

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

**Filipe João Ferreira Gameiro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Júri:**

Presidente: Prof. Dr. Luís Manuel Alves Dias

Orientador: Prof. Dr. Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Vogal: Prof. Dr. António José da Silva Costa

**Lisboa, Janeiro 2013**



## Resumo

De forma a satisfazer as suas necessidades, o ser humano tem vindo a consumir os recursos naturais disponíveis na Natureza. No entanto, apenas recentemente a sua importância enquanto parte integrante da sustentabilidade ambiental tem sido reconhecida e valorizada. Neste domínio, é hoje unânime que os desperdícios gerados na indústria de rochas ornamentais atingiram proporções incontroláveis em termos de sustentabilidade ambiental, impondo-se a criação de soluções inovadoras para a sua reutilização, restituindo-lhe o seu valor económico.

Nos concelhos de Estremoz, Borba e Vila-Viçosa (zona rica em mármore), avalia-se a quantidade de resíduos gerados em cerca de 80% do total de rocha extraída. Assim, esta dissertação pretende avaliar o desempenho em termos de durabilidade e viabilidade de betões estruturais com incorporação de agregados finos provenientes desses resíduos do ponto de vista da proteção ambiental e sustentabilidade das reservas naturais. Desta forma, é essencial garantir todos os parâmetros de segurança e qualidade, assim como definir rigorosamente o desempenho dos betões produzidos com agregados finos de resíduos da indústria de exploração do mármore, de forma a tornar possível a sua introdução no setor da construção civil.

Foram produzidas dez composições de betão: três de referência (com a totalidade de agregados finos de basalto, areia de rio e granito), três com substituição de 20% em volume de agregados finos por agregados finos reciclados de mármore, três com substituição de 50% em volume de agregados finos por agregados finos reciclados de mármore e um betão constituído por 100% de agregados finos reciclados de mármore.

Realizaram-se ensaios de caracterização dos agregados, nomeadamente de absorção de água e massa volúmica, análise granulométrica, baridade e volume de vazios, desgaste de Los Angeles e índice de forma. Adicionalmente, ensaiou-se o betão no seu estado fresco, avaliando a trabalhabilidade e a massa volúmica, e no seu estado endurecido, em termos de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e imersão, carbonatação, penetração de cloretos e retração.

Com esta investigação, concluiu-se que as características de durabilidade de betões com agregados finos de granito, basalto e areia de rio, tendem a melhorar, manter-se aproximadamente constantes, e piorar com a gradual incorporação de agregados finos de mármore, respetivamente. Contudo, concluiu-se também que estas alterações não condicionam a utilização de mármore no betão.

**Palavras-chave:** agregados finos de mármore; durabilidade de betões; resíduos da indústria de extração de mármore; sustentabilidade.

## Abstract

In order to meet their needs, humans have been consuming natural resources available in nature. However, its importance as part of the environmental sustainability has only recently been noticed. In this matter, it is nowadays consensual that ornamental stones quarrying industry waste has reached intolerable proportions in terms of environmental sustainability, requiring new solutions for its reuse, giving back its economic value.

It is evaluated that 80% of the total extracted rock in the Estremoz, Borba and Vila-Viçosa counties (known as a rich marble area) is considered waste. Thus, this dissertation aims at evaluating the performance in terms of durability and viability of structural concrete incorporating fine aggregates of recycled marble in order to increase the environmental protection and sustainability of natural resources. Therefore, it is essential to ensure all safety and quality parameters, as well as accurately define the performance of the concrete produced with waste fine aggregate of marble industry, allowing its introduction in the construction industry.

Ten concrete mixes were made: three standard concrete mixes (containing fine basalt, river sand and granite aggregates), three with 20% substitution in volume of primary fine aggregates by secondary fine aggregates from the marble quarrying industry waste, three with 50% substitution in volume of primary fine aggregates by secondary fine aggregates from the marble quarrying industry waste, and a 100% fine aggregate substitution concrete with marble quarrying industry waste.

The testes performed to characterize the aggregates were water absorption and particle density, sieve analysis, loose bulk density and voids, Los Angeles test and shape index. Furthermore, the workability and bulk density of fresh concrete were measured, and in the hardened state compressive strength, water absorption by capillarity and immersion, carbonation, chloride penetration and shrinkage were assessed.

As a result of this investigation, the tests performed showed that the durability characteristics of concrete with fine aggregates of granite, basalt and river sand tend to improve, remain approximately constant, and get worse as the gradual addition of fine aggregate marble increases, respectively. However, it was also established that these small changes do not compromise the use of fine aggregates from the marble quarrying industry waste in terms of concrete durability properties.

**Key-words:** fine marble aggregates; concrete durability; marble quarrying industry waste; sustainability.

## Agradecimentos

Neste espaço, pretendo fazer referência às pessoas e entidades que estiveram envolvidas na realização da presente dissertação. Desta forma, quero aqui expressar-lhes o meu agradecimento pela sua preciosa colaboração, apoio, incentivo e dedicação em todos os momentos passados ao longo de um ano de trabalho. Certamente, sem o seu auxílio, muitas das dificuldades e obstáculos sentidos não teriam sido ultrapassados com o sucesso desejado.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador científico desta dissertação, agradeço a sua imensurável dedicação, disponibilidade e experiência que, indiscutivelmente, contribuíram para o rigor e excelência deste trabalho. Quero também expressar-lhe a minha gratidão pela sua importante e determinante contribuição no complemento da minha formação profissional e pessoal através da sua simpatia, aconselhamento, orientação e instrução.

Aos meus pais e irmão, pelo incentivo, preocupação, esforço e entusiasmo que me motivaram todos os dias a enfrentar e superar as dificuldades sentidas e à restante família pelo apoio incondicional, direto ou indireto, em todos os momentos da minha vida.

Ao Engenheiro Diogo Costa da Silva pela amizade e contribuição decisiva e imprescindível na realização deste trabalho experimental.

Ao Engenheiro Miguel Bravo pela experiência, ajuda e paciência demonstrados ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Aos colegas do IST, Jorge Pontes, António André e Pedro Martins, pela sua ajuda na atividade laboratorial.

Às empresas LC - Negócios, Lagoagest, Solubema, Grupo Lena, José Marques Galo S.A., Grupo Soarvamil, Grupo Mota-Engil e Secil, pela colaboração logística e cedência dos materiais necessários à realização deste estudo.

Ao Engenheiro Hugo Primo, da Solubema, ao Engenheiro Miguel Nepomuceno, ao Engenheiro António Bettencourt Ribeiro e aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do IST, Leonel Silva, João Lopes e Fernando Alves, pela sua ajuda no trabalho realizado.

À Nádía Gonçalves pelo constante apoio, motivação, compreensão, paciência e revisão atenta da dissertação.

Aos meus amigos Diogo Costa da Silva, Francisco Martinho, Diogo Rego, Carlos Lagareiro, Rúben Timóteo, Miguel Garcia, Rui Silva, Gonçalo Ramalho, Helena Rita Monteiro, Filipe Silva, Cristian Félix, João Caldinhas, Romeu Rosa, António Cardoso, João Madeira, Alberto Silva e restantes amigos e colegas de curso que me acompanharam no meu percurso académico.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso no meu percurso escolar.

# Índice geral

Resumo.....	i
Abstract .....	ii
Agradecimentos.....	iii
1. Introdução .....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objetivos da dissertação e metodologias de investigação .....	3
1.3. Estrutura da dissertação .....	7
2. Estado da Arte .....	9
2.1. Introdução .....	9
2.2. Processo extrativo .....	9
2.3. Propriedades do mármore.....	12
2.3.1. Generalidades.....	12
2.3.2. Anticlinal de Estremoz.....	13
2.3.3. Mármore de Estremoz.....	14
2.4. Propriedades de betões com agregados de mármore .....	20
2.4.1. Características gerais das campanhas experimentais .....	20
2.4.2. Trabalhabilidade .....	26
2.4.3. Massa volúmica .....	27
2.4.4. Volume de vazios.....	28
2.4.5. Absorção de água.....	29
2.4.6. Resistência à carbonatação .....	32
2.4.7. Resistência à penetração de cloretos.....	33
2.4.8. Retração .....	34
2.5. Outras aplicações do mármore .....	37
2.6. Conclusões.....	41
3. Programa experimental .....	43
3.1 Introdução.....	43

3.2. Planificação da campanha experimental.....	43
3.2.1. Primeira fase - Análise de agregados.....	44
3.2.2. Segunda fase - Produção dos betões .....	44
3.2.3. Terceira fase - Ensaios de durabilidade .....	45
3.3. Formulação dos betões .....	45
3.3.1. Introdução .....	45
3.3.2. Parâmetros iniciais de formulação .....	46
3.3.3. Dimensão máxima do agregado ( $D_{máx}$ ).....	46
3.3.4. Valor médio da tensão de rotura à compressão ( $f_{cm}$ ) .....	47
3.3.5. Determinação da relação água / cimento ( $a/c$ ).....	48
3.3.6. Determinação do volume de vazios ( $V_v$ ) .....	49
3.3.7. Determinação do índice de vazios ( $I_v$ ) .....	50
3.3.8. Determinação da dosagem de água de amassadura ( $V_A$ ) .....	51
3.3.9. Determinação da dosagem de cimento ( $V_C$ ) .....	52
3.3.10. Determinação do volume das partículas sólidas ( $V_S$ ) .....	52
3.3.11. Percentagem de cimento relativa ao volume sólido total ( $V_{C\%}$ ) .....	52
3.3.12. Método das curvas de referência - Curva de Faury .....	52
3.3.13. Determinação do módulo de finura para a curva de referência de Faury .....	56
3.3.14. Composição dos betões de referência.....	57
3.4. Produção dos betões .....	59
3.5. Ensaios aos agregados .....	61
3.5.1. Introdução .....	61
3.5.2. Absorção de água e massa volúmica .....	61
3.5.3. Análise granulométrica .....	66
3.5.4. Baridade e volume de vazios .....	69
3.5.5. Desgaste de Los Angeles.....	72
3.5.6. Índice de forma .....	74
3.6. Ensaios ao betão em estado fresco .....	77
3.6.1. Introdução .....	77

3.6.2. Abaixamento do cone de Abrams .....	77
3.6.3. Massa volúmica .....	79
3.7. Ensaio ao betão em estado endurecido .....	81
3.7.1. Introdução .....	81
3.7.2. Resistência à compressão.....	82
3.7.3. Absorção de água por capilaridade .....	84
3.7.4. Absorção de água por imersão.....	86
3.7.5. Resistência à carbonatação .....	88
3.7.6. Resistência à penetração de cloretos.....	91
3.7.7. Retração .....	94
4. Resultados do programa experimental .....	97
4.1. Introdução.....	97
4.2. Propriedades dos agregados .....	97
4.2.1. Absorção de água e massa volúmica .....	98
4.2.2. Análise granulométrica .....	99
4.2.3. Baridade e volume de vazios .....	108
4.2.4. Desgaste de Los Angeles.....	108
4.2.5. Índice de forma .....	109
4.3. Propriedades do betão no estado fresco.....	110
4.3.1. Abaixamento do cone de Abrams .....	110
4.3.2. Massa volúmica no estado fresco .....	113
4.4. Propriedades do betão no estado endurecido.....	114
4.4.1. Resistência à compressão.....	114
4.4.2. Absorção de água por capilaridade .....	119
4.4.3. Absorção de água por imersão.....	124
4.4.4. Resistência à carbonatação .....	128
4.4.5. Resistência à penetração de cloretos.....	133
4.4.6. Retração .....	138
4.5. Conclusões.....	144

4.5.1. Propriedades dos agregados .....	144
4.5.2. Propriedades do betão no estado fresco .....	144
4.5.3. Propriedades do betão no estado endurecido .....	145
5. Conclusões .....	147
5.1. Considerações finais .....	147
5.2. Conclusões gerais .....	148
5.2.1. Propriedades dos agregados .....	148
5.2.1. Propriedades do betão no estado fresco .....	149
5.2.2. Betão no estado endurecido .....	149
5.3. Propostas de desenvolvimento futuro .....	153
Bibliografia .....	155
Anexo A - Composição dos betões .....	A.1
Anexo B - Absorção de água e massa volúmica .....	B.1
Anexo C - Curvas granulométricas .....	C.1
Anexo D - Baridade e volume de vazios .....	D.1
Anexo E - Desgaste de Los Angeles .....	E.1
Anexo F - Índice de forma .....	F.1
Anexo G - Abaixamento e massa volúmica do betão no estado fresco .....	G.1
Anexo H - Resistência à compressão .....	H.1
Anexo I - Absorção de água por capilaridade .....	I.1
Anexo J - Absorção de água por imersão .....	J.1
Anexo K - Resistência à carbonatação .....	K.1
Anexo L - Resistência à penetração de cloretos .....	L.1
Anexo M - Retração .....	M.1

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Escombreira de mármore.....	4
Figura 1.2 - Centro de produção de agregados de Vila Viçosa, Herdade da Vigária.....	5
Figura 1.3 - Conjunto de betões a produzir.....	6
Figura 2.1 - Várias etapas do processo produtivo.....	10
Figura 2.2 - Fluxograma das fases de extração de rocha.....	11
Figura 2.3 - Localização e esboço geológico do anticlinal de Estremoz .....	13
Figura 2.4 - Dobra devido a movimentos tectónicos.....	14
Figura 2.5 - Cronologia dos estratos rochosos.....	14
Figura 2.6 - Relação entre a resistência à compressão e a baridade.....	17
Figura 2.7 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão.....	17
Figura 2.8 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água.....	17
Figura 2.9 - Relação entre a baridade e a resistência ao choque.....	18
Figura 2.10 - Relação entre a porosidade e a resistência ao choque.....	18
Figura 2.11 - Resultados experimentais de incorporação de pó de mármore em betão auto-compactável.....	23
Figura 2.12 - Microestrutura de betão auto-compactável com 300 kg/m <sup>3</sup> de pó de mármore.....	23
Figura 2.13 - Variação percentual da resistência à compressão após imersão em solução de sulfatos.....	25
Figura 2.14 - Variação da massa volúmica com a adição de pó de mármore.....	28
Figura 2.15 - Variação do volume de vazios com a adição de pó de mármore.....	29
Figura 2.16 - Absorção de água para diferentes composições de betão.....	30
Figura 2.17 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	31
Figura 2.18 - Variação do coeficiente de capilaridade devido à adição de pó de mármore.....	31
Figura 2.19 - Variação da absorção de água, q, devido à adição de pó de mármore.....	31
Figura 2.20 - Variação do coeficiente de capilaridade com a adição de pó de mármore.....	32
Figura 2.21 - Variação de penetração de cloretos para os betões especificados na Tabela 2.10.....	34

Figura 2.22 - Sequência cronológica do mecanismo de retração.....	35
Figura 2.23 - Influência da relação água / cimento e da dosagem de agregados na retração.....	36
Figura 2.24 - Ensaio de retração a betões com diferentes tipos de agregados.....	37
Figura 2.25 - Variação da absorção de água para diferentes percentagens de resíduos de mármore em peças cerâmicas.....	39
Figura 3.1 - Correlação entre resistência média à compressão aos 28 dias e relação água / cimento.....	49
Figura 3.2 - Representação da curva granulométrica de referência de Faury.....	53
Figura 3.3 - Curva de referência de Faury.....	55
Figura 3.4 - Curva de referência de Faury e curvas granulométricas dos agregados.....	55
Figura 3.5 - Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água e massa volúmica.....	62
Figura 3.6 - Secagem do provete com uma corrente de ar quente.....	64
Figura 3.7 - Balde de aço inoxidável de 5 litros.....	70
Figura 3.8 - Máquina de Los Angeles e carga abrasiva.....	73
Figura 3.9 - Paquímetro.....	75
Figura 3.10 - Tipos de abaixamento válidos.....	79
Figura 3.11 - Prensa hidráulica de 4 colunas de velocidade controlável.....	83
Figura 3.12 - Processo de imersão de provetes em água e balança hidrostática.....	87
Figura 3.13 - Borracha líquida e pincel, fenolftaleína, martelo, escopro e provetes ensaiados.....	89
Figura 3.14 - Provetes de ensaio partidos em quartos de provete e após aplicação de fenolftaleína.....	90
Figura 3.15 - Provetes partidos ao meio com aplicação de nitrato de prata.....	93
Figura 3.16 - Provetes de ensaio com pastilhas metálicas e betume polimérico.....	95
Figura 4.1 - Representação gráfica da análise granulométrica à brita 2.....	100
Figura 4.2 - Representação gráfica da análise granulométrica da brita 1.....	101
Figura 4.3 - Representação gráfica da análise granulométrica do bago de arroz.....	102
Figura 4.4 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia grossa de rio.....	103
Figura 4.5 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia fina de rio.....	104
Figura 4.6 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de basalto.....	105
Figura 4.7 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de granito.....	106

Figura 4.8 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de mármore.....	107
Figura 4.9 - Valores do abaixamento do cone de Abrams para os betões produzidos.....	111
Figura 4.10 - Valores de relação água / cimento para os betões produzidos.....	112
Figura 4.11 - Representação gráfica da massa volúmica no estado fresco dos betões produzidos.....	113
Figura 4.12 - Resistência à compressão aos 7 dias para os vários betões.....	116
Figura 4.13 - Resistência à compressão aos 28 dias para os vários betões.....	116
Figura 4.14 - Resistência à compressão aos 56 dias para os vários betões.....	116
Figura 4.15 - Percentagem relativa da resistência à compressão dos betões com substituição de finos e grossos de mármore.....	118
Figura 4.16 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas para os vários betões.....	120
Figura 4.17 - Altura de absorção de água por capilaridade às 72 horas para os vários betões...	121
Figura 4.18 - Absorção de água dos vários betões ao longo de 72 horas de ensaio.....	122
Figura 4.19 - Altura de ascensão capilar dos vários betões ao longo de 72 horas de ensaio....	122
Figura 4.20 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade médio dos vários betões para diferentes durações de ensaio.....	123
Figura 4.21 - Comparação de coeficientes de absorção de água por capilaridade em betões com substituição de finos e grossos de mármore.....	124
Figura 4.22 - Absorção de água por imersão para os vários betões.....	126
Figura 4.23 - Média de absorção de água por imersão dos vários betões.....	126
Figura 4.24 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos vários betões.....	127
Figura 4.25 - Resistência à compressão aos 28 dias com a absorção de água por imersão de vários estudos.....	128
Figura 4.26 - Coeficiente de carbonatação dos diferentes betões para vários tempos de exposição ao CO <sub>2</sub> .....	130
Figura 4.27 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de basalto.....	130
Figura 4.28 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de calcário.....	130

Figura 4.29 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de granito.....	131
Figura 4.30 - Comparação de profundidades de carbonatação em betões com substituição de finos e grossos de mármore.....	131
Figura 4.31 - Profundidade de carbonatação média para diferentes percentagens de substituição e tempos de ensaio em betões com substituição de finos e grossos de mármore.....	132
Figura 4.32 - Relação entre a absorção de água por imersão e a profundidade de carbonatação aos 91 dias.....	132
Figura 4.33 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias.....	133
Figura 4.34 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias para os vários betões.....	134
Figura 4.35 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias para os vários betões.....	135
Figura 4.36 - Coeficiente de difusão de cloretos médio para diferentes percentagens de substituição de agregados finos primários por mármore.....	135
Figura 4.37 - Comparação de coeficientes de difusão de cloretos aos 91 dias em betões com substituição de agregados finos e grossos de mármore.....	136
Figura 4.38 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a absorção de água por imersão.....	136
Figura 4.39 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias.....	137
Figura 4.40 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias.....	137
Figura 4.41 - Retração do conjunto de betões de basalto ao longo de 91 dias.....	138
Figura 4.42 - Retração do conjunto de betões de areia de rio ao longo de 91 dias.....	139
Figura 4.43 - Retração do conjunto de betões de granito ao longo de 91 dias.....	139
Figura 4.44 - Retração média após 91 dias de cura para diferentes percentagens de substituição de agregados finos.....	140
Figura 4.45 - Variação da retração dos betões em função do tipo de agregados da sua composição.....	141
Figura 4.46 - Relação entre a retração aos 91 dias de ensaio e a absorção de água por imersão nos vários betões.....	142
Figura 4.47 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias...	142

Figura 4.48 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à carbonatação aos 28 dias..	143
Figura 4.49 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à penetração de cloretos aos 91 dias.....	143

## Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Produção de pedra natural por países em 2004 e 2009.....	2
Tabela 2.1 - Composição química do mármore.....	12
Tabela 2.2 - Caracterização física e mecânica do mármore.....	13
Tabela 2.3 - Composição química do mármore do anticlinal de Estremoz.....	15
Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz.....	15
Tabela 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz.....	16
Tabela 2.6 - Comparação das propriedades mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz.....	19
Tabela 2.7 - Composição dos betões.....	21
Tabela 2.8 - Composição dos betões em estudo.....	21
Tabela 2.9 - Variação da resistência à compressão de betão para diferente tempo e condições de cura.....	22
Tabela 2.10 - Composição dos tipos de betão.....	24
Tabela 2.11 - Propriedades físicas dos agregados.....	24
Tabela 2.12 - Variação da resistência à compressão de betão para diferentes tempos e condições de cura.....	25
Tabela 3.1 - Regulamentação utilizada para caracterização de agregados grossos e finos.....	44
Tabela 3.2 - Regulamentação utilizada para controlo de qualidade do betão.....	45
Tabela 3.3 - Ensaio de durabilidade.....	45
Tabela 3.4 - Parâmetros de formulação iniciais.....	46
Tabela 3.5 - Desvios padrão em função das condições de produção do betão.....	48
Tabela 3.6 - Relação água / cimento obtidos por Nepomuceno e ACI.....	49
Tabela 3.7 - Volume de vazios proposto pelo ACI.....	50
Tabela 3.8 - Parâmetro K e K' para a determinação do índice de vazios.....	51
Tabela 3.9 - Parâmetros A e B.....	54
Tabela 3.10 - Percentagens iniciais de cada tipo de agregado na composição dos betões de referência.....	56
Tabela 3.11 - Módulos de finura de cada tipo de agregado dos betões de referência.....	56

Tabela 3.12 - Valores do módulo de finura em função dos parâmetros $D_{máx}$ e $\phi$ .....	57
Tabela 3.13 - Acerto do módulo de finura da areia de rio.....	57
Tabela 3.14 - Acerto do módulo de finura do basalto.....	58
Tabela 3.15 - Acerto do módulo de finura do granito.....	58
Tabela 3.16 - Acerto do módulo de finura do mármore.....	58
Tabela 3.17 - Percentagens corrigidas de cada tipo de agregado dos betões de referência.....	58
Tabela 3.18 - Percentagem de cada tipo de agregado na massa total de betão.....	59
Tabela 3.19 - Provetes e quantidade de betão produzido.....	60
Tabela 3.20 - Determinação da massa mínima dos provetes.....	63
Tabela 3.21 - Determinação da massa mínima dos provetes de ensaio.....	67
Tabela 3.22 - Capacidade mínima de recipientes para diferentes dimensões máximas de agregados.....	70
Tabela 3.23 - Determinação da massa mínima do provete para o ensaio de índice de forma.....	75
Tabela 4.1 - Absorção de água e massa volúmica dos diferentes tipos de agregados.....	98
Tabela 4.2 - Ensaio de análise granulométrica à brita 2.....	100
Tabela 4.3 - Ensaio de análise granulométrica à brita 1.....	101
Tabela 4.4 - Ensaio de análise granulométrica ao bago de arroz.....	102
Tabela 4.5 - Ensaio de análise granulométrica à areia grossa de rio.....	103
Tabela 4.6 - Ensaio de análise granulométrica à areia fina de rio.....	104
Tabela 4.7 - Ensaio de análise granulométrica à areia de basalto.....	105
Tabela 4.8 - Ensaio de análise granulométrica à areia de granito.....	106
Tabela 4.9 - Ensaio de análise granulométrica à areia de mármore.....	107
Tabela 4.10 - Baridade e volume de vazios dos diferentes tipos de agregados.....	108
Tabela 4.11 - Desgaste de Los Angeles para os agregados grossos.....	109
Tabela 4.12 - Levantamento bibliográfico a ensaios de desgaste de Los Angeles.....	109
Tabela 4.13 - Índice de forma dos agregados grossos.....	109
Tabela 4.14 - Abaixamento do cone de Abrams nas betonagens experimentais.....	110
Tabela 4.15 - Abaixamento do cone de Abrams nas betonagens efetivas.....	110
Tabela 4.16 - Massa volúmica no estado fresco dos betões produzidos.....	113

Tabela 4.17 - Valores da resistência à compressão dos betões de referência na betonagem experimental.....	115
Tabela 4.18 - Valores da resistência à compressão dos betões na betonagem efetiva.....	115
Tabela 4.19 - Absorção e altura de água por ascensão capilar dos vários betões às 72 horas...	119
Tabela 4.20 - Absorção de água por imersão dos vários betões produzidos.....	125
Tabela 4.21 - Profundidade de carbonatação com a substituição de AP por AGM.....	129
Tabela 4.22 - Valores do coeficiente de difusão de cloretos dos vários betões aos 28 e 91 dias.....	134
Tabela 5.1 - Variação em percentagem das propriedades dos agregados relativamente ao mármore.....	152
Tabela 5.2 - Variação percentual das propriedades do betão no estado fresco relativamente ao BRM.....	152
Tabela 5.3 - Variação percentual das propriedades do betão no estado endurecido relativamente ao BRM.....	153

## Abreviaturas

ACI - American Concrete Institute;

AEP - Associação Empresarial de Portugal;

BB - Família de betões de basalto;

BB/M20 - Betão com 80% de agregados finos de basalto e 20% de agregados finos de mármore;

BB/M50 - Betão com 50% de agregados finos de basalto e 50% de agregados finos de mármore;

BC - Família de betões de areia de rio;

BC/M20 - Betão com 80% de agregados finos de areia de rio e 20% de agregados finos de mármore;

BC/M50 - Betão com 50% de agregados finos de areia de rio e 50% de agregados finos de mármore;

BG - Família de betões de granito;

BG/M20 - Betão de referência com 80% de agregados finos de granito e 20% de agregados finos de mármore;

BG/M50 - Betão de referência com 50% de agregados finos de granito e 50% de agregados finos de mármore;

BRB - Betão de referência com 100% de agregados finos de basalto;

BRC - Betão de referência com 100% de agregados finos de areia de rio;

BRG - Betão de referência com 100% de agregados finos de granito;

BRM - Betão de referência de mármore;

CVSCE - Complexo Vulcano-Sedimentar-Carbonatado de Estremoz;

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação;

OSNET - Ornamental Stones Network;

PROZOM - Plano Regional de Ordenamento do Território da Zona dos Mármore;

UNEP - United Nations Environment Programme.

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações gerais

De forma a satisfazer as suas necessidades, o ser humano tem vindo a consumir os recursos naturais disponíveis na Natureza. No entanto, apenas recentemente a sua importância enquanto parte integrante da sustentabilidade ambiental tem sido reconhecida e valorizada. No que diz respeito a esses recursos, devido a fatores tais como o aumento populacional, industrialização, inovação tecnológica, melhorias de condições de vida e desenvolvimento socioeconómico, a sua crescente procura tem-se acentuado consideravelmente. Assim, tem-se dado um relevo cada vez maior à sensibilização dos cidadãos para o excesso de consumo de recursos naturais, levado a cabo por políticas governamentais e organizações destinadas a esse fim.

No âmbito dos recursos naturais não renováveis, segundo o relatório da UNEP (2011), é estimado que no ano de 2050 seja consumido anualmente o triplo de recursos naturais no mundo, face aos atualmente consumidos. Nesse documento, é apresentado um valor que se traduz em cerca de 140 mil milhões de toneladas, bem como é referido um cenário onde é considerada uma correlação linear entre a taxa de consumo de recursos naturais e a taxa de crescimento económico mundial.

Tendo em conta estatísticas apuradas pelas Nações Unidas (2006), é possível prever uma taxa média de crescimento populacional mundial entre 2007 e 2050 de 0,75%, valor que reflete a necessidade de preocupação face ao consumo de recursos naturais, nomeadamente em questões de índole ambiental.

O setor da extração e comercialização de pedra natural é um dos atuais exemplos da necessidade de consumo de recursos naturais. Neste, o subsector da indústria das rochas ornamentais é caracterizado por uma grande suscetibilidade face à instabilidade na sua procura e extração. No entanto, o volume de negócio deste subsector está, em geral, a aumentar devido à constante necessidade de resposta face à procura de mais e melhores recursos naturais.

Segundo estatísticas da OSNET, a produção mundial de pedra, no intervalo compreendido entre 1986 e 1998, traduziu-se num aumento de 118%, comprovando a tendência crescente nesta área sectorial. Este valor, favorável ao desenvolvimento da indústria extrativa, tem-se mantido constante ao longo dos anos, segundo Midha e Paspaliaris (2003).

De acordo com a AEP (2003), a indústria das rochas ornamentais está concentrada em dois importantes grupos de países: países europeus (Itália, Espanha e Portugal) e asiáticos (China e Índia); é referido ainda que estes dois grupos foram responsáveis por cerca de 80% da produção mundial de mármore e granito em 2003.

Segundo a revista Rochas e Equipamentos (2011), surgiram países emergentes na produção e exportação de rochas ornamentais tais como o Brasil, a Turquia e o Irão, produtores estes privilegiados quanto à competitividade económica resultante do seu baixo custo de produção.

Em suma, a área de negócio das rochas ornamentais tem apresentado um carácter evolutivo, dinâmico e competitivo, antevendo uma crescente e progressiva importância no mercado mundial dos recursos naturais.

No contexto nacional, o mercado da indústria extrativa de rochas ornamentais destaca-se pela grande parcela de exportações inerente à atividade. De acordo com o INETI (2001), Portugal exportava em 1998 cerca de 58% da pedra natural extraída. Em 2002, o mesmo instituto definiu a ordem de grandeza de exportação de rochas ornamentais em 50% do produto final, destacando o país na quinta posição no mercado mundial de exportações. Este também refere que, entre 1992 e 2002, a produção de mármore cresceu cerca de 15% em volume e valor de negócio.

