calcário	Granito	Basalto	Mármore
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	26,14	-	-	38,9
Akbulut e Gurer (2007)	25,46 / 20,91 ¹	-	-	27,44
Pereira <i>et al.</i> (2009)	37	26	15	41
Martins (2012) (Valores médios)	32,31	24,68	11,76	38,81

¹ Este autor utilizou dois tipos diferentes de calcário

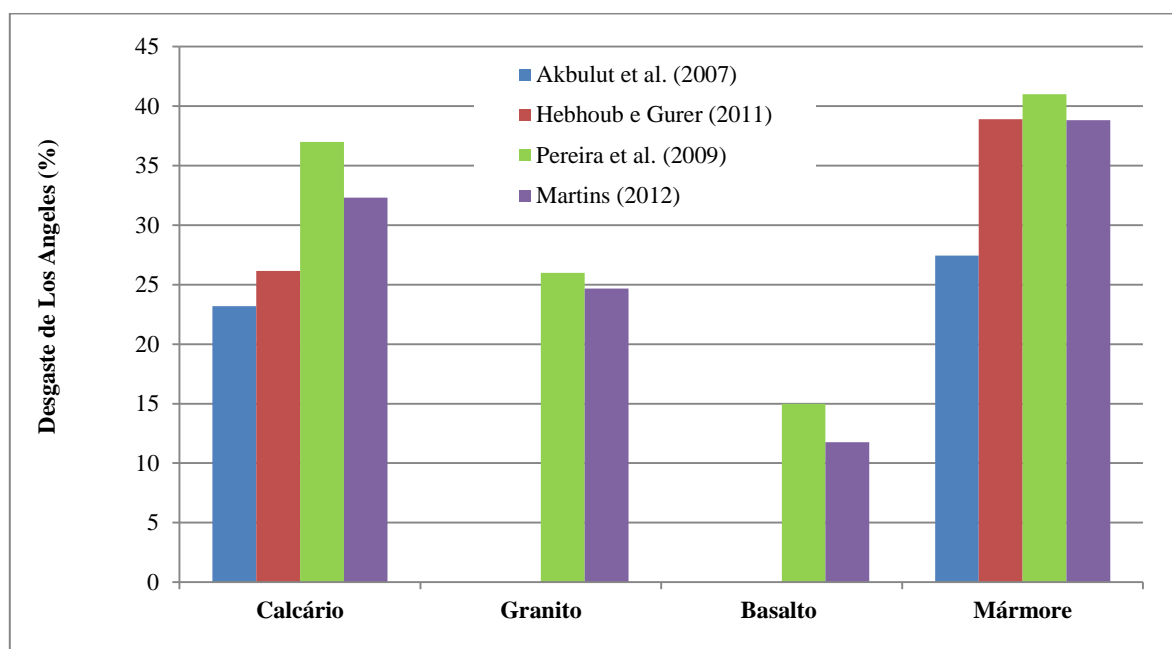


Figura 4.20 - Comparação dos valores, de diferentes campanhas, para o desgaste de *Los Angeles* (%)

4.2.5 Índice de forma

Os ensaios para a determinação do índice de forma basearam-se na norma NP EN 933-4 (2002). Os detalhes sobre a descrição do ensaio podem ser encontrados no capítulo 3.

De acordo com as indicações fornecidas pela respectiva norma, o ensaio foi apenas realizado para os agregados grossos naturais, britas e bago de arroz, não tendo, portanto, contemplado as areias.

A extensa e minuciosa análise estatística, extraída deste ensaio, fornece informação sobre a proporção de partículas alongadas nos agregados. Este género de informação é importante uma vez que o parâmetro, índice de forma, influencia directamente propriedades do betão no estado fresco e endurecido como a trabalhabilidade e compacidade (Jamkar e Rao 2004). A referida quantificação conduziu aos resultados indicados no Quadro 4.22. Na Figura 4.21, para mais fácil comparação, pode ser visualizada uma representação gráfica dos mesmos resultados.

Quadro 4.22 - Índice de forma dos agregados grossos (%)

Agregados	Brita 3	Brita 2	Brita 1	Bago de arroz
Mármore	-	28,8	31,6	30,1
Granito	-	40,0	48,8	24,9
Calcário	-	12,0	17,9	18,6
Basalto	21,8	17,0 ¹	25,4	29,5

¹ Brita 1,5 (esta designação está relacionada com a que é atribuída na pedra. As dimensões correspondentes a estas designações não coincidem de pedra para pedra, podendo ter-se material com a mesma designação mas com gamas de dimensões diferentes, pela natureza das britadeiras e pela natureza dos agregados que geram proporções das diferentes fracções diferentes e, conseqüentemente, diferentes distribuições granulométricas como pode ser observado em 4.2.1.

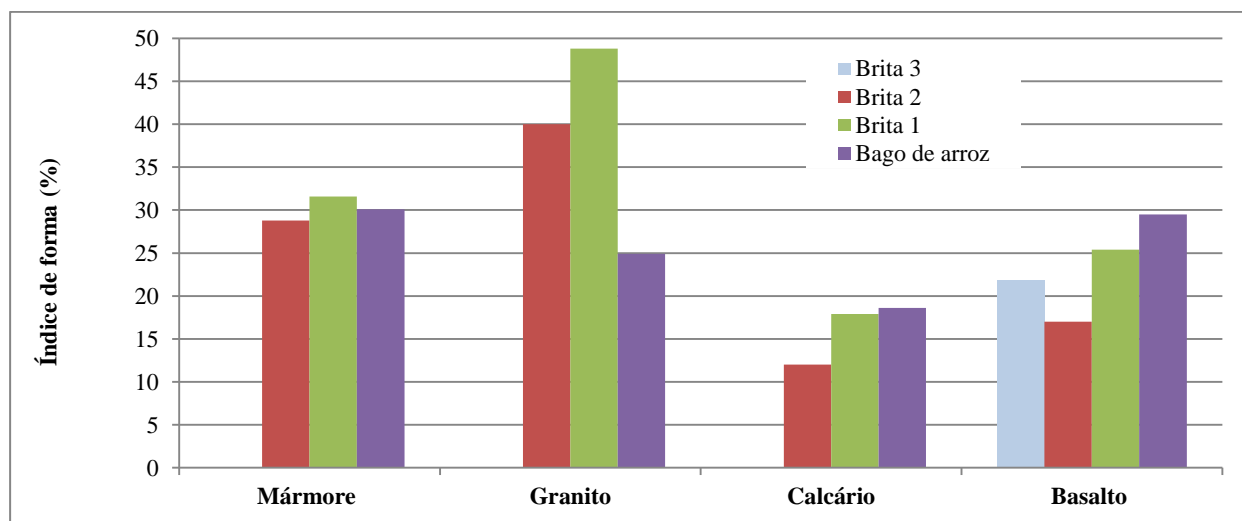


Figura 4.21 - Índice de forma para todos os agregados

Os valores mais elevados foram registados com os agregados de granito, à excepção do bago de arroz. Isto já era expectável, pois mesmo por simples inspecção visual, logo na recolha dos agregados na pedra em Montemor-o-Novo, era nítida uma abundância de partículas alongadas e com formas irregulares, nada semelhantes a formas esféricas ou cúbicas. As razões para tal poderão estar relacionados com as naturezas químicas e geológicas daquele tipo de granito em particular e pela interacção das britadeiras com os blocos de granito, o qual reagirá especificamente em termos de textura de fractura. Sem razão aparente, o bago de arroz de granito, de menores dimensões de partículas, não apresentou valores tão elevados como as britas de maiores dimensões. Este material sofre um processamento mais longo nas britadeiras não se sabendo até que ponto isso possa influenciar a fractura das partículas e, tendo o granito zonas

preferenciais de fracturação, a forma final das partículas possa ser condicionada pelo processo. Existe ainda a possibilidade de as extremidades angulosas das partículas menores, serem mais sensíveis a se desgastarem na britadeira, transporte e choque entre si até à altura da realização do ensaio. De facto, em todas os recipientes contentores do material foi possível notar uma excessiva acumulação de pó e detritos maiores resultantes do desgaste das partículas. Porém, a explicação poderá estar relacionada com outros factores de ordem física e/ou química.

No Quadro 4.23, pode ser observado um resumo dos valores médios de parâmetros relacionados com a formas dos agregados, obtidos na presente campanha e por outros autores. É necessário algum cuidado na comparação dos vários resultados. Segundo Jamkar e Rao (2004), as dimensões, distribuições granulométricas, forma e textura superficial dos agregados têm todas uma influência significativa sobre as propriedades do betão, quer no estado fresco, quer no endurecido. Porém, os autores afirmam que as especificações que dizem respeito ao tamanho e distribuição das partículas, segundo as várias normas e códigos, são mais claras do que as homólogas que dizem respeito à forma e textura da superfície das partículas. Argumentam que existe falta de uma definição rigorosa quanto à forma e textura superficial dos agregados e que isso conduz frequentemente a resultados inconsistentes na produção de betão, tornando-se necessário um número adicional de ensaios sobre os agregados para poder atingir determinadas propriedades desejáveis num betão. A falta de uniformização também é visível ao nível da investigação quando se tenta fazer uma comparação entre os parâmetros, relacionados com a forma, estudados por vários autores. São utilizados ensaios diferentes, ainda que com a mesma finalidade. Na presente dissertação, por exemplo, é utilizado o índice de forma, que corresponde ao quociente entre a massa das partículas não cúbicas e a massa da amostra conforme explicado em detalhe no capítulo 3.

Quadro 4.23 - Comparação dos valores, de diferentes campanhas, para parâmetros relacionados com a forma das partículas (%)

Referências	Índices indicativos da forma dos agregados			
	Calcário	Granito	Basalto	Mármore
Hebhoub <i>et al.</i> (2011) - índice de lamelação (<i>flakiness index</i>)	12-15	-	-	9-24
Akbulut e Gurer (2007) - índice de lamelação	3,54 /4,85 ¹	-	-	9,41
Giaccio e Zeberdino (1998) - índice de lamelação	-	64	-	-
Pereira <i>et al.</i> (2009) - índice volumétrico (Valores médios)	23,0	15,5	25,0	19,5
Martins (2012) (Valores médios)	16,2	37,9	23,4	30,2

¹ dois tipos de calcário

Outros autores utilizam o índice de lamelação ou achatamento (*flakiness index*) que mede a razão entre a massa das partículas lamelares, ou seja as partículas com espessura inferior a 60% da sua dimensão nominal, e a massa da amostra. Outro parâmetro utilizado é o índice de alongamento que corresponde à razão entre a massa das partículas alongadas, partículas em que o comprimento é superior a 1,8 vezes a sua dimensão nominal, e a massa da amostra. Outro parâmetro relacionado com a forma, que surge na literatura, é o índice volumétrico onde um valor próximo de 1 indica uma elevada percentagem de esfericidade em contraste com um valor baixo que sugere a presença de elevada percentagem de partículas alongadas. Outros autores

nem apresentam um parâmetro relacionado com a forma das partículas de agregado. Estes limitam-se a caracterizar os agregados pela dimensão, análise granulométrica, propriedades mecânicas. Esta situação leva a uma menor clareza na caracterização da forma dos agregados devendo, portanto, salientar-se que os valores obtidos pelos vários autores, quando é caso disso, só são indirectamente comparáveis.

As possíveis razões para algumas discrepâncias poderão estar relacionadas com as propriedades físicas dos agregados utilizados pelos diferentes investigadores, as naturezas geológicas dos mesmos, os processos de extracção, características específicas das diferentes britadeiras, provocando consequentemente determinadas zonas de fracturação preferenciais, ou ainda com erros experimentais.

4.3 Propriedades do betão no estado fresco

Neste subcapítulo, são analisados os resultados relacionados com as propriedades dos betões no estado fresco, designadamente a trabalhabilidade e a massa volúmica.

4.3.1 Abaixamento do cone de Abrams

O ensaio para determinação do abaixamento, utilizando o cone de Abrams, foi executado de acordo com os princípios indicados na norma NP EN 12350-2 (2002). Os detalhes sobre a execução do ensaio podem ser encontrados no capítulo 3.

No Quadro 4.24, podem ser observados os resultados respectivos às várias amassaduras. Para mais fácil comparação, podem ser visualizadas representações gráficas nas Figuras 4.22 e 4.23.

Quadro 4.24 - Abaixamento do cone de Abrams

Tipo de betão	Abaixamento médio (mm)		
	1ª betonagem	2ª betonagem	média
BRC	110	130	120
BC20	115	130	122,5
BC50	113	121	117
BRG	111	106	108,5
BG20	108	109	108,5
BG50	109	109	109
BRB	121	119	120
BB20	124	126	125
BB50	112	113	112,5
B100M	124	122	123

Os valores situaram-se no intervalo $[100; 130] \text{ mm}$ ($115 \pm 15 \text{ mm}$) que, por sua vez, está contido no de limites 100 e 150 mm, ou seja, enquadra-se na classe de consistência S3. Deste modo, conseguindo-se situar os vários abaixamentos dentro de um apertado intervalo, é possível comparar os vários betões. O abaixamento é uma medida da trabalhabilidade e consequentemente da qualidade de um betão. Não fará sentido comparar a viabilidade de alternativa de um betão face a outro, se não possuírem aproximadamente a mesma

trabalhabilidade uma vez que o valor desta propriedade pode inviabilizar a colocação em obra. É importante salientar que a relação água/cimento foi mantida constante para todas as amassaduras, no valor de 0,54, não havendo necessidade de corrigir dado os valores de abaixamento no cone de Abrams se terem mantido dentro do referido intervalo.

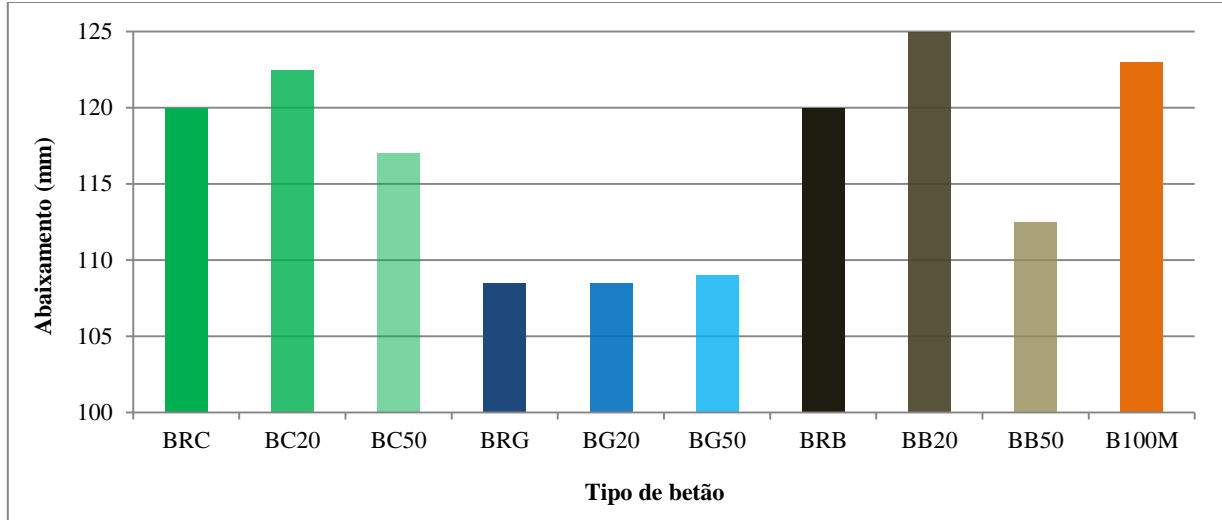


Figura 4.22 - Abaixamento do cone de Abrams

Observa-se que os betões com elevadas proporções de granito são os que apresentaram os menores valores de abaixamento e, portanto, de trabalhabilidade. Esta situação era esperada, atendendo aos elevados valores de índice de forma dos seus agregados a que corresponde uma elevada proporção de partículas não cúbicas, ou seja, alongadas. Será plausível admitir que a forma, irregular e alongada, possa contribuir para criar dificuldades em termos de deslizamento das partículas entre si. Assim sendo, do ponto de vista da trabalhabilidade, pode ser favorável a introdução de ASM na família de betões de granito (Figura 4.23) enquanto que, para as famílias de calcário e basalto, não se conclui o mesmo.

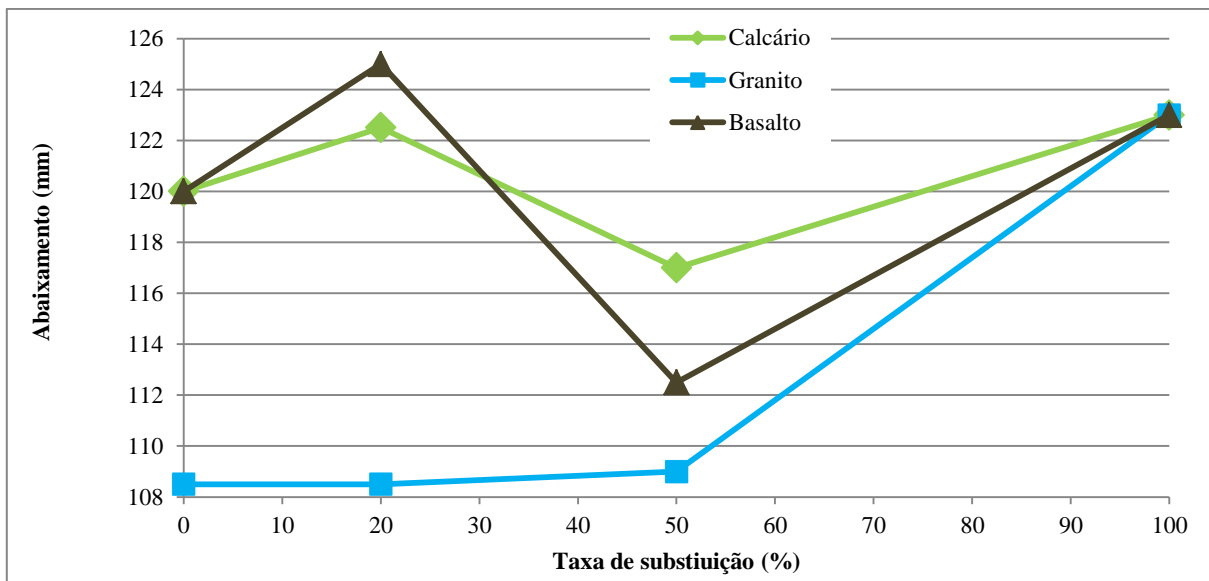


Figura 4.23 - Evolução do abaixamento do cone de Abrams, com a taxa de substituição

No Quadro 4.25, podem ser visualizados os resultados do trabalho de Hebhoub *et al.* (2011) em que se estudou o efeito da taxa de substituição de agregados grossos primários (AGP) de calcário por agregados grossos de mármore provenientes de desperdícios da indústria de extracção (AGSM), tal como os utilizados na presente campanha. Contudo, não é possível fazer uma comparação directa com os resultados da presente campanha uma vez que existem vários parâmetros diferentes como o tipo de calcário, o tipo de agregados finos, possíveis diferenças químicas dos mármore e o próprio procedimento de ensaio. Fica registado, de qualquer modo, que Hebhoub *et al.* (2011) obtiveram uma diminuição da trabalhabilidade com o aumento da taxa de substituição de agregados grossos de calcário por mármore, o que não foi evidente no presente estudo para a família de betões com calcário. Hebhoub *et al.* defendem, no entanto, que alguns dos factores que podem influenciar a trabalhabilidade deste tipo de betões são a distribuição granulométrica e forma dos agregados finos, a proporção de agregados finos para agregados grossos e as características dos materiais. Consideram que o parâmetro crítico na trabalhabilidade é o facto de os seus agregados naturais de calcário absorverem mais água do que os seus agregados de resíduos de mármore, o que é contraditório com a perda de trabalhabilidade nestes. Assim sendo, sublinham que a quantidade certa de água para as misturas necessita de correcção e depende das proporções das mesmas. Se forem observados os valores de absorção de água dos agregados de mármore de outros trabalhos citados, incluindo o de Hebhoub *et al.* (2011) e o da presente dissertação (Quadro 4.12), verificar-se-á que são menores relativamente aos dos outros agregados. Por esta via, e ao contrário do que Hebhoub *et al.* (2011) registaram, seria esperado que o aumento da taxa de substituição de AGP por AGSM não levasse a uma perda de trabalhabilidade, o que está de acordo com a tendência sugerida pela Figura 4.23.

Quadro 4.25 - Valor relativo do abaixamento, em função da taxa de substituição de agregados grossos de calcário por grossos de mármore

Taxa de substituição de agregados grossos de calcário por ASM (%)	Valor relativo do abaixamento (%)					
	0	20	25	50	75	100
Hebhoub <i>et al.</i> (2011) A/C=0,50	100	-	77	70	37	33
Martins (2012) A/C=0,54 (Valores médios)	100	102	-	98	-	103

A/C – Relação água/cimento.

Não existindo muitos estudos com introdução de várias taxas de substituição, como o de Hebhoub *et al.* (2011), são apresentados os resultados, no Quadro 4.26, referentes a autores que utilizaram taxas de substituição total (100%), ainda que alguns tenham linhas de estudo distintas da presente campanha. Salvaguardando as mesmas referidas limitações de comparação relativas ao Quadro 4.25, evidenciam-se os baixos valores de trabalhabilidade do granito para Giaccio e Zeberdino (1998). O panorama geral revela alguma discrepância entre os resultados mas as diferenças de materiais e procedimentos referidas, além da introdução de plastificantes por parte de alguns autores (na presente campanha não foram utilizados), tornam inviável fazer comparações e tirar ilações de modo mais rigoroso. Binici *et al.* (2008), por exemplo, além de utilizarem plastificante, não mantiveram a concentração deste constante para todas as amassaduras, tendo ajustado a quantidade nos casos de menor abaixamento, como no caso do

betão com granito, de modo a obterem abaixamentos semelhantes para todos os betões. Giaccio e Zeberdino (1998), que estudaram dois valores para a razão água / cimento (0,3 e 0,5) também utilizaram superplastificante no caso da razão água / cimento de 0,3 de modo a coseguir aumentar a trabalhabilidade. No betão com granito, obtiveram um abaixamento de 45 e 65 mm para as razões água / cimento de 0,3 e 0,4 respectivamente.

Quadro 4.26 - Abaixamento Δ (mm), em função do tipo de agregados grossos para substituição total

Referências	Abaixamento (mm)			
	Calcário	Granito	Basalto	Mármore
Binici <i>et al.</i> (2008) ¹ A/C=0,40	150	100	-	110
Pereira <i>et al.</i> (2009) A/C=0,44 (Valores médios)	110	110	130	130
Giaccio e Zeberdino (1998)	-	45 (A/C=0,3) ¹ 65 (A/C=0,5)	-	-
Martins (2012) A/C=0,54 (Valores médios)	120	109	120	123

¹Nestes estudos foram utilizados superplastificantes em diferentes concentrações consoante o tipo de agregado, com o objectivo de que os betões apresentassem abaixamentos semelhantes.