Atualmente, há que referir o relatório elaborado por Montani (2010) onde consta que Portugal ocupa o oitavo lugar no ranking mundial dos países produtores e exportadores de pedra natural, tal como demonstra a Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 - Produção de pedra natural por países em 2004 e 2009, adaptado de Montani (2010)**

País	2004		2009		2004 - 2009
	Milhares de toneladas	%	Milhares de toneladas	%	Varição em %
<b>China</b>	18000	22,2	31000	29,7	72,2
<b>Índia</b>	9500	11,7	13200	12,6	38,9
<b>Turquia</b>	4200	5,2	8500	8,1	102,4
<b>Itália</b>	7650	9,4	7500	7,2	-2,0
<b>Irão</b>	n.d.	-	6800	6,5	-
<b>Brasil</b>	4500	5,5	6000	5,7	33,3
<b>Espanha</b>	6250	7,7	5200	5,0	-16,8
<b>Portugal</b>	2450	3,0	2450	2,3	0,0
<b>EUA</b>	2300	2,8	1800	1,7	-21,7
<b>Grécia</b>	1400	1,7	1250	1,2	-10,7
<b>França</b>	1300	1,6	1100	1,1	-15,4
<b>África do Sul</b>	1100	1,4	800	0,8	-27,3
<b>Outros países</b>	22600	27,8	18900	18,1	-16,4
<b>Total</b>	81250	100	104500	100	28,6

Perante estes dados, e tendo em conta a dimensão do país relativamente à análise do volume de negócio que esta atividade gera nos mercados internacionais, é de frisar que o subsector das rochas ornamentais é de extrema importância para o contexto económico nacional.

## 1.2. Objetivos da dissertação e metodologias de investigação

Reconhecida a potencial procura de recursos naturais para as próximas décadas, esta dissertação surge associada às necessidades mundiais no sector das pedras naturais. É enfatizado o subsector das rochas ornamentais, mais concretamente a rocha mármore, pretendendo-se resolver problemáticas associadas a contextos de sustentabilidade e de otimização na sua exploração em domínio nacional.

A escolha da rocha ornamental mármore, proveniente da região alentejana, deve-se à sua grande expressão no domínio da área de negócio tratada. Em 1998, esta região nacional representava cerca de 28% do valor global de produção das pedreiras nacionais, rondando 140 milhões de euros. Não obstante, as rochas ornamentais desta região detêm 39% da cota de mercado do volume nacional produzido, equivalente a cerca de 61% em termos de valor global nacional transacionado. Estes números devem-se à existência do anticlinal de Estremoz, um dos mais importantes centros a nível mundial de extração de mármore, rico em afloramentos dolomíticos e vulcano-sedimentar-carbonatados, como referido por Lopes e Silva (2005).

De acordo com o Decreto-Lei nº178/2006, de 5 de Setembro, um resíduo é qualquer substância ou objeto supérfluo ou sem interesse económico, resultante de uma atividade e cujo detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer.

O processo de extração e transformação da pedra natural conduz à produção de grandes quantidades de resíduos, quer em estado sólido, assim como na forma de lamas. De acordo com Çelik e Sabah (2008), destacam-se cinco principais impactes ambientais decorrentes da exploração das rochas de mármore: as alterações topográficas, a ocupação do terreno, a contaminação da água superficial e subterrânea, a poluição aérea e a poluição visual. Destes aspetos, o principal problema é originado pelas partículas finas de mármore (< 2 mm). Estas partículas, que representam cerca de 25% dos resíduos gerados, pelo facto de perderem a humidade, podem dispersar-se facilmente contaminando o ar e o terreno envolvente com CaCO<sub>3</sub>, causando a poluição visual. Relativamente à poluição da água, o mesmo estudo indica um aumento significativo na quantidade de aniões e catiões presentes na água subterrânea associado ao depósito dos mármore, evidenciando a poluição da mesma.

Não obstante, a acumulação destes resíduos - Figura 1.1 - cria um grande incómodo de carácter logístico, na medida em que ocupam áreas de potencial exploração induzindo por vezes a fracturação de maciços subjacentes. Finalmente, há também que considerar os encargos financeiros para as empresas, associados a estes detritos.



**Figura 1.1 - Escombreira de mármore**

Segundo o LNEC (1991), os resíduos resultantes do processo extrativo podem ascender a 80% do volume de pedra trabalhada. A inapropriação deste material para o mercado das rochas ornamentais deve-se principalmente a fatores como a forte presença de descontinuidades nos maciços originais, as más propriedades físicas e mecânicas do material e o elevado grau de fracturação das rochas.

O impacte ambiental associado a esta atividade é de grandes proporções. Como tal, a crescente necessidade de solucionar o problema do excesso de resíduos já se encontra presente em diversos trabalhos académicos que têm sido realizados ao longo dos últimos anos. A título de exemplo, destaca-se o trabalho de Souza et al. (2009) com a aplicação de resíduos do corte de mármore no setor de polímeros, enquanto carga de compósitos, a aplicação na produção de cosméticos sugerida por Oliveira et al. (2010), a incorporação de resíduos de mármore em lãs minerais de Rodrigues (2009), a utilização em tijolo cerâmico investigado por Saboya et al. (2007), o emprego do pó de mármore na agricultura para correções no pH do solo, segundo Bakken et al. (2000) e Van Straaten (2007), entre outros. Contudo, tem-se verificado que, apesar das diversas áreas de investigação abordadas, nenhuma tem dado resposta à enorme

quantidade de resíduos gerados na extração e exploração do mármore, a não ser a da construção civil. Neste sentido, trabalhos como o de Çetin (1997) e Terzin e Karasahin (2003) com a utilização de resíduos de mármore na construção de pavimentos rodoviários, ou de Hebhoub et al. (2011), Binici et al. (2008), Akbulut e Gürer (2007), e outros, na utilização de resíduos de mármore como agregados em betões têm-se demonstrado alternativas viáveis e benéficas do ponto de vista ecológico. Segundo Costa et al. (1991), o LNEC confirmou a viabilidade da aplicação dos desperdícios do mármore em grandes empreendimentos da construção civil e obras públicas, devido às suas boas características físicas e mecânicas.

Face às considerações enunciadas e numa tentativa de ir ao encontro dos problemas associados à exploração do mármore, a Resolução do Conselho de Ministros nº 86/94, de 21 de Setembro, elaborou o Plano Regional de Ordenamento do Território da Zona dos Mármore (PROZOM) abrangendo a região dos municípios de Alandroal, Borba, Estremoz e Vila Viçosa. Constituem esse plano orientações para a garantia da exploração racional do mármore, a garantia do adequado aproveitamento de desperdícios e subprodutos resultantes da exploração, o fomento da recuperação progressiva das zonas afetadas pela indústria de extração, o impedimento da contínua degradação ambiental dentro da área cativa, entre outras medidas.

Assim, este projeto surge como uma investigação sobre uma possível aplicação para os resíduos sólidos finos resultantes da indústria de extração de mármore, do triângulo Estremoz-Borba-Vila Viçosa, em elementos de betão.

Os resíduos de mármore utilizados tiveram origem no centro de produção de Vila Viçosa - Figura 1.2 - na Herdade da Vigária, resultantes do aproveitamento dos blocos de menores dimensões rejeitados da produção da indústria de extração.



**Figura 1.2 - Centro de produção de agregados de Vila Viçosa, Herdade da Vigária**

Reconhecido pela diminuição do volume dos resíduos existentes nas numerosas escombreyras da região, este centro de produção de agregados destaca-se por ter uma capacidade produtiva superior a 300 mil toneladas por ano com qualidade para o fabrico de betão, argamassa, utilização em obras de engenharia civil e construção rodoviária, enrocamentos e podendo em algumas circunstâncias ser utilizados no fabrico de misturas betuminosas. De facto, os agregados provenientes deste centro de produção já foram utilizados em obras tais como a barragem do Loureiro, a construção do 1º e 2º troço do canal Álamos / Loureiro, a circular sul Reguengos de Monsaraz, a beneficiação da EN4 em Estremoz, o aeródromo de Évora, o túnel Loureiro, entre outras.

Para esta dissertação, foi considerada a elaboração de vários tipos de betões de referência, com sucessivas incorporações de resíduos finos de mármore. Com isto, está prevista uma análise comparativa entre as durabilidades e propriedades mecânicas dos mesmos, para que desta forma se possa proceder a uma posterior avaliação da viabilidade de aplicação desta nova solução de reaproveitamento de resíduos finos resultantes da indústria extrativa de mármore.

Foram produzidos dez tipos de betões distintos. Três destes representam os de referência, com as designações de BRB, BRC e BRG, utilizando 100% do volume total de agregados finos empregues correntemente na construção, isto é, o basalto, a areia de rio e o granito, respetivamente. Sequencialmente, será aplicada uma percentagem de substituição de 20% e 50% de agregados finos de mármore em relação ao volume total de finos em cada betão de referência. Finalmente, será produzido um betão de referência com 100% de resíduos finos totalmente provenientes da indústria de extração de mármore, o BRM. O conjunto de betões idealizados encontra-se representado no diagrama da Figura 1.3.

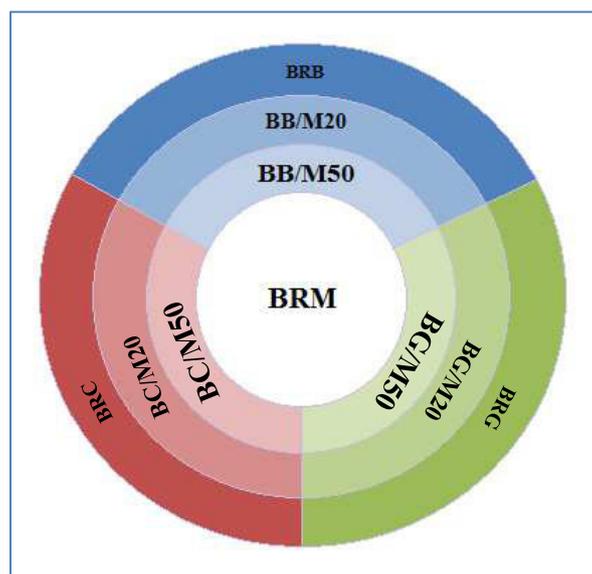


Figura 1.3 - Conjunto de betões a produzir

### 1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho realizado ao longo desta dissertação foi dividido em cinco etapas.

A primeira etapa consistiu na compilação de informação relativa ao tema, recorrendo-se para isso a bibliografia nacional e internacional. Com isto, pretendeu-se compreender a generalidade dos conceitos envolvidos neste trabalho, bem como os fundamentos teóricos e práticos necessários para a sua execução. Assim, garantiu-se a sensibilidade necessária para a análise dos resultados obtidos.

Em segundo lugar, destaca-se a planificação de todo o trabalho experimental, de forma a garantir o rigor e a coerência dos resultados alcançados. Nesta etapa, incluem-se a consulta de regulamentação, bem como a calendarização de betonagens e ensaios para uma otimização do processo de monitorização dos resultados.

A terceira etapa consistiu na realização da campanha experimental. Esta englobou a aquisição e preparação dos diversos materiais necessários, a sua caracterização física, a produção dos betões idealizados e a avaliação do seu desempenho em termos de durabilidade.

A quarta etapa caracterizou-se por uma análise crítica dos resultados obtidos na campanha experimental. Assim, discutiram-se os resultados de forma a justificar as tendências verificadas, confrontando-os, sempre que possível, com as conclusões observadas por outros autores.

Finalmente, na quinta e última etapa, elaborou-se este documento escrito, de forma a expor de uma forma científica e rigorosa todos os objetivos, procedimentos, análises e conclusões obtidas ao longo deste trabalho. Quanto à estrutura formal desta dissertação, enumeram-se os seguintes capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução: aborda as considerações gerais sobre o tema, expõe os objetivos e metodologias da dissertação e apresenta a estrutura da mesma;
- Capítulo 2 - Estado da arte: compila o estado da arte nacional e internacional, com destaque para a caracterização das propriedades do mármore assim como os trabalhos de carácter semelhante à presente dissertação; faz ainda um levantamento das propriedades de durabilidade de betões com agregados de mármore procurando definir o estado do conhecimento atual;
- Capítulo 3 - Programa experimental: expõe a formulação dos betões utilizados e descreve todos os procedimentos experimentais dos ensaios aos agregados, ao betão no estado fresco e endurecido, com referência aos respetivos objetivos, à regulamentação existente, ao equipamento utilizado e à determinação das amostras;

- Capítulo 4 - Resultados do programa experimental: apresenta e justifica os resultados dos ensaios descritos no capítulo 3, complementando-os com uma análise crítica através da comparação, quando possível, com as conclusões obtidas por outros autores;
- Capítulo 5 - Conclusões: estabelece as principais conclusões da dissertação, realçando os resultados que mais se destacaram, estabelecendo as devidas justificações; propõe também o desenvolvimento de trabalhos futuros, no seguimento desta investigação, de forma a aprofundar o conhecimento nesta matéria, caraterizar aspetos relevantes ainda não abordados e clarificar fenómenos que careçam de maior conhecimento e rigor científico.

No final do documento, encontram-se os anexos referidos ao longo do texto, com informação, dados e cálculos explicativos dos métodos utilizados.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Introdução

Analisado o contexto geral da indústria de mármore, o presente capítulo visa a descrição do processo extrativo da rocha, a análise das propriedades do mármore, o estudo das propriedades de betões formulados com este agregado, bem como a identificação de outras possíveis aplicações para os resíduos de exploração desta rocha ornamental.

Desta forma, pretende-se fazer uma síntese dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos últimos anos tendo em conta a crescente preocupação acerca da extensa diversidade de problemas decorrentes da extração de mármore. A análise dos vários resultados obtidos no âmbito desta primeira investigação permite, entre outros aspetos, prever propriedades do betão a produzir, tornando-se indispensável para uma melhor compreensão do seu comportamento físico e químico, com implicações a nível de resistência mecânica assim como de durabilidade.

### 2.2. Processo extrativo

O processo extrativo do mármore é um aspeto bastante importante na indústria de extração devido ao efeito desta atividade sobre a qualidade do produto final. De facto, fatores como a melhoria dos meios tecnológicos e a experiência acumulada dos profissionais do ramo de extração de rochas têm aumentado significativamente a eficácia do processo realizado pelas empresas deste sector.

Segundo a Solubema (2010), o ciclo do mármore desde a sua origem até à comercialização passa pelo seguinte conjunto de operações:

- traçagem e levantamento topográfico;
- corte de levante, furação, serragem e derrube;
- esquadrejamento e transporte;
- beneficiação;
- medição, classificação e armazenagem.

Precedida pela limpeza do terreno a explorar, a traçagem consiste na definição da orientação do desmonte a efetuar bem como das suas dimensões tendo por base a caracterização da massa mineral a explorar. Não obstante, trata da identificação e do levantamento das discontinuidades existentes. Feito isto, recorrendo a métodos topográficos, são recolhidos elementos que posteriormente se introduzem em computador para análise informática, definindo assim a topografia do local de exploração.

O corte de levante é feito ao longo de toda a base do bloco de rocha a extrair. São também executadas furações na vertical a cerca de 3 metros da frente livre com recurso a martelos pneumáticos ou perfuradoras hidráulicas. Quando o corte de levante é executado, com recurso a uma roçadora de cadeia a seco, este intercepta as furações descritas uma vez que o corte horizontal alcança uma profundidade de 3,2 metros, associada ao comprimento da sua lâmina.

A serragem consiste na utilização de máquinas de fio diamantado, fazendo-o passar pelos locais de corte, permitindo assim destacar o bloco pretendido, como representado na Figura 2.1. É frequente começar-se pela serragem das costas da rocha, serrando seguidamente os topos da mesma. Os blocos obtidos são normalmente cortados a meio da massa mineral com espaçamentos de 3 metros de forma a facilitar o seu derrube - as talhadas. Para o seu derrube, é necessária a colocação de algum entulho (pequenos fragmentos de rocha e terra) na zona de queda para amortecer o bloco extraído, minimizando a projeção de pedras e o risco de fracturação e permitindo a passagem do fio diamantado. Este processo tem início com a ação de um colchão hidráulico, de modo a afastar a talhada do local inicial, terminando com o auxílio de uma escavadora giratória ou pá carregadora atuando na ação de derrube.

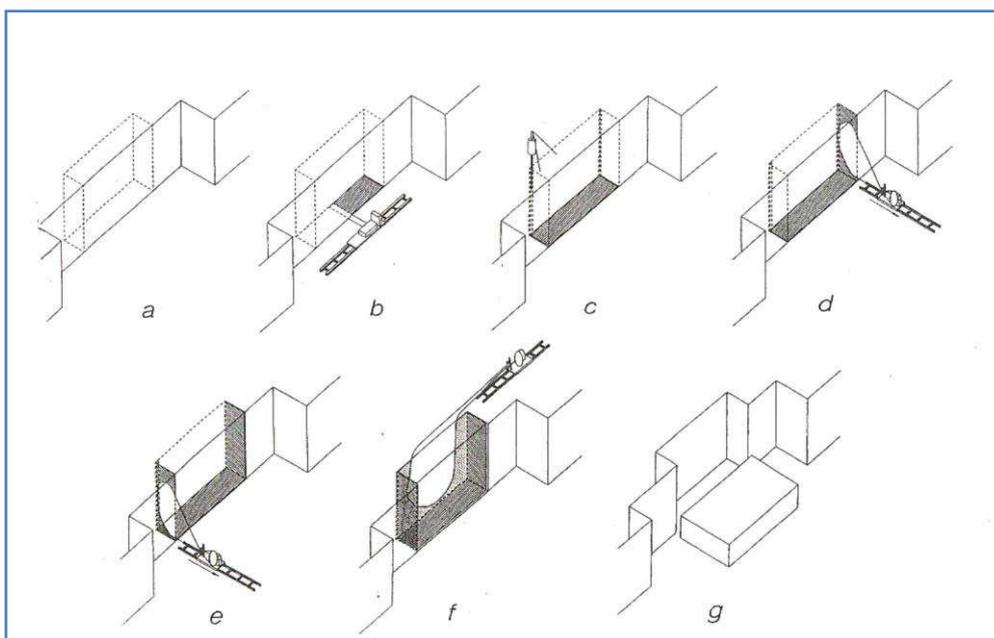


Figura 2.1 - Várias etapas do processo produtivo, Solubema (2010)

Utilizando máquinas de fio diamantado de menores dimensões, a fase que se segue é o esquadreamento. Este consiste na eliminação de imperfeições, removendo zonas com maior fracturação ou com maior concentração de veios. Concluído o tratamento dos blocos, caso sejam comercializáveis, estes são encaminhados para os centros de produção por uma pá carregadora. Caso contrário, são encaminhados por intermédio de um dumper para as escombrelas.

Já nos centros de produção, é realizada uma etapa mais rigorosa de tratamento dos blocos, regularizando-os o mais possível através de monofios ou monolâminas. Esta operação é denominada de beneficiamento.

Finalmente, os blocos prontos são medidos, classificados quanto à sua origem e dimensões, sendo posteriormente armazenados tendo por base essa classificação e o seu padrão final aparente.

Na Figura 2.2, é apresentado um esquema que apresenta as operações unitárias descritas, tentando enquadrá-las no processo geral enquanto um todo.

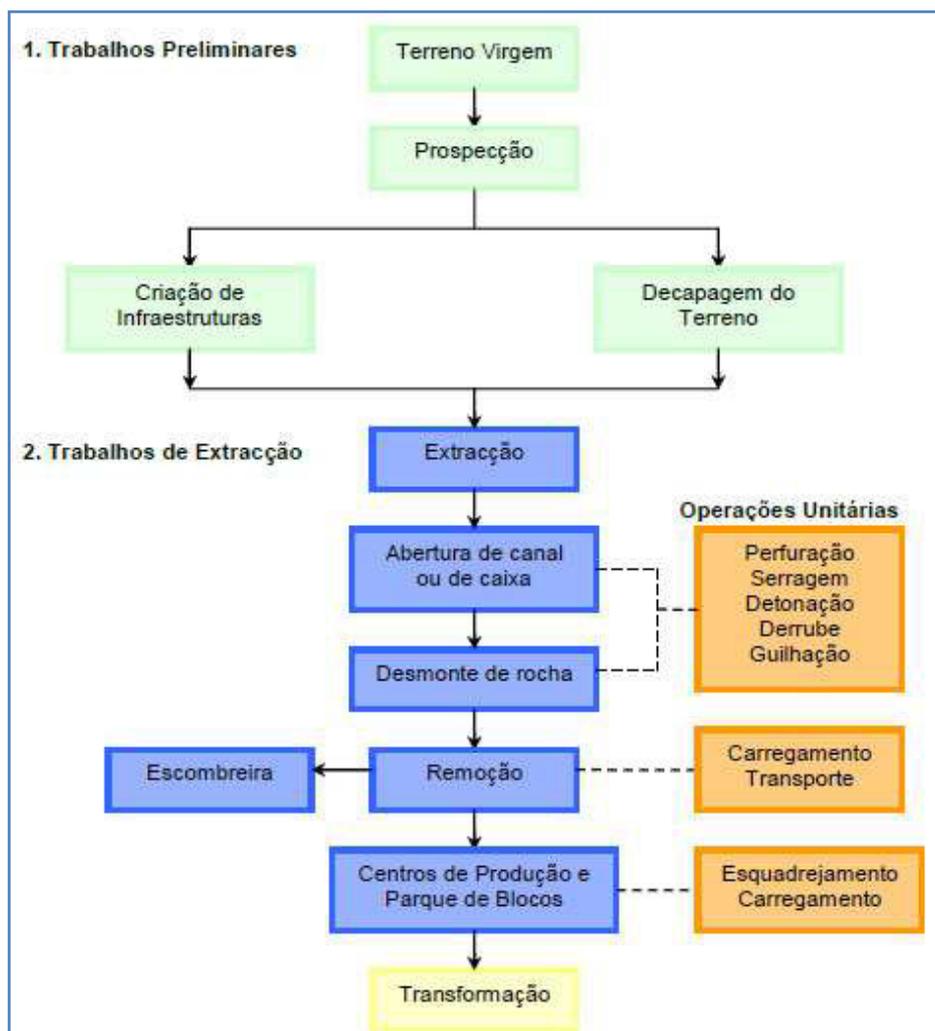


Figura 2.2 - Fluxograma das fases de extração de rocha, Solubema (2010)

## 2.3. Propriedades do mármore

### 2.3.1. Generalidades

Com origem no Latim, a palavra mármore deriva de “marmor” e significa “pedra de qualidade” ou “pedra branca”. Analisando-o do ponto de vista geológico, o mármore é “uma rocha metamórfica cristalina e carbonatada, composta por cristais de calcite (mármore calcítico) ou dolomite (mármore dolomítico), resultante da recristalização de rochas calcárias ou dolomíticas previamente existentes”, segundo Lopes (2003). Uma vez que a sua origem remete para calcários expostos a altas temperaturas e pressões, o mármore é predominante em zonas rochosas de matriz calcária e de atividade vulcânica.

Enquanto rocha ornamental, o mármore constitui uma das mais reconhecidas imagem de marca que Portugal exporta para o resto do mundo devido às excelentes propriedades físico-mecânicas apresentadas, remetendo-o inclusivamente para o nível dos melhores mármore mundiais. Outro aspeto que o destaca é a sua variedade cromática e a componente estética devida ao cuidado no tratamento e acabamento.

As características químicas do mármore assemelham-se às do calcário devido ao facto de esta rocha estar na sua génese. No entanto, segundo registos do LNEC (1991), a quantidade de dióxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é inferior à do calcário, antevendo um melhor comportamento em betões quando testados a reações álcalis-sílica. A sua composição química é principalmente definida por óxido de ferro, óxido de magnésio, óxido de alumínio, sílica e óxido de cálcio, nas proporções descritas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Composição química do mármore, adaptado de LNEC (1991)**

	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$
%	0,08 - 0,22	0,3 - 0,6	0,9 - 1,8	1,1 - 2,5	53,0 - 54,5

Relativamente às características físicas e mecânicas de agregados, de acordo com o LNEC (1991 e 1992), ocorre a mesma situação de afinidade entre os mármore e as rochas calcárias. No entanto, a rocha ornamental em estudo apresenta um baixo valor de absorção de água e um elevado valor do índice de abrasão de “Los Angeles”. De acordo com Bertolini e Pedefferi (1995), a porosidade média do calcário compacto anda na ordem de 0,5% a 2% face a 0,42% referido pelo laboratório - Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Caracterização física e mecânica do mármore, adaptado de LNEC (1991 e 1992)

Absorção média	Índice de abrasão de Los Angeles	Massa volúmica aparente média	Porosidade aparente média	Resistência à compressão média
0,16%	34% - 41%	2710 kg/m <sup>3</sup>	0,42%	75,4 MPa

Assim, os valores recolhidos permitem a antevisão de betões que à partida terão melhores características em termos de permeabilidade, mas piores em termos de resistência mecânica relativamente aos betões de agregados convencionais. Contudo, é de salientar a existência de outros fatores que influenciam as características descritas, não sendo portanto possível aferir com rigor, nesta fase de estudo, o comportamento dos betões previstos para a dissertação.

### 2.3.2. Anticlinal de Estremoz

O anticlinal de Estremoz, formação geológica que alberga uma vasta riqueza de rocha ornamental mármore, permanece uma incógnita quanto à sua idade por não haver um consenso generalizado. No entanto, Lopes (2003) aponta-o como um complexo rochoso do Ordovício Superior com cerca de 450 milhões de anos.

Esta estrutura anticlinal é composta por um núcleo pré-câmbrico ladeado por uma formação dolomítica, seguindo-se o complexo-vulcano-sedimentar-carbonatado de Estremoz (CVSCE, mais vulgarmente conhecido por “mármore de Estremoz”) - Figura 2.3.

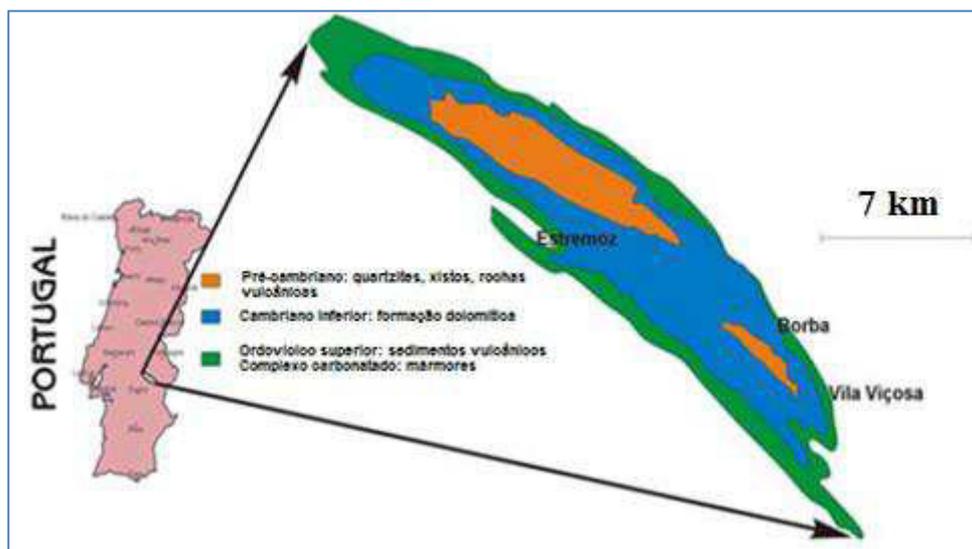


Figura 2.3 - Localização e esboço geológico do anticlinal de Estremoz - adaptado de Lopes et al. (2000)

Tendo em conta a litologia da região na sua fase de formação, o anticlinal de Estremoz surgiu com a atuação de forças tectónicas sobre uma base rochosa calcária, exercendo enormes pressões com consequências físicas tais como dobras e fraturas, como representado na Figura 2.4.

Essas dobras, resultantes de movimentos tectónicos, modelaram a morfologia do terreno bem como as características do solo, apresentando grande amplitude desde a escala microscópica até à macroscópica, como o próprio anticlinal com os seus 40 km de comprimento e 7 km de largura máxima.

O conjunto litológico do anticlinal é constituído pelos “xistos de mares”, uma “formação dolomítica” e o “complexo-vulcano-sedimentar”, segundo a ordem cronológica - Figura 2.5. Esse complexo é um conjunto carbonatado formado por calcários calcíticos cristalinos que têm um elevado interesse económico, variando a dimensão do grão de fino a médio, com uma coloração variada e uma grande diversidade na forma e quantidade de veios.

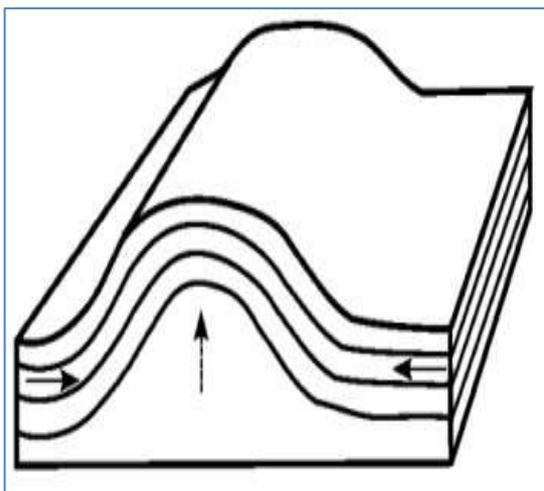


Figura 2.4 - Dobra devido a movimentos tectónicos

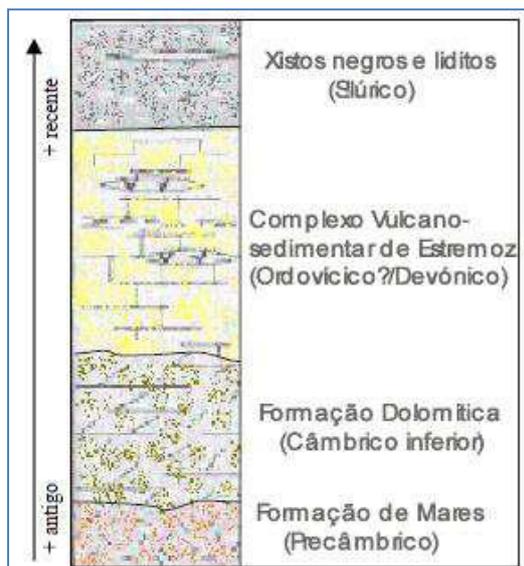


Figura 2.5 - Cronologia dos estratos rochosos

### 2.3.3. Mármore de Estremoz

O anticlinal de Estremoz, particularmente nos concelhos de Vila-Viçosa, Estremoz e Borba, apresenta uma variedade assinalável de tipos comercializáveis de mármore.