Pereira *et al.* (2009) utilizaram agregados grossos num estado relativamente seco, como o encontrado durante condições de verão em Portugal. Por isso, foi colocada água adicional em cada amassadura para compensar a absorção inicial dos agregados. Os autores determinaram o teor em água para cada caso e a quantidade adicional de água foi calculada considerando que os agregados podem absorver cerca de 70% do total de água correspondente à sua saturação, durante os primeiros minutos de mistura. Em alguns casos, efectuaram um segundo pequeno ajuste de água de modo a obter um abaixamento semelhante, defendendo que este ajustamento de água não afectou significativamente a relação água / cimento, uma vez que a água foi absorvida principalmente pelos agregados grossos. Contudo, verificaram que o betão produzido com mármore saturado necessitou de água adicional para se obter um abaixamento equivalente ao beão produzido com outros agregados, basalto e calcário. Não ficou muito claro para os autores qual a razão para ser necessário adicionar mais água no betão com agregados saturados de mármore de modo a ser possível obter a mesma trabalhabilidade de outros betões. No entanto, defendem que a explicação pode residir no índice volumétrico das partículas do mármore utilizado e na sua textura lisa o que resultaria numa atípica mistura coesa de baixa trabalhabilidade, sendo necessária mais água para contrariar esse efeito. Argumentam ainda que a água adicional afecta a relação água / cimento e a resistência à compressão, neste betão em particular e que isso deve ser considerado quando se analisam os resultados experimentais mas que, de um ponto de vista prático, os seus betões foram produzidos, colocados e compactados da maneira como se pretendia no seu estudo. Pereira *et al.* (2009) concluem que, independentemente do tipo de agregado, os betões produzidos com agregados saturados, antes de se juntar a água, apresentam menor absorção e permeabilidade ao ar do que os betões com agregados introduzidos num estado relativamente seco, sendo provável que, na situação em os agregados estão saturados, não exista absorção a partir da zona cimentícia criando uma interface com pasta de cimento-agregado mais densa. De outro modo, se o agregado estiver seco, irá absorver água contribuindo para uma zona de interface cimento-agregado mais porosa.

Constata-se, portanto, que os poucos estudos existentes nesta área nem sempre têm a mesma finalidade, como defendido por Hebhouh *et al.* (2011). Assim sendo, será importante incluir, nas campanhas futuras, trabalhos de investigação em que se elimine a variação de determinados parâmetros, no sentido de verificar a influência no abaixamento do cone de Abrams, exclusivamente devida ao tipo de agregado e percentagem de substituição de agregados grossos primários (AGP) por agregados grossos secundários de mármore (AGSM), como aconteceu no presente estudo.

4.3.2 Massa volúmica

O ensaio de determinação da massa volúmica foi realizado de acordo com a metodologia e princípios estabelecidos pela norma NP EN 12350-6 (2002), como descrito no capítulo 3.

Ao analisar os resultados do ensaio da massa volúmica do betão, no estado fresco, é possível tirar ilações sobre a compacidade do betão e, conseqüentemente, relacionar com a porosidade que apresentará no estado endurecido.

No Quadro 4.27, podem ser observados os resultados obtidos no ensaio de massa volúmica do betão no estado fresco. Para cada tipo de betão, foram efectuadas duas betonagens pelo que se apresenta, à semelhança do abaixamento, também uma coluna com os valores médios. Uma representação gráfica dos mesmos resultados pode ser observada na Figura 4.24 e na Figura 4.25 pode ser visualizada uma comparação da evolução, em função da taxa de substituição de agregados grossos primários (AP) por agregados grossos secundários de mármore (AGSM) para as três famílias de betões (granito, calcário e basalto; agregados primários AP).

Quadro 4.27 - Massa volúmica do betão no estado fresco para todos os tipos de betão

Agregado	Tipo de betão		Massa volúmica (kg/m ³)		
	designação	Taxa de substituição (%)	1ª betonagem	2ª betonagem	Valor médio
Calcário	BRC	0	2373	2370	2371
	BC20	20	2377	2404	2391
	BC50	50	2398	2374	2386
Granito	BRG	0	2397	2388	2393
	BG20	20	2400	2422	2411
	BG50	50	2401	2381	2391
Basalto	BRB	0	2451	2490	2470
	BB20	20	2462	2465	2463
	BB50	50	2439	2428	2433
Mármore	B100M	100	2331	2402	2366

No caso do basalto, onde aparecem os maiores valores, devido à maior densidade dos agregados, parece existir uma tendência para a redução da massa volúmica à medida que se aumenta a taxa de substituição enquanto que, nos casos do calcário e do granito, essa redução só é notória quando a substituição é completa, para o nível de substituição de 100%. O aumento, face ao respectivo betão de referência, nos níveis de substituição de 20%, para o calcário e granito, e no nível de 50%, no caso do calcário, poderá ser devido a uma favorecimento do arranjo das partículas no betão, quando este passa a acomodar um conjunto de agregados diferentes, misturando diferentes índices de forma. Este arranjo poderá, de alguma maneira,

contribuir para um aumento da compacidade quando se mistura calcário com mármore ou granito com mármore.

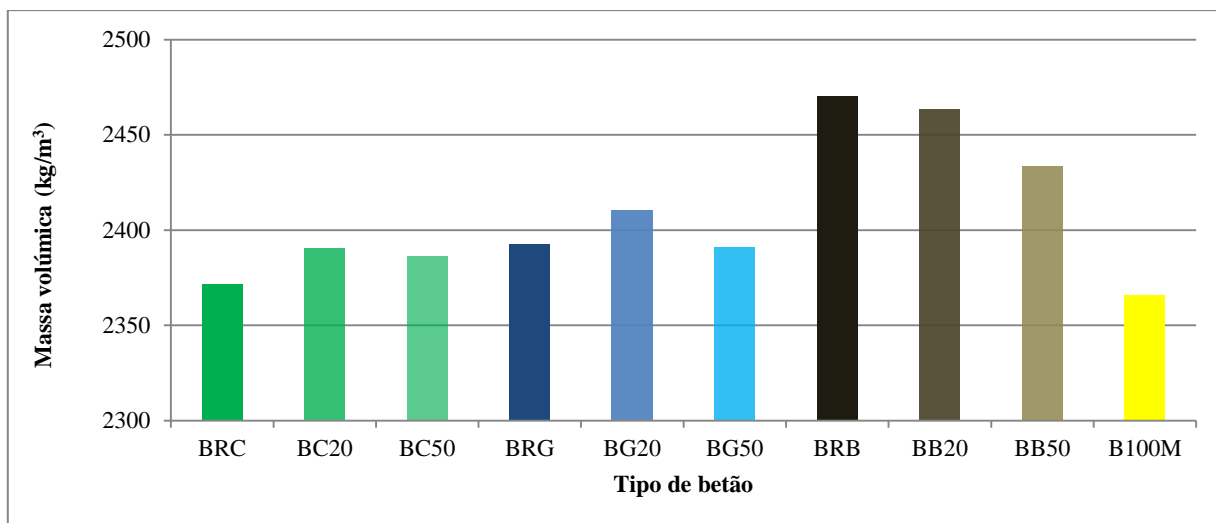


Figura 4.24 - Massa volúmica do betão no estado fresco para todos os tipos de betão (acrónimos - ver Quadro 4.27)

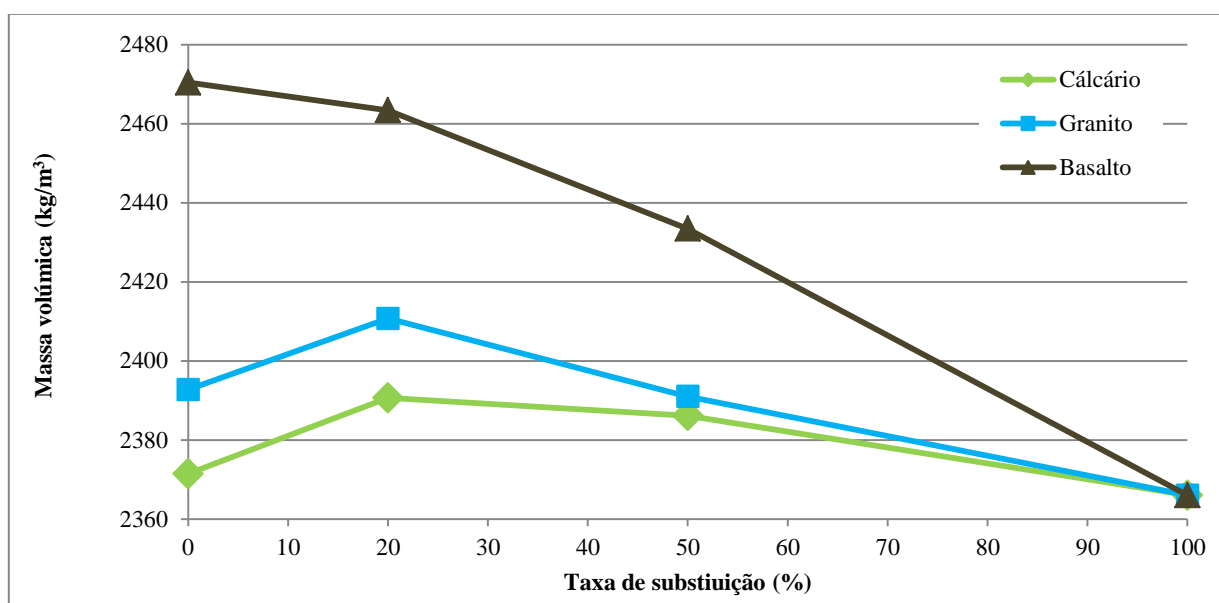


Figura 4.25 - Massa volúmica em função da taxa de substituição para as três famílias de betão

No Quadro 4.28, podem ser visualizados os resultados do trabalho em que se estudou o efeito da taxa de substituição de AGP, agregados grossos primários (naturais), de calcário por agregados grossos de mármore provenientes de desperdícios da indústria de extração, tal como os utilizados na presente campanha, AGSM. Para mais fácil comparação, pode ser visualizada uma representação gráfica na Figura 4.26. É possível verificar que, no estudo de Hebhoub *et al.* (2011), existe uma tendência para a diminuição da massa volúmica com o aumento da taxa de substituição, o que só é visível, na presente campanha, para a taxa de substituição de 100%. As referidas diferenças de procedimentos e características dos materiais não permitem elaborar comparações mais conclusivas.

Quadro 4.28 - Evolução da massa volúmica em função da taxa de substituição para o betão de referência de calcário

Taxa de substituição de agregados grossos de calcário por AGSM (%)	Massa volúmica (kg/m ³)					
	0	20	25	50	75	100
Hebhoub <i>et al.</i> (2011)	2455	-	2420	2422	2410	2430
Martins (2012) (Valores médios)	2371	2391	-	2386	-	2366

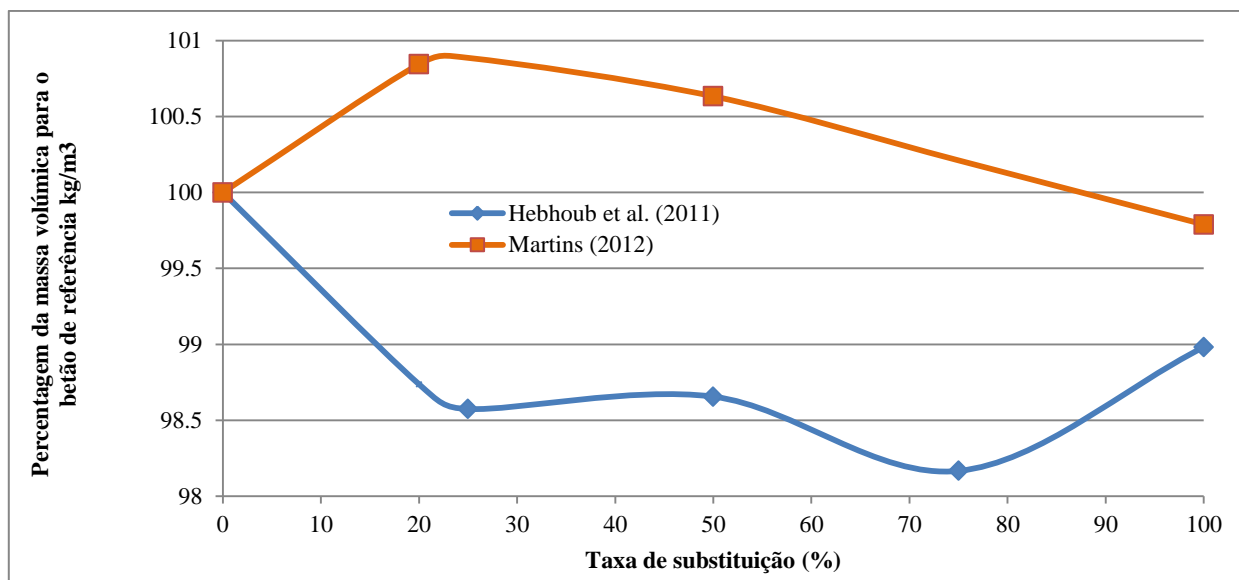


Figura 4.26 - Evolução da massa volúmica em função da taxa de substituição para o betão de referência de calcário

No Quadro 4.29, podem ser observados os resultados de Binici *et al.* (2008) que estudaram betões com apenas um tipo de agregado grosso: com calcário designado como controlo, com granito (desperdícios) e com mármore (resultantes de desperdícios como os utilizados na presente campanha). Os resultados são relativamente semelhantes não se fazendo comentários mais elaborados pelas razões referidas, relacionadas com as diferenças nos estudos. Refira-se que alguns autores, citados nos quadros anteriores, não apresentam dados relativamente à massa volúmica no estado fresco dos seus betões.

Quadro 4.29 - Comparação dos resultados de massa volúmica do betão no estado fresco nos estudos de Binici *et al.* (2008) e na presente campanha para substituição total

Referências	Massa volúmica (kg/m ³)			
	Calcário	Granito	Basalto	Mármore
Binici <i>et al.</i> (2008)	2396	2395	-	2375
Martins (2012) (Valores médios)	2371	2393	2470	2366

4.4 Propriedades do betão no estado endurecido falta corrigir daqui para a frente

Nesta secção, são feitas a apresentação e discussão dos resultados relativos ao comportamento mecânico dos betões. Estes ensaios, descritos em detalhe no capítulo 3,

contemplam a resistência à compressão, a resistência à tracção por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência à abrasão.

A linha de estudo centra-se no efeito que o nível de substituição tem no comportamento mecânico das 3 famílias de betões. Apesar de existirem poucas campanhas experimentais com estudos sobre a influência da taxa de substituição de agregados grossos primários por agregados grossos secundários de mármore em betões para fins estruturais, são feitas comparações entre estas e os resultados da presente campanha experimental. São também abordados outros estudos que de alguma maneira, ainda que não apresentem exactamente os mesmos alvos ou não contemplem o mesmo tipo de agregados quer por estes não serem de mármore ou por não serem secundários, possam ser comparados com a presente campanha experimental. Tais estudos já foram abordados no capítulo 2 e pretende-se agora fazer uma globalização dos dados, confrontando-os com os resultados obtidos. É importante salientar a questão de a relação água/cimento ter sido mantida constante no valor de 0,54 para todas as amassaduras pois, como referido, conseguiram-se abaixamentos no cone de Abrams semelhante para todos os betões, com valores contidos entre 100 e 130 mm.

4.4.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em conformidade com as especificações estipuladas pela norma NP EN 12390-3 (2003), descritas em detalhe no capítulo três.

No Quadro 4.30, podem ser encontrados os resultados do ensaio de resistência à compressão relativos às três idades de cura ensaiadas, 7, 28 e 56 dias. Nas Figuras 4.26 a 4.38, são apresentadas as representações gráficas dos resultados correspondentes às três famílias de substituição de AGP, calcário, granito e basalto, por AGSM à idade de 7 dias.

Quadro 4.30 - Resistência à compressão

Tipo de betão	f_{cm7} (MPa)	Δ (%)	Regressão Linear	f_{cm28} (MPa)	Δ (%)	Regressão Linear	f_{cm56} (MPa)	Δ (%)	Regressão linear
BRC	34,44	-	$y = -0,0138x + 34,357$ $R^2 = 0,78$	43,39	-	$y = -0,0174x + 43,911$ $R^2 = 0,64$	45,33	-	$y = 0,0093x + 47,452$ $R^2 = 0,05$
BC20	33,73	-2,1		43,79	+0,9		49,54	+9,3	
BC50	34,07	-1,1		43,73	+0,8		49,11	+8,3	
B100M	32,85	-4,6		41,78	-3,7		47,41	+4,6	
BRG	35,02	-	$y = -0,0196x + 34,758$ $R^2 = 0,92$	46,59	-	$y = -0,0419x + 45,538$ $R^2 = 0,80$	49,87	-	$y = -0,0209x + 49,101$ $R^2 = 0,64$
BG20	34,01	-2,9		43,68	-6,2		48,07	-3,6	
BG50	33,82	-3,4		42,98	-7,7		47,51	-4,7	
B100M	32,85	-6,2		41,78	-10,3		47,41	-4,9	
BRB	34,47	-	$y = -0,0103x + 33,851$ $R^2 = 0,29$	45,93	-	$y = -0,0367x + 45,524$ $R^2 = 0,89$	51,08	-	$y = -0,0301x + 50,254$ $R^2 = 0,73$
BB20	32,66	-5,2		44,00	-4,2		48,55	-5,0	
BB50	33,67	-2,3		44,14	-3,9		48,86	-4,4	
B100M	32,85	-4,7		41,78	-9,0		47,41	-7,2	

Muitos investigadores, na área de agregados reciclados, consideram a hipótese de uma relação aproximadamente linear entre a resistência à compressão e a taxa de substituição de agregados naturais por agregados reciclados. Alguns resultados obtidos nessa área apoiam a

hipótese. Porém, o trabalho da presente dissertação não deve ser incluído no mesmo lote do que os referidos trabalhos uma vez que os agregados grossos utilizados não provêm de um material já utilizado, ao contrário dos agregados resultantes da trituração de betão, borracha, plásticos ou vidro por exemplo. Os agregados grossos secundários de mármore (AGSM) apenas têm origem numa indústria que não tem como finalidade principal a produção de agregados para incorporação em betão, quer este seja ou não estrutural. Como referido, os agregados resultam de desperdícios resultantes da indústria de rochas ornamentais (RO). Dados os poucos estudos nesta área, e não sendo conclusivos como são exemplo os de Binici *et al.* (2008) e de Hebhouh *et al.* (2011), não se tinha ideia à partida de que tipo poderia ser, no caso de existir, a relação entre a taxa de incorporação de AGSM e a resistência à compressão. De qualquer modo, numa primeira abordagem, foi considerada e discutida a hipótese de relação linear. As equações de regressão linear e os respectivos coeficientes de correlação podem ser consultadas no Quadro 4.30.

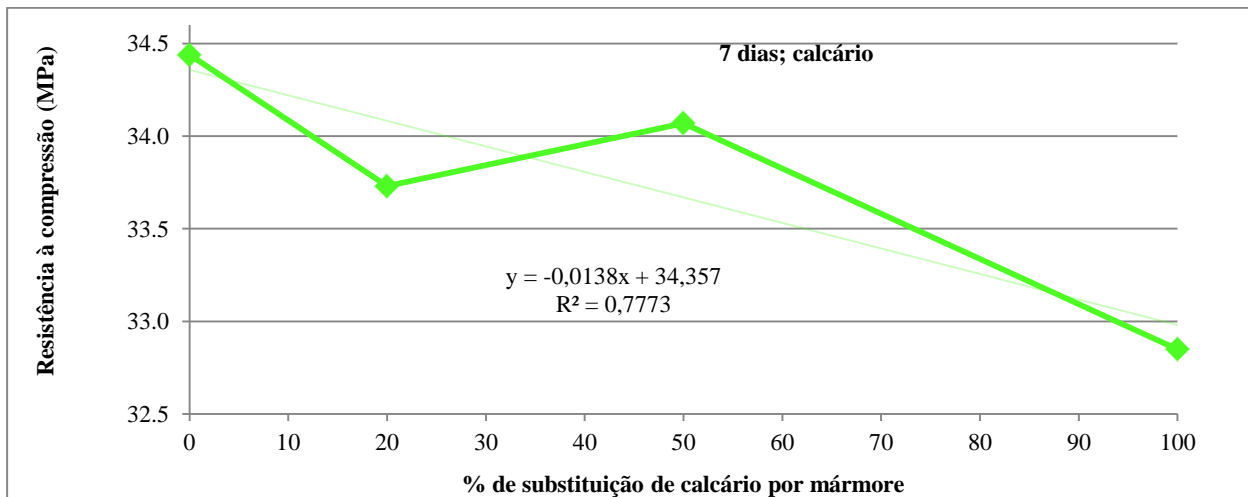


Figura 4.27 - Resistência à compressão aos 7 dias: família calcário

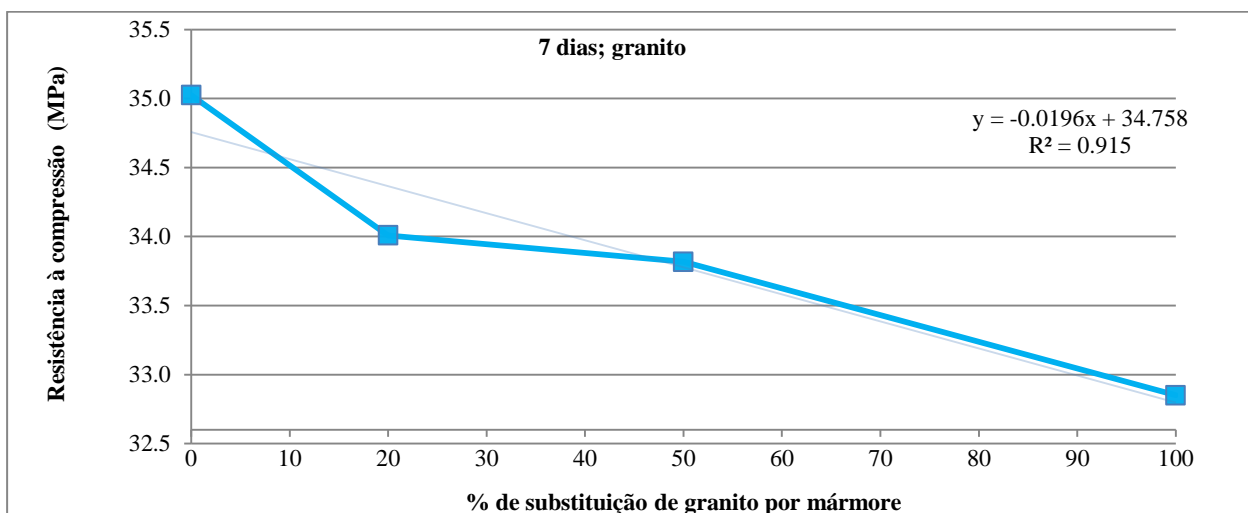


Figura 4.28 - Resistência à compressão aos 7 dias: família granito

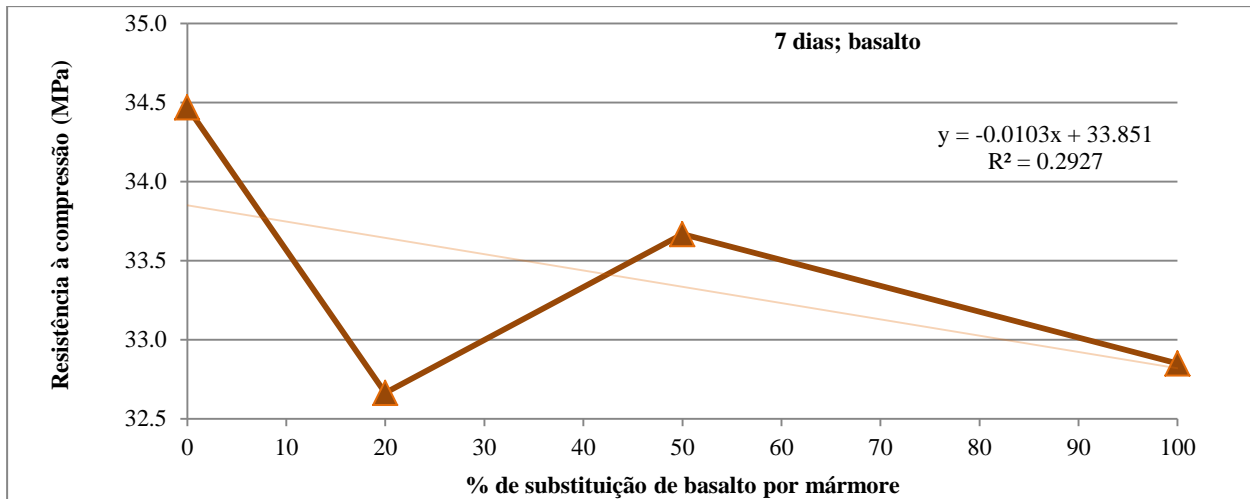


Figura 4.29 - Resistência à compressão aos 7 dias: família basalto

Nas Figuras 4.30 a 4.32, podem ser observadas as representações gráficas dos resultados correspondentes às três famílias de substituição de AGP, calcário, granito e basalto, por AGSM à idade de 28 dias.