Segundo Moura et al. (2007), o mármore do anticlinal de Estremoz apresenta uma composição química maioritariamente constituída por óxido de cálcio, silicatos, aluminatos e outros óxidos em quantidades mais reduzidas, como consta na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Composição química do mármore do anticlinal de Estremoz, adaptado de Moura et al. (2007)**

	<b>Média (%)</b>	<b>Máximo (%)</b>	<b>Mínimo (%)</b>
<b>CaO</b>	53,77	55,55	51,91
<b>SiO<sub>2</sub></b>	1,66	4,67	0,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,64	1,69	0,1
<b>MgO</b>	0,64	2,76	0,04
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,24	0,82	0,04
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,2	1,8	0,03
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,18	1,15	0,04
<b>MnO</b>	0,05	0,05	0
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,04	0,05	0
<b>Perda de rubro</b>	42,77	43,6	41,32

Apesar do baixo valor de sílica presente na composição, Sousa Coutinho (1999) alerta para a mistura de carbonato de magnésio, presente nas dolomites, com os álcalis do cimento. Esta indesejável combinação reage de forma expansiva devido à modificação da estrutura dos agregados.

Tendo em conta a influência das propriedades físicas e mecânicas dos agregados na resistência mecânica e durabilidade de um betão, reuniram-se na Tabela 2.4 as características analisadas por Moura et al. (2007).

**Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz, adaptado de Moura et al. (2007)**

	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	86,69	108,56	64,04
<b>Resistência à tração por flexão (MPa)</b>	15,89	22,07	9,81
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2712	2717	2703
<b>Absorção de água (%)</b>	0,1	0,1	0,0(3)
<b>Porosidade aberta (%)</b>	0,2	0,3	0,1
<b>Índice de abrasão de Los Angeles (%)</b>	37,7	41	34
<b>Resistência ao choque (cm)</b>	55	70	45

Costa e Appleton (2002) referem que, para betões com agregados de resistência à compressão de cerca de 60 MPa, a resistência do betão é garantida essencialmente pela pasta de cimento.

Assim, a elevada resistência à compressão, expressa na Tabela 2.4, permite prever um bom desempenho mecânico de betões com agregados de mármore.

Quanto aos valores da baridade, esta é da ordem de grandeza dos agregados primários utilizados nesta investigação, antevendo betões de massa volúmica corrente, isto é, entre 2000 e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

A absorção de água e a porosidade aberta do mármore de Estremoz são bastante reduzidas, permitindo obter misturas com a trabalhabilidade desejada com menor quantidade de água e maior compacidade face a outros agregados mais porosos.

Após uma compilação dos diferentes mármore comercializados da região, constatou-se a existência de 32 tipos distintos, com pequenas oscilações em termos de características físicas e mecânicas. Com recurso aos catálogos disponibilizados pela empresa Construlink e dados do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), as características analisadas foram a resistência à compressão, resistência à tração por flexão, baridade, absorção de água, porosidade aberta, coeficiente de dilatação térmica, resistência ao desgaste e resistência ao choque. Os seus valores médios, máximos e mínimos encontram-se na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz, adaptado de catálogos da Construlink**

	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	84,59	108,49	59,00
<b>Resistência à tração por flexão (MPa)</b>	22,50	30,58	14,50
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2712	2718	2703
<b>Absorção de água (%)</b>	0,07	0,11	0,03
<b>Porosidade aberta (%)</b>	0,20	0,32	0,09
<b>Coefficiente de dilatação térmica (por °C)</b>	1,12E-05	1,63E-05	5,40E-06
<b>Resistência ao choque (cm)</b>	55,6	72,5	45,0
<b>Resistência ao desgaste (mm)</b>	2,6	1,6	3,8

Os dados compilados de vários tipos de mármore resultaram em correlações explícitas entre algumas das suas propriedades.

As Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 demonstram como a resistência à compressão se relaciona com a baridade, a resistência à tração por flexão e a absorção de água.

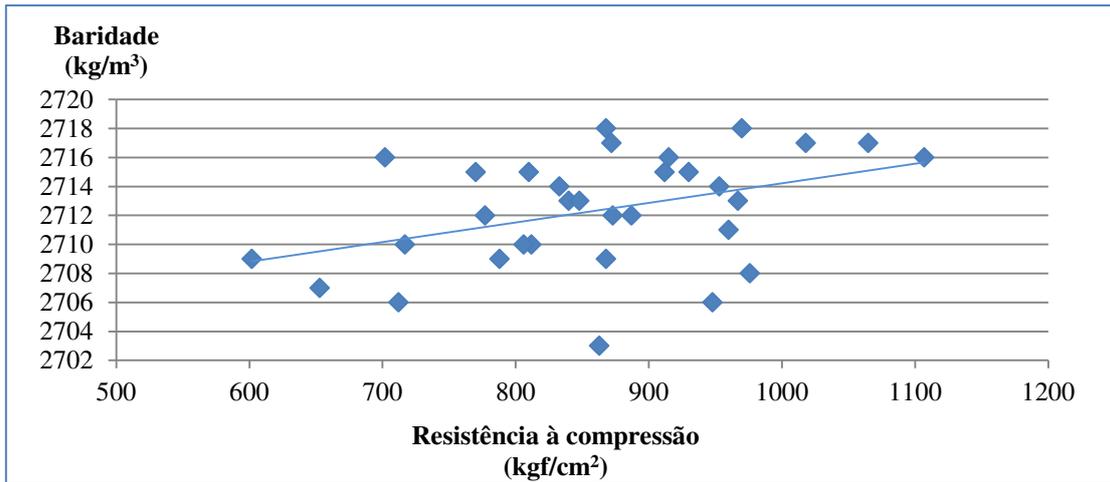


Figura 2.6 - Relação entre a resistência à compressão e a baridade, adaptado de Construlink e INETI

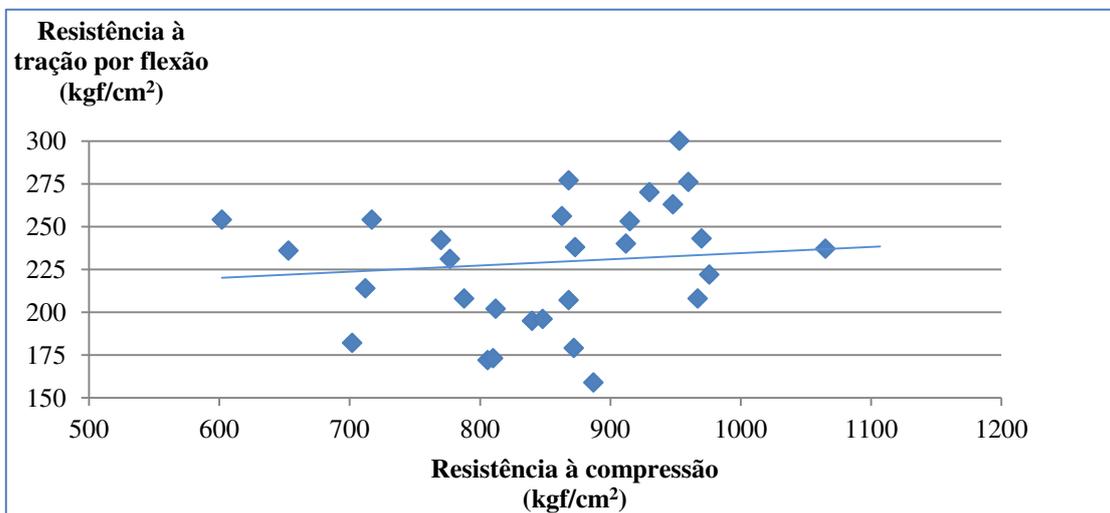


Figura 2.7 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão, adaptado de Construlink e INETI

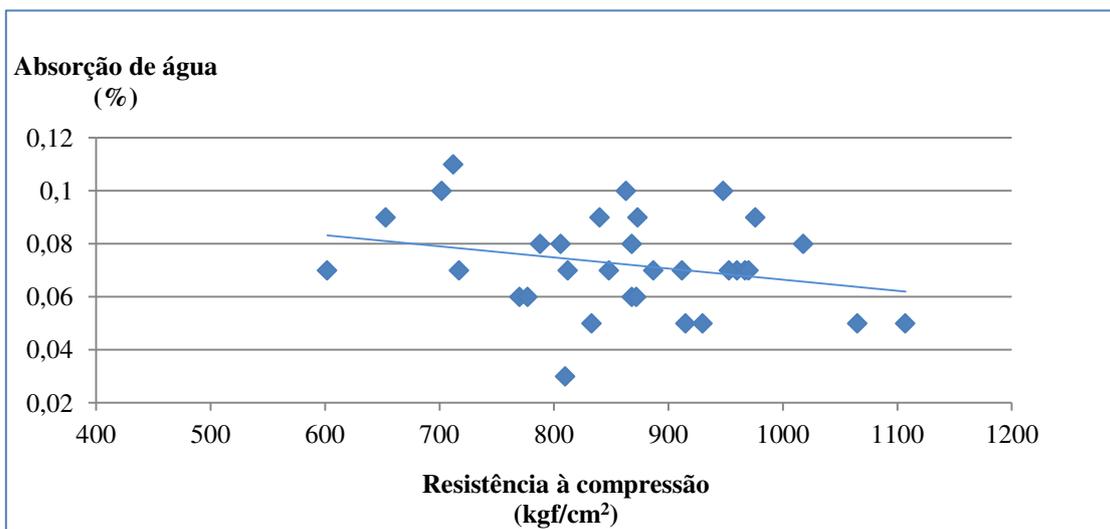


Figura 2.8 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água, adaptado de Construlink e INETI

Através das figuras apresentadas, constata-se que, para maiores baridades e maiores resistências à tração por flexão, o mármore do anticlinal de Estremoz atinge valores mais altos de resistência à compressão. Por outro lado, quando se verifica o aumento de absorção de água, ocorre um decréscimo de resistência à compressão.

O ensaio de resistência ao choque, segundo a norma BS EN 14158:2004, consiste em submeter 4 placas de dimensões 20 x 20 x 3 cm, talhadas segundo os planos de utilização mais comum, ao impacto de uma esfera de 1 kg de aço. Esse impacto é gerado por quedas sucessivamente maiores, intervaladas de 5 cm, até se atingir a rotura das placas. O valor de resistência ao choque é a média dos valores obtidos das alturas de queda da esfera, em centímetros.

Fazendo variar a resistência do mármore ao choque, tendo em conta a baridade e a porosidade, obtiveram-se as Figuras 2.9 e 2.10.

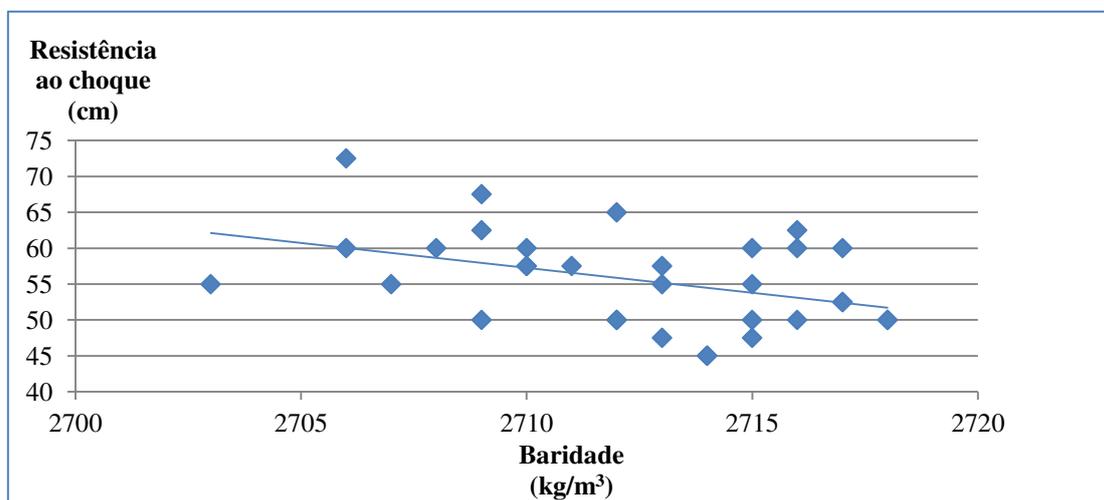


Figura 2.9 - Relação entre a baridade e a resistência ao choque, adaptado de Construlink e INETI

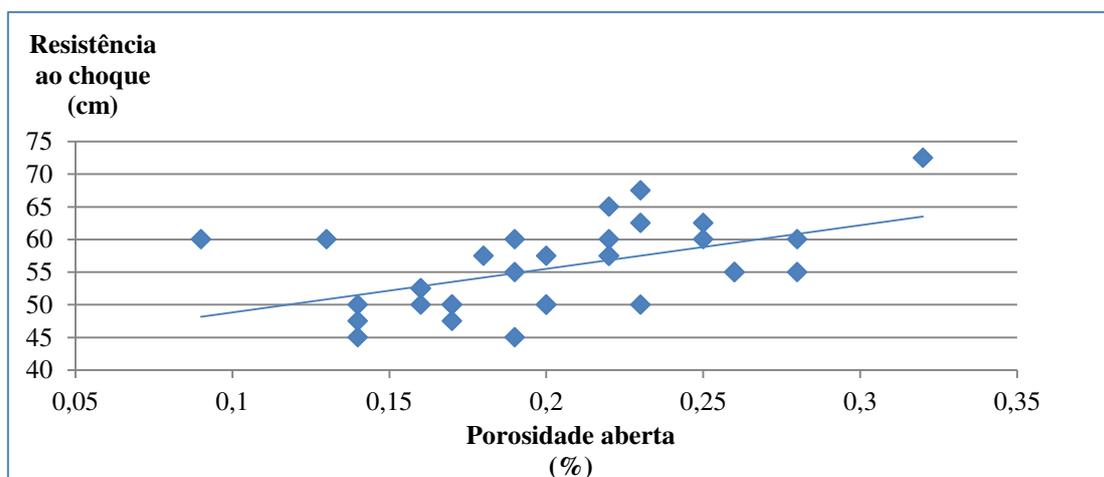


Figura 2.10 - Relação entre a porosidade e a resistência ao choque, adaptado de Construlink e INETI

Tendo em conta os gráficos apresentados, é possível concluir que a resistência ao choque no mármore considerado aumenta para menores valores de baridade e, complementarmente, para maiores valores de porosidade aberta. Esta relação deve-se à absorção de energia cinética por parte da rede porosa do agregado, amortecendo dessa forma o impacto.

Considerando as propriedades tabeladas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, constata-se que, face aos valores de referência dados pelo laboratório, o mármore do anticlinal de Estremoz apresenta diferenças pouco significativas na resistência média à compressão, baridade e índice de abrasão de Los Angeles. Por outro lado, a absorção de água e a porosidade da rocha em estudo diferem cerca de 50% relativamente aos valores apresentados pelo LNEC, como se apresenta na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6 - Comparação das propriedades mecânicas do mármore do anticlinal de Estremoz obtidas por Moura et al. (2007), fichas técnicas (Construlink e INETI) e LNEC (1991 e 1992)**

	<b>Moura et al. (2007)</b>	<b>Compilação de fichas técnicas</b>	<b>LNEC</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	86,69	84,59	75,4
<b>Resistência à tração por flexão (MPa)</b>	15,89	22,5	-
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2712	2712	2710
<b>Absorção de água (%)</b>	0,1	0,07	0,16
<b>Porosidade aberta (%)</b>	0,2	0,2	0,42
<b>Coefficiente de dilatação térmica (por °C)</b>	-	1,12E-0,5	-
<b>Índice de abrasão de Los Angeles (%)</b>	37,7	-	37,5
<b>Resistência ao choque (cm)</b>	55	55,6	-
<b>Resistência ao desgaste (mm)</b>	-	2,6	-

Analisadas as propriedades químicas, físicas e mecânicas do mármore proveniente do anticlinal de Estremoz, é necessário ter em consideração que estas características se referem à rocha no seu estado de comercialização. Por outras palavras, como o mármore a utilizar tem origem nos resíduos de extração, é de esperar que as suas características variem ligeiramente daquelas consideradas de referência. O LNEC (1991) refere que os resíduos podem conter até 40% de solos, 10% de dolomitos e 5% de rochas xistosas e filonianas, evidenciando a possibilidade de utilização de misturas pouco homogêneas e, conseqüentemente, com piores resultados do que aqueles que se possam antever com os dados de rochas sãs.

## 2.4. Propriedades de betões com agregados de mármore

### 2.4.1. Características gerais das campanhas experimentais

Neste subcapítulo, são apresentados alguns trabalhos realizados e as suas principais conclusões relativamente à incorporação de agregados de mármore na constituição de betões. Este levantamento de estudos é de extrema importância para esta investigação na medida em que a utilização do mármore criará, com certeza, uma modificação nas características de referência de betões tradicionais, sendo essencial a análise daquilo que já se concluiu neste domínio.

De acordo com os trabalhos realizados, é de salientar o facto de a grande maioria abordar a utilização de resíduos de mármore no formato de pó. Assim, uma pequena fração das investigações consiste na reutilização de mármore enquanto agregado grosso, sendo quase inexistentes os estudos de betões com a incorporação de agregados finos de mármore na sua composição. Não obstante, na generalidade das situações, as propriedades abordadas nos casos de estudo são as propriedades do betão fresco e as suas características mecânicas, constatando-se desta forma uma deficiente caracterização atual da durabilidade de betões com mármore na sua composição.

Hebhoub et al. (2011) realizaram um estudo que consistiu na substituição de agregados finos e grossos de mármore, tanto separadamente como em conjunto, nas percentagens de 25, 50, 75 e 100% em betões de areia natural e agregados grossos calcários. Assim pretenderam verificar a viabilidade da aplicação deste resíduo proveniente da indústria de mármore da Argélia. A dosagem de cimento foi constante,  $350 \text{ kg/m}^3$ , e foi mantida uma relação água-cimento de 0,5. Como resultado, é apontado o bom desempenho em termos de resistência mecânica de betões com agregados reciclados de mármore, sendo explícita a necessidade de estudos suplementares de âmbito de durabilidade.

Em conformidade com os problemas ambientais decorrentes da indústria de exploração de mármore, Hameed e Sekar (2009) propuseram-se investigar as propriedades de durabilidade de um betão produzido com agregados finos reciclados. Para isso, produziram um betão de controlo usando areia de rio nas partículas finas, face ao betão alvo de estudo que incorporaria 50% de resíduos de pó de mármore e 50% de resíduos de pó proveniente de diversas pedreiras - Tabela 2.7. Para a relação água-cimento, foi definido o valor de 0,55 em peso dos constituintes. De forma a calibrar a trabalhabilidade das misturas devido à utilização de superplastificante, reduziram 250 ml de água por cada 50 kg de cimento utilizados

Tabela 2.7 - Composição dos betões, adaptado de Hameed e Sekar (2009)

Componente	Composição A	Composição B
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	425	425
Areia de rio (kg/m <sup>3</sup> )	770	0
Pó de pedreiras (kg/m <sup>3</sup> )	0	368
Pó de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	0	368
Agregados grossos (kg/m <sup>3</sup> )	868	868
Água (l/m <sup>3</sup> )	234	234

Esta investigação revelou que a reutilização dos desperdícios industriais garante uma parcial melhoria nas características físicas e mecânicas do betão produzido. Isto deve-se a uma maior eficiência na interligação das partículas, resultando num betão com melhor coesão molecular. Outro aspeto referido é o facto de os componentes químicos e propriedades dos resíduos tais como o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Na<sub>2</sub>O, MgO, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e SiO<sub>2</sub> serem muito semelhantes aos do cimento. Não obstante, é referido que uma substituição de agregados finos naturais até 50% tem mais-valias em termos de resistência mecânica bem como na qualidade de aspeto. Outro fator considerado foi o aumento de durabilidade do betão estudado quando sujeito a exposição a sulfatos. Em suma, a combinação dos resíduos aplicados garante bons resultados devido ao seu efeito de compacidade a nível microscópico combinado com as suas características pozolânicas.

“Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete” é um trabalho de Binici et al. (2007) onde se salienta que o aumento do teor de pó de mármore e calcário resulta numa significativa melhoria da resistência de betões a sulfatos. A Tabela 2.8 mostra a composição dos betões produzidos enquanto que a Tabela 2.9 traduz os resultados referentes à resistência à compressão dos mesmos após imersão numa solução de sulfato de sódio.

Tabela 2.8 - Composição dos betões em estudo - Binici et al. (2007)

Nomenclatura	Composição
C	Betão de controlo - Agregados naturais
MD1	Incorporação de 5 % de pó de mármore em massa
MD2	Incorporação de 10 % de pó de mármore em massa
MD3	Incorporação de 15 % de pó de mármore em massa
LD1	Incorporação de 5 % de pó de calcário em massa
LD2	Incorporação de 10 % de pó de calcário em massa
LD3	Incorporação de 15 % de pó de calcário em massa

Tabela 2.9 - Variação da resistência à compressão de betão para diferente tempo e condições de cura - Binici et al. (2007)

Nomenclatura	Resistência à compressão (MPa)		
	Aos 28 dias	Após 12 meses imerso em água	Após 12 meses imerso em solução de sulfato de sódio
C	29	35,2	15,1
MD1	32	56,3	41
MD2	36,2	58,6	48,4
MD3	39,7	60,7	52
LD1	27,1	45	36,2
LD2	28,2	48,1	39,3
LD3	25	44,7	35,1

Estes valores sugerem assim que, para incorporações de pó de mármore em betão, se obtêm quebras de resistência à compressão decrescentes para maiores taxas de substituição, em que no caso de MD3 se trata de uma redução de 15% após o contacto durante 12 meses com a solução de sulfato de sódio a 7%. Assim, do ponto de vista da durabilidade, a incorporação de resíduos de pó de mármore em betão corresponde à produção de soluções mais duradouras.

Para outra aplicação em betão, Alyamaç e Ince (2008) desenvolveram também um projeto com o objetivo de reaproveitar os desperdícios de pó de mármore resultantes da atividade da indústria mineira. Assim, sugerem a utilização desses resíduos na produção de betão auto-compactável. Para efeito elaboraram várias misturas distintas, fazendo variar a relação água-cimento e a relação água-resíduos de mármore. Como principal objetivo, é referida a tentativa de estabelecer correlações entre as propriedades do betão auto-compactável fresco e endurecido. Como resultado, foi criado um ábaco - Figura 2.11 - que relaciona a quantidade de cimento, a relação agregados-cimento e a relação de pó de mármore-cimento com a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral.

A principal conclusão que resultou desta investigação passou pela confirmação da possibilidade de utilização dos resíduos de mármore enquanto filer inerte adicional na composição de betões auto-compactáveis do ponto de vista físico, mecânico e económico. Das correlações estabelecidas, destaca-se a grande vantagem de se poderem calibrar parâmetros iniciais da composição da mistura, com a obtenção de aproximações válidas em termos de desempenho mecânico da mesma.

Ainda no domínio de betões auto-compactáveis, Topçu et al. (2008) substituíram o ligante deste tipo de betão em 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg/m<sup>3</sup> (Figura 2.12) de pó de mármore proveniente de desperdícios de exploração da rocha.

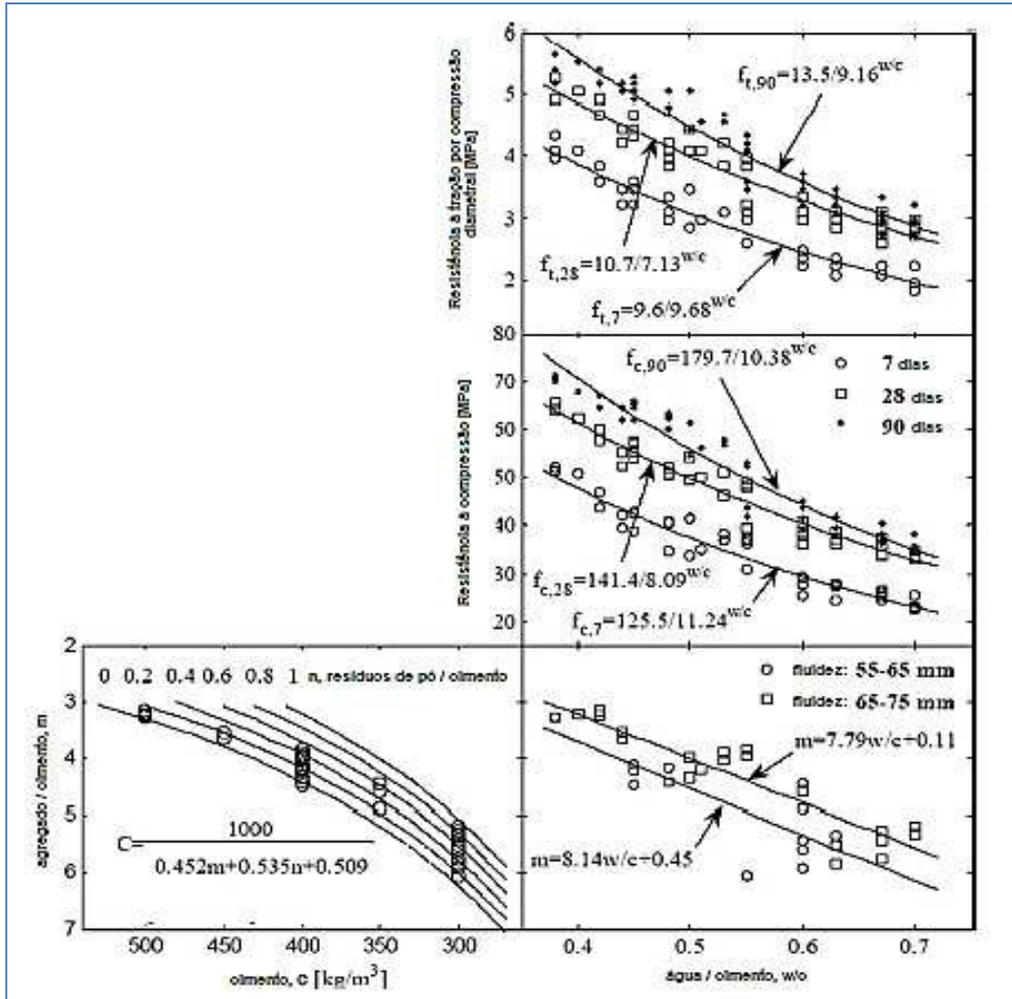


Figura 2.11 - Resultados experimentais de incorporação de pó de mármore em betão auto-compactável, adaptado de Alyamaç e Ince (2008)

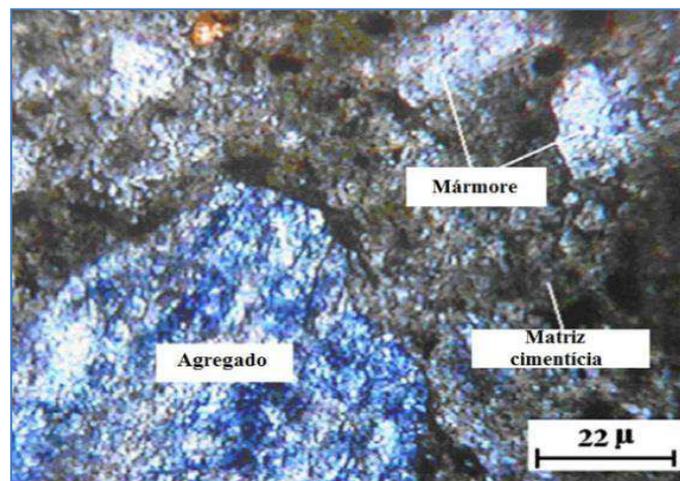


Figura 2.12 - Microestrutura de betão auto-compactável com 300 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore, Topçu et al. (2008)

Com estas variações, realizaram ensaios de espalhamento, fluidez, caixa-L, massa volúmica e volume de vazios ao betão fresco, bem como ensaios de resistência à compressão, resistência à

flexão, velocidade ultrassónica, porosidade, compacidade e absorção de água por capilaridade ao betão endurecido. A máxima dimensão de agregado foi definida em 20 mm de forma a evitar obstruções na fluidez do betão auto-compactável, tendo-se recorrido a cimento do tipo I Portland com adição de cinzas volantes enquanto ligante da mistura. Felekoğlu et al. (2007) demonstraram que, aumentando a relação água-cimento, se obteria uma menor taxa de bloqueio no betão auto-compactável devido à menor viscosidade da mistura. Contudo, neste trabalho, foi mantida uma relação água-pó de mármore constante, com gradual aumento de quantidade de filler e diminuição de ligante.

Foi também realizado por Binici et al. (2008) um estudo de durabilidade de betões com incorporação de agregados grossos reciclados de mármore e granito e agregados finos de areia de rio e escórias de alto-forno. Através da combinação destes agregados, foram criados os seis betões descritos na Tabela 2.10. Neste estudo, pretendeu-se perceber a adequabilidade do uso de mármore, granito e escórias de alto-forno na substituição de agregados convencionais - betões C1 e C2.

**Tabela 2.10 - Composição dos tipos de betão, adaptado de Binici et al. (2008)**

Nomenclatura	Agregados grossos	Agregados finos
MC1	Mármore	Areia de rio
MC2	Mármore	Escórias de alto-forno
GC1	Granito	Areia de rio
GC2	Granito	Escórias de alto-forno
C1	Calcário	Areia de rio
C2	Calcário	Escórias de alto-forno

As dimensões máximas dos agregados foram limitadas a 19 e 4,75 mm, no caso dos agregados grossos e finos, respetivamente. Outras características físicas avaliadas foram a massa volúmica e a absorção de água, resumidas na Tabela 2.11.

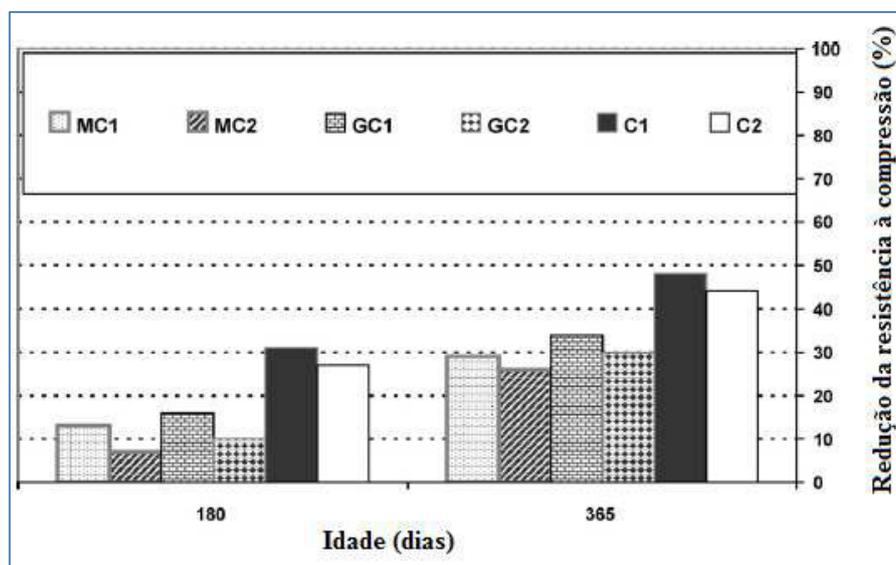
**Tabela 2.11 - Propriedades físicas dos agregados, adaptado de Binici et al. (2008)**

Tipo de agregado	Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Mármore	2,72	1,4
Granito	2,65	1,5
Areia do rio	2,6	2,4
Escória de alto-forno	2,1	8,78
Calcário	2,71	2,3

Nesta investigação, é dada uma especial ênfase ao ataque de sulfatos, sendo comprovado que a imersão de betões correntes numa solução a 10% de sulfato de sódio diminui em quase 50% os valores da resistência à compressão dos mesmos após 12 meses de exposição, alertando-se para a importância do ataque do  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  no betão. Contudo, para betões com incorporação de agregados grossos de mármore, há uma queda de resistência à compressão na ordem de 25% - 30%, tornando a sua incorporação numa mais-valia quanto à resistência do produto final - Tabela 2.12 e Figura 2.13.

**Tabela 2.12 - Variação da resistência à compressão de betão para diferentes tempos e condições de cura, adaptado de Binici et al. (2008)**

Nomenclatura	Resistência à compressão (MPa)		
	Após 28 dias imerso em água	Após 6 meses em solução de sulfatos	Após 12 meses imerso em solução de sulfatos
MC1	44,3	38,6	31,8
MC2	47,2	43,1	35,1
GC1	41,5	35,1	27,7
GC2	44	39,7	31
C1	25,1	17,4	13,2
C1	37,2	28,7	21,2



**Figura 2.13 - Variação percentual da resistência à compressão após imersão em solução de sulfatos, adaptado de Binici et al. (2008)**

O estudo apresentado refere que estes resultados se devem a uma melhor ligação entre os aditivos, cimento e agregados, resultando numa matriz de ligação mais condensada e consistente.

É também de salientar investigações como as de Pacheco Torgal e Castro-Gomes (2006) e Pereira et al. (2007). Na primeira, é frisada a pequena variação na durabilidade de betões que possuam agregados com baixa propensão para absorção e boa resistência mecânica inicial, sendo que na segunda é referido o facto de a durabilidade e a resistência do betão não serem praticamente afetadas pela mineralogia dos agregados em si incorporados.

No estudo de Corinaldesi et al. (20010), o pó de mármore resultante da serragem e moldagem de blocos maciços foi caracterizado do ponto de vista químico e físico de forma a ser incorporado enquanto adição mineral em argamassas e betão, mais concretamente para betão auto-compactável. 90% das partículas do pó utilizado tinham dimensões inferiores a 50 µm e 50% inferiores a 7 µm. É aqui citado que as adições minerais têm geralmente influência no desempenho de betões e argamassas no estado fresco. Do ponto de vista experimental, a avaliação do desempenho das misturas teve em conta a percentagem de substituição do cimento e areia por pó de mármore, sendo que os resultados comprovaram que, para uma trabalhabilidade constante, se obteria uma máxima resistência à compressão com uma substituição de 10% de areia. Comprovou-se nesta investigação que o pó de mármore é um elemento muito eficiente na garantia de coesão nas argamassas e betões, inclusive na presença de superplastificantes para relações água-cimento baixas.

Assim sendo, a utilização de mármore na produção de betões pode ser algo benéfica em termos de propriedades mecânicas, trabalhabilidade e resistência química, fazendo sentido a aposta na mesma num contexto económico e ambiental, propiciado pela maior durabilidade do betão.

#### 2.4.2. Trabalhabilidade

Segundo Brito (2005), a comparação entre betões exige que estes apresentem valores de trabalhabilidade semelhantes. Este aspeto decorre do facto de este parâmetro ter implicações diretas no desempenho do betão tanto no estado fresco como endurecido. Coutinho e Gonçalves (1973) referem que a trabalhabilidade se relaciona com propriedades físicas do betão tais como a segregação e exsudação, a coesão, viscosidade, massa volúmica e ângulo de atrito interno, reforçando ainda mais a importância deste parâmetro. Aïtcin (1998) e Ramachandran et al. (1998) consideram que estas propriedades físicas resultam da natureza química e física dos materiais constituintes do betão. Assim, referem a reatividade do cimento e das adições, e a quantidade total de agregados na mistura, a proporção entre o agregado fino e grosso, a distribuição granulométrica e a forma dos agregados como aspetos químicos e físicos, respetivamente, a ter em consideração na trabalhabilidade.

Num trabalho desenvolvido por Hebhouh et al. (2011), é apurado que a trabalhabilidade decresce com o aumento de incorporação de agregados finos de mármore. É aí referido que essa perda de trabalhabilidade se deve essencialmente à forma do agregado, à proporção entre os agregados finos e grossos, bem como às características intrínsecas ao material em causa. A trabalhabilidade pode então ser um parâmetro a calibrar através da definição da quantidade de água a utilizar, bem como pela correta dosagem e qualificação dos agregados grossos e finos reciclados.

O estudo intitulado “Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete”, realizado por Shelke et al. (2012), é outra investigação onde se refere a diminuição de trabalhabilidade em betão com sílica de fumo e pó de mármore, situação que é também evidenciada no estudo de Pereira et al. (2007). Este refere uma baixa trabalhabilidade nos betões com incorporação de mármore. Este problema surge associado ao tipo de superfície e índice volumétrico das partículas de rocha, antevendo uma necessidade de maior dosagem de água para a obtenção da trabalhabilidade pretendida.

### 2.4.3. Massa volúmica

Este parâmetro do betão é influenciado quer pela massa volúmica dos seus constituintes quer pelo grau de compactação da mistura, como refere Brito (2005). Tendo em conta o segundo aspeto, a massa volúmica tem uma correlação direta com a porosidade no betão, evidenciando desta maneira a sua importância nas características de durabilidade do mesmo. Contudo, para efeitos quantitativos, dos dois condicionantes deste parâmetro, a massa volúmica dos agregados utilizados no betão é o fator que mais influência tem na variação da massa volúmica total.

Em Hebhouh et al. (2011), concluiu-se que a massa volúmica dos betões testados não varia muito para as diferentes taxas de substituição de agregados, obtendo-se valores aceitáveis para a sua produção. É também referido que a massa volúmica é função da densidade dos componentes do betão utilizados, das proporções utilizadas na mistura, do conteúdo de água inicial e final, bem como do grau de hidratação do betão.

Na investigação previamente caracterizada de Topçu et al. (2008), comprova-se que a utilização de pó de mármore enquanto adição em betões auto-compactáveis tem consequências diretas na massa volúmica da mistura no estado fresco. Essa situação é representada na Figura 2.14, onde o peso próprio do betão diminui de acordo com a gradual incorporação de mármore, devido à sua massa volúmica ser inferior à do ligante substituído.

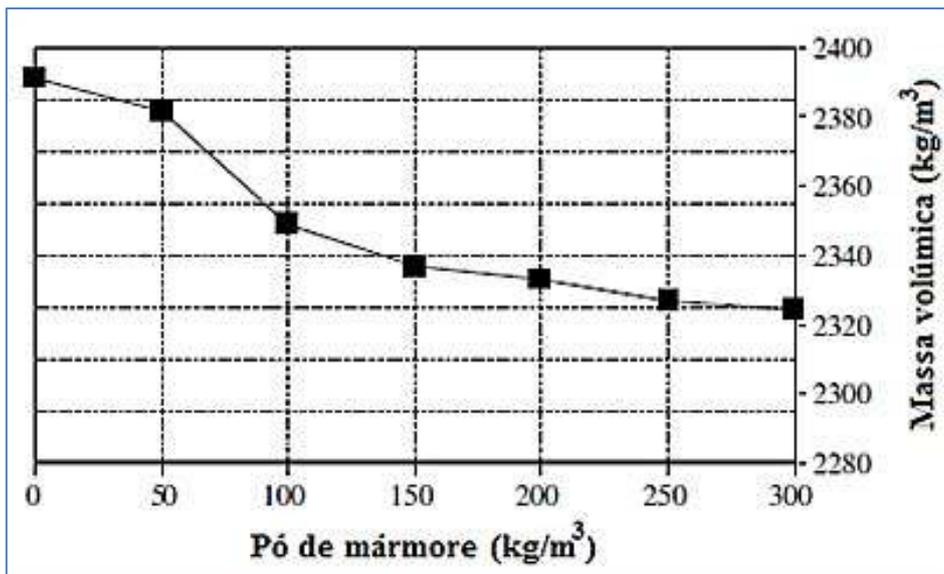


Figura 2.14 - Variação da massa volúmica com a adição de pó de mármore - adaptado de Topçu et al. (2008)

#### 2.4.4. Volume de vazios

Este parâmetro avalia o volume total de poros, estruturas capilares e fraturas existentes no betão sendo que a sua importância ao nível da durabilidade não pode ser descurada. É de salientar que o volume de vazios tem uma relação direta com a massa volúmica da mistura, sendo que para uma maior quantidade de vazios a massa volúmica diminui e vice-versa.

Em Hebhouh et al. (2011), um aspeto importante referido foi a diminuição do volume de vazios no betão aquando da gradual inclusão de 25, 50, e 100% de finos de resíduos de mármore. Em suma, é apontado nesta investigação que o aumento de resistência é significativo para betões com incorporação de mármore devido em parte à diminuição do volume de vazios, requerendo isto uma especial atenção para a quantidade de água necessária para a amassadura, não comprometendo assim a trabalhabilidade pretendida.

Segundo o trabalho de Topçu et al. (2008), relativamente à análise das propriedades do betão auto-compactável em estado fresco, constatou-se que, para maiores incorporações de fíler de pó de mármore, o volume de vazios na composição da mistura aumentou. Citando os autores, para uma mesma relação água-ligante, aumentando a quantidade de fíler de mármore, surge uma maior necessidade de hidratação associada a essas partículas, conduzindo a uma pior redistribuição das mesmas com implicações na sua interação e consequente aumento do volume de vazios. Este fenómeno encontra-se representado na Figura 2.15.

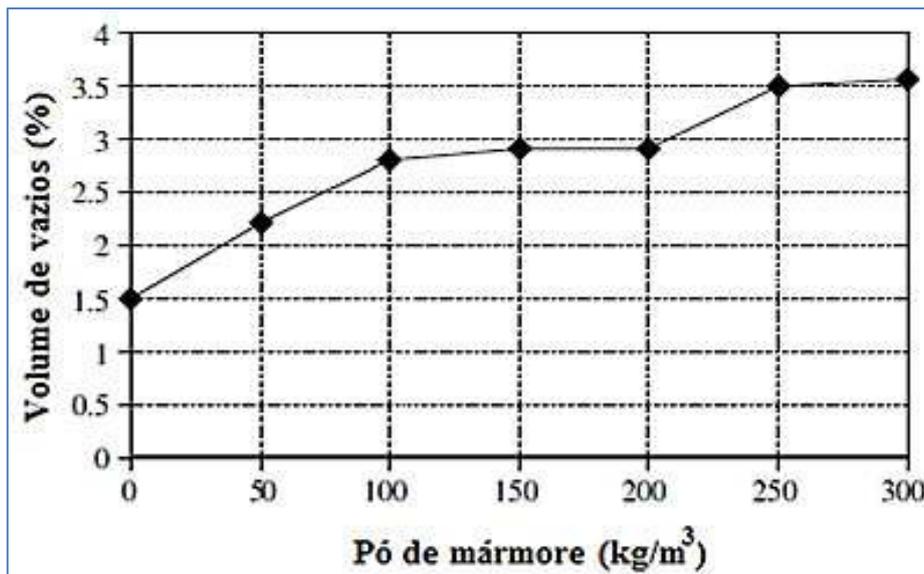


Figura 2.15 - Variação do volume de vazios com a adição de pó de mármore - adaptado de Topçu et al. (2008)

Tendo em conta os resultados desta investigação, o valor ótimo de adição de pó de mármore situa-se em 200 kg/m<sup>3</sup>, correspondendo assim a um volume de vazios na ordem de 3%, o dobro do valor de referência. É aqui de salientar a mais-valia inerente ao aumento do volume de vazios para efeitos de resistência do betão a ações decorrentes de baixas temperaturas, como refere Aïtcin (2003).

#### 2.4.5. Absorção de água

A absorção de água no betão ocorre sob duas formas distintas: imersão e capilaridade. No primeiro caso, absorção por imersão, as pressões no interior e exterior do elemento em causa não se encontram em equilíbrio estático sendo que a água tende a infiltrar-se de forma a saturar o betão. Neste caso, o volume de água absorvido está diretamente relacionado com o volume de poros abertos interligados na estrutura do betão. Quanto à absorção de água por capilaridade, Coutinho e Gonçalves (1973) sugerem que esta decorre da ascensão capilar devido à diferença de pressão gerada pela interface curva entre a fase líquida e a fase gasosa. Para este efeito, quanto mais fina for a rede porosa do betão, mais facilmente a água penetra no mesmo, atingindo alturas superiores.

Segundo Coutinho e Gonçalves (1973), a absorção de água varia com a relação água-cimento, a finura e o teor de cimento, a idade, as condições de cura, a compacidade e trabalhabilidade do

betão, assim como a absorção de água dos agregados, representando estes fatores um forte condicionalismo na resistência mecânica e durabilidade.

No trabalho de Binici et al. (2007), é analisada a profundidade de penetração de água para os betões apresentados na Tabela 2.8.

Como é possível analisar pela Figura 2.16, para um aumento de pó de mármore na composição do betão de 5% até 15%, ocorre uma redução de profundidade de penetração de água significativa, sendo que em comparação com o betão de referência se trata de um valor na ordem de 80%. Isto resulta do facto de as adições de pó de mármore reagirem quimicamente com o ligante envolvido na mistura, permitindo a obtenção de uma matriz mais densa e compacta e, por sua vez, reduzir a permeabilidade. É de salientar que este aspeto tem implicações diretas na porosidade do betão, reduzindo-a significativamente.

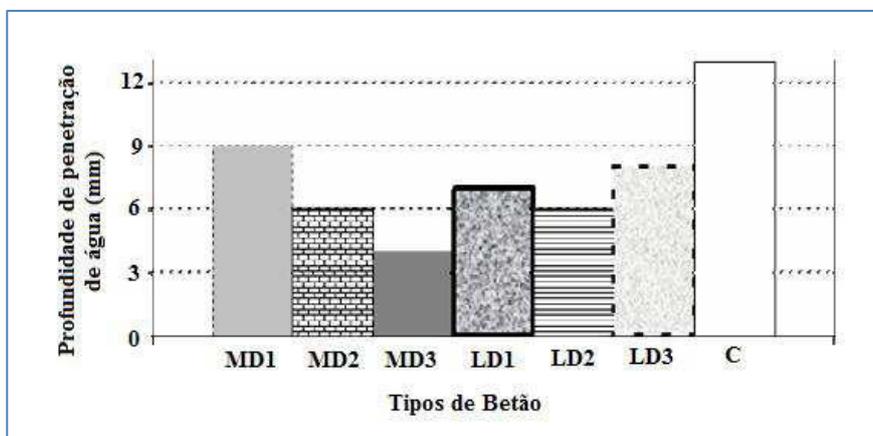


Figura 2.16 - Absorção de água para diferentes composições de betão, adaptado de Binici et al. (2007)

Na investigação de André (2012), que consistiu na substituição de agregados grossos primários de basalto, calcário e granito por agregados grossos de resíduos de mármore nas percentagens de 20, 50 e 100%, conclui-se que não ocorrem variações significativas na absorção de água por imersão nos betões produzidos. Contudo, na absorção de água por capilaridade, o autor reconhece uma melhoria significativa nas características de betões com mármore, levando a variações negativas de até 31 e 48,7% de absorção de água e altura de ascensão capilar, respetivamente.

No estudo de betões auto-compactáveis de Topçu et al. (2008), foi analisada a absorção de água por capilaridade recorrendo a provetes cúbicos de faces com 100 mm. Para tal, os provetes foram imersos numa das faces a uma profundidade de 5 mm em água como representado na Figura 2.17. A utilização da parafina tem a função de isolar as zonas em contacto com água para que esta ascenda por capilaridade na área definida.

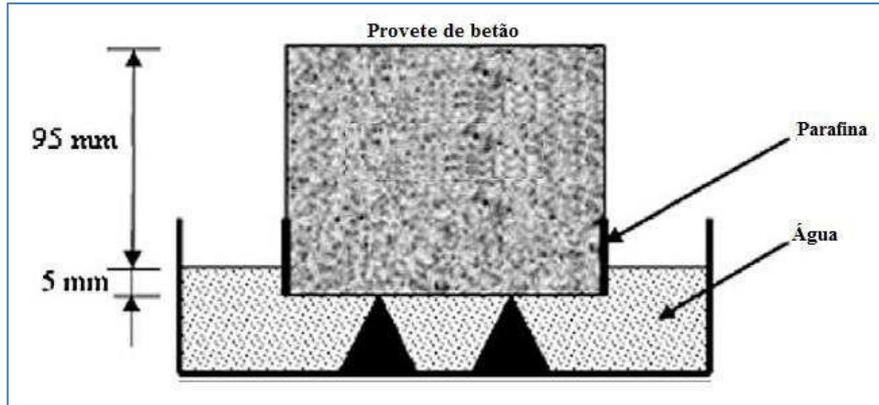


Figura 2.17 - Ensaio de absorção de água por capilaridade, adaptado de Topçu et al. (2008)

Deste ensaio resultaram valores distintos para o coeficiente de capilaridade e, conseqüentemente, diferentes valores de absorção de água nos provetes ensaiados com variação de incorporação de pó de mármore. As Figuras 2.18 e 2.19 demonstram essa correlação obtida ao nível experimental.

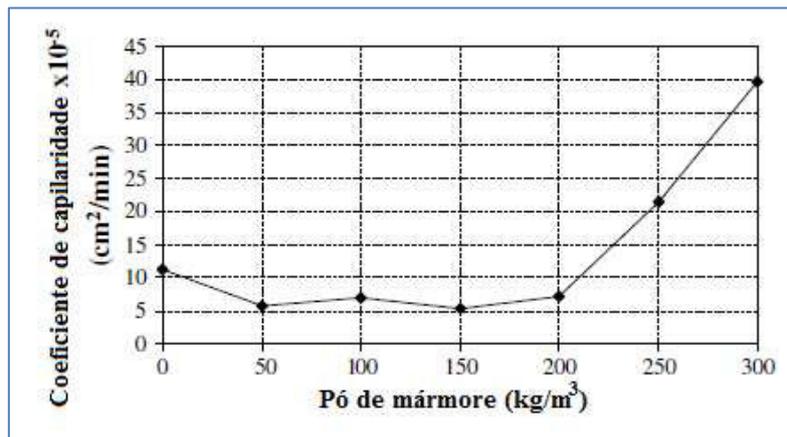


Figura 2.18 - Variação do coeficiente de capilaridade devido à adição de pó de mármore, adaptado de Topçu et al. (2008)

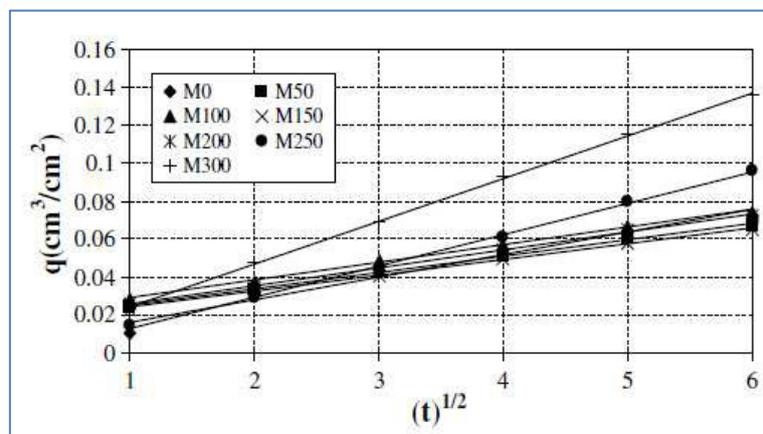


Figura 2.19 - Variação da absorção de água, q, devido à adição de pó de mármore - adaptado de Topçu et al. (2008)

Sendo a água um dos principais agentes responsáveis pela degradação dos materiais de construção, o seu mecanismo de agressão passa pelo transporte de substâncias nocivas através dos poros dos materiais bem como o seu congelamento no interior destes. Hanzlič e Ilić (2003) explicam que, na presença de um potencial hidráulico constante à superfície de um material poroso, a água pode atingir alturas consideráveis devido à absorção capilar. Tendo isto em conta, um aspeto importante desta investigação é o decréscimo do coeficiente de capilaridade no betão auto-compactável até valores de 200 kg/m<sup>3</sup> de adição de pó de mármore (Figura 2.18). A variação deste parâmetro está em grande parte associada à porosidade aparente, que para os betões em estudo decresce igualmente como demonstra a Figura 2.20.

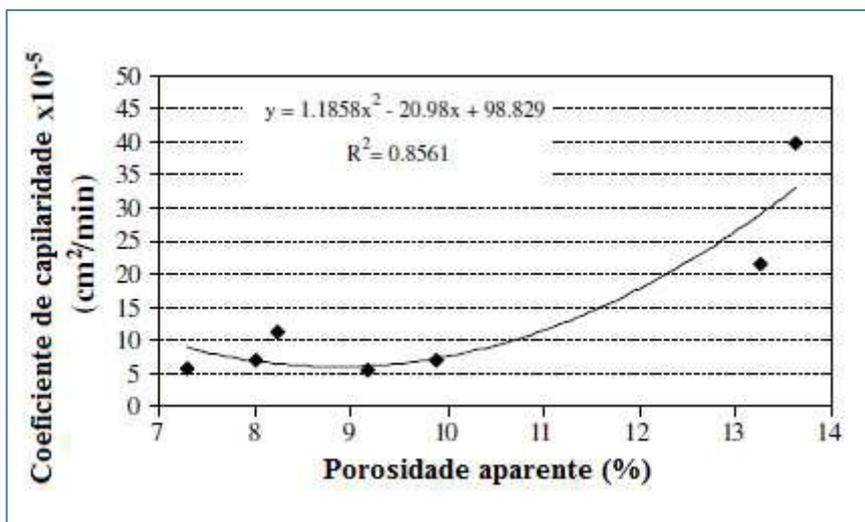


Figura 2.20 - Variação do coeficiente de capilaridade com a adição de pó de mármore, adaptado de Topçu et al. (2008)

#### 2.4.6. Resistência à carbonatação

A porosidade de um betão tem profundas implicações na resistência à carbonatação, propriedade essa que se torna essencial na proteção de armaduras à corrosão em elementos de betão armado. Segundo Neville (2002), o aço desenvolve uma camada de passivação quando em contacto com o meio alcalino do betão, protegendo-o da reação com o oxigénio e água. Contudo, o fenómeno de corrosão resulta na diminuição do pH do betão (inicialmente 12,5) devido à presença de CO<sub>2</sub>, para valores inferiores a 9, vulnerabilizando dessa forma as armaduras ao efeito corrosivo da água e oxigénio. Outro aspeto a ter em consideração é a retração por carbonatação. Como referem Coutinho e Gonçalves (1973), trata-se da combinação de dióxido de carbono com componentes hidratados de cimento, em especial o hidróxido de cálcio, gerando compostos de volume inferior aos que lhes deram origem. Sendo que a

profundidade da frente de carbonatação está relacionada com a difusão de  $\text{CO}_2$  na rede porosa do betão, quanto maior a profundidade de penetração atingida, menor a velocidade de propagação do  $\text{CO}_2$ .

No estudo de André (2012), referente à substituição de agregados grossos de basalto, calcário e granito por agregados grossos de mármore, constatou-se uma melhoria pouco significativa na profundidade de frente de carbonatação. É mencionado que a variação mais expressiva ocorre para o betão de agregados grossos de granito com substituição de 50% de mármore, face ao betão de referência de granito, quando aos 7 dias apresenta uma profundidade de carbonatação menor, na ordem de 25%. Contudo, aos 91 dias essa melhoria traduz-se em 11%. Os resultados obtidos nesta investigação são justificados pela melhoria pouco significativa obtida na absorção de água por imersão, fator diretamente relacionado com a resistência à carbonatação.

Tendo em conta a resistência de betões à carbonatação, não foram encontradas mais investigações neste domínio, o que apresenta a desvantagem de impossibilitar a comparação de resultados bem como a determinação de padrões transversais a diversos estudos. Contudo, tendo em conta as expectáveis características de baixa porosidade dos agregados de mármore, é de prever um bom comportamento de betões com incorporação deste resíduo enquanto agregado fino. Outro ponto de referir é a influência da baixa porosidade na previsível relação água-cimento efetiva. Tendo em conta a baixa porosidade do mármore, é possível antecipar uma diminuição ligeira da relação água-cimento contribuindo de forma positiva para a resistência à carbonatação.

#### 2.4.7. Resistência à penetração de cloretos

A resistência à penetração de cloretos é outro parâmetro que, de forma semelhante à resistência à carbonatação, tem grande importância na proteção das armaduras presentes no interior de elementos de betão armado. Segundo Ferreira (2000), estes dois fenómenos são os principais responsáveis pela despassivação de armaduras. Contudo, na penetração de cloretos, em vez de alterações ao nível do pH do betão, a ação que se desenvolve é a atuação molecular dos iões cloretos na destruição da camada passiva das armaduras. Um aspeto interessante nos dois mecanismos referidos, carbonatação e penetração de cloretos, é o facto de dependerem dos mesmos fatores físicos do betão para que ocorram. Assim, para o fenómeno de penetração de cloretos, também o volume de vazios, referido em 2.4.4., é um parâmetro condicionante.

No estudo de durabilidade de betões com incorporação de mármore e granito enquanto agregados reciclados apresentado por Binici et al. (2008), foi provado que o mármore está diretamente relacionado com melhorias quer ao nível de menores penetrações de cloretos quer de sulfatos. Mais concretamente, um betão corrente de calcário, face a um betão com agregados grossos de mármore, passa de uma penetração de cerca de 48 a 11 mm, traduzindo-se em reduções na profundidade de cloretos na ordem de 70% - Figura 2.21. Estes valores devem-se também à utilização de escórias de alto-forno enquanto agregado fino na produção do betão.

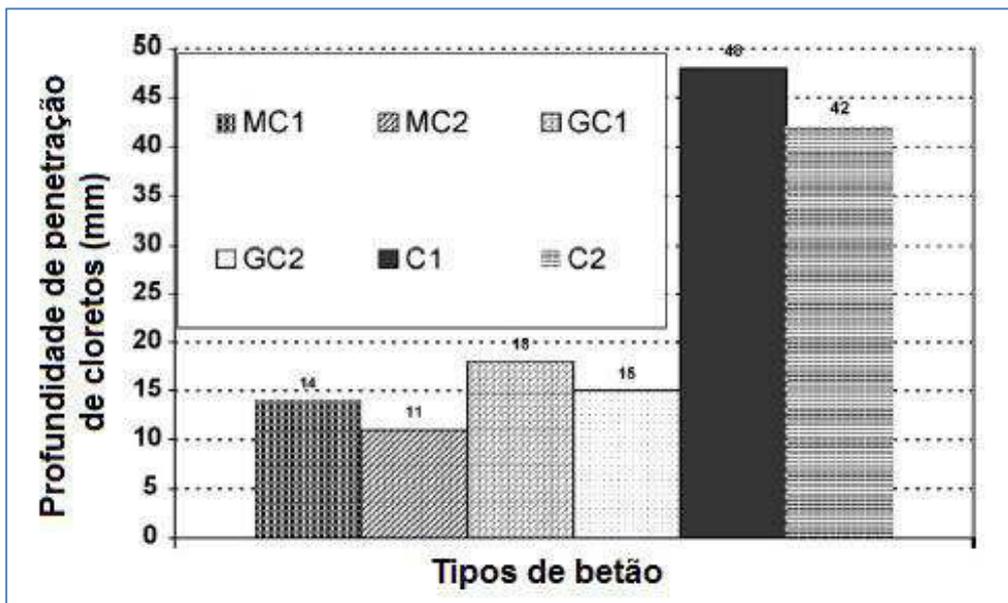


Figura 2.21 - Variação de penetração de cloretos para os betões especificados na Tabela 2.10, adaptado de Binici et al. (2008)

Porém, no estudo de André (2012), a introdução de agregados grossos de mármore no betão por substituição de agregados primários de basalto, calcário e granito, aumentou o coeficiente de difusão de cloretos. É então referido que essa situação se possa dever à baixa percentagem de alumina,  $Al_2O_3$ , presente no mármore utilizado. A presença de alumina beneficia a formação de aluminato tricálcico,  $C_3A$  e este produto, através das reações do cimento, fixa os iões cloreto, impossibilitando-os assim de destruírem a camada de passivação das armaduras, segundo Missau (2004), Amrutha et al. (2011) e Uysal et al. (2012).