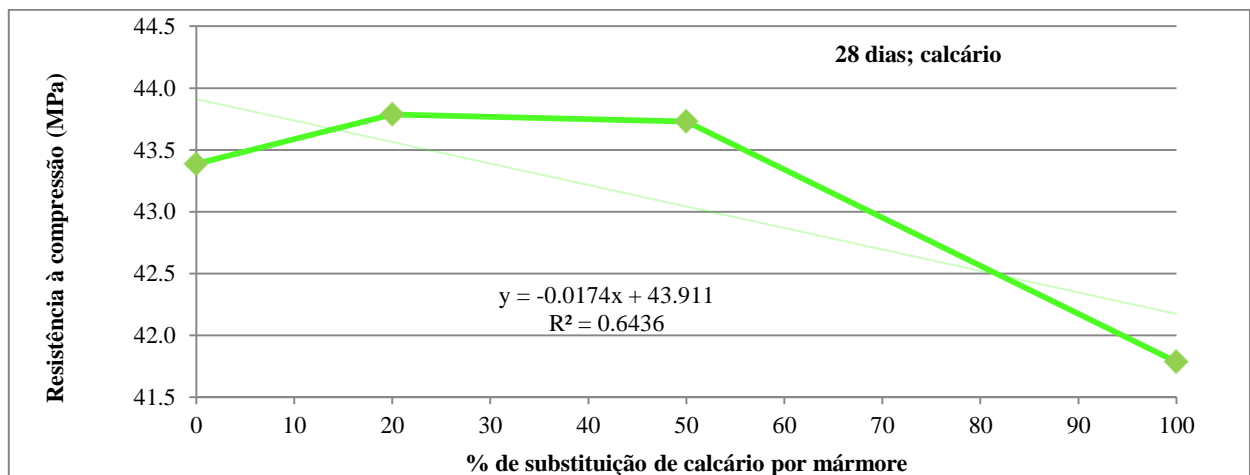


Figura 4.30 - Resistência à compressão aos 28 dias: família calcário

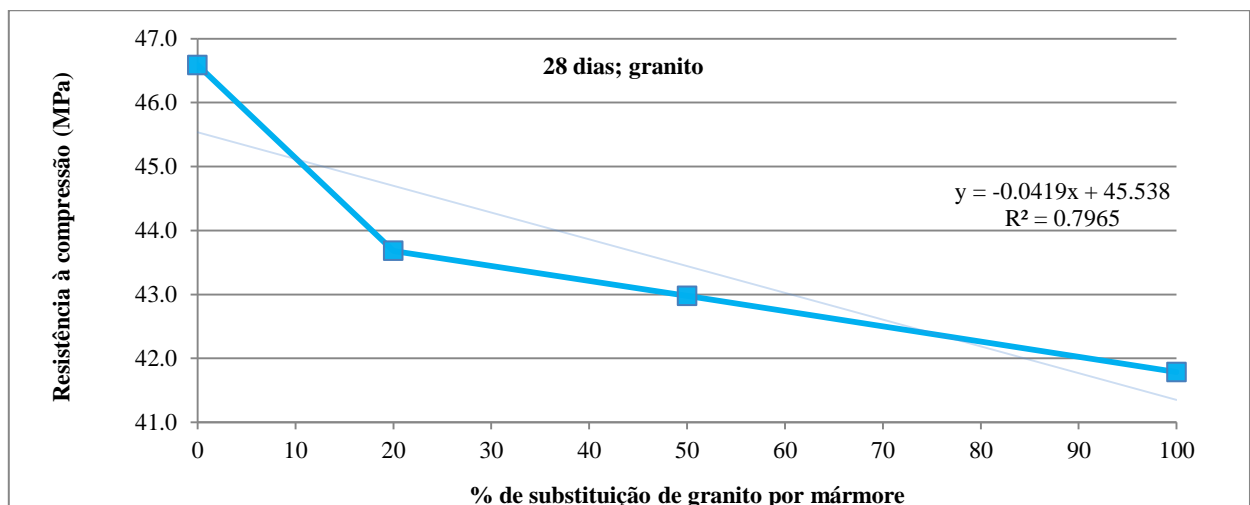


Figura 4.31 - Resistência à compressão aos 28 dias: família granito

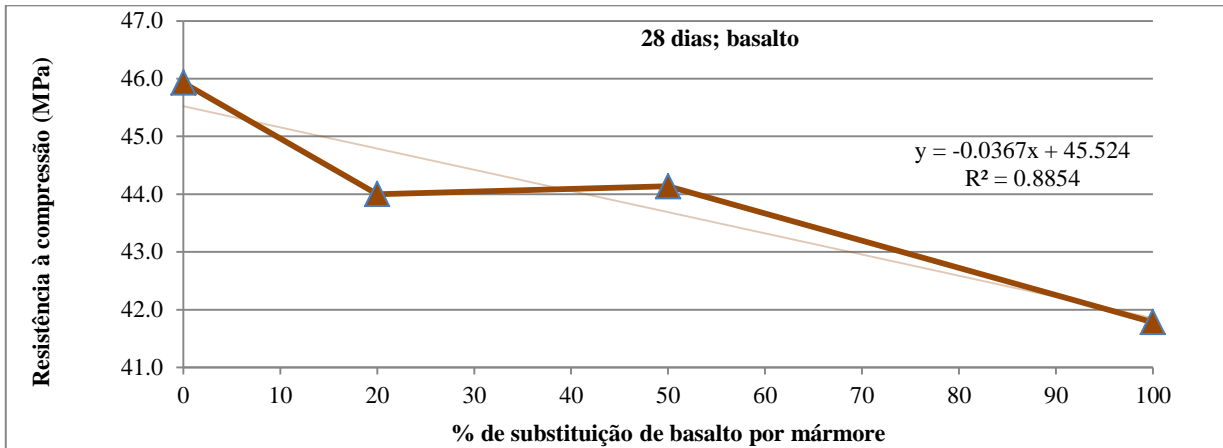


Figura 4.32 - Resistência à compressão aos 28 dias: família basalto

Nas Figuras 4.33 a 4.35, podem ser consultadas as representações gráficas dos resultados correspondentes às três famílias de substituição de AGP, calcário, granito e basalto, por AGSM à idade de 56 dias.

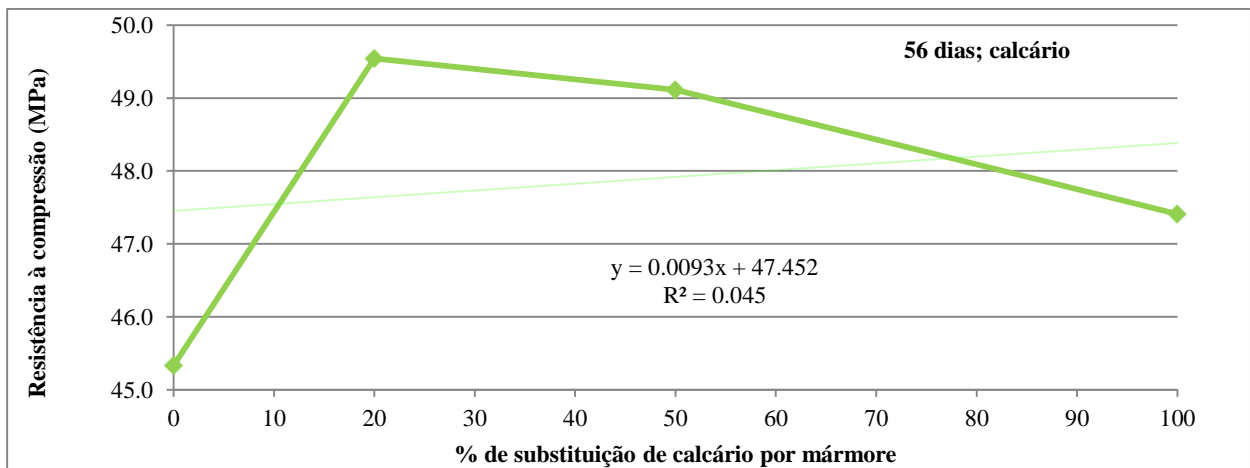


Figura 4.33 - Resistência à compressão aos 56 dias: família calcário

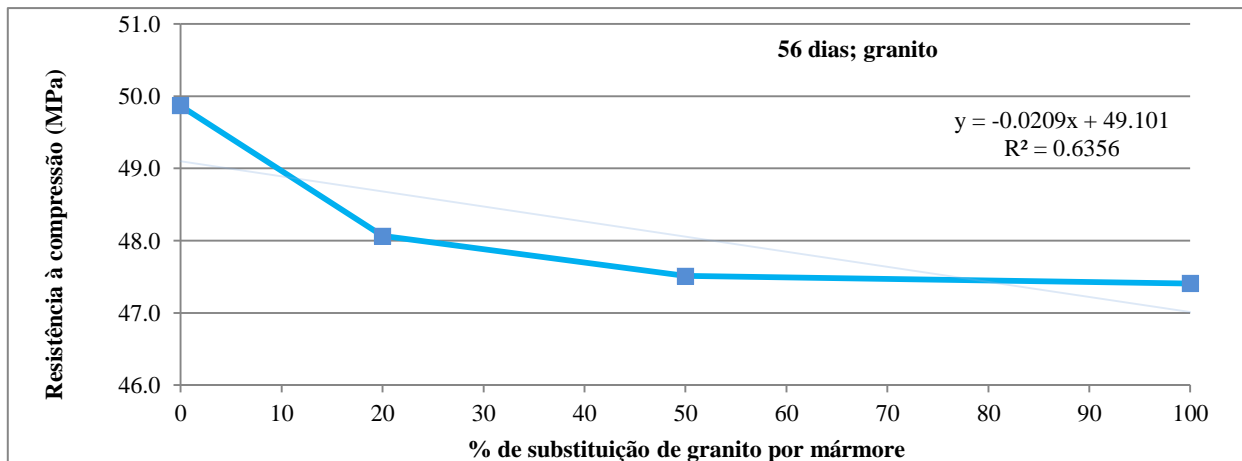


Figura 4.34 - Resistência à compressão aos 56 dias: família granito

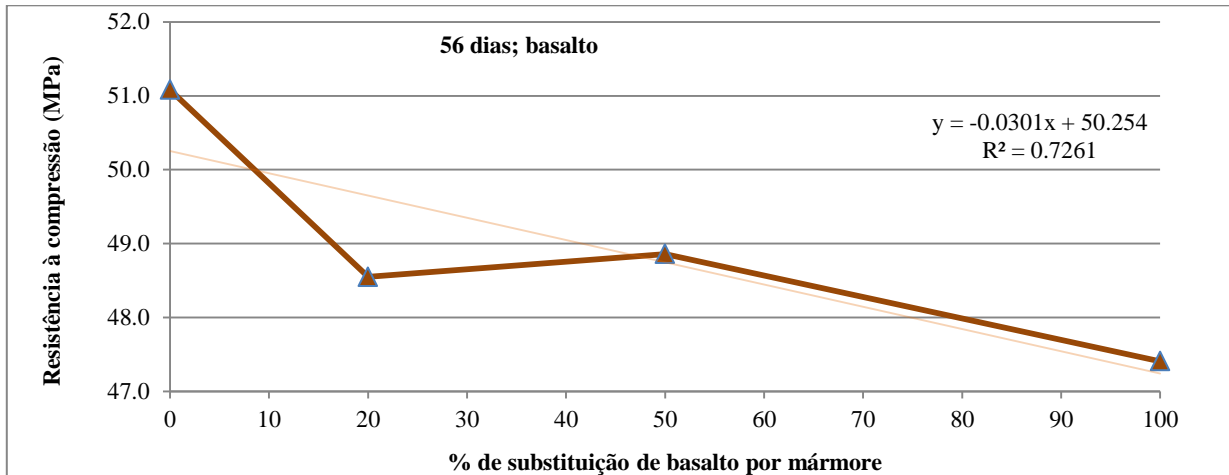


Figura 4.35 - Resistência à compressão aos 56 dias: família basalto

Nas Figuras 4.36 a 4.38, para mais fácil comparação, podem ser observados os resultados de todas as famílias de betões para cada idade.

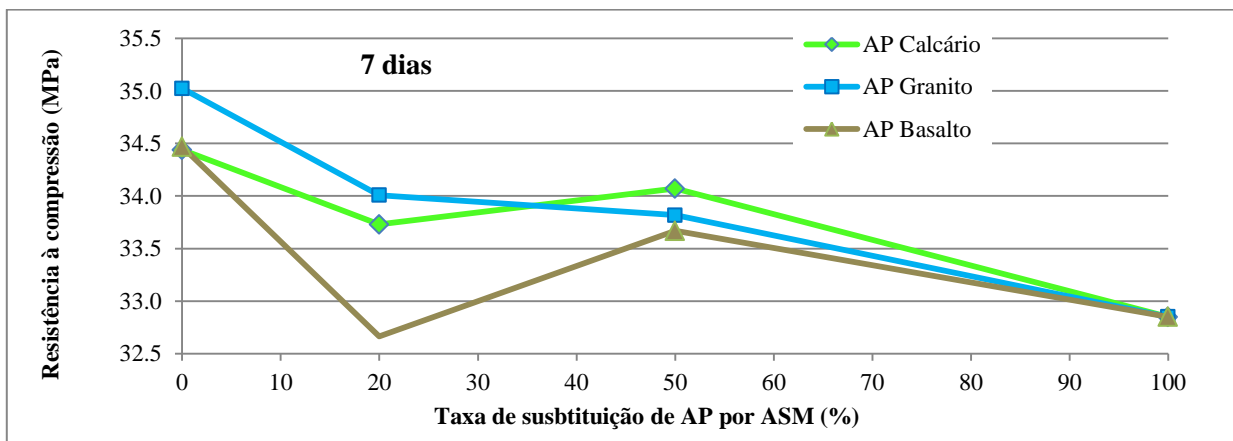


Figura 4.36 - Resistência à compressão à idade de 7 dias

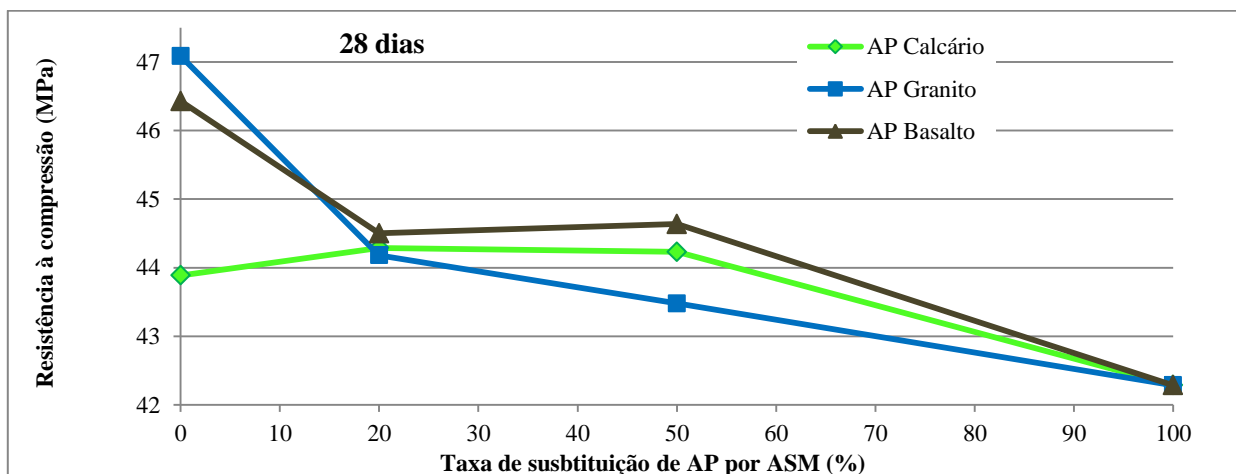


Figura 4.37 - Resistência à compressão à idade de 28 dias

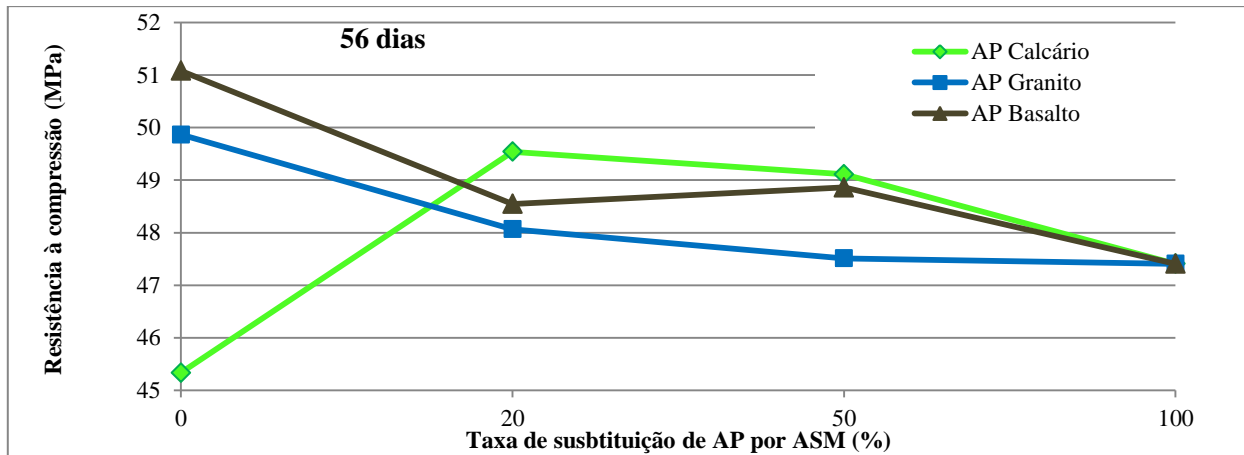


Figura 4.38 - Resistência à compressão à idade de 56 dias

Na Figura 4.39, pode ser visualizadas as representações gráficas da resistência à compressão em função da idade de cura, repetitantes a todos os betões realizados.

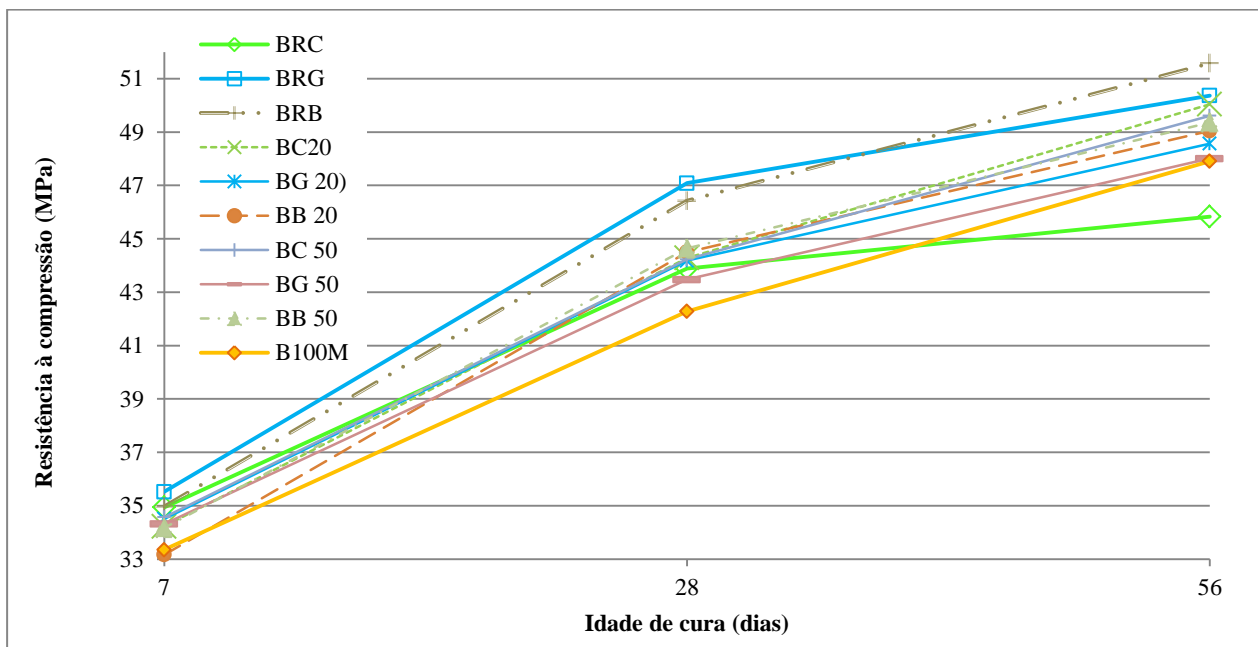


Figura 4.39 - Evolução da resistência à compressão com a idade de cura

Relativamente à hipótese de existir uma relação linear, os dados não são esclarecedores. Apenas na família de granito, para a idade de 7 dias, se regista um valor superior a 0,90 para o coeficiente de correlação. Apenas aqui os dados apontam no sentido de a variável resistência à compressão ser explicada pela variável taxa de substituição em cerca de 92%. Se for observado o que acontece com esta família para idades superiores, chega-se a menores valores, 80% e 64% para as idades de 28 e 56 dias respectivamente. Para as restantes famílias, os respectivos valores são, em média, mais baixos, nalguns casos insignificantes. Nestes últimos, os dados sugerem que a variável resistência não parece ser explicada pela variável taxa de substituição, o que apontaria para a conclusão de que incorporar AGSM em betões estruturais não levantaria problemas no que diz respeito a esse parâmetro. Porém, pela análise mais detalhada dos dados, podem ser identificados alguns pontos singulares que, se não considerados, conduziriam a valores do coeficiente de correlação superiores, como é o caso do valor da resistência à compressão para o

basalto na taxa de substituição de 20% aos 7 dias (o valor de R^2 passaria de 0,29 para 1,00) e o correspondente à taxa de substituição de 0% para o calcário (BRC) aos 56 dias (o valor de R^2 passaria de 0,29 para 0,96). Pode ser colocada a hipótese de ter havido alguma anomalia com os referidos pontos quer por erros experimentais na própria amassadura quer por outra situação não detectada.