#### 2.4.8. Retração

A retração é um fenómeno de diminuição de volume que ocorre no betão tendo por base as características físicas e químicas dos seus constituintes bem como outros fatores. Apontados por

Coutinho e Gonçalves (1973), os principais responsáveis por este comportamento posterior à produção são as dimensões do elemento a produzir, o teor de água da amassadura, a quantidade de cimento utilizada, a natureza e distribuição granulométrica dos agregados utilizados, as condições de cura e as propriedades do cimento.

Do ponto de vista prático, a retração pode ter consequências indesejáveis no betão tais como a fissuração, comprometendo de forma indireta a durabilidade dos elementos considerados.

Gettu et al. (1998) apontam 5 tipos distintos de retração ao longo do tempo: plástica, térmica, autogénea, por secagem e por carbonatação, como representado na Figura 2.22.

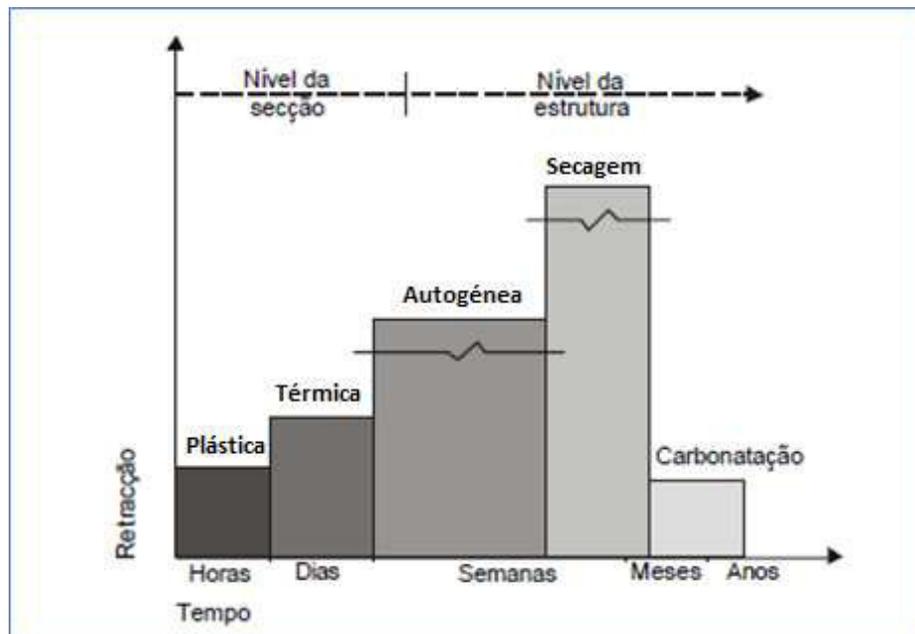


Figura 2.22 - Sequência cronológica do mecanismo de retração, Ferreira (2000) adaptado de Gettu (1998)

A retração plástica deve-se à perda de água para o ambiente envolvente, tendo maior incidência em casos de alta temperatura, ventos fortes ou cura não adequada. Por outro lado, a subida de temperatura do betão nas primeiras fases de hidratação dilata o próprio elemento. Contudo, quando este arrefece já em estado endurecido até à temperatura ambiente, ocorre a retração térmica. Outro fenómeno que ocorre no betão é a sua natural hidratação contínua em contacto com água. No entanto, para ambientes onde não haja troca de humidade do exterior com a pasta de cimento, ocorre a retração autogénea ou básica. Finalmente, a saída de água do betão endurecido para o ar envolvente não saturado, provoca a retração por secagem. Parte deste processo é irreversível, sendo que, se a retração por secagem for acompanhada de carbonatação, a pasta de cimento não é capaz de acompanhar o movimento da humidade e a retração irreversível torna-se superior.

Ferreira (2000) sugere que para relações água / cimento superiores, a retração também aumenta, pelo facto de haver mais água disponível para efeitos de evaporação e isso condicionar a velocidade de ascensão à superfície do betão. É também referido que a dosagem de agregados condiciona a retração.

Na Figura 2.23, resultante de um estudo de Ödman (1968), é possível observar que, quanto maior for a relação água / cimento para a mesma dosagem de agregados, maior será a retração.

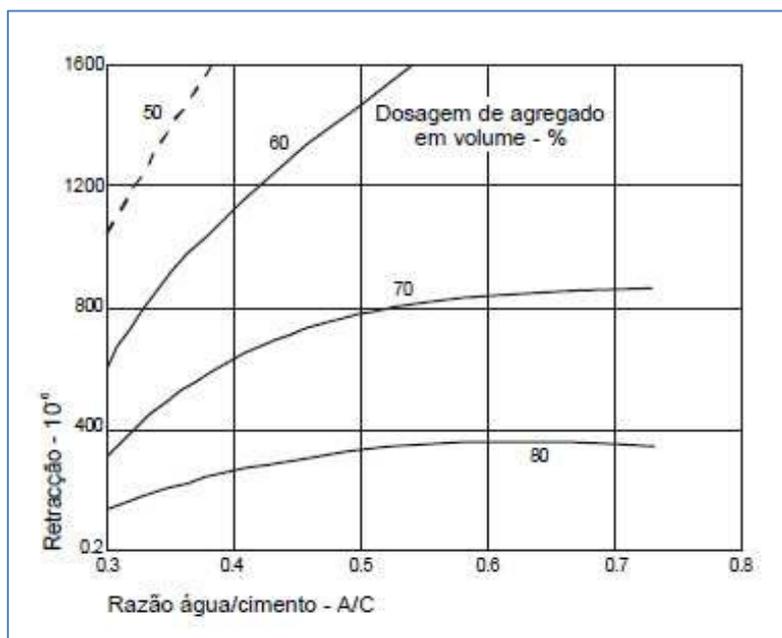


Figura 2.23 - Influência da relação água / cimento e da dosagem de agregados na retração, adaptado de Ödman (1968)

Na investigação de Troxell et al. (1958), iniciada em 1926, foi medida a retração de betões ao longo de mais de trinta anos. O parâmetro que foi considerado nesse trabalho foi a natureza petrográfica dos agregados utilizados em provetes de betão cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 36 cm de altura, num processo de cura a 50% de humidade relativa e 21 °C de temperatura, após 28 dias de conservação inicial em atmosfera saturada. A dosagem de cimento utilizada foi de 320 kg/m<sup>3</sup> e a de água de 190 l/m<sup>3</sup>. A conclusão que se obteve foi de que a retração ao fim de 30 anos ainda cresce, mas considera-se que o aumento de retração após o segundo ano de ensaio se deve à carbonatação do betão. Pela análise da Figura 2.24, também se constata que os diferentes agregados têm influência na retração do betão, não necessariamente pela sua composição química, mas pela sua geometria e influência na compacidade da mistura. Neste sentido, observa-se que os betões com agregados de basalto e granito têm retrações mais elevadas do que o betão com calcário, sendo que o basalto, dos três, é o agregado ao qual se associa uma retração mais acentuada. Devido à rocha calcária estar na génese de formação do mármore,

pressupõe-se, nesta fase, que os agregados finos de mármore irão assemelhar-se ao comportamento de betões com agregados de calcário.

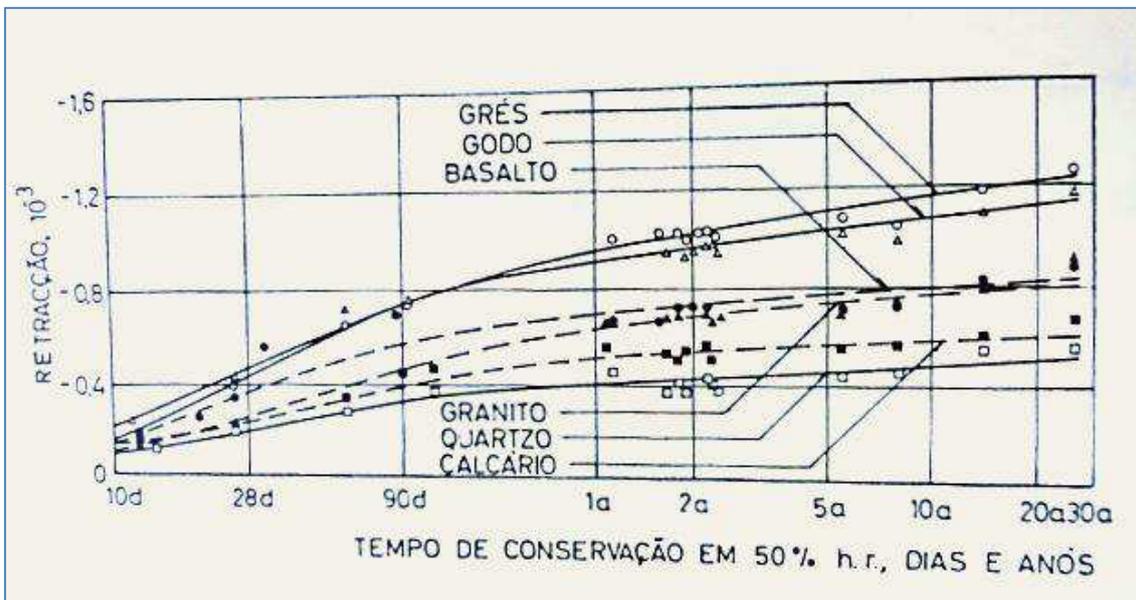


Figura 2.24 - Ensaio de retração a betões com diferentes tipos de agregados realizado por Troxell et al. (1958), adaptado de Coutinho e Gonçalves (1973)

Para fins de comparação entre estudos realizados e conclusões gerais sobre a retração em betões com agregados de mármore, não foi registada praticamente qualquer investigação nesse sentido. Contudo, com um número reduzido de referências para comparação, é possível fazer uma estimativa do comportamento dos betões em estudo pelas características dos seus constituintes.

Tendo em conta as características estudadas, prevê-se uma redução significativa na retração de betões com agregados finos de basalto e granito, e uma variação menos pronunciada em betões com agregados finos de areia do rio, pela sua substituição por agregados finos de mármore.

## 2.5. Outras aplicações do mármore

Tal como referido, a necessidade de fazer frente ao excesso de resíduos gerados pela indústria da extração de mármore tem gerado a crescente investigação na área referente à sua reciclagem e reutilização. Esta investigação tem surgido no domínio da criação de produtos destinados a novos fins comerciais. Por outras palavras, e essencialmente a nível académico, devido à recente preocupação emergente neste sector, têm vindo a ser desenvolvidos novos conceitos de produtos, visando assim a sustentabilidade no sector da indústria primária.

Um caso concreto de estudo neste domínio foi a “Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos”, de Oliveira et al. (2010), tendo como objetivo o aproveitamento dos resíduos de rocha para a elaboração de cargas em sabonetes. Assim, procedeu-se a ensaios de caracterização química e mineralógica, seguidos de uma análise granulométrica para uma posterior incorporação de partículas finas na massa dos sabonetes. Este procedimento foi testado para teores de substituição compreendidos no intervalo de 5 a 70% da massa total dos cosméticos. Foram seguidas as normas existentes para cosméticos aplicáveis aos ensaios de densidade, absorção de água, porosidade, fendilhação e desgaste, para além de testes efetuados em coelhos na perspetiva de analisar reações dérmicas. Como principais conclusões, resultou o facto de se observar uma baixa perda de massa decorrente da utilização normal dos sabonetes e uma alta estabilidade do produto final, viabilizando assim a aplicação do mármore como pretendido. No entanto, como condicionantes, surgiram a limitação ao uso de 40% de incorporações e dimensões de partículas até 0,053 mm de forma a não provocar irritação na pele dos utilizadores.

Outra investigação sobre o reaproveitamento de mármore corresponde à “Reciclagem de resíduos visando à produção de lâs minerais”, por Rodrigues (2009), motivada pelas boas características químicas que resíduos como o mármore, o granito e as escórias de ferro silício manganês têm para a execução deste produto. Esta investigação passou pela identificação da composição química dos resíduos através de uma Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, permitindo assim encontrar uma forma de doseá-los de forma a produzir composições para a lâ mineral similar às existentes na prática. As conclusões decorrentes do estudo, no âmbito dos resíduos de mármore, traduzem-se numa boa solução enquanto matéria-prima para a produção de lâ de rocha e lâ de vidro, atuando na composição destas com percentagens de 11,7 e 14,6%, respetivamente. Esta incorporação demonstrou-se satisfatória essencialmente devido à presença de grandes quantidades de óxido de cálcio na composição química do mármore.

No estudo intitulado “Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas”, de Silva et al. (2005), é apresentada outra opção para o aproveitamento dos resíduos de rocha inutilizada. Neste trabalho, é analisado o comportamento de uma argila utilizada em indústrias de cerâmica vermelha, procedendo-se a uma substituição de 10 a 50% do seu peso por uma lama de mármore e granito. Para tal, foram efetuados testes relativos a características químicas, mineralógicas, térmicas, granulométricas, porosidade, absorção de água e tensão de rotura à flexão. Enquanto resultados determinantes, foram demonstradas as potencialidades de inclusão de mármore na produção de massa argilosas, sem comprometer ou até mesmo melhorando a qualidade das mesmas. No entanto, esta incorporação apresenta como desvantagem uma maior dificuldade sentida no processo de conformação, se bem que conferindo à massa um período de

secagem mais eficaz, não obstante uma pequena perda de resistência mecânica enquanto corpo seco.

Outro estudo relativo a tijolos cerâmicos “The use of the powder marble by - product to enhance the properties of brick ceramic”, por Saboya et al. (2005), refere que a introdução de 15 a 20% de pó de mármore neste produto não altera as suas propriedades mecânicas, considerando mesmo a hipótese da sua mais-valia na obtenção de propriedades melhoradas. Contudo, para além de 20% de substituição, os tijolos cerâmicos apresentam absorções de água elevadas, acima dos valores máximos estabelecidos no âmbito da construção civil. Também é mencionada a vantagem associada à baixa temperatura necessária para dissociar a calcite de dolomite, melhorando a resistência mecânica do elemento cerâmico.

No estudo intitulado “The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies”, realizado por Montero et al. (2009), conclui-se que, adicionando resíduos de pó de mármore na produção de elementos de cerâmica, se obtém uma boa reação com os minerais de quartzo e argila contribuindo para um melhor processo de sinterização dos constituintes originais. Como principal vantagem, é referida a reutilização dos resíduos de mármore com ligeiras alterações nas propriedades dos produtos finais. Contudo, a incorporação de mármore é limitada face ao aumento de absorção de água, representado na Figura 2.25, e consequente decréscimo da resistência à flexão.

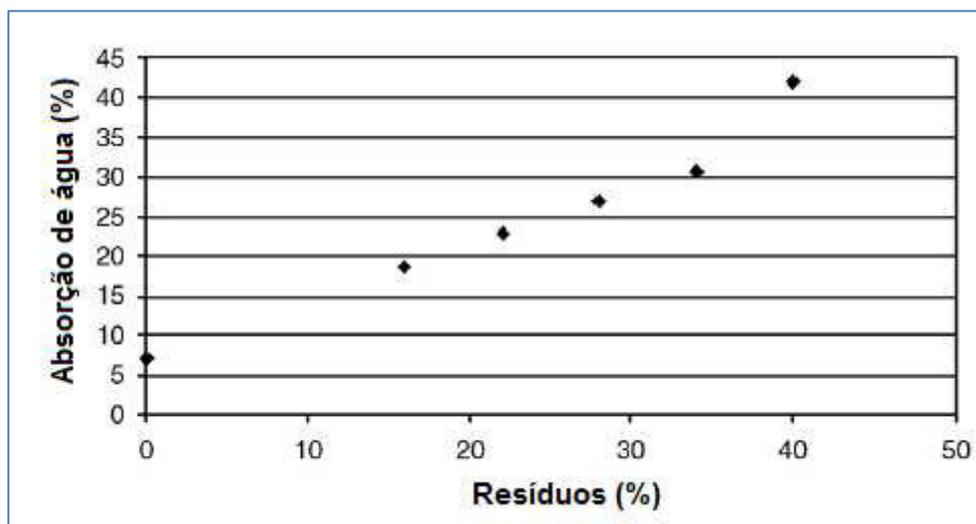


Figura 2.25 - Variação da absorção de água para diferentes percentagens de resíduos de mármore em peças cerâmicas, adaptado de Montero et al. (2009)

Através do estudo do pó de mármore resultante do processo de serragem e moldagem dos blocos, afirma-se em “Utilization of waste marble dust as na additive in cement production”, de Aruntaş et al. (2010), e “Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete”, por Corinaldesi et al. (2010), que a incorporação até 10% desses resíduos em argamassas não

tradicionais lhes confere a sua máxima resistência e conformidade com a NP EN 197-1, respetivamente.

Um estudo de Okagbue e Onyeobi (1999) avaliou a incorporação de pó de mármore como estabilizador de solos tropicais de base para estradas. Através de substituições de 0, 2, 4, 6, 8 e 10% de três solos diferentes por pó de mármore, foi analisada a alteração do índice de plasticidade e resistência à compressão. Dessa substituição resultou uma melhoria nesses parâmetros, registando-se uma redução do índice de plasticidade entre 20 e 33% e um aumento de resistência à compressão em 46%, obtendo-se o melhor desempenho em substituições de 8%.

É também de referir o trabalho de Karaşahin e Terzi (2005) que aponta os pavimentos de baixo e médio tráfego como uma óptima solução a dar ao pó de mármore enquanto fíler. Aproveitando a mesma linha de raciocínio, surgem Akbutul e Gürer (2007) a propor a inclusão dos agregados grossos da indústria de extracção de mármore novamente nos pavimentos de baixo e pequeno tráfego. Estes referem que uma enorme quantidade de massa de agregados é necessária para a execução dos pavimentos, cerca de 95% da massa total, pelo que se trata de uma utilidade considerável a dar aos resíduos de mármore.

Ainda no âmbito da pavimentação, mas agora enquanto blocos de betão pré-fabricados, Gencil et al. (2012) utilizaram resíduos de mármore na substituição dos agregados primários, finos e grossos, nas quantidades de 10, 20, 30, e 40%. A composição do betão original era de 25% de areia natural do rio, 25% de areia britada e 50% de agregados grossos britados.

Com esta investigação, chegou-se à conclusão de que a massa volúmica dos blocos diminuiu devido à menor massa volúmica do mármore face aos agregados originais. Consequentemente, houve também uma diminuição da resistência à compressão, devido à influência que a massa volúmica tem nesta propriedade. Quanto à resistência à tração e a absorção de água, não se notaram variações significativas, notando-se uma ligeira diminuição em ambas. A substituição dos agregados originais pelo mármore provocou também uma diminuição do módulo de elasticidade dos blocos e um aumento da resistência à abrasão. Estas tendências são justificadas pela dureza do mármore ser superior à dos agregados iniciais, medida na escala de Mohs<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Escala de Mohs: A escala de Mohs quantifica a dureza dos minerais, isto é, a resistência que um determinado mineral oferece ao risco. Esta escala foi criada em 1812 e foi-lhe atribuída uma classificação de dureza de 1 a 10. A classificação de 1 foi dado ao material menos duro da escala, que é o talco, e o valor 10 dado ao diamante, que é a substância mais dura conhecida na Natureza.

## 2.6. Conclusões

A realização desta compilação de estudos permitiu confirmar a crescente preocupação com a sustentabilidade da exploração dos recursos naturais na atualidade. Se bem que a nível mais académico, mas começando já a ter resultados práticos no dia-a-dia dos cidadãos, a reutilização de resíduos de mármore assume hoje uma importante área de investigação.

Mais concretamente no desenvolvimento de betões com agregados reciclados de mármore, destaca-se a maior importância que se tem dado às características mecânicas em detrimento da sua durabilidade. Assim, é possível concluir que este estudo se revela de extrema importância para fazer face a essa lacuna. Contudo, comprovou-se a existência de homogeneidade em grande quantidade de informação relevante para a realização desta investigação.

Em termos de propriedades de betão fresco, é consensual que a trabalhabilidade diminui com a incorporação de agregados de mármore de um amplo intervalo de dimensões. Consensual também, nas investigações já realizadas, é o decréscimo de massa volúmica dos betões com adição de mármore. Isto deve-se ao facto de a maioria dos trabalhos académicos terem por base a incorporação de pó enquanto filler a substituir o ligante, componentes estes com massas volúmicas bastante díspares. Quanto ao volume de vazios, os estudos abordados referem uma diminuição deste parâmetro para betões ditos normais, ao contrário de betões auto-compactáveis, onde o volume de vazios tende a aumentar. O que o justifica é a diferença de trabalhabilidades e fluidez que os betões apresentam.

Finalmente, analisando as propriedades do betão endurecido, concluiu-se neste capítulo que o fator principal na caracterização da durabilidade de betões com resíduos de mármore é a porosidade e conseqüente permeabilidade. Uma vez que a inclusão de mármore confere uma estrutura mais compacta na generalidade dos betões, estes apresentaram menores valores de absorção de água, assim como melhorias significativas no desempenho à penetração de cloretos e, apesar de não ser alvo de estudo nesta dissertação, melhorias significativas ao ataque de sulfatos. Há que referir também que apesar de não se terem realizado ou existirem poucos estudos relativos à resistência à carbonatação e retração, tudo indica que o mármore é uma incorporação com efeitos benéficos nestes domínios.



## 3. Programa experimental

### 3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo a descrição detalhada da campanha experimental realizada. Como tal, tem em conta a formulação dos diferentes betões de referência, os procedimentos experimentais para a sua produção, os ensaios aos seus constituintes, assim como os ensaios nos seus estados fresco e endurecido.

Relativamente aos constituintes do betão, foram apenas analisados os agregados utilizados, tanto os finos como os grossos. Isto deve-se ao facto de a água utilizada para efeitos experimentais ser da rede pública e de o ligante, o cimento, ter sido previamente sujeito a um controlo de qualidade na central de produção. Como tal, tornou-se necessária a análise dos agregados utilizados de forma a garantir o rigor do estudo a realizar.

Há ainda que salientar a referência à regulamentação existente no âmbito dos ensaios laboratoriais a betões e aos seus constituintes. Essa regulamentação, traduzida na prática por normas e especificações, é utilizada neste estudo de forma a garantir a uniformidade com outros ensaios anteriormente realizados, permitindo assim comparar resultados experimentais devidamente parametrizados e padronizados.

### 3.2. Planificação da campanha experimental

De forma a simplificar a campanha experimental, esta foi dividida em três fases distintas. A primeira consistiu na análise dos agregados, a segunda na produção dos betões e a terceira nos respetivos ensaios de durabilidade.

As duas primeiras fases desta campanha resultaram de um trabalho conjunto com o investigador Diogo Costa da Silva, sendo que este ensaiou, na terceira fase, os betões produzidos quanto à sua resistência mecânica, resultando numa dissertação paralela e complementar. Uma vez que a resistência mecânica influencia diretamente a durabilidade dos betões, parte dos dados obtidos nessa dissertação foi também considerada na interpretação dos resultados verificados neste trabalho.

### 3.2.1. Primeira fase - Análise de agregados

Para cada tipo de agregado utilizado, foram consideradas as suas dimensões de forma a distingui-los entre agregados grossos e finos. Feita esta distinção, aplicaram-se os ensaios, normas e especificações descritas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Regulamentação utilizada para caracterização de agregados grossos e finos**

<b>Tipo de Agregados</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Regulamentação</b>
Agregados grossos	Absorção de água e massa volúmica	NP EN 1097-6 (2003)
	Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999)
	Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3 (2003)
	Desgaste de Los Angeles	LNEC E-237 (1970)
	Índice de forma	NP EN 933-4 (2002)
Agregados finos	Absorção de água e massa volúmica	NP EN 1097-6 (2003)
	Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-3 (1999)
	Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3 (2003)

### 3.2.2. Segunda fase - Produção dos betões

Nesta etapa, formularam-se as dez diferentes composições de betão em estudo. Destas, apenas os quatro betões de referência foram calculados com base nas propriedades dos seus agregados, ao invés dos outros seis que resultaram de uma substituição ponderada em percentagem do volume de agregados finos.

Um dos aspetos importantes a considerar nesta fase foi a produção de várias amassaduras experimentais dos diferentes tipos de betão. Com esta medida, pretendeu-se efetuar, caso necessário, alguns acertos relativos a proporções de água / cimento efetivas bem como pequenos ajustes quanto à trabalhabilidade do betão. É de referir que este parâmetro foi utilizado de forma a possibilitar a comparação dos diferentes betões, isto é, impuseram-se trabalhabilidades semelhantes para se analisarem resultados entre betões compatíveis.

O valor de abaixamento do cone de Abrams, medida indireta da trabalhabilidade, foi definido em  $125 \pm 15$  mm, sendo que para além deste se consideraram também os ensaios listados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Regulamentação utilizada para controlo de qualidade do betão**

<b>Ensaio</b>	<b>Regulamentação</b>
Abaixamento do cone de Abrams	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica no estado fresco	NP EN 12350-6 (2002)
Resistência à compressão aos 28 dias	NP EN 12390-3 (2003)

### 3.2.3. Terceira fase - Ensaio de durabilidade

A terceira fase consistiu na realização de ensaios aos provetes de betão no estado endurecido de forma a analisar as suas características em termos de durabilidade. Essas características obtiveram-se através de ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão, resistência à carbonatação e penetração de cloretos, e retração. Outro ensaio considerado foi o da resistência à compressão de forma a poder relacionar as propriedades de durabilidade com a resistência mecânica.

Na Tabela 3.3, é possível consultar as respetivas normas e especificações.

**Tabela 3.3 - Ensaio de durabilidade**

<b>Ensaio</b>	<b>Regulamentação</b>
Absorção por de água por capilaridade	LNEC E 393 (1993)
Absorção de água por imersão	LNEC E 394 (1993)
Resistência à carbonatação	LNEC E 391 (1993)
Resistência à compressão	NP EN 12390-3 (2003)
Resistência à penetração de cloretos	LNEC E 463 (2004)
Retração	LNEC E 398 (1993)

## 3.3. Formulação dos betões

### 3.3.1. Introdução

Tratando-se de um material caracterizado pela elevada resistência à compressão e durabilidade, o betão insere-se no grupo dos materiais compósitos.

É um material constituído por agregados, que lhe conferem a maior parte do volume, um ligante e água, com a possibilidade de junção de adições e/ou adjuvantes para melhorar as suas características mecânicas e de durabilidade. Também é sabido que a qualidade de um betão varia de acordo com a dosagem dos materiais envolvidos bem como na técnica da sua mistura.

Relativamente à fase de produção, é unânime que a trabalhabilidade e a compacidade são os parâmetros mais importantes no estado fresco de um betão, como refere Sousa Coutinho (1999).

### 3.3.2. Parâmetros iniciais de formulação

Para a formulação dos diferentes betões deste estudo, optou-se pela utilização das curvas de referência de Faury (1958), tratando-se da técnica mais utilizada em Portugal.

Com base no dimensionamento de Nepomuceno (1999) e de acordo com a norma NP EN 206-1 (2007), utilizaram-se como parâmetros iniciais de formulação a classe de consistência e resistência, o tipo de água, agregados e ligante, e o método de compactação e medição dos componentes. Estes elementos são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros de formulação iniciais

Parâmetro	Referência
Classe de consistência	S3 (125 ± 15 mm)
Classe de resistência	C30/37
Tipo de água	Água potável
Tipo de agregado	Agregados naturais
Tipo de ligante	CEM II A-L 42,5R
Método de medição de componentes	Pesagem
Método de compactação	Vibração mecânica normal (agulha vibratória)
Tipo de controlo de produção	Bom

### 3.3.3. Dimensão máxima do agregado ( $D_{máx}$ )

Faury estabeleceu como limite superior da dimensão do agregado,  $D_{máx}$ , o valor de 1,33 R, sendo R o raio médio do molde a betonar. Desta forma, evita-se a impossibilidade de uma colocação e compactação adequada do betão referido por Sousa Coutinho (1999).

A dimensão máxima do agregado traduz-se então pela seguinte expressão:

$$D_{máx} = \frac{4}{3} \times R \quad (3.1)$$

onde,

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

Estas variáveis,  $D_{m\acute{a}x}$  e  $R$ , caracterizam o efeito de parede a que o betão está sujeito através da razão:

$$\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} \quad (3.3)$$

implicando o aumento da percentagem de agregados grossos a introduzir na composição face ao aumento desta relação.

O molde condicionante utilizado na escolha da dimensão máxima do agregado foi o cubo de 0,10 m de aresta, resultando daí o seguinte valor:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{4}{3} \times \frac{L^3}{6L^2} = \frac{4}{3} \times \frac{100}{6} = 22,2 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Para efeitos de comparação com outros estudos realizados nesta área e condicionalismos experimentais, considerou-se um  $D_{m\acute{a}x}$  de 22,4 mm, valor semelhante para o qual não ocorre o efeito de parede.

#### 3.3.4. Valor médio da tensão de rotura à compressão ( $f_{cm}$ )

A expressão que traduz o valor médio da tensão de rotura à compressão é dada por:

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda \times S_n \quad (3.5)$$

onde  $f_{ck}$  é a resistência característica especificada para o betão,  $\lambda$  um parâmetro estatístico dependente de um determinado número de amostras de forma a garantir uma certa probabilidade, e  $S_n$  o desvio padrão das resistências do mesmo conjunto de amostras.