Relativamente à análise global dos dados, pode observar-se que estes sugerem, independentemente do tipo de relação, uma ligeira diminuição da resistência à compressão com a taxa de substituição de AGP por AGSM, para todas as taxas de substituição (20, 50 e 100%) e para todas as idades de betão estudadas (7, 28 e 56 dias), o que é apoiado pelo valor sempre negativo ou próximo de zero do declive da recta de regressão linear. Para a taxa de substituição de 20%, regista-se uma acentuada diminuição da resistência à compressão para todos os betões e idades, relativamente ao betão de referência (BR), excepto para o calcário aos 28 e 56 dias de idade. Curiosamente, verifica-se uma ligeira melhoria ao nível da taxa de substituição de 50% para alguns betões. A referida diminuição da resistência à compressão para a taxa de substituição de 20% pode ser explicada, em parte, pela relação água/cimento (A/C) efectiva. Relembrando os resultados do abaixamento, observou-se que estes se situaram dentro de um intervalo [100;130] mm, não sendo necessário alterar a relação A/C que foi sempre 0,54. Porém, isso não significa que a relação A/C efectiva se mantenha exactamente constante porque a água disponível para hidratação do ligante pode ser absorvida em doses diferentes por parte das diferentes misturas de agregados. Isso pode explicar a ligação entre os maiores valores de abaixamento, medida indirecta da A/C efectiva, que estão perto do limite superior do intervalo para as taxas de substituição de 20% (famílias de calcário e basalto) e a sua relativa menor resistência do betão à compressão no estado endurecido. Um excesso de água maior do que o estritamente necessário para a hidratação do cimento pode corresponder a uma maior trabalhabilidade mas conduzir a uma maior porosidade do betão, o que se traduz numa menor resistência à compressão. Por outras palavras, o caso do abaixamento superior para 20% poderá dever-se a uma incorporação de água superior na interface agregado-pasta cimentícia que pode, por um lado, favorecer a trabalhabilidade, mas por outro prejudicar a ligação do agregado à pasta e/ou conduzir a uma maior porosidade.

A aparente tendência para a diminuição da resistência, com a incorporação de AGSM, poderia eventualmente ser expectável por parte de alguns autores, pois os resíduos dos blocos de extracção de mármore (rocha considerada suave) terão estado sujeitos a grandes impactos que poderão ter criado algum tipo de microfendilhação, ou outros danos, mesmo antes de serem direccionados para as britadeiras onde sofrem impactos adicionais. Também as naturezas química e geológica dos agregados, bem como as características físicas analisadas nas secções anteriores, terão tido influência na referida perda de resistência.

Percentualmente, a diminuição da resistência, com a taxa de substituição, sentida em geral para todos os betões, para todas as idades, é inferior às perdas registadas em estudos com substituição de agregados primários (AP) por outros tipos de agregados secundários (AS). O valor mais elevado de perda para o betão de referência, 10,3%, foi obtido com o caso da família de granito aos 28 dias, com taxa de substituição de 100%. Nos restantes casos, a perda foi sempre inferior a 10%, o que representa uma gama de valores de perda inferior aos valores comumente encontrados para betões com incorporação, por exemplo, de agregados reciclados da

indústria da construção, agregados de borracha, agregados de plástico ou agregados de vidro, colocando os AGSM num superior patamar de qualidade face a esses.

Na Figura 4.40, podem ser comparados os resultados de Binici *et al.* (2008) com os da presente campanha. O aspecto mais evidente é o valor invariavelmente baixo do betão de controlo de calcário de Binici *et al.* face ao panorama geral dos betões restantes, onde existe semelhança entre os valores dos autores e os da presente campanha. As conclusões de Binici *et al.*, afirmando que substituir calcário por mármore é favorável do ponto de vista mecânico, podem dever-se não ao mármore mas ao facto de o seu calcário ser fraco, como sugerem os resultados da Figura 4.40. De facto, os resultados das Figuras 4.27 a 4.39 sugerem quase sempre a tendência de o comportamento mecânico do betão piorar quando se aumenta a taxa de substituição de calcário, granito ou basalto, por mármore. Ainda assim, as percentagens de perda são menores relativamente à incorporação de outros agregados secundários referidos, pelo que a perda citada não será razão suficiente para a não incorporação de AGSM em betões estruturais.

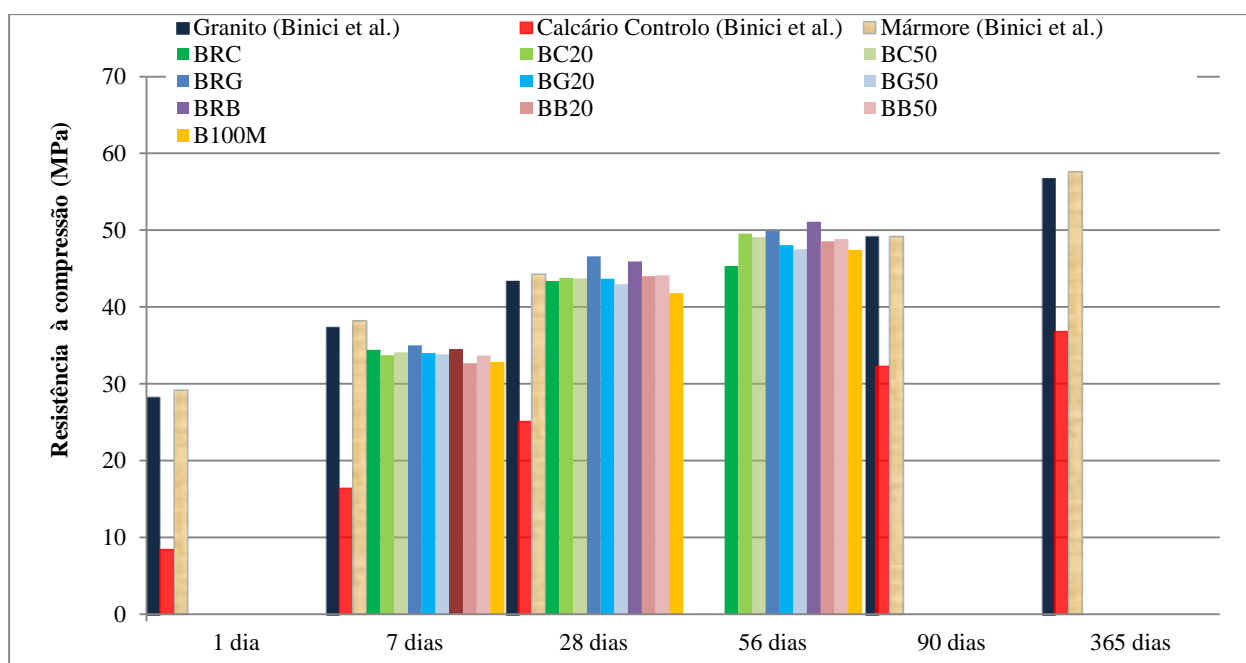


Figura 4.40 - Comparação dos resultados de Binici *et al.* (2008) com os da presente campanha

Hebhoub *et al.* (2011) referiram que os seus resultados, apresentados no capítulo 2 da presente dissertação, para betões incorporando ASM com taxas de substituição de 75 %, revelam resistências à compressão muito maiores do que os betões com agregados naturais, aqui designados por AP (agregados primários), mas que esse efeito já não é sentido para a taxa de substituição de 100%. Estes resultados não sustentam a ideia de uma relação linear entre a resistência mecânica e a taxa de incorporação de agregado secundário de mármore (ASM). Concluíram que a incorporação de ASM é benéfica, em termos de resistência mecânica, para todas as taxas de substituição excepto para a de 100%. Binici *et al.* (2008) só estudaram precisamente taxas de incorporação de ASM de 100% e aí afirmaram que eram favoráveis para a resistência à compressão. Por sua vez, os resultados da presente campanha não são tão claros quanto a esse benefício, devido a uma introdução de ASM, para todas as taxas de substituição.

Estas discrepâncias poderão dever-se, como referido, a diferenças nas naturezas dos agregados, pois os 3 estudos recorreram a resíduos da indústria do mármore de pedreiras dos respectivos países. Não obstante, as discrepâncias também poderão dever-se a outros factores, como a presença de diferentes materiais constituintes do betão e interacções entre eles, ou ainda a outros aspectos não detectados pelos vários autores.

4.4.2 Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi regido pelas especificações indicadas na norma NP EN 12390-6 (2003). Os detalhes relativos à metodologia foram descritos no subcapítulo 3.6.2.

A linha central do estudo está relacionada com a influência que a taxa de substituição de AP por AS pode ter na resistência à tracção, por compressão diametral, nas três famílias de betões.

Os resultados do ensaio, realizado aos 28 dias de idade para cada betão, podem ser consultados no Quadro 4.31. Na Figura 4.41, pode ser visualizada uma representação gráfica dos mesmos.

O valor mais baixo de perda percentual, 10,4%, foi registado na família de basalto com nível de substituição de 20% enquanto que, na família de calcário com taxa de substituição de 50%, chegou a registar-se um ganho percentual de 6,9%.

Quadro 4.31 - Resultados médios do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, aos 28 dias de idade

Taxa de substituição	Calcário		Granito		Basalto	
	f_{ctm28} (MPa)	Δ (%)	f_{ctm28} (MPa)	Δ (%)	f_{ctm28} (MPa)	Δ (%)
0	3,06	-	3,31	-	3,11	-
20	2,91	-4,9	3,06	-7,5	2,78	-10,4
50	3,27	6,9	3,18	-3,8	3,30	6,1
100	3,07	0,5	3,07	-7,1	3,07	-1,1

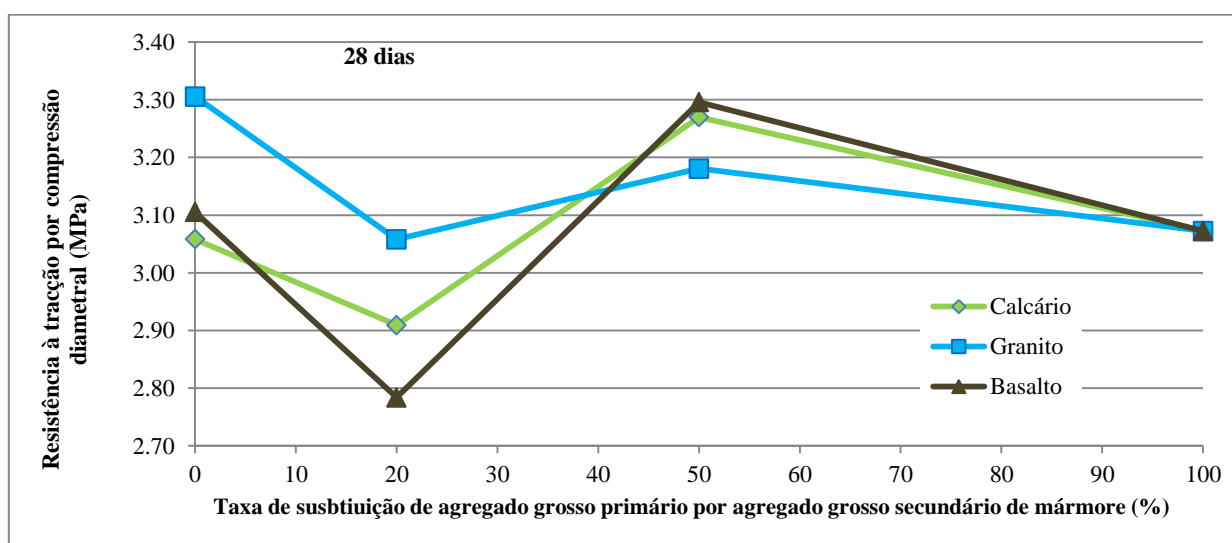


Figura 4.41 - Evolução da resistência à tracção, aos 28 dias de idade, com a taxa de substituição de AP por AS

No panorama global, observa-se uma tendência para a diminuição da resistência à tracção com a incorporação crescente de ASM. Contudo, esta tendência para a diminuição da resistência à tracção, não é tão acentuada como foi visível para a compressão aos 28 dias de idade. No caso da família de granito, a tendência é ténue e, nas famílias de basalto e calcário, pode ser mesmo inexistente. À semelhança, dos resultados para a compressão, a taxa de incorporação de 20%, parece ser, proporcionalmente, a mais gravosa. Os valores de resistência à tracção por compressão diametral para o calcário e basalto, na taxa de 20%, são os mais baixos de todos os registados. A explicação para tal poderá residir nas mesmas razões, apontadas para o caso da resistência à compressão, e que se relacionam com a trabalhabilidade, razão A/C efectiva e excesso de água que pode conduzir a maior porosidade.

De acordo com o Eurocódigo 2 - parte 1.1, a resistência à tracção média (f'_{ctm}) pode ser estimada através da expressão 4.1, que relaciona o referido parâmetro com a resistência à compressão média (f_{cm}). Saliente-se que a relação tem domínio de validade apenas para classes de resistência inferiores a C50/60.

$$f'_{ctm} = 0,30 \times (f_{cm} - 8)^{\frac{2}{3}} \quad (4.1)$$

No Quadro 4.32, pode ser consultado um resumo dos resultados experimentais para os ensaios de resistência à compressão e tracção aos 28 dias, a estimativa correspondente do EC2, e uma coluna com a comparação relativa entre a estimativa do EC2 e os resultados de tracção.

Os resultados experimentais, à excepção da composição de calcário e de basalto com taxa de substituição de 50%, estão sempre abaixo da estimativa do EC2 sem uma evidente explicação. Contudo, as pequenas diferenças relativas parecem traduzir uma estimativa relativamente razoável. Destaca-se apenas o valor anómalo, de 17,7% de diferença, no caso do basalto com 20% de substituição.

Na Figura 4.42, pode ser observada uma comparação entre os betões de Binici *et al.* (2008) e os da presente campanha. Enquanto Binici *et al.*, que só experimentaram percentagens de agregados grossos de 100%, registaram uma melhoria com a introdução de ASM, os resultados registados na presente campanha não indiciam essa tendência benéfica.

Quadro 4.32 - Comparação entre a estimativa do EC2 e os resultados experimentais para a resistência à tracção na idade de 28 dias

Tipo de betão (taxa de substituição)	Resultados experimentais f_{cm28} (MPa)	Estimativa do EC2 f'_{ctm28} (MPa)	Resultados experimentais f_{ctm28} (MPa)	$\frac{f'_{ctm28} - f_{ctm28}}{f_{ctm28}}$ (%)
BRC (0)	43,39	3,23	3,06	5,7
BC (20)	43,79	3,22	2,91	12,0
BC (50)	43,73	3,28	3,27	-0,5
B100M (100)	41,78	3,13	3,07	2,1
BRG (0)	46,59	3,43	3,31	3,5
BG (20)	43,68	3,25	3,06	6,3
BG (50)	42,98	3,21	3,18	0,9
B100M (100)	41,78	3,13	3,07	2,1
BRB (0)	45,93	3,39	3,11	8,9
BB (20)	44,00	3,27	2,78	17,7
BB (50)	44,14	3,28	3,30	-0,6
B100M (100)	41,78	3,13	3,07	2,1

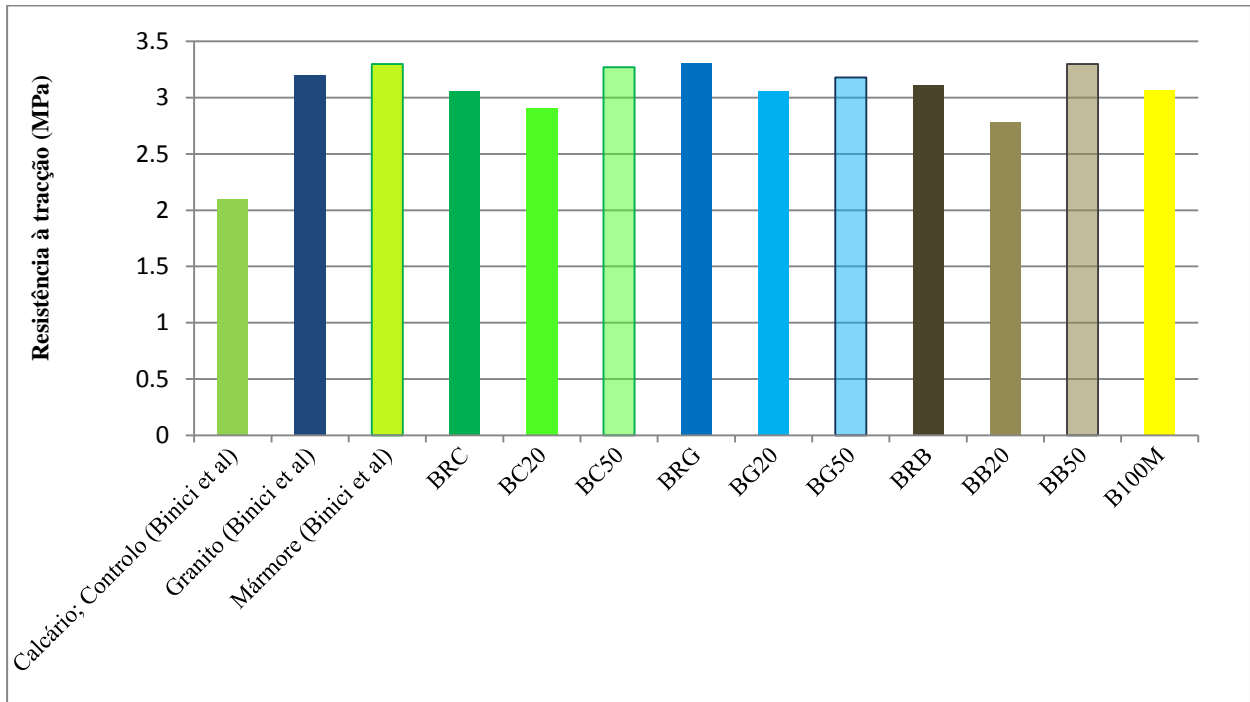


Figura 4.42 - Comparação de resultados de resistência à tracção por compressão diametral

Na Figura 4.43, podem ser observados os valores de Heboub, que estudou a substituição de grossos naturais (primários) de calcário por ASM, e os resultados da presente campanha para comparação. Na Figura 4.44, é feito um tratamento dos mesmos resultados de modo a expressar a resistência à tracção em percentagem do betão de referência, para mais fácil leitura e comparação. Enquanto Hebhouh *et al* referem uma melhoria para todas as taxas de substituição, à excepção de 100%, os resultados da presente campanha não sugerem tal conclusão, notando-se uma menor variação com a taxa de substituição. Estes podem eventualmente sugerir que a substituição de AP de calcário, utilizado na presente campanha experimental, por ASM, não afecta significativamente a resistência à tracção por compressão diametral.

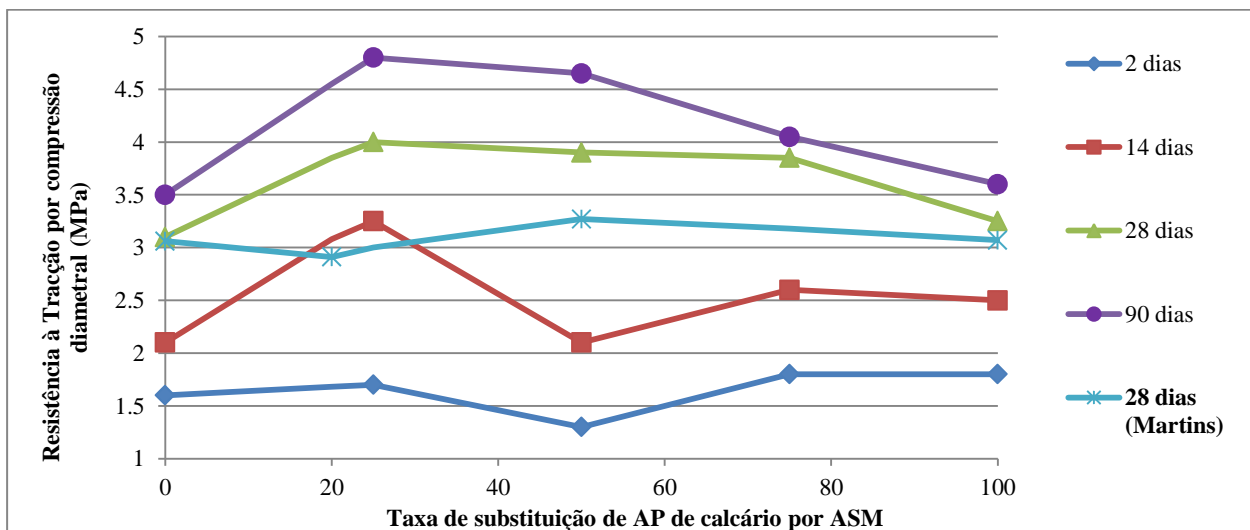


Figura 4.43 - Comparação dos estudos de Hebhouh *et al.* (2011) e da presente campanha para a resistência à tracção por compressão diametral

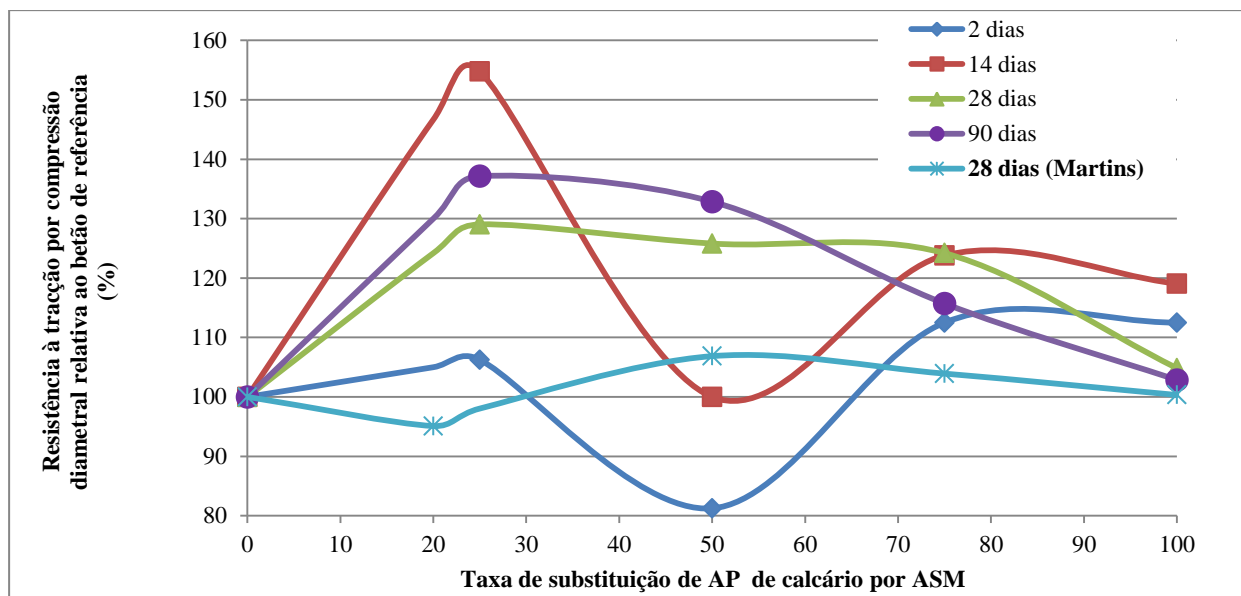


Figura 4.44 - Comparação da resistência à tracção por compressão diametral relativa ao betão de referência entre os estudos de Hebhoub *et al.* (2011) e da presente campanha

Por último, as diferenças referidas na anteriores secções, apontadas como possíveis razões para as discrepâncias de resultados entre os autores, são também aqui válidas. Acrescenta-se ainda como adicional possível causa para as diferenças que, de acordo com Coutinho (1988), a resistência do betão à tracção, seja por tracção pura, por flexão ou por compressão diametral, é fundamentalmente influenciada pela tensão de rotura à tracção dos agregados, podendo também ser afectada pela rugosidade da sua superfície e pela sua angulosidade. Isto significa que, não utilizando os diferentes autores materiais iguais, ainda que semelhantes, não é possível controlar todas as diferenças e variáveis nos agregados que, segundo Coutinho (1998), influenciam a resistência do betão à tracção.

4.4.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi realizado em conformidade com as especificações estipuladas pela norma LNEC E-397, descritas em detalhe na secção 3.6.3.

A linha central do estudo está relacionada com a influência que a taxa de substituição de AP por AS pode ter nos valores do módulo de elasticidade, nas três famílias de betões.

No Quadro 4.33, pode ser observada uma síntese dos resultados (valores médios) obtidos com o presente ensaio e, na Figura 4.45, uma representação gráfica dos mesmos.

Quadro 4.33 - Módulo de elasticidade, aos 28 dias, para todas as famílias de betões

Taxa de substituição	Calcário		Granito		Basalto	
	E_{cm28} (GPa)	Δ (%)	E_{cm28} (GPa)	Δ (%)	E_{cm28} (GPa)	Δ (%)
0	38,51	-	29,55	-	37,88	-
20	34,73	-9,8	29,47	-0,3	35,81	-5,5
50	32,76	-14,9	30,46	3,1	33,13	-12,5
100	27,82	-27,8	27,82	-5,8	27,82	-26,5

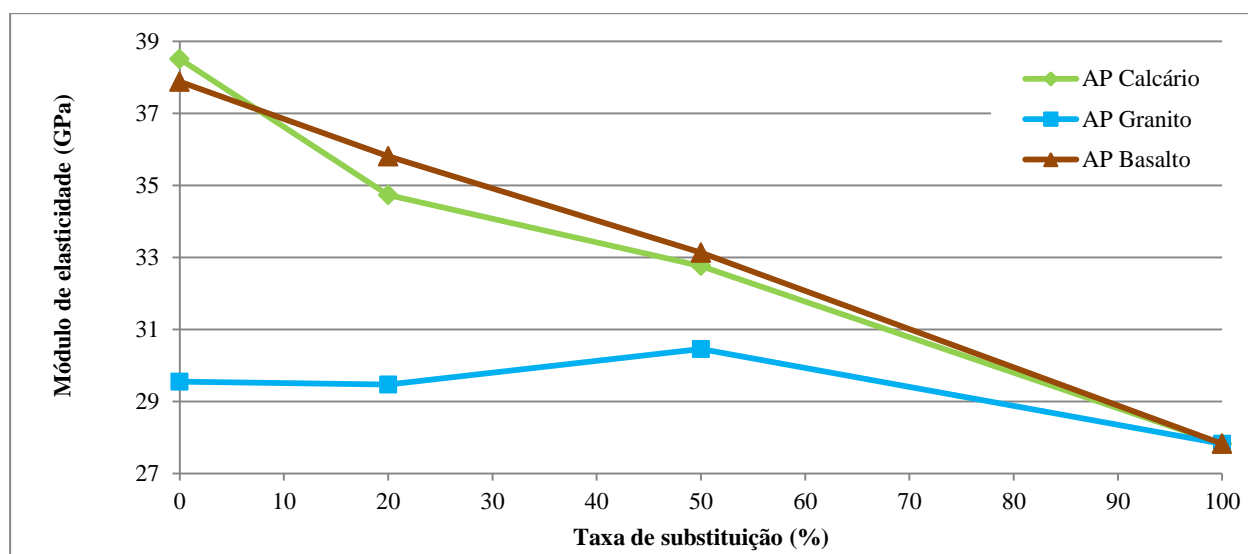


Figura 4.45 - Evolução, em função da taxa de substituição de AP por ASM, do módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, para todas as 3 famílias de betões

Evidencia-se uma tendência para a diminuição do módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, com a taxa de substituição, por AGSM, para os AP de calcário e basalto, sendo curiosa a relativa proximidade e evolução semelhante para estes. Essa tendência é mais ténue ou mesmo inexistente para a substituição de AP de granito por ASM.

À semelhança dos ensaios de resistência à compressão e tracção, a taxa de substituição de 20 % parece ser a mais gravosa, situando-se o seu valor abaixo do que sugere a tendência dos restantes valores. A máxima perda percentual, 27,8%, foi registada na família de calcário ao introduzir o nível de substituição de 20%, como pode ser verificado pelo maior declive desse troço no gráfico da Figura 4.45.

A tendência para a diminuição do valor do módulo de elasticidade, está de acordo com as tendências de diminuição registadas para a compressão e tracção por compressão diametral. Deste modo, as explicações referidas para as respectivas tendências são também aqui válidas. De facto, é do consenso geral, entre os investigadores, a existência de uma estreita relação entre estes parâmetros mecânicos, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Na Figura 4.46, é feita uma representação gráfica dos resultados dos betões de Binici *et al.* (2008), que utilizou sempre taxas de substituição de 100%, e mediu o módulo de elasticidade a duas idades, 28 e 90 dias. Estão também registados os resultados da presente campanha, onde foi apenas estudada uma idade, 28 dias, para as 3 famílias de betões.

Em relação ao estudo mais semelhante ao da presente dissertação, o de Hebhoub *et al.* (2011), que estudou a influência da taxa de substituição de agregados primários de calcário por agregados grossos secundários de mármore, não forneceu dados sobre o modo de elasticidade, limitando-se a registar os valores de resistência à compressão e tracção por compressão diametral como a única caracterização mecânica dos betões que produziu. Deste modo, não é possível fazer nenhuma comparação com o estudo da presente dissertação nesta matéria. Apenas se poderá afirmar que, no caso dos betões do autor, seria esperado que a influência da taxa de substituição, sobre o módulo de elasticidade, seguisse a mesma tendência observada para a resistência à compressão, sendo interessante realizar esse estudo.

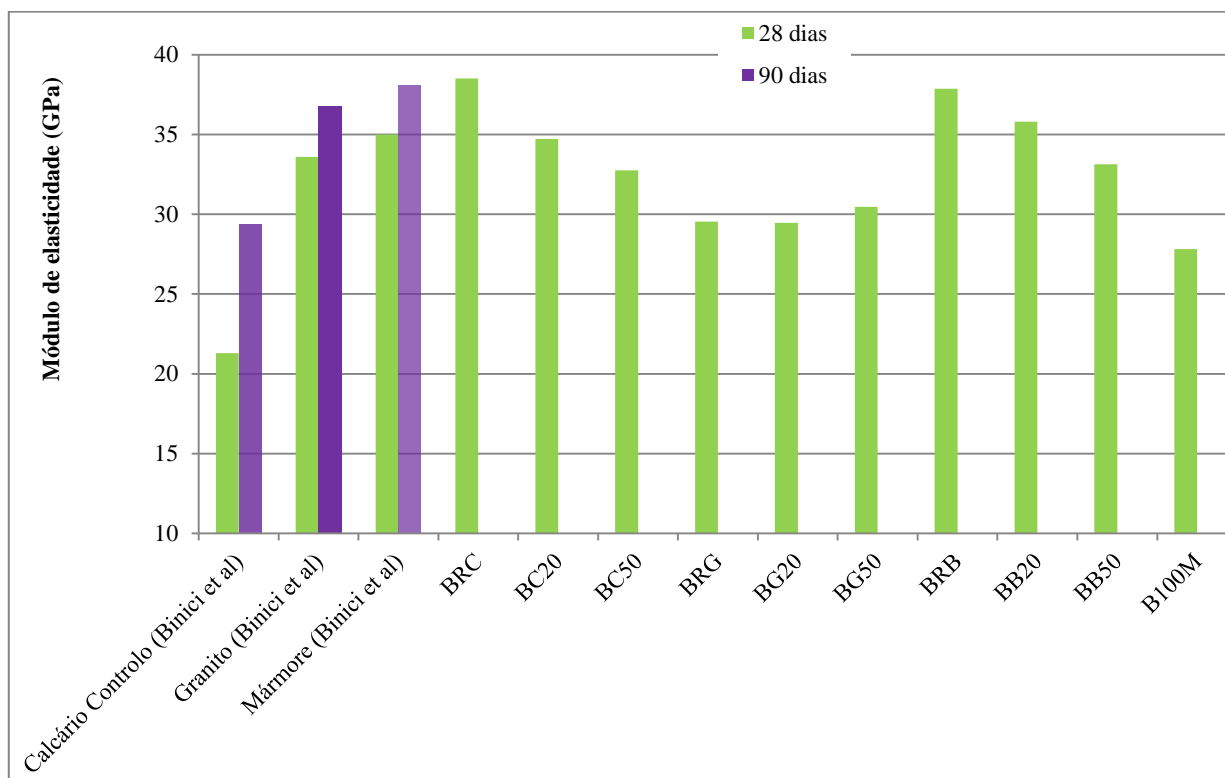


Figura 4.46 - Comparação gráfica dos resultados de Binici *et al.* (2008) e da presente campanha para o módulo de elasticidade

4.4.4 Resistência à abrasão

O ensaio de determinação da resistência ao desgaste por abrasão foi realizado de acordo com a metodologia e princípios indicados pela norma DIN 52108. Os detalhes relativos ao ensaio encontram-se descritos no subcapítulo 3.6.4.

No Quadro 4.34, podem ser observados os resultados obtidos, na presente campanha experimental, e a variação percentual face a cada um dos 3 betões de referência de AP de calcário, granito e basalto. No Anexo 4.2 podem ser consultados os valores individuais de cada provete ensaiado e a metodologia de cálculo para obtenção dos valores.

Quadro 4.34 - Profundidade do desgaste por abrasão ΔL , aos 91 dias de idade, e variação percentual para os 3 betões de referência de AP.

Taxa de substituição	AP de calcário		AP de granito		AP de basalto	
	ΔL (mm)	Δ (%)	ΔL (mm)	Δ (%)	ΔL (mm)	Δ (%)
0	2,79	-	2,43	-	2,89	-
20	3,07	10,0	2,81	15,7	3,16	9,3
50	3,20	14,8	3,08	26,5	3,41	18,1
100	3,66	31,3	3,66	50,7	3,66	26,8

Para mais fácil leitura, é feita uma representação gráfica dos resultados na Figura 4.47. Na Figura 4.48, é feita outra representação gráfica, com tratamento percentual dos dados, para comparação das várias famílias de betões.

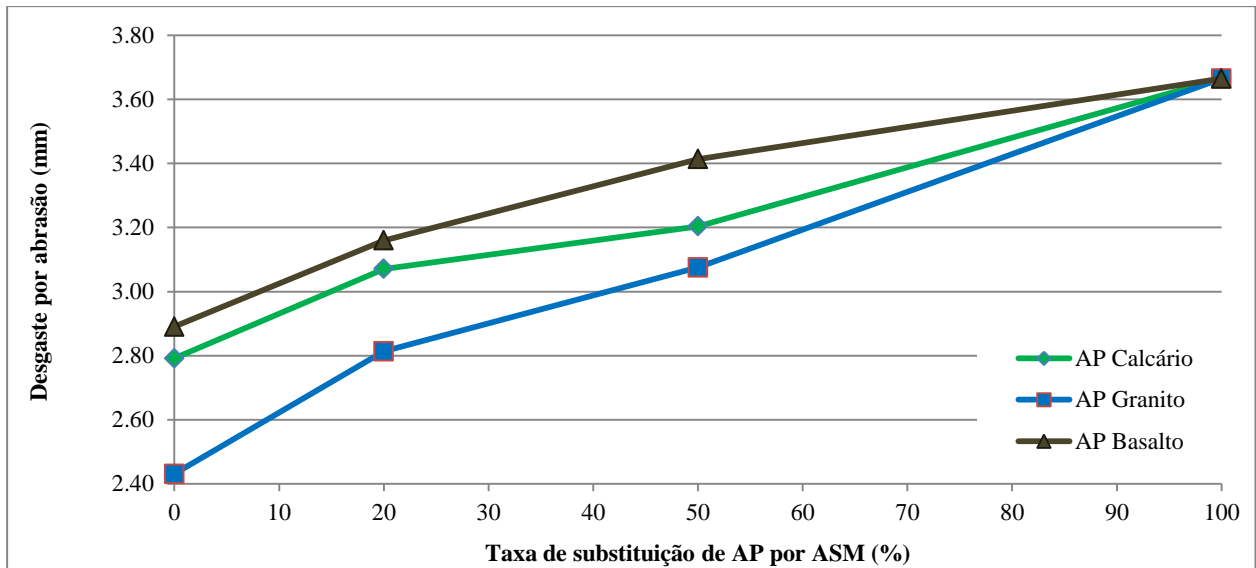


Figura 4.47 - Evolução, em função da taxa de substituição de AP por ASM, da profundidade do desgaste por abrasão, aos 91 dias de idade, para todas as 3 famílias de betões

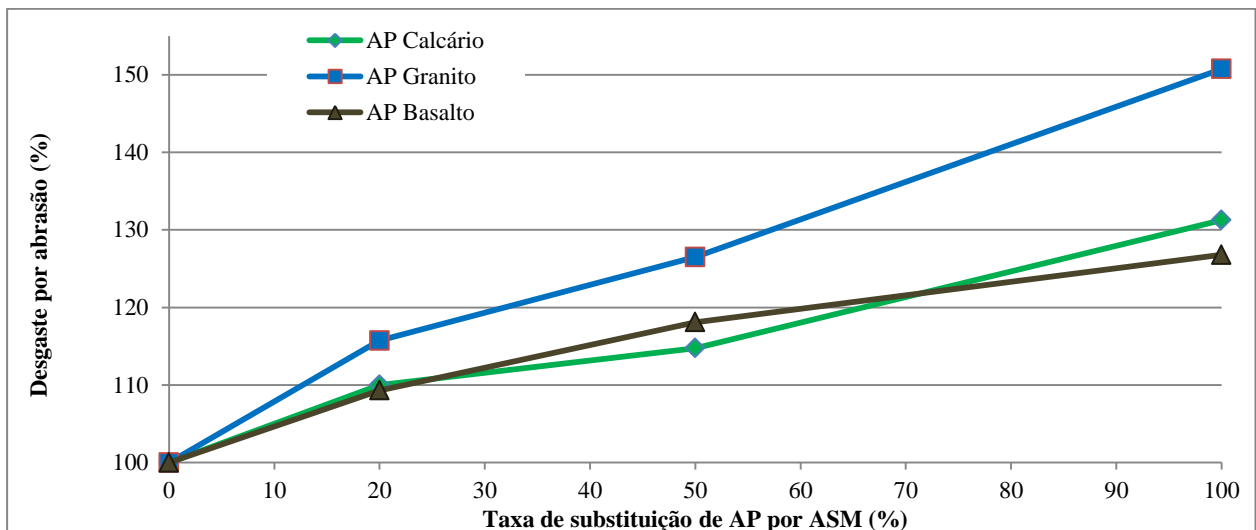


Figura 4.48 - Percentagem do desgaste por abrasão relativamente ao betão de referência

É visível a tendência para a maior sensibilidade ao desgaste, à medida que a taxa de substituição aumenta, o que está de acordo com as tendências registadas nos outros parâmetros mecânicos estudados, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e módulo de elasticidade. Esta tendência é mais evidente na família de granito registando-se os valores máximos de variação percentual para a família de granito. O valor mais elevado registado, 50,7%, foi obtido com a taxa de substituição de 100%. Em todos os betões, a taxa de variação de substituição de 20%, parece ser sempre a proporcionalmente mais gravosa, à semelhança do que aconteceu para os restantes ensaios mecânicos, o que poderá estar ligado aos referidos aspectos relacionados com o abaixamento no cone de Abrams, relação água/cimento efectiva e porosidade.

Um aspecto crucial para os resultados do presente ensaio é, segundo a maior parte dos autores citados, a sua relação com os resultados do ensaio de desgaste de *Los Angeles* realizado

aos respectivos agregados. Como pode ser observado no Quadro 4.20, os resultados realizados aos agregados grossos secundários de mármore (AGSM), quer nas fracções de brita 2 quer de bago de arroz, conduziram sempre a valores de desgaste de *Los Angeles* superiores aos realizados com todos os outros tipos de agregados. Deste modo, seria esperado que a crescente taxa de introdução de AGSM, por substituição de AP, levasse a um crescente desgaste por abrasão nos respectivos betões, o que se veio a confirmar nos resultados deste ensaio.

Adicionalmente às razões apontadas nas secções anteriores, e que são neste caso também válidas, pode adicionar-se, como possível justificação para os resultados do desgaste por abrasão, a estrutura porosa do mármore ser menos densa, para o que contribui também a menor densidade do agregado face aos outros agregados, o que também poderá ser relacionado com a questão do desgaste de *Los Angeles* discutida no parágrafo anterior.

Na Figura 4.49, pode ser visualizada uma comparação dos resultados de Binici *et al.* (2008) com os da presente dissertação.

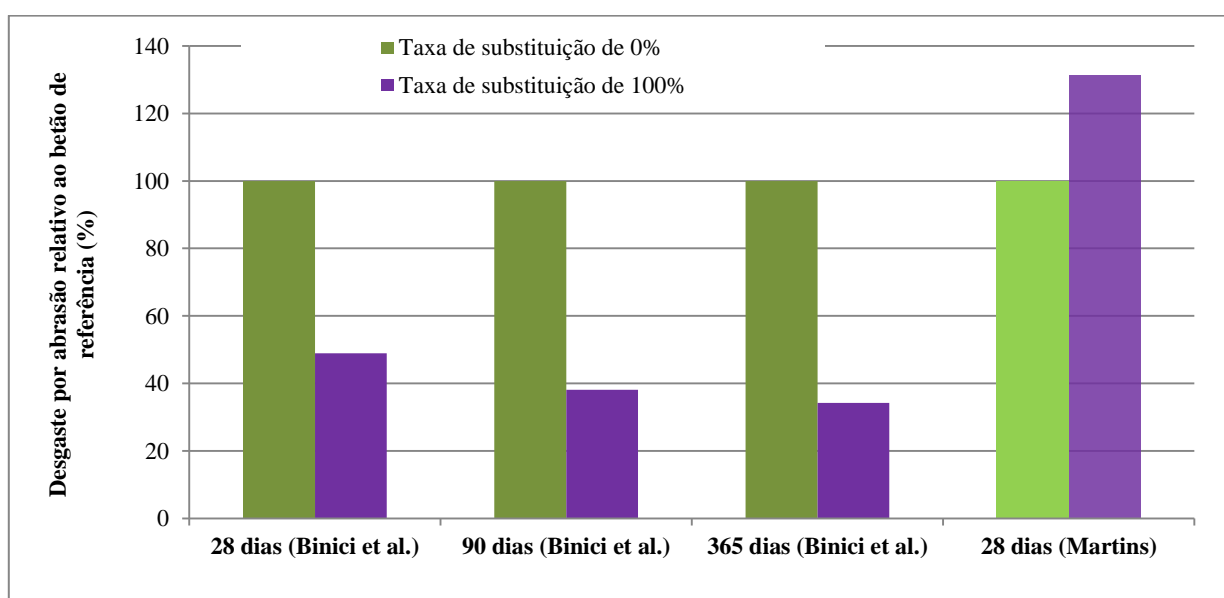


Figura 4.49 - Percentagem de desgaste à abrasão, em função da substituição de AP por ASM, para várias idades

Binici *et al.* (2008) registaram um menor desgaste ao incorporar ASM, o que está de acordo com os seus restantes melhores resultados mecânicos para os betões com ASM. Porém, os resultados da presente dissertação apontam noutra direcção. As possíveis razões para as discrepâncias, amplamente referidas nas secções referentes aos outros parâmetros mecânicos, são também aqui válidas. De qualquer modo, apesar da tendência para a diminuição, mais ou menos geral, do comportamento mecânico, com o aumento da taxa de substituição de AP por ASM, fica a ideia de que este efeito é mais ténue do que o registado para a grande maioria de agregados reciclados que começam a ser incorporados no betão. Deste modo, os resultados não inviabilizam, de todo, a utilização dos ASM em betões estruturais, pelo menos em algumas taxas de substituição, mais adequadas e convenientes, dependendo também do destino que se pretenda para o betão.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações finais

Segundo dados da APBE (Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto), em Portugal, a produção anual de betão pronto em 2007 foi de 11 milhões de metros cúbicos tendo caído para 6,7 milhões de m³ em 2011. Estima-se que seja o segundo material mais gasto pelo Homem, logo a seguir à água. Assim sendo, torna-se vital, por um lado, defender os recursos naturais dos materiais utilizados tradicionalmente no betão e, por outro, procurar materiais alternativos que assegurem a sustentabilidade da sua produção.

O eixo de Estremoz - Borba - Vila Viçosa representa mais de 50% do total de exploração de rochas ornamentais em Portugal. Em 1989, o número total de pedreiras era já superior a 90% do total existente no País. As escombrelas, que acumulam material desperdiçado a céu aberto, constituem um problema ambiental. O problema tem várias vertentes. Em primeiro lugar, representa uma agressão visual. Quem percorre a zona das escombrelas percebe imediatamente as consequências nefastas que tais acumulações de desperdícios têm na paisagem natural. Em segundo lugar, e não menos grave, levanta-se a questão das ameaças para o terreno e aquíferos adjacentes, pondo em risco o *habitat* natural, com as plantas e animais a sofrerem graves consequências.

Têm sido apontados possíveis destinos para os detritos que se acumulam continuamente, em grandes quantidades, nas escombrelas. Uma das utilizações tem sido em camadas de pavimentos rodoviários. No presente trabalho, pretendeu-se alargar o campo de investigação à possível utilização dos resíduos das escombrelas, como agregados grossos em betão estrutural. Os poucos trabalhos existentes nesta área não permitem comparações definitivas. Os estudos mais relevantes, citados na presente dissertação, provêm da Turquia e da Algéria, países com significativas produções de mármore a nível mundial. Nesses estudos, foram utilizados os mármore locais. Sendo Portugal um dos principais e maiores produtores de mármore, tornou-se interessante caracterizar e estudar os materiais das suas pedreiras na mesma linha de investigação dos estudos citados, ou seja, na incorporação de agregados secundários de mármore em betão estrutural.

Ao contrário dos dois estudos citados, realizados na Turquia e Algéria, a presente investigação conduziu a conclusões de um ligeiro abaixamento das propriedades mecânicas dos betões, resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e resistência à abrasão, com a substituição de AGP (agregados grossos primários) por AGSM (agregados grossos secundários de mármore). Esta diminuição dos parâmetros de caracterização mecânica foi-se tornando mais nítida à medida que se aumentou a taxa de substituição de AGP de 3 materiais de referência, calcário, granito e basalto, por AGSM. De qualquer modo, relativamente à taxa de substituição de AGP por AGSM, deve ser referido que as perdas no comportamento mecânico são percentualmente menores do que as registadas com a substituição de agregados tradicionais por outros não convencionais tais como agregados reciclados da indústria da construção civil, agregados de plástico, borracha ou vidro, por exemplo.

5.2 Conclusões gerais

O levantamento bibliográfico, realizado para o estado da arte, evidenciou a escassez de estudos no âmbito da presente investigação. Adicionalmente, Hebhoub *et al.* (2011) também observaram que os poucos estudos que existem, com vista a entender as propriedades reológicas e mecânicas de betões com incorporação de agregados resultantes de desperdícios da indústria do mármore, nem sempre têm os mesmos objectivos. Registam-se, neste capítulo, as principais conclusões da presente inestigação que pretendeu inserir a temática das questões ambientais e dos betões estruturais como destino viável para a incorporação de AGSM.

5.2.1 Propriedades dos agregados

Em termos de massa volúmica dos agregados grossos, destacaram-se pelos valores mais elevados, os de basalto a rondar o valor de 3000 kg/m^3 , para todos os três tipos de massa volúmica estudados, estando os restantes, calcário, granito e mármore, dentro dos valores usuais para os agregados tradicionais utilizados em betão, que se situam entre 2500 e 2800 kg/m^3 . Para a massa volúmica aparente, também designada por baridade, foram novamente os agregados de basalto que apresentaram, em média, os valores mais elevados, chegando a ultrapassar 1500 kg/m^3 enquanto que os restantes, calcário, mármore e granito, apresentaram valores entre 1300 e 1450 kg/m^3 . Quanto às areias, os valores dos tipos de massa volúmica situaram-se ligeiramente acima e abaixo de 2600 kg/m^3 para a grossa e fina respectivamente, e de 1550 e 1500 kg/m^3 , respectivamente, para a massa volúmica aparente.