Tendo em conta um trabalho de Lourenço (1989) baseado em Coutinho e Gonçalves (1973), foi possível estimar o desvio padrão das resistências em função do controlo de produção e da forma de medição dos componentes do betão. Essa informação encontra-se resumida na Tabela 3.5.

Nepomuceno (1999) refere também que o valor característico da tensão de rotura ( $f_{ck}$ ) distará da média 1,64 desvios padrão, adotando-se um valor de  $\lambda$  igual a 1,64.

Tabela 3.5 - Desvios padrão em função das condições de produção do betão, baseado em Coutinho e Gonçalves (1973)

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
		Bom	4,7
Volume	Volume	Fraco	7,6
		Normal	6,5
		Bom	5,2

Face à escolha inicial de uma classe de resistência C30/37 para o betão, logo se conclui que o valor médio da tensão de rotura à compressão resulta em:

$$f_{cm} = 37 + 1,64 \times 4,4 = 44,2 \text{ MPa} \quad (3.6)$$

### 3.3.5. Determinação da relação água / cimento (a/c)

A relação água / cimento utilizada na produção de betão tem efeitos diretos na sua durabilidade e resistência. Isto deve-se essencialmente ao facto de a quantidade de água introduzida ser responsável pela maior ou menor quantidade de vazios no estado endurecido da matriz cimentícia. Por outro lado, a água tem um importante papel no fenómeno de hidratação do ligante da mistura, resultando daqui a necessidade de uma otimização da relação água / cimento.

Apesar de não haver unanimidade numa relação exata entre a resistência de um betão aos 28 dias e a sua relação água / cimento, a Figura 3.1 apresenta duas correlações consideradas boas aproximações da realidade. A linha a cheio representa um estudo de Nepomuceno (1999) e a tracejado a correlação indicada pelo American Concrete Institute (ACI). Ambos dizem respeito a betões produzidos com cimento do tipo II 32,5, sem adições e adjuvantes.

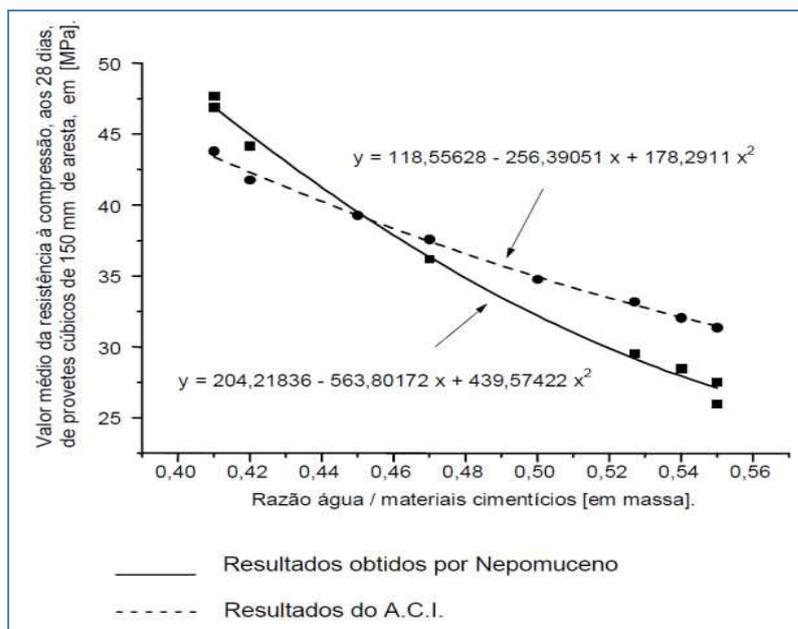


Figura 3.1 - Correlação entre resistência média à compressão aos 28 dias e relação água / cimento, Nepomuceno (1999)

Daqui resultaram os valores da relação água / cimento expressos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Relação água / cimento obtidos por Nepomuceno e ACI

Tipo	Expressão	Relação a/c
Nepomuceno	$44,2 = 204,21836 - 563,80172 \times \left(\frac{a}{c}\right) + 439,57422 \times \left(\frac{a}{c}\right)^2$	0,43
ACI	$44,2 = 204,21836 - 563,80172 \times \left(\frac{a}{c}\right) + 439,57422 \times \left(\frac{a}{c}\right)^2$	0,41

Seguindo o dimensionamento de Nepomuceno (1999), optou-se pela utilização de uma relação água / cimento teórica de 0,43.

### 3.3.6. Determinação do volume de vazios ( $V_v$ )

Sendo a qualidade de um betão diretamente proporcional à compacidade da mistura em fase de produção, este terá tanto melhor desempenho em termos de durabilidade e resistência mecânica quanto menor for o volume de vazios contido na sua amassadura. Porém, não é possível evitar a existência desse volume mesmo que em proporções muito pequenas.

A única forma de medir a quantidade de ar presente numa mistura é através de métodos indiretos. O ACI propõe uma correlação entre a granulometria dos agregados utilizados e o volume de ar contido na amassadura. Essa correlação é apresentada na Tabela 3.7, sendo que para valores intermédios, o volume de vazios se obtém através de uma interpolação linear.

**Tabela 3.7 - Volume de vazios proposto pelo ACI**

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	$V_v$ (l/m <sup>3</sup> )
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Efetuando a interpolação obtém-se:

$$\frac{25,4 - 19,1}{15 - 20} = \frac{22,4 - 19,1}{V_v - 20} \Leftrightarrow V_v = 17,4 \text{ l/m}^3 \quad (3.7)$$

### 3.3.7. Determinação do índice de vazios ( $I_v$ )

O índice de vazios traduz a proporção entre os constituintes não sólidos e a totalidade do betão. Assim, corresponde à soma dos volumes de água e ar presentes por unidade de volume de betão após a betonagem.

A expressão geral proposta por Faury, descrita no trabalho de Nepomuceno (1999), para o cálculo desta grandeza é:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[3]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (3.8)$$

onde K e K' são parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de colocação utilizados, conforme definido na Tabela 3.8, R é o raio médio do molde que contém o betão, em mm, e  $D_{m\acute{a}x}$  a máxima dimensão do agregado, em mm.

Tabela 3.8 - Parâmetro K e K' para a determinação do índice de vazios, adaptado de Nepomuceno (1999)

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Valores de K			Valores de K'
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado	Agregado grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤0,24	≤0,25	≤0,27	0,002
Seca	Vibração potente	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
Plástica	Vibração média	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,34	0,003
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Sem nada	0,36	0,38	0,4	0,004

Uma vez que se optou por uma mistura com trabalhabilidade mole obtida através de apiloamento, e os constituintes desta foram a areia rolada e agregados grossos britados, definiu-se através da Tabela 3.8 um valor de K e K' igual a 0,37 e 0,003, respetivamente.

Para cubos de 150 x 150 x 150 mm calculou-se o seguinte R:

$$R = \frac{L^3}{6 \times L^2} = \frac{L}{6} = \frac{150}{6} = 25 \text{ mm} \quad (3.9)$$

Como tal, o índice de vazios foi calculado segundo a expressão 3.8, resultando na expressão 3.10.

$$I_v = \left( \frac{0,37}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{\frac{25}{22,4} - 0,75} \right) \times 1000 = 207 \text{ l/m}^3 \quad (3.10)$$

### 3.3.8. Determinação da dosagem de água de amassadura ( $V_A$ )

O volume de água necessário na amassadura do betão pode ser estimado através da expressão 3.11. O seu valor é dado pela diferença entre o volume de vazios (expressão 3.7) e o índice de vazios (expressão 3.10).

$$V_A = I_v - V_v = 207 - 17,4 = 189,6 \text{ l/m}^3 \quad (3.11)$$

### 3.3.9. Determinação da dosagem de cimento ( $V_C$ )

Obtido pela expressão 3.12, o cálculo da dosagem do cimento necessário foi baseado na relação água / cimento previamente estabelecida.

$$V_C = \frac{V_A}{\frac{a}{c}} = \frac{189,6}{\frac{0,43}{3100}} = 0,142 \text{ m}^3/\text{m}^3 = 142 \text{ l/m}^3 \quad (3.12)$$

### 3.3.10. Determinação do volume das partículas sólidas ( $V_S$ )

Para a obtenção do volume de partículas sólidas a considerar na produção de betão, é apenas necessário subtrair à totalidade da mistura o respetivo índice de vazios. Assim, o volume das partículas sólidas é dado por:

$$V_S = (1 - I_v) \times 1000 = (1 - 0,207) \times 1000 = 793 \text{ l/m}^3 \quad (3.13)$$

### 3.3.11. Percentagem de cimento relativa ao volume sólido total ( $V_{C\%}$ )

Uma vez conhecido o volume sólido total e o volume de cimento no betão, a percentagem de cimento relativa ao volume das partículas sólidas foi determinada da seguinte forma:

$$V_{C\%} = \frac{V_C}{V_S} \times 100 = \frac{142}{793} \times 100 = 17,9 \% \quad (3.14)$$

### 3.3.12. Método das curvas de referência - Curva de Faury

O método descrito neste subcapítulo possibilita a determinação, de forma expedita, da composição granulométrica do betão a produzir. Este é caracterizado pela maximização da compacidade e resistência do betão tendo em conta os seus constituintes.

Dos vários métodos descritos por Coutinho e Gonçalves (1973), nomeadamente de Bolomey, Faury, e Josiel, optou-se pelo de Faury uma vez que define a melhor proporção entre os componentes sólidos da mistura. Desta forma, obtém-se a curva granulométrica real que mais se ajusta à curva de referência de Faury, como referido por Evangelista (2007).

A curva de Faury traduz-se num diagrama constituído por dois segmentos retos que se unem num ponto. Nesse diagrama, as abcissas e as ordenadas descrevem as mesmas incógnitas das curvas granulométricas, isto é, a abertura da malha dos peneiros e a percentagem acumulada de material que por eles passa. Quanto às escalas representadas nesse diagrama, as ordenadas têm uma escala linear, ao invés das abcissas que estão compreendidas entre 0,0065 mm (dimensão da menor partícula de cimento) e a máxima dimensão dos agregados, segundo uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas, tal como representado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Representação da curva granulométrica de referência de Faury

As percentagens obtidas pelo método da curva de referência de Faury correspondem ao volume ocupado pelas partículas sólidas do betão e não ao volume total de betão.

Para a determinação da curva de referência, é então necessário definir três pontos. Estes pontos são dados pelas seguintes condições:

Ponto 1:

- Abcissa - 0,0065 mm
- Ordenada - 0,0%

Ponto 2:

- Abcissa -  $\frac{D_{m\acute{a}x}}{2}$
- Ordenada -  $A + 17\sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{D_{m\acute{a}x}^{-0,75}}$

Ponto 3:

- Abcissa -  $D_{m\acute{a}x}$
- Ordenada 100%

onde  $D_{\max}$  é a máxima dimensão do agregado, R o raio médio do molde, e A e B parâmetros que dependem da natureza dos agregados, do meio de colocação utilizado e da consistência do betão.

Para a obtenção dos valores a de A e B a utilizar, recorreu-se à Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Parâmetros A e B, adaptado de Coutinho e Gonçalves (1973)

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado	Agregado grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	$\leq 18$	$\leq 19$	$\leq 20$	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluída	Sem nada	32	34	38	2

Assim, obtiveram-se os seguintes pontos, representados na Figura 3.3:

Ponto 1:

- Abcissa - 0,0065 mm
- Ordenada - 0,0 %

Ponto 2:

- Abcissa -  $\frac{22,4}{2} = 11,2$
- Ordenada -  $30 + 17^5 \sqrt{22,4} + \frac{2}{\frac{25}{22,4} - 0,75} = 69,1 \%$

Ponto 3:

- Abcissa - 22,4
- Ordenada - 100 %

Determinados os pontos que definem a curva de referência de Faury, as percentagens de cada fração de agregado a utilizar na composição dos betões de referência foram obtidas pela

combinação da curva de referência com as curvas granulométricas de cada agregado, como se apresenta na Figura 3.4.

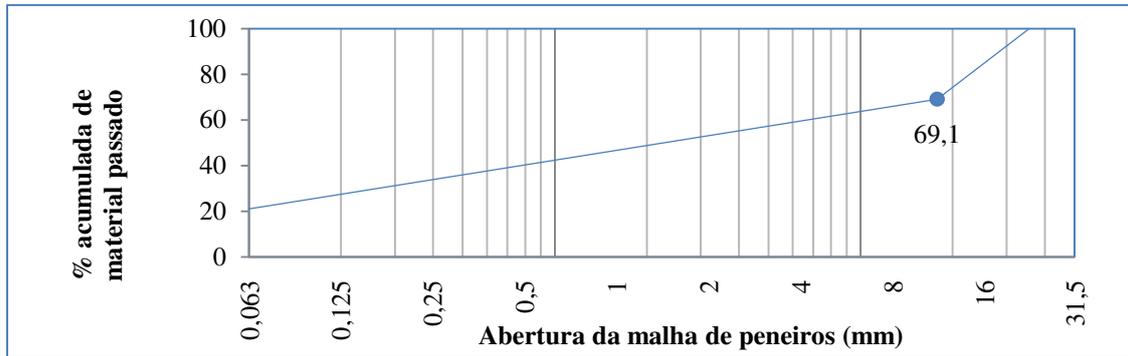


Figura 3.3 - Curva de referência de Faury

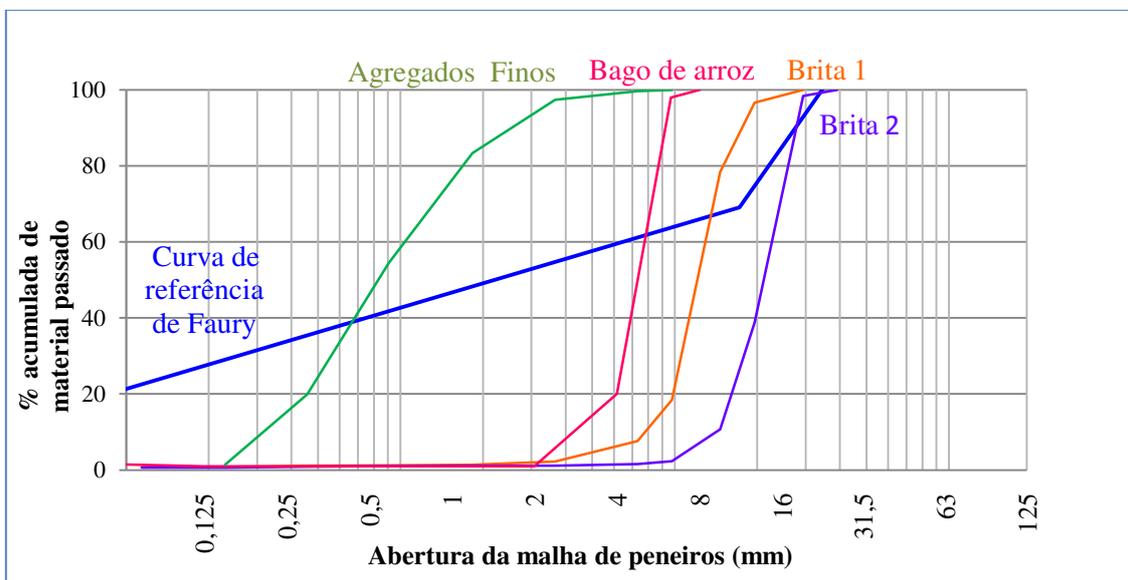


Figura 3.4 - Curva de referência de Faury e curvas granulométricas dos agregados

Esta quantificação é feita considerando que as curvas granulométricas adjacentes são divididas por áreas graficamente iguais definidas por uma linha vertical. Posteriormente, onde essa linha vertical cruzar a curva de referência de Faury estabelece na percentagem acumulada de material passado um limite para a granulometria de agregados em questão. Repetindo isto para as várias combinações de linhas verticais, obtém-se as percentagens relativas de cada tipo de agregado. No presente caso de estudo, esta metodologia resultou nas percentagens da Tabela 3.10.

Considerando estes valores, foi possível estabelecer os módulos de finura de cada tipo de agregado, discriminando-os também por tipo de betão - Tabela 3.11.

Tabela 3.10 - Percentagens iniciais de cada tipo de agregado na composição dos betões de referência

		BRB	BRC	BRG	BRM
%	Brita 2	32,8	32,8	32,8	32,8
	Brita 1	5,7	5,7	5,7	5,7
	Bago de arroz	5,5	10,3	3,8	4,0
	Agregados finos e cimento	56,0	51,3	57,7	57,2

Tabela 3.11 - Módulos de finura de cada tipo de agregado dos betões de referência

		BRB	BRC	BRG	BRM
%	Brita 2	6,8	6,8	6,8	6,8
	Brita 1	6,1	6,1	6,1	6,1
	Bago de arroz	1,8	1,8	1,8	1,8
	Agregados finos e cimento	3,4	2,4	3,7	2,7

### 3.3.13. Determinação do módulo de finura para a curva de referência de Faury

O módulo de finura de Faury para a respetiva curva de referência é calculado através da utilização da Tabela 3.12 de acordo com os parâmetros  $D_{m\acute{a}x}$  e  $\phi$ .  $D_{m\acute{a}x}$  representa a dimensão máxima do agregado e  $\phi$  calcula-se de acordo com a expressão 3.15:

$$\phi = A + \frac{B}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (3.15)$$

onde os parâmetros A, B, R e  $D_{m\acute{a}x}$  têm o mesmo significado apresentado em 3.3.12.

$$\phi = 32 + \frac{2}{\frac{25}{22,4} - 0,75} = 37,5 \quad (3.16)$$

Calculando  $\phi$  e conhecendo o valor de  $D_{m\acute{a}x}$  obteve-se então o valor do módulo de finura da curva de referência de Faury através de uma interpolação linear com base na Tabela 3.12.

O valor do módulo de finura é dado por:

$$MF = 4,19 + \frac{3 \times (4,46 - 4,19)}{5,3} = 4,33 \quad (3.17)$$

Tabela 3.12 - Valores do módulo de finura em função dos parâmetros  $D_{máx}$  e  $\phi$ , adaptado de Nepomuceno (1999)

Máxima dimensão do agregado ( $D_{máx}$ ) (mm)	$\phi$										
	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46
203,2	6,11	6,06	6,01	5,96	5,91	5,85	5,80	5,75	5,70	5,65	5,60
152,4	5,90	5,85	5,80	5,75	5,70	5,65	5,60	5,55	5,50	5,45	5,40
101,6	5,64	5,60	5,55	5,50	5,45	5,40	5,36	5,31	5,26	5,21	5,16
76,2	5,40	5,36	5,31	5,26	5,22	5,17	5,12	5,07	5,03	4,98	4,93
50,8	5,12	5,08	5,03	4,99	4,94	4,89	4,85	4,80	4,76	4,71	4,69
38,1	4,87	4,82	4,78	4,74	4,69	4,65	4,60	4,56	4,51	4,47	4,42
25,4	4,57	4,53	4,48	4,44	4,40	4,36	4,32	4,28	4,24	4,19	4,15
19,1	4,29	4,25	4,21	4,17	4,12	4,08	4,04	4,00	3,96	3,92	3,88
12,7	3,96	3,92	3,88	3,84	3,80	3,76	3,72	3,68	3,64	3,60	3,56
9,52	3,64	3,60	3,56	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38	3,34	3,30	3,26
6,35	3,33	3,29	3,26	3,22	3,19	3,15	3,12	3,08	3,05	3,01	2,98
4,76	3,04	3,01	2,98	2,94	2,91	2,88	2,84	2,81	2,78	2,74	2,71

### 3.3.14. Composição dos betões de referência

Os betões de referência foram calculados com base nas curvas granulométricas dos agregados presentes na sua composição, isto é, agregados finos de basalto, areia de rio e granito, e agregados grossos de calcário.

Para a composição dos betões de referência, foi necessário acertar o módulo de finura do conjunto de partículas sólidas. Esse acerto é apresentado nas Tabelas 3.13 a 3.16, salientando-se o facto de se obterem módulos de finura com variações inferiores a 1% face ao módulo de finura da curva de referência de Faury.

Tabela 3.13 - Acerto do módulo de finura da areia de rio

Acerto do módulo de finura da areia de rio					
Tipo de agregado	Inicial			Acerto	
	$Mf_i$	$I_i\%$	$Mf_i \times I_i/100$	$I'_i\%$	$Mf_i \times I'_i/100$
<b>Brita 1</b>	6,1	5,67	0,35	12	0,73
<b>Brita 2</b>	6,8	32,80	2,23	35	2,38
<b>Bago de arroz</b>	1,8	10,27	0,18	10	0,18
<b>Areia de rio e cimento</b>	2,4	51,25	1,23	43	1,03
		$\Sigma =$	3,992	$\Sigma =$	4,324 $\approx$ 4,330

Tabela 3.14 - Acerto do módulo de finura do basalto

Acerto do módulo de finura do basalto					
Tipo de agregado	Inicial			Acerto	
	Mf <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100
Brita 1	6,1	5,67	0,35	7	0,43
Brita 2	6,8	32,81	2,23	27	1,84
Bago de arroz	1,8	5,49	0,10	11	0,20
Basalto e cimento	3,4	56,04	1,91	55	1,87
		Σ =	4,580	Σ =	4,331≈4,330

Tabela 3.15 - Acerto do módulo de finura do granito

Acerto do módulo de finura do granito					
Tipo de agregado	Inicial			Acerto	
	Mf <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100
Brita 1	6,1	5,67	0,35	4	0,24
Brita 2	6,8	32,81	2,23	28	1,90
Bago de arroz	1,8	3,79	0,07	18	0,32
Granito e cimento	3,7	57,74	2,14	50	1,85
		Σ =	4,781	Σ =	4,323≈4,330

Tabela 3.16 - Acerto do módulo de finura do mármore

Acerto do módulo de finura do mármore					
Tipo de agregado	Inicial			Acerto	
	Mf <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> /100
Brita 1	6,1	5,67	0,35	9	0,55
Brita 2	6,8	32,81	2,23	33	2,24
Bago de arroz	1,8	4,02	0,07	4	0,07
Granito e cimento	2,7	57,18	1,54	54	1,46
		Σ =	4,193	Σ =	4,323≈4,330

A Tabela 3.17 apresenta as percentagens corrigidas de cada tipo de agregado.

Tabela 3.17 - Percentagens corrigidas de cada tipo de agregado dos betões de referência

		BRB	BRC	BRG	BRM
%	Brita 2	27	35	28	33
	Brita 1	7	12	4	9
	Bago de arroz	11	10	18	4
	Agregados finos e cimento	55	43	50	54

Estes valores, tendo em conta a interceção da curva de referência de Faury com a abertura da malha dos peneiros considerados neste estudo, em conjunto com os parâmetros previamente determinados permitiram formular a composição dos betões de referência.

Na Tabela 3.18 encontra-se as composições dos três betões de referência produzidos assim como a composição do betão com a totalidade de agregados finos de mármore. Tendo em conta que se pretende fazer uma substituição ponderada em percentagem de volume de agregados finos, considerou-se este tipo de agregado nas frações granulométricas que o compõem. No Anexo A, encontram-se as composições dos todos os betões produzidos.

Tabela 3.18 - Percentagem de cada tipo de agregado na massa total de betão

		BRB (kg/m <sup>3</sup> )	BRC (kg/m <sup>3</sup> )	BRG (kg/m <sup>3</sup> )	BRM (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Agregados finos</b>	<b>&lt; 0,063</b>	90,72	57,64	72,29	69,01
	<b>0,063 - 0,125</b>	113,78	72,29	90,67	106,18
	<b>0,125 - 0,25</b>	158,37	100,62	126,20	147,70
	<b>0,25 - 0,5</b>	78,42	49,82	62,49	73,50
	<b>0,5 - 1</b>	107,63	68,38	85,77	100,29
	<b>1 - 2</b>	127,62	81,08	101,69	17,96
	<b>2 - 4</b>	118,39	75,22	94,34	109,68
	<b>≥ 4</b>	76,88	48,84	61,26	71,81
	<b>Bago de arroz</b>	235,21	213,83	384,89	85,53
	<b>Brita 1</b>	149,68	256,59	85,53	192,44
	<b>Brita 2</b>	577,33	748,39	598,71	705,63
	<b>Cimento</b>	440,68	440,68	440,68	440,68
	<b>Água</b>	242,43	216,57	233,56	237,97

### 3.4. Produção dos betões

A metodologia seguida no processo de produção dos betões foi baseada na investigação de Ferreira (2007) uma vez que nesta é dada especial importância à homogeneização da mistura. Assim, é garantida uma boa aderência entre os agregados e o ligante, essencial para um bom desempenho do betão.

Uma vez realizado o pré-doseamento dos componentes da mistura, a sequência de betonagem iniciou-se com a junção dos agregados grossos, o cimento e dois terços da água na betoneira em funcionamento. Após 90 segundos, foram adicionados os finos, seguindo-se de um intervalo de 3 minutos de forma a obter uma mistura homogénea, concluindo-se o processo com a adição da

água restante. Uma vez realizada a betonagem, a mistura resultante foi colocada nos moldes descritos na Tabela 3.19, previamente lubrificadas com óleo descofrante.

Coutinho e Gonçalves (1973) indicam que a vibração com vibradores de agulha deve ser realizada durante um intervalo de tempo entre 5 e 30 s, de acordo com a trabalhabilidade. No presente estudo, foi efetuada uma vibração de 20 s. É também referido que a introdução e a retirada da agulha devem ser feitas na direção vertical e a velocidade constante. Não obstante, recomenda-se que a velocidade para retirar a agulha não exceda 8 cm/s para que a cavidade deixada por esta se feche naturalmente. Finalmente, alerta-se também para manter o vibrador o mais afastado da superfície do molde para evitar a formação de bolhas e a acumulação de calda de cimento ao longo deste, bem como para não vibrar tempo demais provocando assim segregação.

Após o processo de vibração, colocou-se uma superfície de plástico sobre os moldes de forma a minimizar a evaporação inicial, permanecendo o betão nestas condições por um período de 24 horas.

Findas as 24 horas, desmoldaram-se e colocaram-se os provetes nas respetivas câmaras de cura, tendo em conta os respetivos ensaios.

A Tabela 3.19 apresenta o volume total de betão utilizado, bem como as formas e dimensões dos moldes e o número de provetes nestes produzidos.

**Tabela 3.19 - Provetes e quantidade de betão produzido**

Ensaio	Provete			
	Forma	Dimensão (mm)	Número	Volume (l)
Absorção de água por capilaridade	Prismático	100x100x250	4	10
Absorção de água por imersão	Cúbico	100x100x100	4	4
Resistência à carbonatação	Cilíndrico	Ø100x50	12	4,8
Resistência à penetração de cloretos	Cilíndrico	Ø100x50	6	2,4
Retração	Prismático	150x150x600	2	27
<b>Total</b>				48,2
<b>Total para 10 betões</b>				482

Apesar de não ser contemplado, nesta investigação, a realização dos ensaios de compressão aos betões produzidos, há que referir que os resultados obtidos noutra estudo serão tidos em conta, uma vez que os aspetos de durabilidade se relacionam com as características mecânicas do betão para o mesmo tipo de cimento.

## 3.5. Ensaaios aos agregados

### 3.5.1. Introdução

Os agregados representam o constituinte de maior volume do betão. Como tal, as suas características geométricas e físicas condicionam consideravelmente o desempenho do betão em termos de durabilidade e resistência.

Uma vez que nesta investigação se pretende analisar as diferenças que se obtêm pela substituição de agregados finos de basalto, areia de rio e granito por agregados finos de mármore, é essencial o conhecimento das características referidas. Tendo em conta as dimensões, todos os agregados serão sujeitos a ensaios de absorção de água e massa volúmica, e feita a respetiva análise granulométrica. Quanto a ensaios individuais, para os agregados finos será necessário analisar a baridade e volume de vazios, ao invés dos grossos onde se analisará o desgaste de Los Angeles e o índice de forma ou volumétrico.

### 3.5.2. Absorção de água e massa volúmica

#### 3.5.2.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

A absorção de água e a massa volúmica dos agregados são dois aspetos que condicionam uma correta composição do betão.

Uma vez que a generalidade dos agregados apresenta poros na sua estrutura, o ensaio de absorção de água é necessário para ver em que medida este fenómeno afeta a produção de betões. Por outras palavras, tendo em conta que a água determinada pelo método descrito em 3.3.8. é a quantidade estritamente necessária para se desenvolver a presa do betão, todas as perdas devidas a outros fenómenos devem ser equacionadas. Logo, pelo facto de haver porosidade nos agregados, torna-se necessário quantificar as perdas de água associadas à absorção. Por vezes, alterações na quantidade de água modificam significativamente a relação água / cimento efetiva dos betões produzidos, condicionando a sua consistência e trabalhabilidade. No entanto, constata-se que nesta investigação as perdas de água por absorção não são significativas devido à natureza dos agregados, como se analisará mais à frente com os procedimentos experimentais.

O conhecimento da massa volúmica dos agregados é essencial no processo de fabrico do betão visto que o cálculo dos seus componentes é expresso em volume, mas as suas dosagens, do ponto de vista do fabrico, são mais práticas em massa. Como tal, o conhecimento da massa volúmica permite a realização dessa conversão.

A determinação da absorção de água e massa volúmica dos agregados baseou-se na norma NP EN 1097-6 (2003) “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e absorção de água”. Tendo em conta esta regulamentação, utilizou-se sempre o método do picnómetro, fazendo uma distinção entre agregados maiores e menores do que 4 mm.

### 3.5.2.2. Equipamento utilizado

O procedimento experimental necessitou do equipamento da Figura 3.5:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- estufa ventilada ( $110 \pm 5$  °C);
- peneirador mecânico;
- picnómetro de 500-5000 ml (dependendo do provete);
- peneiros de ensaio (0,063, 4 e 31,5 mm);
- termómetro.