Relativamente ao ensaio de desgaste de *Los Angeles*, foram também os agregados de basalto que apresentaram melhores características, apresentando valores percentuais de desgaste entre 9 e 15% enquanto que os de granito apresentaram valores superiores a 20%, os de calcário valores entre 30 e 35% e os de mármore valores muito próximos de 40%. Ainda assim, estes valores são inferiores ao limite imposto para aplicação estrutural, que se situa em 50%.

No ensaio de determinação da absorção de água os valores situaram-se entre 0,4%, obtido com a brita 2 de mármore, e 1,7%, obtido com o bago de arroz de granito. As areia registaram valores menores.

No que diz respeito ao índice de forma, os agregados que apresentaram maior percentagem de partículas “não cúbicas” foram os de granito, o que terá contribuído para as mais baixas trabalhabilidades obtidas com os betões que incorporaram estes agregados.

5.2.2 Propriedades do betão no estado fresco

No ensaio relativo à trabalhabilidade, os betões da família de calcário e basalto, registaram valores de abaixamento entre 112 e 130 mm no cone de Abrams. Os betões com agregados de granito apresentaram valores menores, abaixo de 110 mm, resultados possivelmente relacionados com a maior percentagem de partículas alongadas, presente nestes agregados. Ainda assim, os valores encontram-se dentro do intervalo estabelecido para todos os betões ($115 \pm 15 \text{ mm}$), pelo que não foi necessário corrigir a relação água/cimento tendo-se mantido esta constante em 0,54. Os betões que registaram abaixamentos perto do limite superior, os de calcário e basalto com taxa de substituição de AP por AGSM de 20%, podem ter sofrido

uma penalização nos parâmetros de resistência mecânica devido à presença de uma quantidade de água maior do que a estritamente necessária para a obtenção do nível de trabalhabilidade pretendido.

No que diz respeito à massa volúmica dos betões, notou-se uma tendência clara para a diminuição proporcional à taxa de substituição de AGP de basalto por AGSM, reflexo da diferença notória entre as massas volúmicas dos dois tipos de agregados. Quanto às duas restantes famílias de betões, partindo de AGP de calcário e granito, essa tendência não é tão clara, mantendo-se relativamente próximos os valores de massa volúmica dos betões para os vários níveis de substituição, o que será consequência da maior proximidade entre os valores de massas volúmicas destes dois tipos de agregados e dos AGSM.

5.2.3 Propriedades mecânicas do betão no estado endurecido

No que diz respeito aos ensaios de resistência à compressão e tracção dos betões no estado endurecido, as tendências observadas na presente investigação são semelhantes. No global, ambas apontam no sentido da diminuição da resistência com a incorporação crescente de AGSM, ainda que, no caso do ensaio de tracção, essa tendência possa não ser tão clara nos casos das famílias de basalto e calcário. Os menores valores de resistência à compressão e à tracção por compressão diametral registados na taxa de substituição de 20%, de um modo geral, relativamente à tendência da evolução das resistências com a taxa de incorporação de AGSM, podem estar relacionados com os referidos maiores valores de abaixamento registados principalmente nas famílias de basalto e calcário. A referida diminuição da resistência à compressão para a taxa de substituição de 20% pode ser explicada, em parte, pela relação água/cimento (A/C) efectiva. O facto de a relação A/C ter sido constante não significa que a relação A/C efectiva se tenha mantido constante uma vez que a água disponível para obtenção do nível de trabalhabilidade pretendido pode ser absorvida em doses diferentes por parte das diferentes misturas de agregados. Um excesso de água maior do que o estritamente necessário para a obtenção do nível de trabalhabilidade pretendido, pode ter correspondido a uma maior trabalhabilidade mas ter conduzido a uma maior porosidade do betão, o que se traduziria numa menor resistência à compressão. Por outras palavras, o caso do abaixamento superior para 20% poderá ser devido a uma incorporação de água superior na interface agregado-pasta cimentícia que pode, por um lado, ter favorecido a trabalhabilidade, mas por outro ter prejudicado a ligação do agregado à pasta e/ou ter conduzido a uma maior porosidade.

Os resultados de ensaio do módulo de elasticidade acompanham a tendência referida para os ensaios de compressão e tracção por compressão diametral, ou seja, apontam no sentido de um abaixamento dos valores com a crescente taxa de substituição, variando desde cerca de 38 GPa até 28 GPa para as famílias de basalto e calcário e desde cerca de 30 GPa até 28 GPa para a família de granito. Esta semelhança nas tendências está de acordo com a correlação, referida por vários autores, entre estas propriedades para a maior parte dos vários tipos de betões.

Finalmente, relativamente aos valores obtidos para o desgaste à abrasão, notou-se invariavelmente uma tendência para o aumento do desgaste, proporcional à taxa de substituição de AGP por AGSM. Neste ensaio, a tendência foi nítida para todas as famílias de betão, sem excepção. Estes resultados poderão ser ligados aos do ensaio de desgaste de Los Angeles realizado aos respectivos agregados. Esta ligação reflecte as ideias da maior parte dos

investigadores e, de facto, os resultados realizados aos agregados grossos secundários de mármore (AGSM), quer nas fracções de brita 2 quer de bago de arroz, conduziram sempre a valores mais elevados de desgaste de Los Angeles do que os realizados com todos os outros tipos de agregados e, portanto, seria previsível que a crescente taxa de introdução de AGSM, por substituição de AP, conduzisse a um crescente desgaste por abrasão nos respectivos betões.

5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros

O trabalho realizado na presente dissertação trouxe informação sobre o comportamento mecânico de betões com incorporação crescente de AGSM, gerados em Portugal em grande quantidade, por substituição de AGP.

Foi constatado que esta temática não estava ainda muito desenvolvida, mesmo em países que, tal como Portugal, são produtores de grandes quantidades de resíduos resultantes da indústria de rochas ornamentais, nomeadamente mármore. Pretendeu-se, portanto, no presente trabalho lançar o problema destes resíduos de mármore, que constituem um problema ambiental, para o campo de estudos na área da sustentabilidade e da utilização de agregados não tradicionais para incorporação em betão.

Como complemento à presente e a outras investigações, são sugeridas as seguintes áreas de estudo:

- avaliação do desempenho mecânico de betões com incorporação de agregados finos de resíduos da indústria do mármore;
- avaliação das propriedades de betões de elevado desempenho, com incorporação de agregados secundários de mármore (AGSM);
- análise do comportamento mecânico, em estados limite de serviço e estados limite últimos, de elementos estruturais compostos por agregados secundários de mármore (lajes, vigas, pilares);
- avaliação da influência relação A/C no comportamento mecânico de betões com incorporação de AGSM (BAGSM);
- avaliação da influência da incorporação de adjuvantes e de adições nos desempenhos mecânico e de durabilidade de BAGSM;
- avaliação da influência da taxa de incorporação AGSM na resistência a condições extremas como, por exemplo, fogo e ciclos de gelo-degelo;
- avaliação da influência de condições de cura mais secas e de temperaturas mais elevadas, nos desempenhos mecânico e de durabilidade de BAGSM;
- análise do desempenho térmico e acústico de BAGSM.

Bibliografia

Artigos / Livros / Dissertações

- **Akbulut H., Cahit G.,** *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*, Building and Environment, Volume 42, Issue 5 (2007), pp. 1921–1930;
- **Aukour F.J.,** *Incorporation of marble sludge in industrial building Eco-blocks or Cement bricks formulation*, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, Issue 1 (2009), pp. 58-65;
- **Beshr H., Almusallama A. A. and Maslehuddin M.,** *Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete*, Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 2 (2003), pp. 97-103;
- **Binici H., Shah T., Aksogan O., Kaplan H.,** *Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 208, Issues 1-3 (2008), pp. 299-308;
- **Brito J. de,** *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões. Lição de Síntese, Provas de Agregação em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2005);
- **Brito J. de, Pereira A.S., Correia J.R.,** *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*, Cement & Concrete Composites, Volume 27, Issue 4 (2005), pp. 429–433;
- **Casuccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., e and Zerbino R.,** *Failure mechanism of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 2 (2003), pp. 97-103;

- **Cetin A.**, 1997. *Assessment of industrial wastes in asphalt concrete pavement mixtures*. M.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, Natural Science Institute, Anadolu University, Eskisehir, 266 p. (em Turco);
- **Coutinho A.S.**, *Fabrico e propriedades do betão*. Volumes I, II e III, LNEC, Lisboa, (1988);
- **Di Maio, Giaccio G., Zerbino R.**, *Failure mechanism of concrete, combined effects of coarse aggregates and specimen geometry*, Construction and Building Materials, Volume 10, Issue 8 (1996), pp. 571-575;
- **Ferreira L.**, *Influência das condições de cura no desempenho mecânico de betões com agregados de resíduos plásticos seleccionados*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2011);
- **Fonseca N.**, *Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência das condições de cura no desempenho mecânico*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2009);
- **Giaccio G., Zerbino R.**, *Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level*, Advanced Cement Based Materials, Volume 7, Issue 2 (1998), pp. 41-48;
- **Hebhoub H., Aoun H., Belachia M., Houari H., Ghorbel E.** *Use of waste marble aggregates in concrete*, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 3 (2011), pp. 1167-1171;
- **Ke-Ru Wu, Bing Chen, Wu Yao, Dong Zhang**, *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 10 (2001), pp 1421-1425;
- **Martins O.R.**, *Panoramica nacional da indústria extractiva das rochas ornamentais em 1989*, «A pedra», nº. 38 (1990);



- **Midha S., Paspaliaris I.,** *A review of stone processing industry in five EU regions*, OSNET Editions, Volume 6 (2003), 101 p.;
- **Meddah M.S., Zitouni S., Belâabes S.,** *Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete*, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 4 (2010) pp. 505-512;
- **Neville A.M.,** *Properties of concrete*, Longman Scientific, London (1981), 3rd Ed., 287p;
- **OECD,** *Road Transport Research: Recycling Strategies for Road Works*, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France (1997), pp. 140–148;
- **Oliveira C.N., Ribeiro R., Queiroz J.,** *Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos*. Série Tecnologia Ambiental, Volume 30 (2010);
- **Ozturan T., Cecen C.,** *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths*, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 2 (1997), pp. 165-170;
- **Pereira C.G., Castro-Gomes J., Oliveira J.P.,** *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete*, *Construction and Building Material*, Volume 21, Issue 3 (2007), pp. 616-620;
- **Rodrigues J.D., Pinelo A., Costa C.** *Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz - Borba - Vila Viçosa*, CEVALOR, LNEC (1992);
- **Saboya F., Xavier G.C., Alexandre J.,** *The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic*, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 10 (2007), pp. 1950–1960;

- **Terzi S., Karasahin M.,** *Use of marble dust in the hot mix asphalt as a filler material*, Journal of Technology Chamber Civil Engineering, Volume 14 (2003), pp. 2903–3022;
- **UMTC,** *Use of recycled materials and recycled products in highway construction*. University of Massachusetts Transportation Center Report UMTC-95-1 (1995), US, pp. 238–245;
- **Valadares N.,** *Desempenho mecânico de betões estruturais com granulado de borracha proveniente de pneus usados*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2009);
- **Víctor O. García Alvarez, G. Giaccio, R.L. Zerbino, Ravindra G.,** *Influencia del tipo de árido grueso sobre el mecanismo de fractura en hormigones normales y de alta resistencia*, Cemento hormigón, nº. 857 (2003), pp. 40-54;
- **Zorluer,** *Stabilization of soils by waste marble dust*, Fourth National Marble Symposium, Afyonkarahisar (2003), pp. 297–305 (em Turco).

Normas e especificações principais

- **DIN 52108** - Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme. 2002;
- **LNEC E 237** - Agregados: Ensaio de desgaste pela maquina de Los Angeles. LNEC, Maio, 1971;
- **LNEC E 397** - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, Maio, 1993;
- **NP 956** - Inertes para argamassas e betões: Determinação dos teores em água total e em água superficial. IPQ, 1973;



- **NP EN 206-1** - Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ, Junho, 2005;
- **NP EN 933-1** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração. IPQ, Novembro, 2000;
- **NP EN 933-2** - Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. IPQ, Dezembro, 1999;
- **NP EN 933-4** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma. IPQ, 2002;
- **NP EN 1097-3** - Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios. IPQ, 2003;
- **NP EN 1097-6** - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ, 2003;
- **NP EN 12350-1** - Ensaio do betão fresco: Amostragem. IPQ, 2002;
- **NP EN 12350-2** - Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento. IPQ, Novembro, 2002;
- **NP EN 12350-6** - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica. IPQ, Novembro, 2002;
- **NP EN 12390-3** - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ, Dezembro, 2003;
- **NP EN 12390-6** - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. IPQ, Janeiro, 2004.

Páginas de internet:

- **APEB:**

<http://www.apeb.pt/news2.htm>

(visitado em 4/8/2012)

Anexos

ANEXO A: Composição dos betões

ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Identificação	B100M
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	0

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		

ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

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		

ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Identificação	BRG
Tipo de agregado primário	Granito
Percentagem de agregados grossos substituídos	0

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		

ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

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	0

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		

ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

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		

ANEXO B: Análise granulométrica

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

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	2904,9	49,5	50,5	49,5
11,2	2819,3	48,0	2,5	-
8	62,5	1,1	1,5	98,5
5,6	0,9	0,0	1,5	-
4	0,0	0,0	1,5	98,5
2	0,0	0,0	1,5	98,5
1	0,0	0,0	1,5	98,5
0,5	0,0	0,0	1,5	98,5
0,25	0,0	0,0	1,5	98,5
0,125	0,0	0,0	1,5	98,5
0,063	0,0	0,0	1,5	98,5
Refugo	27,8	0,5	0,1	99,9
Total	5815,4	99,9	-	-
Módulo de finura		7,39		

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	234,5	12,4	87,6	-
8	1078,2	57,2	30,4	69,6
5,6	547,3	29,0	1,3	-
4	14,5	0,8	0,6	99,4
2	0,0	0,0	0,6	99,4
1	0,0	0,0	0,6	99,4
0,5	0,0	0,0	0,6	99,4
0,25	0,0	0,0	0,6	99,4
0,125	0,0	0,0	0,6	99,4
0,063	0,0	0,0	0,6	99,4
Refugo	3,0	0,2	0,0	100,0
Total	1877,5	100,0	-	-
Módulo de finura		6,66		

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Material		Mármore – Bago de arroz		
Massa da amostra (g)		2025,4		
Massa da amostra após lavagem (g)		2009,2		
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	120,4	5,9	94,1	-
4	1525,9	75,3	18,7	81,3
2	352,5	17,4	1,3	98,7
1	1,2	0,1	1,3	98,7
0,5	0,8	0,0	1,2	98,8
0,25	0,9	0,0	1,2	98,8
0,125	1,2	0,1	1,1	98,9
0,063		0,0	1,1	98,9
Refugo	3,6	0,2	0,1	99,9
Total	2006,5	99,9	-	-
Módulo de finura		5,75		

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		
Módulo de finura		7,36		

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

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		
Módulo de finura			6,70	

Material		Calcário - Bago de arroz		
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		
Módulo de finura			5,53	

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

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	20,6	0,30	99,7	-
16	3587,6	52,37	47,3	52,67
11,2	3109,6	45,39	1,9	-
8	57	0,83	1,1	98,89
5,6	12,1	0,18	0,9	-
4	0,1	0,00	0,9	99,07
2	0	0,00	0,9	99,07
1	0	0,00	0,9	99,07
0,5	0	0,00	0,9	99,07
0,25	0	0,00	0,9	99,07
0,125	0	0,00	0,9	99,07
0,063	0	0,00	0,9	99,07
Refugo	35,4	0,52	0,02	99,98
Total	6822,4	99,98	-	-
Módulo de finura			7,46	

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	50,6	2,08	97,9	2,08
11,2	789,6	32,48	65,4	-
8	888,7	36,56	28,9	71,12
5,6	585,6	24,09	4,8	-
4	55,1	2,27	2,5	97,48
2	9	0,37	2,2	97,85
1	2,1	0,09	2,1	97,93
0,5	1,8	0,07	2,0	98,01
0,25	0	0,00	2,0	98,01
0,125	0	0,00	2,0	98,01
0,063	0	0,00	2,0	98,01
Refugo	19,2	0,8	0,1	99,9
Total	2401,7	99,9	-	-
Módulo de finura			6,60	

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Material	Granito – Bago de arroz
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	0,8	99,2	-
4	804,0	33,6	65,7	34,3
2	1067,7	44,6	21,1	78,9
1	191,2	8,0	13,1	86,9
0,5	74,6	3,1	10,0	90,0
0,25	34,6	1,4	8,6	91,4
0,125	18,0	0,8	7,8	92,2
0,063	0,0	0,0	7,8	92,2
Refugo	27,9	1,2	0,0	100,0
Total	2237,0	100,0		
Módulo de finura			4,74	

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	509,2	7,1	92,9	-
16	3496,1	48,8	44,0	56,0
11,2	2863,7	40,0	4,0	-
8	262,9	3,7	0,4	99,6
5,6	5,4	0,1	0,3	-
4	0,7	0,0	0,3	99,7
2	0,0	0,0	0,3	99,7
1	0,0	0,0	0,3	99,7
0,5	0,0	0,0	0,3	99,7
0,25	0,0	0,0	0,3	99,7
0,125	0,0	0,0	0,3	99,7
0,063	0,0	0,0	0,3	99,7
Refugo	10,4	0,1	0,0	100,0
Total	7148,4	100,0	-	-
Módulo de finura			7,54	

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Material		Basalto - Brita 2 (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		
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	122,7	7,1	92,9	-
8	1053,4	60,6	32,3	67,7
5,6	555,3	32,0	0,4	-
4	0,9	0,1	0,3	99,7
2	0,0	0,0	0,3	99,7
1	0,0	0,0	0,3	99,7
0,5	0,0	0,0	0,3	99,7
0,25	0,0	0,0	0,3	99,7
0,125	0,0	0,0	0,3	99,7
0,063	0,0	0,0	0,3	99,7
Refugo	1,4	0,1	0,1	99,9
Total	1733,7	99,9		
f (%)		0,25		
Módulo de finura		6,66		

ANEXO B - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Material	Basalto – Bago de arroz
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	424,0	27,2	72,8	-
4	793,7	50,9	21,9	78,1
2	330,0	21,2	0,8	99,2
1	2,0	0,1	0,6	99,4
0,5	0,0	0,0	0,6	99,4
0,25	0,0	0,0	0,6	99,4
0,125	0,0	0,0	0,6	99,4
0,063	0,0	0,0	0,6	99,4
Refugo	1,7	0,1	0,0	100,0
Total	1551,4	100,0	-	-
Módulo de finura			5,75	

ANEXO C: Massa volúmica e absorção de água

ANEXO C - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

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
Bago de arroz										
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

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	2723,6	2651,0	2677,6	1,005
A2	8357,4	17,0	5148,7	19,0	5130,0	5083,0	2711,9	2645,6	2670,1	0,925
A3	8359,0	17,0	5148,7	18,0	5122,8	5071,3	2725,0	2651,7	2678,6	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	2741,4	2652,5	2684,9	1,223
A2	7120,2	21,0	5221,8	19,5	3039,7	2997,9	2726,6	2626,7	2663,4	1,394
A3	7103,9	21,0	5223,5	19,5	2989,0	2953,7	2752,0	2664,3	2696,2	1,195
Bago de arroz										
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	2724,0	2641,7	2671,9	1,143
A2	2266,1	20,5	1554,6	21,0	1128,4	1113,8	2768,6	2671,6	2706,6	1,311
A3	2271,7	20,5	1551,3	20,0	1149,7	1136,9	2729,6	2648,3	2678,1	1,126

ANEXO C - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Granito										
Brita 2										
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	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	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	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
Bago de arroz										
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	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
Basalto										
Brita 3										
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	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 2 (1,5)										
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	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	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	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
Bago de arroz										
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	2509,9	21,5	1553,6	21,5	1441,4	1429,5	3015,6	2941,7	2966,1	0,832
A2	2809,5	21,5	1563,2	22,0	1882,8	1866,1	3005,5	2926,7	2952,9	0,895
A3	2726,7	21,5	1547,5	22,0	1781,1	1763,0	3014,6	2923,9	2954,0	1,027

ANEXO C - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Areia grossa										
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	2260,5	18,0	1508,3	16,0	1214,1	1212,6	2633,8	2625,2	2628,5	0,124
A2	2116,5	18,0	1508,3	17,0	982,2	982,0	2627,1	2625,7	2626,2	0,020
A3	2141,2	17,0	1510,3	17,0	1020,1	1020,1	2621,0	2621,0	2621,0	0,000
Areia fina										
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	1982,9	19,0	1249,6	17,0	1201,5	1200,0	2571,2	2563,0	2566,2	0,125
A2	1860,0	18,0	1249,6	17,0	999,9	999,3	2569,6	2565,6	2567,1	0,060
A3	2051,8	17,0	1481,2	17,0	924,7	923,9	2615,1	2609,2	2611,4	0,087

ANEXO D: Baridade e volume de vazios

ANEXO D - BARIDADE E VOLUME DE VAZIOS

Mármore							
	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
Brita 2	22227			1357,7	49,9		
	22368	8650	10	1371,8	49,4	1363,3	49,7
	22253			1360,3	49,8		
Brita 1	22555			1390,1	48,2		
	22406	8654	10	1375,2	48,8	1378,1	48,7
	22344			1369,0	49,0		
Bago de arroz	5808			1316,4	50,6		
	5768	1859	3	1303,1	51,1	1313,6	50,7
	5823			1321,5	50,4		

Calcário							
	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
Brita 2	22784			1419,7	46,0		
	22955	8587	10	1436,8	45,4	1426,2	45,8
	22808			1422,1	45,9		
Brita 1	22891			1432,0	45,8		
	22706	8571	10	1413,5	46,5	1424,9	46,1
	22862			1429,1	45,9		
Bago de arroz	22884			1432,0	45,9		
	22699	8564	10	1413,5	46,6	1438,3	45,7
	23257			1469,3	44,5		

Granito							
	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
Brita 2	21936			1328,9	51,5		
	22027	8647	10	1338,0	51,2	1339,7	51,1
	22168			1352,1	50,7		
Brita 1	21980			1338,2	50,9		
	21861	8598	10	1326,3	51,3	1325,5	51,3
	21718			1312,0	51,8		
Bago de arroz	6100			1413,8	46,6		
	5962	1859	3	1367,7	48,4	1383,6	47,8
	5966			1369,2	48,3		

ANEXO D - BARIDADE E VOLUME DE VAZIOS

Basalto							
	Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
Brita 3	23842			1519,5	49,0		
	23802	8647	10	1515,5	49,1	1514,1	49,2
	23719			1507,2	49,4		
Brita 2 (1,5)	23716			1506,9	48,7		
	23742	8647	10	1509,5	48,6	1507,9	48,7
	23721			1507,4	48,7		
Brita 1	23273			1462,3	50,7		
	23410	8650	10	1476,0	50,2	1470,3	50,4
	23376			1472,6	50,3		
Bago de arroz	6083			1408,1	51,9		
	6089	1858	3	1410,3	51,9	1408,5	51,9
	6080			1407,2	52,0		

Areia grossa						
Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
2689			1513,0	42,3		
2723	1176	1	1547,0	41,0	1543,0	41,1
2745			1569,0	40,1		

Areia fina						
Massa amostra + recipiente (g)	Massa recipiente (g)	Volume recipiente (dm ³)	ρ_i (kg/m ³)	ϑ_i (%)	ρ_b (kg/m ³)	ϑ_b (%)
2681			1505,0	41,6		
2673	1176	1	1497,0	41,9	1500,0	41,8
2674			1498,0	41,8		

ANEXO D - BARIDADE E VOLUME DE VAZIOS

ANEXO E: Desgaste de *Los Angeles*

ANEXO E - DESGASTE DE *LOS ANGELES*

		Composição	N.º de esferas	Massa recomendada das esferas	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
	Bago de arroz	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
	Bago de arroz	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
	Bago de arroz	D	6	2500 ± 15	5000,1	3074,3	38,52