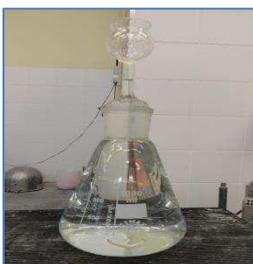
Balança de precisão



Estufa ventilada



Peneirador mecânico



Picnómetro



Peneiros de ensaio



Termómetro

Figura 3.5 - Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água e massa volúmica

### 3.5.2.3. Determinação das amostras

#### **Agregados finos - partículas de dimensão entre 0,064 e 4 mm**

Para as partículas destas dimensões, a norma recomenda a utilização de uma massa de provete superior a 1 kg no método do picnómetro. Seguindo a regulamentação, de forma a garantir a utilização de partículas no intervalo mencionado, removeram-se as partículas indesejadas através da lavagem do provete com os peneiros das dimensões pretendidas.

#### **Agregados grossos - partículas de dimensão entre 4 e 31,8 mm**

Neste caso, a norma define um valor mínimo para a massa dos provetes tendo em conta a máxima dimensão do agregado, como mostra a Tabela 3.20. Para valores intermédios daqueles descritos, o valor da massa dos provetes é dado por uma interpolação linear dos valores tabelados.

**Tabela 3.20 - Determinação da massa mínima dos provetes**

<b>Máxima dimensão do agregado - <math>D_{\text{máx}}</math> (mm)</b>	<b>Massa mínima do provete (kg)</b>
8	1
16	2
31,8	5

Também para os agregados grossos se garantiu o intervalo de granulometrias recorrendo à lavagem dos provetes através dos peneiros, desta vez de 4 e 31,5 mm.

### 3.5.2.4. Procedimentos de ensaio

Para determinar a massa volúmica e a absorção de água, realizaram-se os procedimentos descritos de seguida.

#### **Agregados finos - partículas de dimensão entre 0,064 e 4 mm**

1. Colocou-se o provete de ensaio no picnómetro, adicionando água a  $22 \pm 3$  °C até à total imersão do provete;
2. Agitou-se cuidadosamente o picnómetro para eliminar o ar da mistura, seguindo-se a imersão do picnómetro em água a  $22 \pm 3$  °C durante  $24 \pm 0,5$  horas;

3. Terminado esse período e agitando novamente o picnómetro para retirar o ar aprisionado na mistura, adicionou-se água no picnómetro até transbordar;
4. Colocou-se a tampa do picnómetro e, uma vez sem ar no seu interior, pesou-se o conjunto sem água na sua superfície -  $M_2$ ;
5. Decantou-se a maior parte da água do picnómetro e espalhou-se o provete num tabuleiro;
6. Encheu-se novamente o picnómetro com água e pesou-se em conjunto com a tampa -  $M_3$ ;
7. Registou-se a temperatura da água para garantir que não ocorreram variações significativas, isto é, excedendo  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ;
8. Secou-se lentamente o provete com uma corrente de ar quente de forma a eliminar a água superficial e a aderência entre partículas (Figura 3.6);
9. Mexeu-se continuamente o provete até atingir a temperatura ambiente;
10. Pesou-se o provete saturado com superfície seca -  $M_1$ ;
11. Finalmente, secou-se totalmente o provete na estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  até massa constante e registou-se esse valor -  $M_4$ .



Figura 3.6 - Secagem do provete com uma corrente de ar quente

#### **Agregados grossos - partículas de dimensão entre 4 e 31,8 mm**

1. Colocou-se o provete de ensaio no picnómetro, adicionando água a  $22 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  até à total imersão do provete;
2. Agitou-se cuidadosamente o picnómetro para eliminar o ar da mistura, seguindo-se a imersão do picnómetro em água a  $22 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  durante  $24 \pm 0,5$  horas;

3. Terminado esse período e agitando novamente o picnómetro para retirar o ar aprisionado na mistura, adicionou-se água no picnómetro até transbordar;
4. Colocou-se a tampa do picnómetro e, uma vez sem ar no seu interior, pesou-se o conjunto sem água na sua superfície -  $M_2$ ;
5. Registou-se a temperatura da água para garantir que não ocorreram variações significativas;
6. Retirou-se o provete saturado do picnómetro para um tabuleiro, pesando de seguida o conjunto picnómetro e tampa, cheio de água -  $M_3$ ;
7. Fez-se novamente uma leitura da temperatura da água para controlar possíveis alterações;
8. Espalhou-se o provete numa camada monogranular e secou-se repetidamente a sua superfície com um pano seco até este apresentar um aspeto húmido mas tal que as películas superficiais de água tivessem desaparecido à face dos agregados;
9. Pesou-se o provete saturado com superfície seca -  $M_1$ ;
10. Finalmente, secou-se totalmente o provete na estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C até massa constante e registou-se esse valor -  $M_4$ .

### 3.5.2.5. Cálculo de resultados experimentais

A absorção de água foi obtida pela seguinte expressão:

$$W_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \quad (3.18)$$

Quanto às massas volúmicas, estas foram obtidas através das expressões que a seguir se apresentam:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)] \rho_w} \quad (3.19)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)] \rho_w} \quad (3.20)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_4 - (M_2 - M_3)] \rho_w} \quad (3.21)$$

em que,

$W_{24}$  - absorção de água após imersão de 24 horas (%);

$M_1$  - massa do agregado saturado com superfície seca (kg);

$M_2$  - massa do picnómetro com o provete saturado em água (kg);

$M_3$  - massa do picnómetro com tampa cheio de água (kg);

$M_4$  - massa do provete seco em estufa (kg);

$\rho_a$  - massa volúmica do material impermeável dos agregados ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{rd}$  - massa volúmica dos agregados secos em estufa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{ssd}$  - massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_w$  - massa volúmica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

### 3.5.3. Análise granulométrica

#### 3.5.3.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

A análise granulométrica tem por finalidade a representação da curva granulométrica de um conjunto de agregados. Assim, permite analisar as suas diferentes granulometrias, resultando em conclusões importantes em termos de proporções e compacidade do conjunto.

Para além da presença na composição dos vários betões, a análise granulométrica tornou-se essencial para o cálculo das quantidades de matéria-prima a obter, uma vez a substituição de agregados a realizar nos betões ser relativa a cada fração granulométrica.

Relativamente à regulamentação existente, foram utilizadas a norma NP EN 933-1 (2000) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração” e a norma NP EN 933-2 (1999) “Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas”. Como o nome indica, a primeira define o procedimento experimental da análise granulométrica e a segunda a regulamentação dos peneiros de ensaio a utilizar.

### 3.5.3.2. Equipamento utilizado

Para se realizar este ensaio, foram necessários os seguintes aparelhos:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- estufa ventilada ( $110 \pm 5$  °C);
- peneirador mecânico;
- peneiros de ensaio.

### 3.5.3.3. Determinação das amostras

Para se determinar a massa das amostras a ensaiar, foi necessário recorrer à máxima dimensão do agregado, como especificado na NP EN 933-1. Esta dimensão corresponde à menor abertura do peneiro que retém no máximo 10% da massa dos agregados. Assim, é definido na norma os valores apresentados na Tabela 3.21.

**Tabela 3.21 - Determinação da massa mínima dos provetes de ensaio**

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

Para valores intermédios dos apresentados na Tabela 3.21, a massa mínima do provete é determinada através de uma interpolação linear aos valores tabelados.

De forma a garantir massa constante, os agregados foram previamente secos em estufa a uma temperatura de  $110 \pm 5$  °C por um período de 24 horas, altura em que se verificou que pesagens sucessivas intervaladas de 1 hora não registavam variações de massa superior a 0,1 % da massa dos provetes. Assim se concluiu que estes tinham massa constante e estavam prontos para o ensaio.

### 3.5.3.4. Procedimentos de ensaio

O procedimento de ensaio caracterizou-se pelas seguintes etapas:

1. Após secagem em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C até massa constante, registou-se a massa da amostra -  $M_1$ ;
2. Com o auxílio do peneiro de 0,063 mm, lavou-se a massa da amostra com água, até que esta ao atravessar o peneiro tivesse um aspeto límpido;
3. Secou-se a nova massa nas mesmas condições anteriores e registou-se novamente o seu valor -  $M_2$ ;
4. Colocou-se o provete na coluna de peneiros, de acordo com a NP EN 933-2, de abertura de malha em ordem decrescente de cima para baixo;
5. Peneirou-se a amostra com um agitador mecânico até que a massa retida em cada peneiro não se alterasse mais do que 1% no intervalo de 1 minuto;
6. Pesou-se o material retido em cada peneiro -  $R_i$ ;
7. Registou-se também a massa do material retido no fundo, o refugo -  $R_0$ .

### 3.5.3.5. Cálculo de resultados experimentais

Para a definição da curva granulométrica, recorreu-se à expressão 3.17 para identificar a percentagem de material retido em cada peneiro:

$$\%R_i = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad (3.17)$$

onde,

$\%R_i$  - percentagem de material retido no peneiro  $i$  (g);

$R_i$  - massa de material retido no peneiro  $i$  (g);

$M_1$  - massa total da amostra seca (g).

A somar a estes valores, foi também considerada a quantidade de finos presente na amostra que é dada pela expressão:

$$\%f = \frac{(M_1 - M_2) + R_0}{M_1} \times 100 \quad (3.18)$$

onde,

$\%f$  - percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (g);

$M_1$  - massa total da amostra seca (g);

$M_2$  - massa da amostra após lavagem e secagem (g);

$R_o$  - massa da amostra após lavagem e secagem inferior a 0,063 mm (g).

De forma a validar a correta execução do procedimento experimental, a norma define que a soma das massas  $R_i$ ,  $R_o$ , e  $M_2$  não tenha uma diferença superior a 1% relativamente à massa inicial da amostra,  $M_1$ . Caso contrário, é invalidado o ensaio e este necessita de ser repetido.

Com os valores das percentagens obtidos neste processo, determinaram-se os módulos de finura, que consistem na soma das percentagens totais de material retido nos peneiros da série principal dividida por 100.

### 3.5.4. Baridade e volume de vazios

#### 3.5.4.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

A baridade é a propriedade dos agregados que define a sua massa por unidade de volume aparente. Os principais fatores que determinam o seu valor são de ordem física, nomeadamente o grau de compactação dos agregados, bem como a sua curva granulométrica e geometria.

Esta propriedade está diretamente relacionada com as características do betão a produzir, sendo que, para baridades superiores, tanto a resistência como a durabilidade do betão se vêm aumentadas. Isto resulta principalmente da maior ou menor quantidade de vazios que o betão tem em conformidade com a baridade. Como tal, o estudo desta propriedade dos agregados é muito importante para a composição do betão.

Uma vez que a análise da baridade se relaciona com o volume de vazios existente nos agregados, através dos procedimentos descritos na NP EN 1097-3 (2003) “Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios”, é possível caracterizar estas duas grandezas.

### 3.5.4.2. Equipamento utilizado

O equipamento necessário para o ensaio descrito na NP EN 1097-3 (2003) foi o seguinte:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- baldes de aço inoxidável de 5 e 10 litros dependendo da máxima dimensão dos agregados (Figura 3.7);
- estufa ventilada ( $110 \pm 5$  °C);
- varão de compactação.



Figura 3.7 - Balde de aço inoxidável de 5 litros

### 3.5.4.3. Determinação das amostras

Para se determinar a massa de agregados a utilizar no ensaio, recorreu-se aos valores indicados na Tabela 3.22, definidos pela norma NP EN 1097-3 (2003).

Tabela 3.22 - Capacidade mínima de recipientes para diferentes dimensões máximas de agregados

Máxima dimensão do agregado - $D_{máx}$ (mm)	Capacidade mínima do recipiente (l)
4	1
16	5
31,5	10
63	20

De forma a realizar o ensaio, foram preparados três provetes com massas correspondentes à dimensão do recipiente determinado, previamente secos em estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C até massa constante.

#### 3.5.4.4. Procedimentos de ensaio

As etapas do ensaio foram as seguintes:

1. Pesou-se a massa do recipiente vazio e seco -  $M_1$ ;
2. Encheu-se o recipiente com o agregado até transbordar com uma pá, sem compactação;
3. Nivelou-se a superfície do provete de forma a restringir o agregado à geometria do recipiente;
4. Pesou-se o recipiente cheio com agregado -  $M_2$ ;
5. Repetiu-se o processo para os restantes provetes.

#### 3.5.4.5. Cálculo de resultados experimentais

Para se obter a baridade, utilizou-se a seguinte expressão:

$$\rho_i = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \times 100 \quad (3.19)$$

em que,

$\rho_i$  - massa volúmica aparente do provete  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_1$  - massa do recipiente de ensaio (kg);

$M_2$  - massa do recipiente de ensaio cheio com agregado (kg);

$V$  - volume do recipiente de ensaio ( $\text{m}^3$ ).

De forma a calcular a massa volúmica aparente de cada agregado, recorreu-se à média dos valores obtidos para cada um dos provetes, representada por  $\rho_i$ .

Por outro lado, a percentagem de vazios traduz-se pela seguinte expressão:

$$\Omega = \frac{(\rho_{rd} - \rho_t)}{\rho_{rd}} \times 100 \quad (3.20)$$

onde,

$\Omega$  - percentagem de vazios (%);

$\rho_{rd}$  - massa volúmica dos agregados secos em estufa, segundo a NP EN 1097-6 (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_t$  - média da massa volúmica aparente dos três provetes do agregado (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.5.5. Desgaste de Los Angeles

#### 3.5.5.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

O ensaio de desgaste de Los Angeles pretende avaliar a capacidade resistente dos agregados grossos à abrasão e fragmentação dos agregados devido a forças de impacto. Consequentemente, é uma medida de avaliação da resistência física e mecânica dos mesmos.

Outra das vantagens deste ensaio é a possibilidade de obtenção de uma correlação entre os ensaios experimentais e as tensões de rotura de compressão e flexão dos betões produzidos. Salienta-se assim que este ensaio permite prever o comportamento mecânico do betão devido aos agregados grossos constituintes.

Quanto à regulamentação em vigor que define este ensaio, recorreu-se à especificação do LNEC E-237 (1970) “Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”.

#### 3.5.5.2. Equipamento utilizado

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi o seguinte:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- esferas de aço (carga abrasiva) (Figura 3.8);
- estufa ventilada ( $110 \pm 5$  °C);
- peneirador mecânico;

- peneiros de ensaio;
- máquina de Los Angeles (Figura 3.8).



Máquina de Los Angeles



Esferas de aço

**Figura 3.8 - Máquina de Los Angeles e carga abrasiva**

### 3.5.5.3. Determinação das amostras

Na preparação dos agregados, efetuou-se uma lavagem seguida de secagem do material em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C até à obtenção de uma massa constante.

Uma vez seco, peneirou-se o material, separando-o pelas frações granulométricas definidas na especificação LNEC E-237, registando-se posteriormente a massa do provete -  $M_1$ .

### 3.5.5.4. Procedimentos de ensaio

O procedimento experimental baseou-se nos seguintes passos:

1. Preparou-se a carga abrasiva em função das dimensões do provete de ensaio;
2. Introduziu-se o provete e a carga abrasiva na máquina de Los Angeles;
3. Selou-se a máquina através da respetiva tampa para não se perder material;
4. Ligou-se a máquina de desgaste a uma velocidade entre 30 e 33 rpm;
5. Após o número de rotações estabelecido, retirou-se e peneirou-se o provete numa malha de 1,68 mm;
6. Lavou-se a massa de provete que passou no peneiro, seguido de uma secagem em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C e uma posterior pesagem -  $M_2$ .

### 3.5.5.5. Cálculo dos resultados experimentais

A metodologia seguida para a determinação da perda de material por desgaste na máquina de Los Angeles teve por base a seguinte expressão:

$$D = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.21)$$

tal que,

D - percentagem de material resultante do desgaste (%);

M<sub>1</sub> - massa do provete inicial de ensaio (g);

M<sub>2</sub> - massa do provete final retido no peneiro de 1,68 mm (g).

### 3.5.6. Índice de forma

#### 3.5.6.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

O índice de forma ou volumétrico tem por objetivo a análise da geometria dos agregados que compõem o betão. Assim, relaciona o comprimento das maiores e menores dimensões das partículas, classificando-as de cúbicas ou não cúbicas para relações maiores ou menores do que três vezes respetivamente.

Este índice torna-se útil para compreender o comportamento do betão, quer em termos de trabalhabilidade quer de compacidade, e para consequente caracterização do ângulo de atrito interno. Estas características são variáveis uma vez que a forma das partículas determina consideravelmente a disposição e interligação das mesmas na mistura final.

Em termos de regulamentação existente, foi seguida a metodologia descrita na norma NP EN 933-4 (2002) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma” para o procedimento experimental.

### 3.5.6.2. Equipamento utilizado

Para a realização do ensaio laboratorial, foi necessário o seguinte equipamento:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- estufa ventilada ( $110 \pm 5$  °C);
- paquímetro (Figura 3.9);
- peneirador mecânico;
- peneiros de ensaio.



Figura 3.9 - Paquímetro

### 3.5.6.3. Determinação das amostras

A massa das amostras a utilizar no ensaio de índice de forma foi determinada em função da máxima dimensão do agregado, sendo que, para valores intermédios daqueles expressos na Tabela 3.23, se recorreu a uma interpolação linear.

Tabela 3.23 - Determinação da massa mínima do provete para o ensaio de índice de forma

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

Os provetes foram previamente secos em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C até se obter massa constante, sendo então peneirada e registada a massa das partículas cuja granulometria estivesse compreendida entre os diâmetros de 63 e 4 mm -  $M_1$ .

#### 3.5.6.4. Procedimentos de ensaio

Tendo os provetes previamente definidos, seguiram-se os seguintes passos para a obtenção do índice de forma:

1. Peneiraram-se os provetes de ensaio nas diferentes granulometrias;
2. Registaram-se as massas de cada fração granulométrica e a sua percentagem relativamente à massa total -  $M_{fi}$  e  $\%f_i$ ;
3. Excluíram-se todas as frações com percentagem relativa inferior a 10 %;
4. Mediram-se as máximas e mínimas dimensões das partículas e juntaram-se as não cúbicas por granulometria;
5. Pesou-se cada conjunto de partículas não cúbicas por fração granulométrica -  $M_{ni}$ .

#### 3.5.6.5. Cálculo dos resultados experimentais

Obtidos os valores descritos nos procedimentos de ensaio, o índice de forma foi calculado recorrendo à seguinte expressão:

$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^y M_{ni}}{\sum_{i=1}^x M_{fi}} \quad (3.22)$$

em que,

$I_f$  - índice de forma (%);

$\sum M_{fi}$  - somatório da massa das x partículas de cada uma das frações granulométricas de ensaio (g);

$\sum M_{ni}$  - somatório da massa das y partículas não cúbicas de cada uma das frações granulométricas de ensaio (g).

## 3.6. Ensaaios ao betão em estado fresco

### 3.6.1. Introdução

De forma a controlar a qualidade de produção e estimar um futuro desempenho, foram realizados os seguintes ensaios ao betão no seu estado fresco: abaixamento do cone de Abrams e massa volúmica. Através destes ensaios, foi possível analisar a consistência das amassaduras, de forma a calibrar a composição dos betões de referência.

### 3.6.2. Abaixamento do cone de Abrams

#### 3.6.2.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

O abaixamento do cone de Abrams é um ensaio que permite avaliar, de forma expedita, a trabalhabilidade do betão produzido. Este parâmetro é medido pelo abaixamento de um volume troncocónico de betão com dimensões padrão relativamente à sua altura inicial. Esse abaixamento neste ensaio foi definido a priori em  $125 \pm 15$  mm, sendo que, para resultados experimentais incoerentes com este valor, seria corrigida a relação água / cimento até à consistência desejada.

O procedimento laboratorial para a execução deste ensaio guiou-se pela norma NP 12350-2 (2002) “Ensaaios de betão fresco: Ensaio de abaixamento”.

#### 3.6.2.2. Equipamento utilizado

Para a realização deste ensaio, foi necessário utilizar o seguinte equipamento:

- base rasa metálica;
- colher de pedreiro;
- cronómetro;
- funil de enchimento do molde;

- molde troncocónico de dimensões padrão segundo a NP EN 12350-2 (2002);
- pano molhado;
- varão de compactação segundo a NP EN 12350-2 (2002).

### 3.6.2.3. Determinação das amostras

A massa de amostra utilizada para este ensaio foi definida tendo em conta as dimensões do molde a preencher com betão, sendo que a totalidade da massa produzida na betoneira foi posteriormente misturada manualmente para garantir a homogeneidade na composição de todo o betão produzido.

### 3.6.2.4. Procedimentos de ensaio

A sequência de passos neste procedimento experimental foi a seguinte:

1. Humedeceu-se a placa rasa metálica, o molde troncocónico e o funil de enchimento do molde;
2. Fixou-se o molde na placa metálica com o peso do operador nas abas laterais do molde e colocou-se o funil de enchimento na abertura superior do molde;
3. Colocou-se uma camada de betão através do funil para o interior do molde, com altura a perfazer um terço do molde, seguida de 25 pancadas de compactação com o varão;
4. Repetiu-se o processo descrito no ponto 3 em mais duas camadas até alcançar a superfície do molde;
5. Retirou-se o funil e alisou-se a superfície do provete à face do molde com o auxílio de uma colher de pedreiro;
6. Eliminou-se o excesso de betão no molde com um pano molhado, retirando-se posteriormente o molde troncocónico num movimento constante compreendido entre 5 e 10 segundos;
7. Finalmente, verificou-se a validade do ensaio pelo aspeto do abaixamento e registou-se esse valor - h.

### 3.6.2.5. Cálculo dos resultados experimentais

Para o cálculo do abaixamento do cone de Abrams, utilizou-se a seguinte expressão:

$$h = H - h_{m\acute{a}x} \quad (3.23)$$

em que,

$h$  - abaixamento do cone de Abrams (mm);

$H$  - altura do molde troncocónico (mm);

$h_{m\acute{a}x}$  - altura do ponto mais alto do provete deformado num ensaio válido (mm).

Do ponto de vista experimental, o ensaio considera-se válido nas condições representadas na Figura 3.10. A situação de colapso do betão ocorre para relações de água-cimento muito elevadas ou no caso de adições de plastificantes na mistura, num abaixamento irregular considera-se o ponto médio de abaixamento como o valor de abaixamento e um abaixamento verdadeiro caracteriza-se pelo abaixamento uniforme de todo o provete.

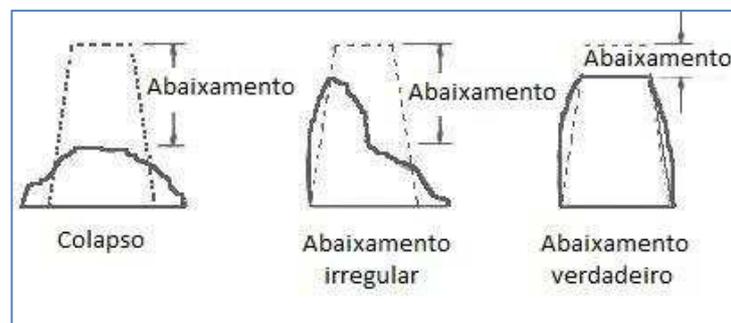


Figura 3.10 - Tipos de abaixamento válidos

## 3.6.3. Massa volúmica

### 3.6.3.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

Outra forma de analisar a trabalhabilidade e desempenho futuro de um betão no estado endurecido é através do ensaio de massa volúmica após a sua produção. Como tal, através da

massa volúmica, é possível estimar a porosidade das misturas produzidas, não obstante a comparação entre compacidades dos diferentes betões de referência.

Em termos laboratoriais, o procedimento de ensaio seguiu a norma NP EN 12350-6 (2002) “Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica”.

### 3.6.3.2. Equipamento utilizado

Foram necessários os seguintes elementos para a realização da atividade experimental:

- agulha vibratória;
- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- balde cilíndrico metálico de 10 litros;
- colher de pedreiro;
- pano molhado;
- varão de compactação.

### 3.6.3.3. Determinação das amostras

Neste ensaio, a massa de amostra necessária para a determinação da massa volúmica foi estabelecida pelo volume do balde cilíndrico definido pela regulamentação aplicável, citado no subcapítulo 3.6.3.2. De forma a garantir que essa massa apresentava homogeneidade nas suas características, foi posteriormente misturada manualmente com o auxílio da colher de pedreiro.

### 3.6.3.4. Procedimentos de ensaio

A realização deste ensaio laboratorial foi estruturada da seguinte forma:

1. Registou-se a massa do balde metálico vazio -  $M_1$ ;
2. Colocou-se o betão com a colher de pedreiro no balde até este transbordar;
3. Vibrou-se o provete até uma completa compactação do betão;
4. Com o auxílio do varão de compactação, nivelou-se a superfície do provete;

5. Limpou-se a superfície do balde metálico com um pano húmido para retirar algum betão indesejado;
6. Finalmente, pesou-se o conjunto composto pelo betão e recipiente -  $M_2$ .

### 3.6.3.5. Cálculo dos resultados experimentais

A expressão utilizada no cálculo da massa volúmica do betão no estado fresco foi a seguinte:

$$M_v = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.24)$$

onde,

$M_v$  - massa volúmica do betão fresco produzido ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_1$  - massa do balde cilíndrico metálico (kg);

$M_2$  - massa do recipiente de ensaio cheio com betão fresco compactado (kg);

$V$  - volume do recipiente cilíndrico ( $\text{m}^3$ ).

## 3.7. Ensaio ao betão em estado endurecido

### 3.7.1. Introdução

O comportamento que um betão apresenta em estado endurecido pode ser caracterizado pela realização de diversos tipos de ensaio. Esse comportamento pode ser distinguido em três tipologias: comportamento mecânico, físico e durabilidade. Na presente dissertação, o betão endurecido foi analisado quanto à sua durabilidade, estimando-se assim o seu real desempenho em situações correntes de aplicação.

De forma a estudar a durabilidade, o betão produzido foi submetido ao ensaio de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, carbonatação, penetração de cloretos e finalmente ao ensaio de retração. É de referir que é sobretudo a estes fenómenos que o betão se encontra exposto em aplicações práticas.

Uma vez que muitas das características de durabilidade que um betão possui se relacionam com as suas propriedades mecânicas, foi também analisada a resistência à compressão dos betões.

### 3.7.2. Resistência à compressão

#### 3.7.2.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

Este ensaio tem como objetivo a determinação da resistência à compressão uniforme dos betões produzidos, levando-os ao estado de rotura. Assim, o resultado deste ensaio é o máximo valor de tensão aplicada nos provetes.

Relativamente à regulamentação para a análise da resistência à compressão de betões, foi utilizada a norma NP EN 12390-3 (2003) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”.

#### 3.7.2.2. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado, em conformidade com a NP EN 12390-3 (2003), foi o seguinte:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- pano de limpeza de provetes;
- prensa hidráulica de 4 colunas, de velocidade controlável (Figura 3.11).

#### 3.7.2.3. Determinação das amostras

Os provetes utilizados neste ensaio foram provetes cúbicos de 150 mm de aresta, como especificados na NP EN 12390-3 (2003). Para cada tipo de betão, foram utilizados 3 destes provetes, sendo que, para a determinação do valor de resistência à compressão, foi utilizada a média dos valores dos provetes.



Figura 3.11 - Prensa hidráulica de 4 colunas de velocidade controlável

#### 3.7.2.4. Procedimentos de ensaio

O procedimento experimental que se seguiu neste ensaio foi o seguinte:

1. Após o período de cura, os provetes foram limpos com um pano e retirou-se o excesso de humidade à superfície dos mesmos;
2. Pesou-se os provetes e registou-se as suas massas -  $M_i$ ;
3. Colocou-se os provetes na prensa hidráulica e aplicou-se uma carga à velocidade constante de 11,3 kN/s, correspondendo a 0,5 MPa/s
4. Ao atingir-se a rotura dos provetes, registou-se os valores de carga que a provocaram -  $F_i$ .

#### 3.7.2.5. Cálculo dos resultados experimentais

De forma a calcular a capacidade resistente máxima à compressão, foi utilizada a seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F_i}{A_c} \quad (3.25)$$

tal que,

$f_c$  - resistência à compressão do provete ( $\text{N/mm}^2$ );

$F_i$  - carga máxima que leva o provete  $i$  à rotura (N);

$A_c$  - área de contato do provete com a prensa hidráulica ( $\text{mm}^2$ ).

### 3.7.3. Absorção de água por capilaridade

#### 3.7.3.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

O fenómeno de absorção por capilaridade ocorre quando existem diferenças de pressão entre a superfície livre de um fluido e a sua superfície livre em vasos capilares. Uma vez existindo a diferença de pressão, o equilíbrio do sistema é restituído pela ascensão do fluido através desses poros, como referem Coutinho e Gonçalves (1973)

Neste ensaio, pretende-se avaliar como a composição do betão condiciona a ascensão capilar de água através dos seus poros. Assim, seguiu-se a especificação LNEC E-393 (1993) “Determinação da absorção de água por capilaridade” para analisar este fenómeno.

#### 3.7.3.2. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado neste ensaio foi o seguinte:

- balança de precisão de  $\pm 0,05\%$  da massa a utilizar;
- bandeja metálica;
- campânula;
- estufa ventilada a  $40 \pm 5$  °C;
- máquina de corte de betão;
- nível;
- suportes plásticos.

#### 3.7.3.3. Determinação das amostras

Os provetes utilizados neste ensaio resultaram de amostras iniciais de betão endurecido com dimensões iguais a 500 x 100 x 100 mm. Com auxílio da máquina de corte, seccionaram-se

esses prismas em dois de dimensões menores, isto é, 250 x 100 x 100 mm. Esses cortes foram realizados a meio do processo de cura, ou seja, após as amostras iniciais estarem 14 dias na câmara húmida, retornando os restantes 14 dias à cura húmida.