ANEXO F: Teor em água total

ANEXO F - TEOR EM ÁGUA TOTAL

		M_1 (g)	M_2 (g)	w_t (%)	w_{th} (%)
Basalto	Brita 3	7750,4	7706,8	0,57	
		10205,3	10147,2	0,57	0,57
		7010,2	6970,1	0,58	
	Brita 2 (1,5)	4098,4	4076,5	0,54	
		3850,3	3830,0	0,53	0,53
		3313,7	3296,5	0,52	
	Brita 1	3708,2	3686,7	0,58	
		3836,3	3814,7	0,57	0,58
		3492,7	3472,3	0,59	
	Bago de arroz	3881,9	3848,2	0,88	
3710,9		3677,9	0,90	0,89	
2384,0		2362,6	0,91		
Granito	Brita 2	5843,5	5831,1	0,21	
		5567,5	5555,4	0,22	0,21
		4878,2	4867,9	0,21	
	Brita 1	2973,3	2953,3	0,68	
		2923,9	2905,0	0,65	0,66
		3014,3	2995,2	0,64	
	Bago de arroz	3038,4	2967,6	2,39	
3043,1		2969,1	2,49	2,44	
3034,0		2961,3	2,46		
Mármore	Brita 2	4153,9	4152,9	0,02	
		5418,8	5417,5	0,02	0,02
		4685,8	4685,0	0,02	
	Brita 1	2543,9	2543,3	0,02	
		2449,5	2448,8	0,03	0,02
		2835,1	2834,5	0,02	
	Bago de arroz	2821,8	2821,0	0,03	
2716,6		2714,7	0,07	0,05	
2430,0		2428,4	0,07		

ANEXO G: Índice de forma

ANEXO G - ÍNDICE DE FORMA

Mármore					
Brita 2					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		24,8	0,7	-	
22,4-16		1150,7	32,9	208,2	
16-11,2	3499,9	2199,6	62,8	755,8	28,8
11,2-8		121,8	3,5	-	
8-5,6		2,6	0,1	-	
5,6-4		0,4	0,0	-	
Brita 1					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		62,7	8,7	-	
16-11,2	721,8	181,5	25,1	52,4	31,6
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	-	
Bago de arroz					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	136,1	0,0	0,0	-	30,1
11,2-8		0,0	0,0	-	
8-5,6		10,1	7,4	-	
5,6-4		126,0	92,6	37,9	
Calcário					
Brita 2					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		473,2	7,8	-	
22,4-16		2162,8	35,7	214,6	
16-11,2	6049,8	2488,4	41,1	376,6	12,7
11,2-8		601,5	9,9	-	
8-5,6		298,4	4,9	-	
5,6-4		25,5	0,4	-	
Brita 1					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		22,7	2,3	-	
22,4-16		239,0	23,9	26,9	
16-11,2	1001,9	489,2	48,8	100,2	18,2
11,2-8		222,4	22,2	46,1	
8-5,6		28,6	2,9	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	
Bago de arroz					
Fracção	M ₀ (g)	M _{1i} (g)	% V _i	M _{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	123,0	0,0	0,0	-	17,6
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	-	

ANEXO G - ÍNDICE DE FORMA

Granito					
Brita 2					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		1387,4	45,5	315,4	
16-11,2	3049	1621,0	53,2	889,5	40,0
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		0,0	0,0	-	
22,4-16		11,6	2,1	-	
16-11,2	550,3	201,2	36,6	88	48,2
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	-	
Bago de arroz					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	116,3	0,0	0,0	-	24,9
11,2-8		1,9	1,6	-	
8-5,6		3,1	2,7	-	
5,6-4		111,3	95,7	27,7	

ANEXO G - ÍNDICE DE FORMA

Basalto					
Brita 3					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		110,4	3,6	-	
22,4-16		1548,6	50,2	249,4	
16-11,2	3085,9	1290,7	41,8	370,2	21,8
11,2-8		136,0	4,4	-	
8-5,6		0,2	0,0	-	
5,6-4		0,0	0,0	-	
Brita 2 (1,5)					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	3070,8	2673,7	87,1	366,3	17,0
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_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	506,2	46,8	9,2	-	25,4
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	-	
Bago de arroz					
Fracção	M₀ (g)	M_{1i} (g)	% V_i	M_{2i} (g)	SI (%)
> 22,4		0,0	0,0	-	
22,4-16		0,0	0,0	-	
16-11,2	190,2	0,0	0,0	-	29,5
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	

ANEXO H: Resistência à compressão

ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

7 Dias	Provete	Massa (g)	Massa média (g)	Força (kN)	Força média (kN)	fc _m -7 dias (Mpa)
B100M	1	8069,5		716,7		
	2	8094,7	8082	764,4	739,1	32,85
	3	8082		736,3		
BRC	1	7914,7		752,1		
	2	8071,9	8016	783,2	774,9	34,44
	3	8062,1		789,3		
BC20	1	7993,1		761,9		
	2	7963,4	8011	750,1	759,0	33,73
	3	8076,2		764,9		
BC50	1	8052,5		758,7		
	2	8046,2	8051	780,1	766,5	34,07
	3	8054		760,6		
BRG	1	8185,7		799,3		
	2	8132,2	8125	772,8	788,0	35,02
	3	8058,5		792,0		
BG20	1	8075,8		767		
	2	8087,1	8066	761,1	765,2	34,01
	3	8035		767,5		
BG/50	1	8067,0		759,9		
	2	8028,3	8038	757,7	760,9	33,82
	3	8020,0		765,1		
BRB	1	8365,6		779,1		
	2	8385,1	8361	749,3	775,6	34,47
	3	8330,9		798,3		
BB20	1	8325,7		740		
	2	8260,4	8294	732,7	734,9	32,66
	3	8296,1		732,1		
BB50	1	8195,3		766,5		
	2	8218,6	8194	773,7	757,5	33,67
	3	8169,0		732,4		

ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

28 Dias	Provete	Massa (g)	Massa média (g)	Força (kN)	Força média (kN)	fcm - 28 dias (MPa)
BRM	1	8241,9	8184	948,5	940,2	41,78
	2	8127,4		939,5		
	3	8188,3		903,8		
	4	8282,7		982		
	5	8077,2		927		
BRC	1	8055,9	8109	1006	976,2	43,39
	2	8062,8		1003		
	3	8054		1010		
	4	8197,5		916,5		
	5	8176,4		945,6		
BC/20	1	8179,9	8117	917	985,2	43,79
	2	8109,5		975,9		
	3	8079,8		970,8		
	4	8126,7		989,2		
	5	8088,8		1005		
BC/50	1	7987,4	8066	968,8	983,9	43,73
	2	8055,7		993,3		
	3	8019		991,7		
	4	8121,4		1035		
	5	8144		981,9		
BRG	1	8147,5	8117	1047	1048,2	46,59
	2	8097,4		1042		
	3	8133,3		1040		
	4	8145,8		1057		
	5	8061,3		1055		
BG/20	1	8173,9	8114	966,8	982,8	43,68
	2	8165,4		994,1		
	3	8171,4		950,9		
	4	8016,2		978,3		
	5	8043		1024		
BG/50	1	8069,4	8067	775,5	967,0	42,98
	2	8073,6		967,6		
	3	8070,5		965		
	4	8051,5		969,7		
	5	8067,7		965,7		
BRB	1	8330,8	8394	1024	1033,4	45,93
	2	8453,5		1047		
	3	8385,9		1050		
	4	8358,3		1021		
	5	8441,5		1025		
BB/20	1	8387,3	8362	956,4	990,0	44,00
	2	8352,1		1001		
	3	8384,5		1011		
	4	8340,8		990,4		
	5	8346,7		991,4		
BB/50	1	8190,8	8200	992	993,1	44,14
	2	8196,4		987,5		
	3	8248,2		992,3		
	4	8160,4		979,6		
	5	8201,7		1014		

ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

56 Dias	Provete	Massa (g)	Massa média (g)	Força (kN)	Força média (kN)	fcm - 56 dias (Mpa)
BRM	1	8230,9	8214	1092	1066,7	47,41
	2	8134		1057		
	3	8276,2		1051		
BRC	1	8221	8205	1017	1020,0	45,33
	2	8193,5		1018		
	3	8201,7		1025		
BC/20	1	8037,1	8082	1101	1114,7	49,54
	2	8138,4		1117		
	3	8071,2		1126		
BC/50	1	8069,5	8066	1103	1105,0	49,11
	2	8079,4		1098		
	3	8047,7		1114		
BRG	1	8056,2	8120	1117	1122,0	49,87
	2	8162,7		1112		
	3	8184,1		1137		
BG/20	1	8062,9	8134	1084	1081,5	48,07
	2	8184		1079		
	3	8155,5		1020		
BG/50	1	8030,3	8035	1069	1069,0	47,51
	2	8029,6		1005		
	3	8045,9		1069		
BRB	1	8484,3	8413	1165	1149,3	51,08
	2	8332,7		1137		
	3	8422,2		1146		
BB/20	1	8280,4	8302	1054	1092,3	48,55
	2	8267,1		1120		
	3	8358		1103		
BB/50	1	8202,8	8215	1112	1099,3	48,86
	2	8242,3		1080		
	3	8200,2		1106		

ANEXO I: Resistência à tracção por compressão diametral

ANEXO I - RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Idade: 28 dias	Provete	Massa (g)	Massa média (g)	Altura (cm)	Altura média (m)	Diâmetro (m)	Força (kN)	Força média (kN)	tensão (Mpa)
BRM	1			29,8			211,4		
	2			29,8	0,299	0,150	220,5	216,5	3,07
	3			30,1			217,7		
BRC	1	12556		29,6			200,2		
	2	12569,7	12644	29,6	0,297	0,150	174,3	214,3	3,06
	3	12807,7		30			268,3		
BC/20	1	12523,7		29,8			205,9		
	2	12550,8	12647	29,6	0,299	0,150	194,5	205,0	2,91
	3	12865,5		30,3			214,5		
BC/50	1	12533,4		29,6			228		
	2	12607,8	12656	29,8	0,299	0,150	218,4	230,1	3,27
	3	12826,4		30,2			243,9		
BRG	1	12624		29,6			245,6		
	2	12613,8	12676	29,6	0,298	0,150	239	232,1	3,31
	3	12790,1		30,2			211,7		
BG/20	1	12803,3		29,6			210		
	2	12709,1	12727	29,7	0,297	0,150	201,6	214,0	3,06
	3	12667,5		29,8			230,4		
BG/50	1	12688		29,8			215,5		
	2	12720,9	12740	29,7	0,299	0,150	227,8	223,8	3,18
	3	12810,4		30,1			228,2		
BRB	1	13263,6		29,7			228,3		
	2	13069,4	13203	29,4	0,297	0,150	214,7	217,1	3,11
	3	13274,6		29,9			208,2		
BB/20	1	13036,9		29,6			210		
	2	13120,7	13116	29,8	0,297	0,150	205,4	195,0	2,78
	3	13189		29,8			169,7		
BB/50	1	12875		29,8			236,9		
	2	13063,1	12986	30	0,299	0,150	219,5	231,9	3,30
	3	13019		29,8			239,4		

ANEXO J: Módulo de elasticidade

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	B100M1								
Idade	28								
Data Ensaio	31-03-2011								
Nome do Ficheiro									
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00								
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67								
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,00								
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	194,39								
Diferença (Waveform)	176,7								

Carga	17,67	194,39	Coef. Poisson
	0,00192	0,024	0,35
	0,0024	0,024	
	0,0024	0,024	
	0,00192	0,024	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E (GPa)
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				
Ciclo 1	35,02	414,35	6,15	391,00		25,58
Ciclo 2	46,69	417,26	1,57	373,50	17,51	26,77
Ciclo 3	49,60	420,18	0,79	372,04	Fim	26,88
Ciclo 4	46,69	423,10	0,78	374,95	Fim	26,67

26,47

Amostra	B100M2								
Idade	28								
Data Ensaio	31-03-2011								
Nome do Ficheiro									
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00								
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67								
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,00								
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	194,39								
Diferença (Waveform)	176,7								

Carga	17,67	194,39	Coef. Poisson
	0,00192	0,02976	0,49
	0,0048	0,02976	
	0,0048	0,02976	
	0,0048	0,03024	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E (GPa)
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				
Ciclo 1	17,51	367,66	37,93	391,00	0,83	351,61		28,44
Ciclo 2	23,34	364,74	49,60	388,09	0,85	339,94	11,67	29,42
Ciclo 3	17,51	358,91	46,69	385,17	0,85	339,94	Fim	29,42
Ciclo 4	14,59	358,91	49,60	385,17	2,54	339,94	Fim	29,42

29,17

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BRC1									
Idade	28					Carga	17,67	204,46	Coef. Poisson	
Data Ensaio	5-04-2011						0,00048	0,0504	0,87	
Nome do Ficheiro							0,00336	0,05136		
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)		1,00					0,00384	0,05184		
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)		17,67					0,00432	0,05184		
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)		11,57				* - caso seja >10% o ensaio é anulado				
Força aplicada p/ fc/3 (kN)		204,46								
Diferença (Waveform)		186,8								
		Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
		Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3					
		(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	%	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(GPa)	
Ciclo 1		35,02	312,22	46,69	350,15	9,47	290,33		36,41	38,27
Ciclo 2		55,44	323,89	87,54	373,50	6,52	277,20	13,13	38,13	
Ciclo 3		61,28	326,81	107,96	382,25	3,30	269,91	Fim	39,16	
Ciclo 4		61,28	326,81	116,72	388,09	2,20	268,45	Fim	39,37	

Amostra	BRC2									
Idade	28					Carga	17,67	204,46	Coef. Poisson	
Data Ensaio	5-04-2011						0,0024	0,02496	0,51	
Nome do Ficheiro							0,00336	0,02544		
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)		1,00					0,00336	0,02544		
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)		17,67					0,00384	0,02544		
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)		11,57				* - caso seja >10% o ensaio é anulado				
Força aplicada p/ fc/3 (kN)		204,46								
Diferença (Waveform)		186,8								
		Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
		Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3					
		(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	%	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(GPa)	
Ciclo 1		11,67	280,12	23,34	318,05	9,78	281,58		37,54	38,76
Ciclo 2		26,26	285,96	40,85	320,97	7,87	269,91	11,67	39,16	
Ciclo 3		26,26	285,96	40,85	320,97	7,87	269,91	Fim	39,16	
Ciclo 4		26,26	285,96	40,85	320,97	7,87	269,91	Fim	39,16	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BC20/1
Idade	28
Data Ensaio	7-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,51
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	203,40
Diferença (Waveform)	185,7

Carga	17,67	203,40	Coef. Poisson
	0,00240	0,02784	0,49
	0,00384	0,02784	
	0,00384	0,02784	
	0,00336	0,02736	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3				(GPa)	
	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	2,92	335,56	40,85	344,32	8,77	318,05		33,04	33,67
Ciclo 2	17,51	341,40	52,52	347,23	9,01	309,30	Fim	33,98	
Ciclo 3	17,51	344,32	52,52	347,23	9,82	310,76	Fim	33,82	
Ciclo 4	17,51	344,32	49,60	344,32	9,82	310,76	Fim	33,82	

Amostra	BC20/2
Idade	28
Data Ensaio	7-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,51
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	203,40
Diferença (Waveform)	185,7

Carga	17,67	203,40	Coef. Poisson
	0,00048	0,01584	0,30
	0,0024	0,01584	
	0,0054	0,01584	
	0,0024	0,01632	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3				(GPa)	
	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	26,26	315,14	23,34	329,73	6,06	297,63		35,31	35,80
Ciclo 2	32,10	318,05	32,10	329,73	4,08	291,79	Fim	36,02	
Ciclo 3	35,02	320,97	32,10	332,64	5,10	293,25	Fim	35,84	
Ciclo 4	35,02	320,97	35,02	332,64	4,08	291,79	Fim	36,02	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BC50/1
Idade	28
Data Ensaio	12-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,78
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	208,17
Diferença (Waveform)	190,5

Carga	17,67	208,17	Coef. Poisson
	0,00336	0,01680	0,27
	0,00048	0,01680	
	0,00048	0,01680	
	0,00048	0,01680	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)						(% x 10^{-6})	(% x 10^{-6})	(GPa)
Ciclo 1	32,10	385,17	23,34	358,91	4,96	344,32		31,31	32,35
Ciclo 2	46,69	385,17	40,85	353,07	7,76	325,35	18,97	33,13	
Ciclo 3	43,77	388,09	37,93	355,99	7,63	331,19	Fim	32,55	
Ciclo 4	43,77	391,00	40,85	358,91	8,40	332,64	Fim	32,41	

Amostra	BC50/2
Idade	28
Data Ensaio	12-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,78
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	208,17
Diferença (Waveform)	190,5

Carga	17,67	208,17	Coef. Poisson
	0,00048	0,0168	0,29
	0,00192	0,0168	
	0,00192	0,0168	
	0,00192	0,0168	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)						(% x 10^{-6})	(% x 10^{-6})	(GPa)
Ciclo 1	23,34	353,07	29,18	364,74	1,77	332,64		32,41	33,18
Ciclo 2	32,10	350,15	37,93	364,74	2,75	322,43	10,21	33,43	
Ciclo 3	32,10	350,15	37,93	364,74	2,75	322,43	Fim	33,43	
Ciclo 4	32,10	350,15	37,93	364,74	2,75	322,43	Fim	33,43	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BRG1
Idade	28
Data Ensaio	14-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	12,42
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	219,53
Diferença (Waveform)	201,9

Carga	17,67	219,53	Coef. Poisson
	0,00096	0,01872	0,27
	0,00192	0,01872	
	0,00192	0,01872	
	0,00192	0,01872	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)						%	(% x 10^{-6})	(% x 10^{-6})	(GPa)
Ciclo 1	17,51	420,18	29,18	420,18	2,90	396,84		28,78	29,36
Ciclo 2	23,34	414,35	43,77	426,02	2,24	386,63	10,21	29,55	
Ciclo 3	14,59	405,59	46,69	431,85	1,49	388,09	Fim	29,43	
Ciclo 4	11,67	399,76	52,52	434,77	1,50	385,17	Fim	29,66	

Amostra	BRG2
Idade	28
Data Ensaio	14-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	12,42
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	219,48
Diferença (Waveform)	201,8

Carga	17,67	219,48	Coef. Poisson
	0,00720	0,00720	0,10
	0,00720	0,00720	
	0,00720	0,00720	
	0,00768	0,00720	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)						%	(% x 10^{-6})	(% x 10^{-6})	(GPa)
Ciclo 1	26,26	443,53	35,02	449,36	0,70	415,81		27,46	29,74
Ciclo 2	55,44	426,02	93,37	469,79	1,57	373,50	42,31	30,58	
Ciclo 3	58,36	417,26	93,37	481,46	8,13	373,50	Fim	30,58	
Ciclo 4	58,36	417,26	93,37	486,81	9,62	376,17	Fim	30,36	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BG20/1
Idade	28
Data Ensaio	19-04-2011

Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,65
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	205,84
Diferença (Waveform)	188,2

Carga	17,67	205,84	Coef. Poisson
	0,00096	0,01824	0,26
	0,00192	0,01776	
	0,00192	0,01776	
	0,00144	0,01776	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E (GPa)	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	32,10	411,43	20,43	414,35	3,85	386,63		27,54	28,66
Ciclo 2	43,77	417,26	52,52	408,51	4,69	364,74	21,88	29,19	
Ciclo 3	43,77	423,10	52,52	408,51	6,15	367,66	Fim	28,96	
Ciclo 4	46,69	426,02	52,52	408,51	6,15	367,66	Fim	28,96	

Amostra	BG20/2
Idade	28
Data Ensaio	19-04-2011

Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,65
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	205,87
Diferença (Waveform)	188,2

Carga	17,67	205,87	Coef. Poisson
	0,00048	0,03552	0,53
	0,00768	0,03552	
	0,00816	0,03600	
	0,00816	0,03600	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E (GPa)	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	29,18	399,76	17,51	396,84	2,36	374,95		28,40	30,27
Ciclo 2	78,78	411,43	43,77	393,92	5,26	341,40	33,56	31,20	
Ciclo 3	81,70	420,18	43,77	396,84	4,31	345,78	Fim	30,80	
Ciclo 4	87,54	426,02	43,77	399,76	5,17	347,23	Fim	30,67	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BG50/1
Idade	28
Data Ensaio	21-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,46
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	202,51
Diferença (Waveform)	184,8

Carga	17,67	202,51	Coef. Poisson
	0,00048	0,01488	0,24
	0,00192	0,01536	
	0,00144	0,01536	
	0,00144	0,01536	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	29,18	376,41	26,26	393,92	5,88	357,45		29,26	29,94
Ciclo 2	40,85	379,33	40,85	391,00	3,45	344,32	13,13	30,38	
Ciclo 3	40,85	385,17	40,85	393,92	2,54	348,69	Fim	30,00	
Ciclo 4	40,85	385,17	40,85	391,00	1,69	347,23	Fim	30,12	

Amostra	BG50/2
Idade	28
Data Ensaio	21-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,46
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	202,51
Diferença (Waveform)	184,8

Carga	17,67	202,51	Coef. Poisson
	0,00000	0,01488	0,24
	0,00240	0,01440	
	0,00240	0,01488	
	0,00240	0,01488	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

II

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	26,26	361,82	29,18	379,33	4,35	342,86		30,51	30,97
Ciclo 2	35,02	364,74	40,85	382,25	3,54	335,56	Fim	31,17	
Ciclo 3	35,02	364,74	40,85	382,25	3,54	335,56	Fim	31,17	
Ciclo 4	35,02	367,66	43,77	385,17	2,63	337,02	Fim	31,04	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BRB/1
Idade	28
Data Ensaio	26-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	12,25
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	216,48
Diferença (Waveform)	198,8

Carga	17,67	216,48	Coef. Poisson
	0,00096	0,0168	0,30
	0,0024	0,01632	
	0,00192	0,01632	
	0,00144	0,01584	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	20,43	318,05	26,26	332,64	2,94	302,01		37,25	37,85
Ciclo 2	29,18	315,14	37,93	338,48	5,10	293,25	Fim	38,36	
Ciclo 3	26,26	315,14	37,93	344,32	6,06	297,63	Fim	37,80	
Ciclo 4	23,34	312,22	40,85	344,32	5,05	296,17	Fim	37,98	

Amostra	BRB/2
Idade	28
Data Ensaio	26-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	12,25
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	216,48
Diferença (Waveform)	198,8

Carga	17,67	216,48	Coef. Poisson
	0,00096	0,02016	0,36
	0,00288	0,02064	
	0,00288	0,02064	
	0,00240	0,02064	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

II

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média	Delta entre ciclos	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	29,18	353,07	17,51	309,30	9,91	307,84		36,54	37,91
Ciclo 2	67,11	364,74	23,34	309,30	3,92	291,79	16,05	38,55	
Ciclo 3	70,03	370,58	23,34	312,22	3,88	294,71	Fim	38,17	
Ciclo 4	75,87	373,50	23,34	312,22	2,94	293,25	Fim	38,36	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BB20/1
Idade	28
Data Ensaio	28-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,73
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	207,36
Diferença (Waveform)	189,7

Carga	17,67	207,36	Coef. Poisson
	0,00096	0,01632	0,30
	0,00288	0,01680	
	0,00288	0,01632	
	0,00240	0,01632	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média (% x 10 ⁻⁶)	Delta entre ciclos (% x 10 ⁻⁶)	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	20,43	323,89	23,34	315,14	3,85	297,63		36,07	36,11
Ciclo 2	35,02	338,48	29,18	315,14	5,77	294,71	Fim	36,42	
Ciclo 3	37,93	347,23	29,18	318,05	6,60	299,09	Fim	35,89	
Ciclo 4	46,69	353,07	29,18	318,05	5,71	297,63	Fim	36,07	

Amostra	BB20/2
Idade	28
Data Ensaio	28-04-2011
Nome do Ficheiro	
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)	1,00
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)	17,67
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)	11,73
Força aplicada p/ fc/3 (kN)	207,36
Diferença (Waveform)	189,7

Carga	17,67	207,36	Coef. Poisson
	0,00048	0,01488	0,26
	0,00096	0,01440	
	0,00048	0,01440	
	0,00048	0,01392	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média (% x 10 ⁻⁶)	Delta entre ciclos (% x 10 ⁻⁶)	E	
	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)	Extensão inicial (% x 10 ⁻⁶)	Extensão fc/3 (% x 10 ⁻⁶)				(GPa)	
Ciclo 1	23,34	326,81	23,34	332,64	1,92	306,38		35,03	35,50
Ciclo 2	32,10	329,73	29,18	329,73	0,98	299,09	Fim	35,89	
Ciclo 3	35,02	332,64	29,18	329,73	0,98	299,09	Fim	35,89	
Ciclo 4	35,02	338,48	32,10	338,48	0,96	304,92	Fim	35,20	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Amostra	BB50/1									
Idade	28									
Data Ensaio	03-05-2011									
Nome do Ficheiro										
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)			1,00							
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)			17,67							
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)			11,77							
Força aplicada p/ fc/3 (kN)			207,99							
Diferença (Waveform)			190,3							

Carga	17,67	207,99	Coef. Poisson
	0,00192	0,01200	0,20
	0,00192	0,01200	
	0,00192	0,01200	
	0,00192	0,01200	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média (% x 10 ⁻⁶)	Delta entre ciclos (% x 10 ⁻⁶)	E	
	Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3				(GPa)	
	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	32,10	370,58	29,18	376,41	2,59	342,86		31,41	32,24
Ciclo 2	40,85	373,50	40,85	373,50	0,00	332,64	10,21	32,38	
Ciclo 3	43,77	376,41	43,77	373,50	0,88	331,19	Fim	32,52	
Ciclo 4	43,77	376,41	43,77	370,58	1,75	329,73	Fim	32,66	

Amostra	BB50/2									
Idade	28									
Data Ensaio	03-05-2011									
Nome do Ficheiro										
Tensão inicial (0.5 a 1 Mpa)			1,00							
Força aplicada p/ tensão inicial (kN)			17,67							
Tensão de ensaio - fc/3 (Mpa)			11,77							
Força aplicada p/ fc/3 (kN)			207,99							
Diferença (Waveform)			190,3							

Carga	17,67	207,99	Coef. Poisson
	0,00192	0,01920	0,34
	0,00192	0,01920	
	0,00192	0,01920	
	0,00192	0,01920	

* - caso seja >10% o ensaio é anulado

	Base de medida 1		Base de medida 2		Delta entre bases de medida*	Extensão média (% x 10 ⁻⁶)	Delta entre ciclos (% x 10 ⁻⁶)	E	
	Extensão inicial	Extensão fc/3	Extensão inicial	Extensão fc/3				(GPa)	
	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)	(% x 10 ⁻⁶)					
Ciclo 1	32,10	332,64	32,10	361,82	9,71	315,14		34,18	34,02
Ciclo 2	32,10	335,56	29,18	358,91	8,65	316,60	Fim	34,02	
Ciclo 3	32,10	335,56	26,26	355,99	8,65	316,60	Fim	34,02	
Ciclo 4	32,10	335,56	23,34	355,99	9,62	318,05	Fim	33,86	

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

ANEXO L: Resistência ao desgaste por abrasão



ANEXO L - RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

B100M																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)
1	49,96	45,85	4,11	46,82	44,51	2,31	48,3	45,04	3,26	49,22	45,68	3,54	47,11	43	4,11	48,13	44,1	4,03
2	49,56	45,57	3,99	47,42	44,17	3,25	47,77	45,12	2,65	49,52	46	3,52	47,03	43,05	3,98	48,31	43,75	4,56
3	49,04	45,25	3,79	47,41	43,69	3,72	47,73	45,09	2,64	49,72	46,05	3,67	46,9	43,06	3,84	48,69	43,47	5,22
4	49,8	45,92	3,88	47,22	44,36	2,86	47,88	44,79	3,09	48,27	45,54	2,73	47,34	42,76	4,58	47,97	44,39	3,58
5	49,63	46,04	3,59	48,05	44,14	3,91	48,54	44,78	3,76	49,04	46,38	2,66	47,68	43,12	4,56	48,61	44,01	4,6
6	48,96	45,6	3,36	47,63	43,51	4,12	48,49	44,73	3,76	48,74	45,98	2,76	47,11	42,76	4,35	48,73	43,6	5,13
7	49,43	45,6	3,83	47,37	43,91	3,46	48,36	44,48	3,88	47,01	45,41	1,6	47,08	42,89	4,19	47,68	44,33	3,35
8	49,52	45,89	3,63	47,47	43,76	3,71	48,71	44,55	4,16	47,62	45,81	1,81	47,22	42,93	4,29	47,98	44,09	3,89
9	49,09	45,44	3,65	47,5	43,5	4	48,7	44,53	4,17	47,95	45,79	2,16	47,09	42,87	4,22	48,33	43,93	4,4
Mediana			3,79			3,71			3,76			2,73			4,22			4,40
Media			3,76			3,48			3,49			2,72			4,24			4,31
Massa (g)	553,6	514,1	39,51	540,9	501,6	39,3	551,5	514,7	36,8	561,4	532	29,4	505,5	463	42,5	533,3	485,9	47,4
																		3,77
																		3,66
																		39,15

BRC																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)
1	48,33	45,32	3,01	48,33	45,85	2,48	49,54	46,39	3,15	47,45	45,16	2,29	46,43	43,93	2,5	49,82	47,3	2,52
2	48,45	45,36	3,09	48,59	45,96	2,63	49,26	46,37	2,89	48,23	44,69	3,54	46,81	43,85	2,96	49,94	47,28	2,66
3	48,26	45,57	2,69	48,56	45,53	3,03	49,53	46,44	3,09	48,21	44,6	3,61	46,92	43,72	3,2	49,81	47,26	2,55
4	48,26	45,75	2,51	48,48	45,93	2,55	49,54	46,62	2,92	47,21	44,61	2,6	46,43	43,93	2,5	49,91	47,28	2,63
5	48,44	45,37	3,07	48,37	45,85	2,52	49,33	46,67	2,66	47,88	44,64	3,24	46,68	44,14	2,54	50,12	47,35	2,77
6	48,08	45,22	2,86	48,28	45,5	2,78	49,08	46,47	2,61	48,02	44,56	3,46	46,7	43,91	2,79	50,22	47,14	3,08
7	48,27	45,7	2,57	47,96	45,7	2,26	49,13	46,77	2,36	47,27	44,63	2,64	46,79	43,72	3,07	50,14	46,97	3,17
8	48,21	45,41	2,8	48,07	45,65	2,42	48,99	46,8	2,19	47,3	44,62	2,68	46,57	43,83	2,74	50,23	47,16	3,07
9	48,26	45,39	2,87	48,03	45,52	2,51	48,61	46,37	2,24	47,43	44,69	2,74	47,28	44,04	3,24	50,41	47,21	3,2
Mediana			2,86			2,52			2,66			2,74			2,79			2,77
Media			2,83			2,58			2,68			2,98			2,84			2,85
Massa (g)	549,8	516,6	33,2	551,7	521,1	30,6	551,2	519,2	32	539,6	507,4	32,2	529,5	497,4	32,1	570,2	538,5	31,7
																		2,72
																		2,79
																		31,97

ANEXO L - RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

BC20																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	48,34	45,69	2,65	48,78	45,33	3,45	48,20	45,50	2,7	48,67	44,94	3,73	49,12	46,38	2,74	47,7	44,99	2,71
2	49,06	45,39	3,67	48,07	44,98	3,09	48,46	45,60	2,86	48,58	44,99	3,59	48,94	46,07	2,87	47,44	44,52	2,92
3	49,01	45,46	3,55	48,14	44,85	3,29	48,68	45,51	3,17	48,27	44,67	3,6	48,71	45,77	2,94	47,31	44,22	3,09
4	48,76	45,74	3,02	48,39	44,94	3,45	48,36	45,83	2,53	48,66	45,18	3,48	49,09	46,36	2,73	47,78	45	2,78
5	48,97	45,9	3,07	48,1	45,1	3	48,78	46,16	2,62	48,46	45,23	3,23	49,81	46,63	3,18	48,6	45,98	2,62
6	49,04	45,64	3,4	47,81	45,01	2,8	48,72	45,51	3,21	47,98	44,92	3,06	49,12	45,78	3,34	47,98	45,33	2,65
7	48,35	45,3	3,05	48,36	44,98	3,38	47,92	45,21	2,71	48,46	44,74	3,72	49,37	46,5	2,87	48,1	45,46	2,64
8	48,58	45,64	2,94	47,94	44,92	3,02	48,18	45,52	2,66	49,32	45,09	4,23	49,86	46,93	2,93	48,3	45,35	2,95
9	48,8	45,42	3,38	47,86	44,74	3,12	48,51	45,70	2,81	48	45,24	2,76	49,83	46,76	3,07	48,18	45,38	2,8
Mediana			3,07			3,12			2,71			3,59			2,93			2,78
Media			3,19			3,18			2,81			3,49			2,96			2,80
Massa (g)	548,0	516,0	32	553,1	522,9	30,2	549,5	519,8	29,7	552,8	516,4	36,4	561,6	529,5	32,1	547,1	517,2	29,9

BC50																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	48,82	46,45	2,37	47,49	45,5	1,99	48	45,05	2,95	48,45	45,1	3,35	48,32	45,57	2,75	48,78	45,53	3,25
2	49,08	46,23	2,85	47,49	44,42	3,07	48,02	45,12	2,9	48,45	44,95	3,5	48,37	45,3	3,07	48,46	45,35	3,11
3	48,83	46,04	2,79	47,6	44,2	3,4	48,13	45,02	3,11	48,3	44,64	3,66	48,19	45,24	2,95	48,53	45,22	3,31
4	49,28	46,41	2,87	47,67	44,22	3,45	47,69	45,19	2,5	48,48	45,15	3,33	48,85	45,42	3,43	48,53	45,91	2,62
5	49,84	46,53	3,31	48,15	44,55	3,6	48,25	45,05	3,2	48,51	45,45	3,06	49,43	45,8	3,63	48,73	45,98	2,75
6	49,22	46,08	3,14	47,84	43,85	3,99	47,84	44,71	3,13	48,36	45,06	3,3	48,76	45,28	3,48	48,03	45,3	2,73
7	49,72	47,2	2,52	47,34	44,03	3,31	47,6	44,8	2,8	48,39	45,12	3,27	49,02	44,99	4,03	48,02	45,04	2,98
8	50,18	46,24	3,94	47,79	44,34	3,45	47,92	44,94	2,98	48,2	45,11	3,09	49,21	45,34	3,87	48,23	45,28	
9	49,62	46,04	3,58	48,15	43,89	4,26	48,14	44,78	3,36	48,42	45,23	3,19	49,13	44,88	4,25	48,37	45,1	3,27
Mediana			2,87			3,45			2,98			3,30			3,48			2,98
Media			3,04			3,39			2,99			3,31			3,50			3,00
Massa (g)	563,4	531,4	32	550,6	513,6	37	552,3	515,9	36,4	553,1	517	36,1	565,5	528	37,5	555,8	524	31,8

ANEXO L - RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

BRG																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1			2			3			4			5			6		
	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)
1	48,22	46,17	2,05	48,22	46,25	1,97	48,77	46,38	2,39	48,2	45,66	2,54	48,6	46,34	2,26	48,29	45,53	2,76
2	48,09	45,88	2,21	48	45,86	2,14	48,55	46,26	2,29	47,76	45,72	2,04	48,57	46,19	2,38	48,33	45,56	2,77
3	48,29	45,44	2,85	48,25	45,42	2,83	48,47	45,95	2,52	47,65	45,77	1,88	48,36	46,04	2,32	48,19	45,27	2,92
4	48,42	46	2,42	48,5	46,1	2,4	48,37	46,38	1,99	48,08	45,48	2,6	48,73	46,47	2,26	48,51	45,39	3,12
5	48,19	45,71	2,48	48,77	46,85	1,92	48,7	46,81	1,89	48,46	45,59	2,87	49,12	46,48	2,64	48,24	45,88	2,36
6	48,34	45,62	2,72	48,25	45,72	2,53	48,41	46,21	2,2	47,92	45,74	2,18	48,71	46,26	2,45	48,04	45,2	2,84
7	47,99	46,01	1,98	48,76	46,03	2,73	48,28	46,24	2,04	48,2	45,51	2,69	48,87	46,39	2,48	47,72	45,11	2,61
8	48,11	45,88	2,23	48,55	46,3	2,25	48,5	46,48	2,02	47,99	45,42	2,57	49,17	46,18	2,99	47,83	45,32	2,51
9	47,92	45,51	2,41	48,44	45,93	2,51	48,51	46,4	2,11	48,12	45,74	2,38	49,12	46,17	2,95	47,93	45,11	2,82
Mediana			2,41			2,40			2,11			2,54			2,45			2,77
Media			2,37			2,36			2,16			2,42			2,53			2,75
Massa (g)	540,9	515	25,9	545,8	518,3	27,5	561,1	536	25,1	549,7	522	27,7	531,5	504,4	27,1	529,9	500	29,9

2,45
2,43
27,20

BG/20																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1			2			3			4			5			6		
	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)
1	50,41	46,92	3,49	47,04	44,78	2,26	47,29	44,61	2,68	49,4	46,26	3,14	48,81	46,09	2,72	48,29	45,79	2,5
2	50,57	46,84	3,73	47,13	44,77	2,36	47,78	44,77	3,01	49,27	46,03	3,24	49,04	45,92	3,12	48,63	45,84	2,79
3	50,75	46,73	4,02	46,98	44,63	2,35	47,65	44,67	2,98	49,37	45,72	3,65	49,25	45,81	3,44	48,75	45,83	2,92
4	49,45	47,02	2,43	47,67	44,85	2,82	47,5	44,82	2,68	48,97	46,38	2,59	49,03	46,3	2,73	48,16	45,76	2,4
5	49,83	47,56	2,27	48,23	45,37	2,86	48,02	44,81	3,21	50,13	46,61	3,52	49,28	46,55	2,73	48,83	46,05	2,78
6	49,54	46,71	2,83	47,53	45	2,53	47,46	44,53	2,93	49,61	45,85	3,76	48,41	46,13	2,28	48,64	46	2,64
7	49,2	46,44	2,76	47,89	44,61	3,28	47,19	44,07	3,12	49,15	46,6	2,55	48,27	46,31	1,96	47,89	45,58	2,31
8	48,91	46,6	2,31	47,97	44,97	3	47,03	44,29	2,74	49,55	46,4	3,15	48,14	46,24	1,9	48,19	46,08	2,11
9	48,91	46,51	2,4	47,95	44,92	3,03	47,14	44,23	2,91	49,56	46,03	3,53	48,15	46,24	1,91	48,37	45,81	2,56
Mediana			2,76			2,82			2,93			3,24			2,72			2,56
Media			2,92			2,72			2,92			3,24			2,53			2,56
Massa (g)	575,6	543,4	32,2	550	518,8	31,2	531,6	499,3	32,3	556,2	520	36,2	543,7	517	26,7	552,5	524,3	28,2

2,84
2,81
31,13

ANEXO L - RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

BG50																		
Provetes																		
Pontos de leituta	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
1	48,59	45,61	2,98	48,57	45,47	3,1	47,74	45,29	2,45	48,71	45,65	3,06	48,5	45,74	2,76	47,87	44,35	3,52
2	48,57	45,6	2,97	48,75	45,41	3,34	47,58	45,12	2,46	48,88	45,63	3,25	48,35	45,38	2,97	47,94	44,64	3,3
3	48,49	45,28	3,21	48,51	45,27	3,24	47,63	44,73	2,9	48,84	45,46	3,38	48,32	44,94	3,38	47,88	44,6	3,28
4	48,21	45,39	2,82	48,7	45,77	2,93	47,82	45,01	2,81	48,79	46,01	2,78	48,49	45,4	3,09	48,14	44,73	3,41
5	49,06	45,68	3,38	48,93	45,64	3,29	48,21	45,53	2,68	49,07	46,07	3	48,85	45,59	3,26	48,51	45,64	2,87
6	48,74	45,27	3,47	48,54	45,45	3,09	47,93	44,7	3,23	48,91	45,72	3,19	48,46	45,31	3,15	48,21	45,06	3,15
7	48,17	45,27	2,9	48,35	45,3	3,05	47,69	44,7	2,99	48,92	45,91	3,01	48,46	45,09	3,37	48,1	45,07	3,03
8	48,39	45,34	3,05	48,24	45,44	2,8	47,78	44,6	3,18	49,15	46,25	2,9	48,46	45,39	3,07	47,88	45,05	2,83
9	48,34	45,6	2,74	48,26	45,14	3,12	48,07	44,49	3,58	49,14	45,96	3,18	48,42	45,02	3,4	48,23	45,53	2,7
Mediana			2,98			3,10			2,90			3,06			3,15			3,15
Media			3,06			3,11			2,92			3,08			3,16			3,12
Massa (g)	530	499,7	30,3	534,8	503,1	31,7	527,6	496,3	31,3	545,3	512,8	32,5	544,7	508,6	36,1	539,8	506,1	33,7
																		32,60

BRB																		
Provetes																		
Pontos de leituta	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
1	48,2	45,2	3	48,74	45,64	3,1	48,09	45,76	2,33	47,62	44,95	2,67	49,36	46,69	2,67	47,81	44,78	3,03
2	48,1	45,18	2,92	48,68	45,5	3,18	48,62	45,83	2,79	48,17	45	3,17	48,92	46,51	2,41	47,72	44,8	2,92
3	47,95	45,28	2,67	48,33	45,41	2,92	49,08	45,72	3,36	48,53	45,12	3,41	48,82	46,43	2,39	47,41	44,72	2,69
4	48,25	45,27	2,98	48,93	45,88	3,05	48,36	45,94	2,42	47,66	44,91	2,75	49,25	46,41	2,84	47,71	44,89	2,82
5	48,4	45,12	3,28	49,07	45,74	3,33	49,82	45,93	3,89	48,64	45,62	3,02	49,45	46,51	2,94	47,61	44,9	2,71
6	48,01	45,07	2,94	48,4	45,71	2,69	49,44	45,79	3,65	48,3	45,29	3,01	48,94	46,35	2,59	47,38	44,85	2,53
7	48,08	45,23	2,85	49,07	46,12	2,95	48,17	46,07	2,1	47,26	44,92	2,34	49,42	46,35	3,07	47,31	44,71	2,6
8	48,05	44,98	3,07	49,11	45,89	3,22	48,95	46,05	2,9	47,76	45,03	2,73	49,28	46,34	2,94	47,3	44,84	2,46
9	47,91	45,05	2,86	49,15	45,62	3,53	49,38	45,91	3,47	48,2	45,11	3,09	48,98	46,27	2,71	47,1	44,98	2,12
Mediana			2,94			3,10			2,90			3,01			2,71			2,69
Media			2,95			3,11			2,99			2,91			2,73			2,65
Massa (g)	545,8	513,5	32,3	562,4	530	32,4	573,2	540,9	32,3	557,1	525,3	31,8	583,8	552,3	31,5	557,1	525,2	31,9
																		32,03

ANEXO L - RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

BB20																		
Provetes																		
Pontos de leituta	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
1	49,65	46,66	2,99	47,6	44,8	2,8	48,47	45,16	3,31	49,24	45,59	3,65	49,41	45,71	3,7	47,76	45,07	2,69
2	49,57	46,4	3,17	47,36	44,35	3,01	48,28	45,08	3,2	48,68	45,86	2,82	49,42	45,81	3,61	47,25	44,74	2,51
3	49,81	46,41	3,4	47,17	43,91	3,26	47,6	45,03	2,57	48,52	45,73	2,79	48,9	45,89	3,01	47,04	44,29	2,75
4	49,49	46,34	3,15	48,26	45,05	3,21	48,49	45,24	3,25	49,08	45,95	3,13	49,47	45,68	3,79	47,76	45,15	2,61
5	49,74	46,02	3,72	47,55	44,24	3,31	47,97	45,21	2,76	49,6	46,08	3,52	49,22	46	3,22	47,61	44,86	2,75
6	49,82	45,94	3,88	47,55	43,81	3,74	47,64	45,05	2,59	49,43	46,18	3,25	48,92	46	2,92	47,2	44,5	2,7
7	49,17	45,74	3,43	47,95	44,59	3,36	48,15	44,94	3,21	49,02	45,85	3,17	49,42	45,55	3,87	47,94	45,13	2,81
8	49,25	45,86	3,39	47,74	44,32	3,42	47,91	44,85	3,06	48,85	45,99	2,86	49,14	45,6	3,54	47,67	44,87	2,8
9	49,12	45,61	3,51	47,69	43,8	3,89	47,63	44,74	2,89	48,78	46,07	2,71	48,76	45,67	3,09	47,39	44,52	2,87
Mediana			3,40			3,31			3,06			3,13			3,54			2,75
Media			3,40			3,33			2,98			3,10			3,42			2,72
Massa (g)	586,2	547,5	38,7	559,4	523,2	36,2	575,2	539,5	35,7	582	546,3	35,7	577,2	538,1	39,1	567,1	535,1	32

3,20
3,16
36,23

BB50																		
Provetes																		
Pontos de leitura	1,1			1,2			2,1			2,2			3,1			3,2		
	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ	Li	Lf	Δ
1	49,72	46,43	3,29	47,23	43,37	3,86	49,79	46,86	2,93	47,16	43,92	3,24	48,26	45,57	2,69	47,91	45,95	1,96
2	49,59	46,38	3,21	47,1	43,21	3,89	49,67	46,7	2,97	47,07	43,94	3,13	48,85	45,46	3,39	48,34	45,78	2,56
3	49,6	46,4	3,2	47,09	43,1	3,99	49,58	46,58	3	46,76	43,83	2,93	49,21	45,3	3,91	48,71	45,63	3,08
4	49,95	46,57	3,38	46,96	43,41	3,55	50,06	46,73	3,33	46,79	43,73	3,06	48,43	45,63	2,8	48,14	45,66	2,48
5	50,09	45,51	4,58	47,04	43,22	3,82	50,07	46,63	3,44	46,96	43,95	3,01	49,39	45,57	3,82	49,17	45,63	3,54
6	49,76	46,41	3,35	46,68	43,05	3,63	49,99	46,51	3,48	46,77	43,88	2,89	49,21	45,4	3,81	49,33	45,42	3,91
7	50,51	46,56	3,95	46,76	43,07	3,69	50,93	46,56	4,37	46,51	43,57	2,94	48,67	45,58	3,09	48,41	45,34	3,07
8	50,45	46,54	3,91	46,46	43,11	3,35	50,77	46,52	4,25	46,96	43,67	3,29	48,91	45,62	3,29	48,73	45,65	3,08
9	50,51	46,47	4,04	46,56	42,78	3,78	50,54	46,36	4,18	47,16	43,7	3,46	49,23	45,42	3,81	48,97	45,3	3,67
Mediana			3,38			3,78			3,44			3,06			3,39			3,08
Media			3,66			3,73			3,55			3,11			3,40			3,04
Massa (g)	556	533,5	22,5	534,6	493,7	40,9	581,5	543,3	38,2	553,1	519,3	33,8	565,9	528,1	37,8	573,3	539,4	33,9

3,36
3,41
34,52