#### 3.7.3.4. Procedimentos de ensaio

O ensaio de absorção de água por capilaridade passou pelas seguintes etapas:

1. Registou-se a massa do provete de ensaio, seco em estufa ventilada a  $40 \pm 5$  °C durante 14 dias -  $M_0$ ;
2. Nivelou-se uma bandeja e colocou-se o provete sobre a mesma, apoiado em suportes plásticos nos cantos para permitir a exposição da face cortada à água;
3. Adicionou-se uma lâmina de água à bandeja de forma a imergir a face do provete cortado em  $5 \pm 1$  mm, tapando-se posteriormente a bandeja com uma campânula de forma a evitar evaporação;
4. Por fim, mediu-se a altura de ascensão capilar média de cada face do provete e registou-se a sua massa ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas, num processo de  $60 \pm 5$  segundos. Neste passo, foi necessário retirar o provete da bandeja e colocá-lo sobre uma base não absorvente.

#### 3.7.3.5. Cálculo dos resultados experimentais

Efetuada o procedimento experimental, a expressão que traduz a absorção de água por ascensão capital é a seguinte:

$$A_{ci} = \frac{M_i - M_0}{A_p} \quad (3.26)$$

tal que,

$A_{ci}$  - absorção de água por ascensão capital no instante  $i$  ( $\text{g}/\text{mm}^2$ );

$M_i$  - massa do provete após  $i$  horas em contacto com a lâmina de água (g);

$M_0$  - massa inicial do provete de ensaio seco em estufa (g);

$A_p$  - área da superfície do provete em contacto com a água ( $\text{mm}^2$ ).

Outro elemento também em análise foi a altura da ascensão capilar no provete passado 3, 6, 24 e 72 horas -  $h_i$ .

### 3.7.4. Absorção de água por imersão

#### 3.7.4.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

Outra forma de absorção de água pelo betão resulta da sua imersão, afetando diretamente a durabilidade do mesmo. Como tal, este ensaio permite a quantificação do volume de vazios acessíveis na massa de betão produzido.

A metodologia de execução laboratorial deste ensaio seguiu a especificação LNEC E-394 (1993) “Determinação da absorção de água por imersão”.

#### 3.7.4.2. Equipamento utilizado

No decorrer deste ensaio, foi necessária a utilização do seguinte equipamento:

- balança de precisão de  $\pm 0,05\%$  da massa a utilizar;
- balança hidrostática (Figura 3.12);
- estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C;
- recipiente com água.

#### 3.7.4.3. Determinação das amostras

A geometria dos provetes escolhidos para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido foi o cubo de arestas de 10 cm. Quanto ao processo de cura pré-ensaio, estes provetes estiveram retidos na câmara húmida por 28 dias e foram utilizados quatro exemplares por cada betão a ensaiar.

#### 3.7.4.4. Procedimentos de ensaio

A atividade experimental realizou-se de acordo com os seguintes passos:

1. Colocou-se os provetes no recipiente com água tal que estes ficassem imersos em 1/3 da sua altura, durante o período de uma hora;
2. Repetiu-se o processo, adicionando água ao recipiente até perfazer 2/3 e a totalidade da altura dos provetes, ambos em períodos de uma hora (Figura 3.12);
3. Aguardou-se até os provetes atingirem massa constante, e posteriormente registaram-se as suas massas com superfície seca -  $M_1$  - e hidrostática após saturação -  $M_2$ ;
4. Secou-se os provetes na estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C até massa constante e registaram-se as massas -  $M_3$ .



Imersão de provetes



Balança hidrostática

Figura 3.12 - Processo de imersão de provetes em água e balança hidrostática

#### 3.7.4.5. Cálculo dos resultados experimentais

Para a obtenção dos valores de absorção de água por imersão, utilizou-se a seguinte expressão:

$$A_i = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \quad (3.27)$$

representando,

$A_i$  - absorção de água por imersão (%);

$M_1$  - massa do provete saturado com superfície seca (g);

$M_2$  - massa hidrostática do provete saturado (g);

$M_3$  - massa do provete seco em estufa (g).

### 3.7.5. Resistência à carbonatação

#### 3.7.5.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

Um dos aspetos mais condicionantes na durabilidade de um betão é como este resiste ao avanço da frente de carbonatação. A importância deste controlo deve-se ao facto de o betão envolver geralmente armaduras danificáveis devido a agentes corrosivos, provocando danos estruturais indesejáveis. Assim, este ensaio visa a quantificação da reação de carbonatação no betão.

Neste ensaio, seguiu-se a especificação LNEC E-391 (1993) “Determinação da resistência à carbonatação” para a realização dos procedimentos experimentais.

#### 3.7.5.2. Equipamento utilizado

De forma a caracterizar a resistência à carbonatação do betão, utilizou-se o seguinte material:

- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a utilizar;
- borracha líquida (Figura 3.13);
- câmara de carbonatação;
- escopro (Figura 3.13);
- máquina de corte de betão;
- martelo (Figura 3.13);
- pincel (Figura 3.13);
- paquímetro;
- solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Borracha líquida e pincel, fenolftaleína, martelo, escopro e provetes ensaiados

### 3.7.5.3. Determinação das amostras

A penetração da frente de carbonatação foi medida em provetes cilíndricos de diâmetro igual a 105 mm e altura de 40 mm. Essa geometria foi obtida através do corte de provetes iniciais com o mesmo diâmetro mas altura igual a 250 mm. Em termos de cura após betonagem, os provetes foram sujeitos a cura húmida, imersos em água a  $20 \pm 2$  °C, por um período de 14 dias e cura seca, com  $60 \pm 5\%$  de humidade relativa e  $20 \pm 2$  °C de temperatura, durante outros 14 dias, nas câmaras húmida e seca respetivamente.

Após a cura húmida e seca, os provetes estiveram um período de 7, 28, 56 e 91 dias na câmara de carbonatação acelerada, permitindo definir a evolução da frente de carbonatação de cada betão produzido.

### 3.7.5.4. Procedimentos de ensaio

Do ponto de vista laboratorial, a sequência de atividades foi a seguinte:

1. Terminado o período de cura, foi aplicada uma tinta de borracha líquida a pincel de forma a definir e isolar a área de exposição dos provetes à reação de carbonatação;
2. Depois de secos, colocou-se os provetes na câmara de carbonatação sob a concentração de  $5 \pm 1\%$  de  $\text{CO}_2$ ,  $60 \pm 5\%$  de humidade relativa e  $23 \pm 3$  °C de temperatura, por períodos de 7, 28, 56 e 91 dias;

3. Findos os períodos definidos, partiu-se os provetes em quatro com a ajuda de um escopro e martelo, aplicando a solução alcoólica de fenolftaleína nas superfícies de rotura (Figura 3.14);
4. Após cinco minutos para seca, mediu-se com um paquímetro as profundidades de carbonatação, definidas pela zona incolor onde a fenolftaleína não desenvolveu reação com o betão.



Figura 3.14 - Provetes de ensaio partidos em quartos de provete e após aplicação de fenolftaleína

### 3.7.5.5. Cálculo dos resultados experimentais

De forma a quantificar a profundidade da frente de carbonatação, utilizaram-se 8 leituras por provete, num total de 3 destes por cada tipo de betão em estudo.

Assim, recorreu-se à seguinte expressão:

$$X_{nm} = \frac{\sum_{i=1}^8 X_{im}}{8} \quad (3.28)$$

tal que,

$X_{nm}$  - média de profundidades da frente de carbonatação do provete  $n$  aos  $m$  dias (mm);

$X_{im}$  - leitura  $i$  de profundidade da frente de carbonatação aos  $m$  dias (mm).

Conhecido o valor da média de profundidade de carbonatação por cada provete, aplicou-se:

$$P_m = \frac{\sum_{n=1}^3 X_{nm}}{3} \quad (3.29)$$

onde,

$P_m$  - média de profundidades da frente de carbonatação dos provetes aos  $m$  dias (mm);

$X_{nm}$  - média de profundidades da frente de carbonatação do provete n aos m dias (mm).

### 3.7.6. Resistência à penetração de cloretos

#### 3.7.6.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

A penetração de cloretos numa estrutura de betão ocorre por difusão dos iões cloretos pela rede de poros existente no seu interior. Este fenómeno é fortemente condicionado pelo teor de água no betão. Devido à penetração de cloretos, dá-se a despassivação das armaduras que, juntamente com a diferença de potencial elétrico instalada no aço, provoca uma corrosão prematura e acentuada. Assim, este ensaio pretende quantificar a resistência do betão à penetração de cloretos, parâmetro este fundamental na durabilidade dos betões.

Em termos normativos, o ensaio de cloretos seguiu a especificação LNEC E-463 (2004) “Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário”.

#### 3.7.6.2. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado neste procedimento experimental foi o seguinte:

- bomba de vácuo;
- braçadeiras de aço inoxidável ajustáveis para diâmetro de 105 mm;
- escopro;
- máquina de corte de betão;
- máquina de indução de corrente elétrica;
- mangas de borracha de diâmetro de 105 mm e 200 mm de altura;
- martelo;
- paquímetro
- solução de cloreto de sódio;
- solução de hidróxido de cálcio;
- solução de hidróxido de sódio
- solução de nitrato de prata.

### 3.7.6.3. Determinação das amostras

Os provetes de ensaio necessários ao ensaio de migração de cloretos foram obtidos com a utilização da máquina de corte de betão em cilindros iniciais de 105 mm de diâmetro e 250 mm de altura transformados em cilindros de igual diâmetro e altura de 50 mm. Este processo de corte foi efetuado após 14 dias de cura em câmara húmida, seguindo-se ainda uma cura seca em câmara seca com  $60 \pm 5\%$  de humidade relativa e temperatura de  $20 \pm 2$  °C. Foram utilizados 3 provetes para cada tipo de betão, bem como ensaiados provetes aos 28 e 91 dias após a sua produção.

### 3.7.6.4. Procedimentos de ensaio

O ensaio de penetração de cloretos seguiu o procedimento que se apresenta:

1. Após terminado o período de cura, colocou-se os provetes de ensaio numa câmara de vácuo por 3 horas à pressão aproximada de 20 mbar, valor compreendido no intervalo entre 10 e 50 mbar definido pela especificação do ensaio;
2. Após 3 horas de vácuo, foi adicionada a solução de hidróxido de cálcio na câmara de forma a que os provetes ficassem imersos por 1 hora;
3. Desligou-se a bomba de vácuo deixando permanecer os provetes imersos em hidróxido de cálcio por  $18 \pm 2$  horas sob pressão atmosférica;
4. Colocou-se os provetes no interior das mangas de borracha e ajustou-se os mesmos com o auxílio das braçadeiras;
5. Posicionou-se os provetes na máquina de indução de corrente elétrica e aplicou-se as soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio, desempenhando funções de solução catódica e anódica respetivamente;
6. Instalou-se uma corrente elétrica de 30 volts e calibrou-se a mesma através do valor resultante de amperagem, num processo iterativo;
7. Fixada a corrente elétrica de ensaio, registou-se a temperatura inicial da solução anódica -  $T_i$  - e definiu-se o tempo de ensaio -  $t$ ;
8. Decorrido o tempo de ensaio, registou-se novamente a temperatura da solução anódica -  $T_f$ ;
9. Retirou-se os provetes das mangas de borracha, partindo-os em metades e aplicando-lhes a solução de nitrato de prata;

10. Após a secagem da solução aplicada, registou-se com um paquímetro o valor de 7 leituras de profundidade de penetração de iões cloretos em cada metade de provete (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Provetes partidos ao meio com aplicação de nitrato de prata

### 3.7.6.5. Cálculo dos resultados experimentais

Com os dados resultantes do procedimento experimental, o coeficiente de migração de cloretos em regime estacionário foi obtido da seguinte forma:

$$D_{nssm} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.30)$$

em que,

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3.31)$$

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2 \times c_d}{c_0} \right)} \quad (3.32)$$

com as seguintes definições:

$D_{nssm}$  - coeficiente de migração em regime não estacionário ( $m^2/s$ );

R - constante dos gases,  $R=8,314$  ( $J/Kmol^{-1}$ );

T - média de temperaturas, em Kelvins, da solução anódica no início e fim do ensaio;

U - voltagem efetiva aplicada;

L - espessura do provete (mm);

$\text{erf}^{-1}$  - inverso da função erro;

$c_d$  - coeficiente de cloretos para a qual o nitrato de prata reage;

$c_0$  - concentração de cloretos no cátodo.

### 3.7.7. Retração

#### 3.7.7.1. Objetivos e regulamentação do ensaio

Este ensaio tem por objetivo avaliar o fenômeno de encurtamento do betão desde o final da compactação até que se atinja o equilíbrio higrotérmico com o ambiente envolvente, sem tensões aplicadas. Este parâmetro tem consequência ao nível da resistência mecânica bem como na durabilidade, pelo que o ensaio de retração é necessário para a quantificar e perceber em que altura ocorre a sua maior incidência.

Para se ensaiar à retração os provetes produzidos, recorreu-se à especificação elaborada para o efeito, com a referência LNEC E-398 (1993) “Determinação da retração e da expansão”:

#### 3.7.7.2. Equipamento utilizado

Em fase de campanha experimental, o ensaio necessitou do seguinte equipamento:

- aparelho de medição de extensões com precisão de  $10^{-6}$  m;
- betume polimérico (Figura 3.16);
- pastilhas metálicas (Figura 3.16).

#### 3.7.7.3. Determinação das amostras

Neste ensaio, as dimensões dos provetes prismáticos corresponderam a bases quadradas de 150 mm de aresta e comprimento de 600 mm. Foram utilizados dois provetes para cada tipo de betão.

A medição da retração iniciou-se  $24 \pm 1$  horas após a betonagem, em ambiente de câmara seca, com medição de referência o valor da primeira leitura registada entre pastilhas metálicas.

#### 3.7.7.4. Procedimentos de ensaio

O procedimento experimental utilizado neste ensaio pode ser descrito nas seguintes etapas:

1. Desmoldados os provetes passadas  $24 \pm 1$  horas após a produção do betão, foram introduzidas duas pastilhas metálicas numa das faces retangulares laterais do provete; estas pastilhas foram colocadas a  $1/3$  do comprimento da face relativamente às pontas e a  $2/3$  desse comprimento entre ambas (Figura 3.16);
2. De forma a imobilizar e acondicionar as pastilhas, aplicou-se o betume polimérico no seu contorno;
3. Registou-se o valor da distância inicial entre o centro das pastilhas metálicas -  $d_i$ ;
4. Deslocou-se os provetes para a câmara seca onde permaneceram a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  e 60% de humidade relativa;
5. Foi-se registando leituras consequentemente mais afastadas temporalmente até 91 dias após a primeira leitura -  $d_f$ , de forma a controlar melhor as primeiras e mais importantes reações de retração.



Figura 3.16 - Provetes de ensaio com pastilhas metálicas e betume polimérico

#### 3.7.7.5. Cálculo dos resultados experimentais

Os valores da retração pretendidos com o procedimento experimental descrito foram obtidos através da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (3.33)$$

onde os parâmetros utilizados tomam as seguintes definições:

$\varepsilon$  - valor da retração (m/m);

$d_i$  - distância inicial entre as pastilhas metálicas (m);

$d_f$  - distância medida entre as pastilhas metálicas no decorrer do ensaio (m).

## 4. Resultados do programa experimental

### 4.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais dos ensaios descritos no capítulo 3. Estes encontram-se divididos em três subcapítulos, sendo que o primeiro se refere aos ensaios realizados aos agregados e o segundo e o terceiro aos ensaios ao betão no estado fresco e endurecido, respetivamente.

Os resultados dos ensaios aos agregados serviram para se analisar as semelhanças e diferenças entre os agregados primários, o basalto, a areia de rio e o granito, e os secundários, o mármore. Adicionalmente, estes resultados permitiram fazer uma primeira especulação sobre as características físicas e de durabilidade dos betões a produzir. Foi através de alguns destes resultados que se fizeram as composições dos vários betões estudados.

Os ensaios ao betão no estado fresco permitiram analisar as diferenças originadas pela substituição dos agregados finos, possibilitando antever com maior exatidão o desempenho real dos betões produzidos.

Finalmente, apresentam-se os resultados da terceira fase de ensaios desta investigação, os ensaios ao betão no estado endurecido. Com estes, foi possível determinar concretamente as características de durabilidade dos betões com substituição parcial e total de agregados finos primários por agregados finos de mármore reciclado.

De forma a validar tecnicamente os resultados obtidos neste capítulo, efetuaram-se, sempre que possível, análises comparativas entre estes e as investigações e conclusões apresentadas no capítulo 2. Não obstante, recorreu-se também ao conhecimento existente em bibliografia na área do betão.

### 4.2. Propriedades dos agregados

Uma vez que os agregados utilizados condicionam significativamente as propriedades do betão a produzir, este subcapítulo pretende analisá-los de forma a conhecer as suas características.

Assim, submetem-se os agregados aos ensaios de absorção de água e massa volúmica, análise granulométrica, baridade e volume de vazios, desgaste de Los Angeles e índice de forma.

#### 4.2.1. Absorção de água e massa volúmica

Para cada tipo de agregado, tendo em conta a distinção entre finos (de 0,063 a 4 mm) e grossos (entre 4 e 63 mm), foi aplicada a metodologia descrita em 3.5.2, de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2003). Dos cálculos efetuados, apresentados no Anexo B, resultou a Tabela 4.1, referente à absorção de água e massa volúmica dos agregados.

**Tabela 4.1 - Absorção de água e massa volúmica dos diferentes tipos de agregados**

		$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$W_{24}$ (%)
<b>Agregados grossos</b>	Brita 2	2711	2606	2645	1,5
	Brita 1	2713	2620	2655	1,3
	Bago de arroz	2678	2489	2559	2,84
<b>Agregados finos</b>	Areia grossa de rio	2651	2600	2619	0,75
	Areia fina de rio	2535	2523	2528	0,2
	Basalto	2906	2820	2850	1,05
	Mármore	2724	2684	2699	0,14
	Granito	2504	2467	2482	0,59

Como referido na descrição do ensaio,  $\rho_a$  representa a massa volúmica impermeável,  $\rho_{rd}$  a massa volúmica das partículas secas em estufa,  $\rho_{ssd}$  a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca e  $W_{24}$  a absorção de água após imersão de 24 horas.

A Tabela 4.1 evidencia que os agregados finos de basalto são os que têm maior massa volúmica. Isto deve-se essencialmente à sua composição rica em minerais ferromagnesianos, como as piroxenas e olivina, como refere Rutley (1916). Por outro lado, é possível verificar que a areia de mármore apresenta valores de massa volúmica superiores à de areia de rio e de granito.

Relativamente à absorção de água, nota-se que existe uma ordem de grandeza diferente para os valores dos agregados grossos e finos. Isto resulta do facto de os agregados grossos utilizados absorverem mais água do que os agregados finos por terem um volume de vazios superior a estes, tal como se poderá verificar na Tabela 4.10. Analisando os finos, nota-se uma maior absorção de água evidente no basalto (1,05%), sendo que o agregado que tem menor absorção é o mármore (0,14%).

#### 4.2.2. Análise granulométrica

Este ensaio decorreu segundo a NP EN 933-1 (2000), tal como descrito no subcapítulo 3.5.3, e permitiu determinar as quantidades de agregados no betão, de forma a maximizar a sua compactidade. Apesar de esta análise ter sido realizada, não se revelou muito importante nesta investigação uma vez que se separaram os agregados finos por frações granulométricas para um posterior ajuste da sua composição à curva granulométrica de referência. Assim, apresentam-se as curvas granulométricas, o módulo de finura e a percentagem de finos de cada tipo de agregado utilizado.

Da análise dos resultados apresentados de seguida, considera-se  $M_1$  e  $M_2$  como a massa total da amostra inicial após secagem em estufa a  $110 \pm 5$  °C, até massa constante, e a mesma massa após lavagem e secagem, respetivamente. No Anexo C, encontram-se as curvas granulométricas fornecidas pelos produtores dos agregados.

##### 4.2.2.1. Brita 2

Na Tabela 4.2, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica da brita 2. A Figura 4.1 representa-a graficamente.

Tabela 4.2 - Ensaio de análise granulométrica à brita 2

Brita 2					
M <sub>1</sub> (g)	5989,2		%f	0,02	
M <sub>2</sub> (g)	5987,8		M.F.	9,85	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
22,4 - 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
16 - 22,4	1043,2	17,42	1043,2	17,42	82,58
11,2 - 16	4000,5	66,80	5043,7	84,21	15,79
8 - 16	594,7	9,93	5638,4	94,14	5,86
5,6 - 8	137,2	2,29	5775,6	96,43	3,57
4 - 5,6	59,4	0,99	5835	97,43	2,57
2 - 4	54,9	0,92	5889,9	98,34	1,66
1 - 2	26	0,43	5915,9	98,78	1,22
0,5 - 1	13,5	0,23	5929,4	99,00	1,00
0,25 - 0,5	10,4	0,17	5939,8	99,18	0,82
0,125 - 0,25	26,5	0,44	5966,3	99,62	0,38
0,063 - 0,125	21,5	0,36	5987,8	99,98	0,02
Refugo (< 0,063)	1,4	0,02	5989,2	100,00	0,00

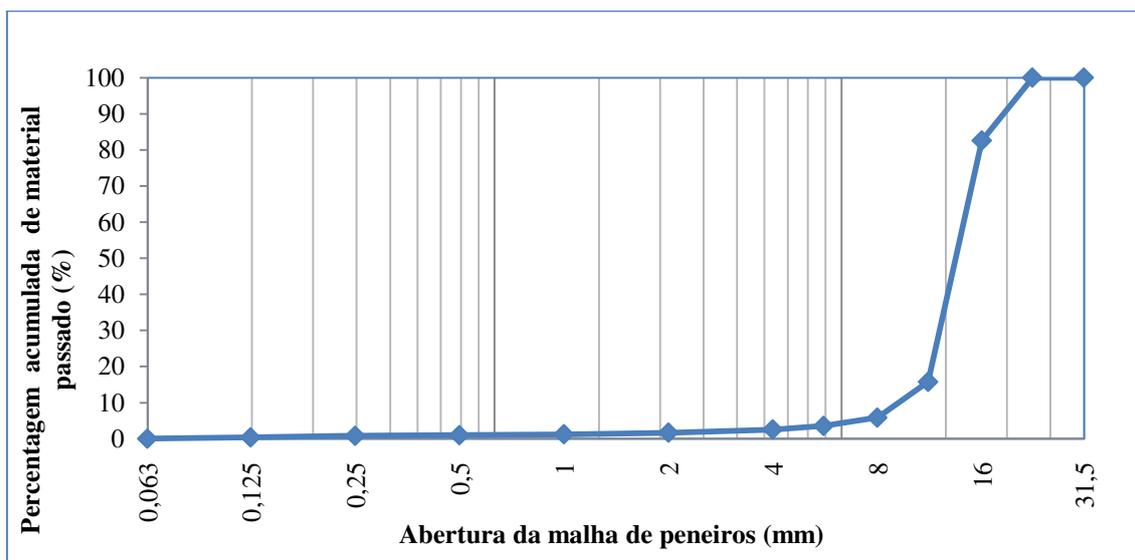


Figura 4.1 - Representação gráfica da análise granulométrica à brita 2

#### 4.2.2.2. Brita 1

Na Tabela 4.3, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica da brita 1. A Figura 4.2 representa-a graficamente.

Tabela 4.3 - Ensaio de análise granulométrica à brita 1

Brita 1					
$M_1$ (g)	3130,8		%f	0,05	
$M_2$ (g)	3129,2		M.F.	9,85	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
22,4 - 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
16 - 22,4	0	0,00	0	0,00	100,00
11,2 - 16	173,7	5,55	173,7	5,55	94,45
8 - 16	1596,8	51,03	1770,5	56,58	43,42
5,6 - 8	1077,1	34,42	2847,6	91,00	9,00
4 - 5,6	122,2	3,91	2969,8	94,91	5,09
2 - 4	145,4	4,65	3115,2	99,55	0,45
1 - 2	2,5	0,08	3117,7	99,63	0,37
0,5 - 1	1,8	0,06	3119,5	99,69	0,31
0,25 - 0,5	0,3	0,01	3119,8	99,70	0,30
0,125 - 0,25	0,4	0,01	3120,2	99,71	0,29
0,063 - 0,125	7,4	0,24	3127,6	99,95	0,05
Refugo (< 0,063)	1,6	0,05	3129,2	100,00	0,00

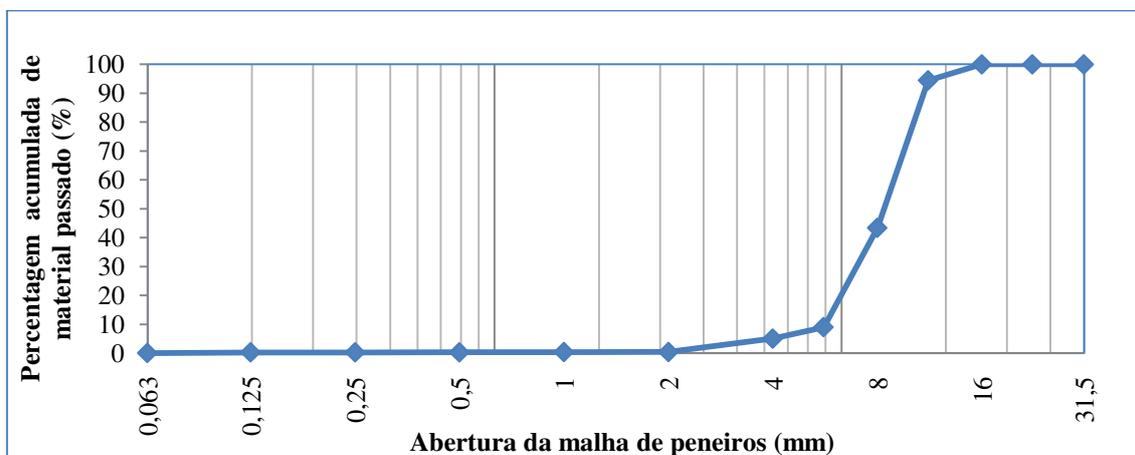


Figura 4.2 - Representação gráfica da análise granulométrica da brita 1

### 4.2.2.3. Bago de arroz

Na Tabela 4.4, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica do bago de arroz. A Figura 4.3 representa-a graficamente.

Tabela 4.4 - Ensaio de análise granulométrica ao bago de arroz

Bago de arroz					
$M_1$ (g)	994,3		%f	0,18	
$M_2$ (g)	992,5		M.F.	6,38	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
22,4 - 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
16 - 22,4	0	0,00	0	0,00	100,00
11,2 - 16	0	0,00	0	0,00	100,00
8 - 16	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	30,3	3,05	30,3	3,05	96,95
4 - 5,6	552,3	55,55	582,6	58,59	41,41
2 - 4	307,8	30,96	890,4	89,55	10,45
1 - 2	48,1	4,84	938,5	94,39	5,61
0,5 - 1	23,2	2,33	961,7	96,72	3,28
0,25 - 0,5	11,6	1,17	973,3	97,89	2,11
0,125 - 0,25	5,2	0,52	978,5	98,41	1,59
0,063 - 0,125	14	1,41	992,5	99,82	0,18
Refugo (< 0,063)	1,8	0,18	994,3	100,00	0,00

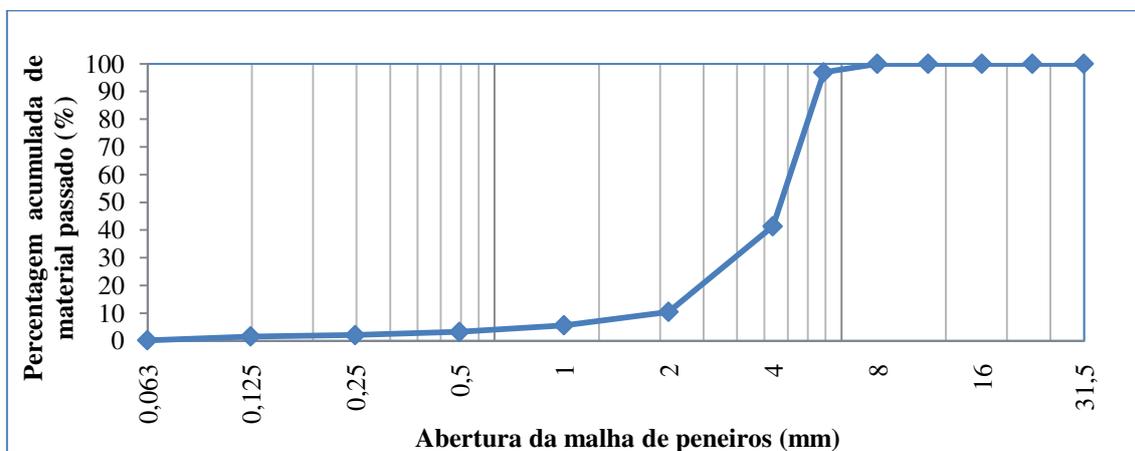


Figura 4.3 - Representação gráfica da análise granulométrica do bago de arroz

#### 4.2.2.4. Areia grossa de rio

Na Tabela 4.5, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica à areia grossa de rio. A Figura 4.4 representa-a graficamente.

Tabela 4.5 - Ensaio de análise granulométrica à areia grossa de rio

Areia grossa de rio					
$M_1$ (g)	1734,6		%f	0,05	
$M_2$ (g)	1733,7		M.F.	4,95	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
22,4 - 31,5	0	0,00	0	0,00	100,00
16 - 22,4	0	0,00	0	0,00	100,00
11,2 - 16	0	0,00	0	0,00	100,00
8 - 16	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	20	1,15	20	1,15	98,85
4 - 5,6	42,2	2,43	62,2	3,59	96,41
2 - 4	392,9	22,65	455,1	26,24	73,76
1 - 2	841,8	48,53	1296,9	74,77	25,23
0,5 - 1	328	18,91	1624,9	93,68	6,32
0,25 - 0,5	66,5	3,83	1691,4	97,51	2,49
0,125 - 0,25	6,2	0,36	1697,6	97,87	2,13
0,063 - 0,125	36,1	2,08	1733,7	99,95	0,05
Refugo (< 0,063)	0,9	0,05	1734,6	100,00	0,00

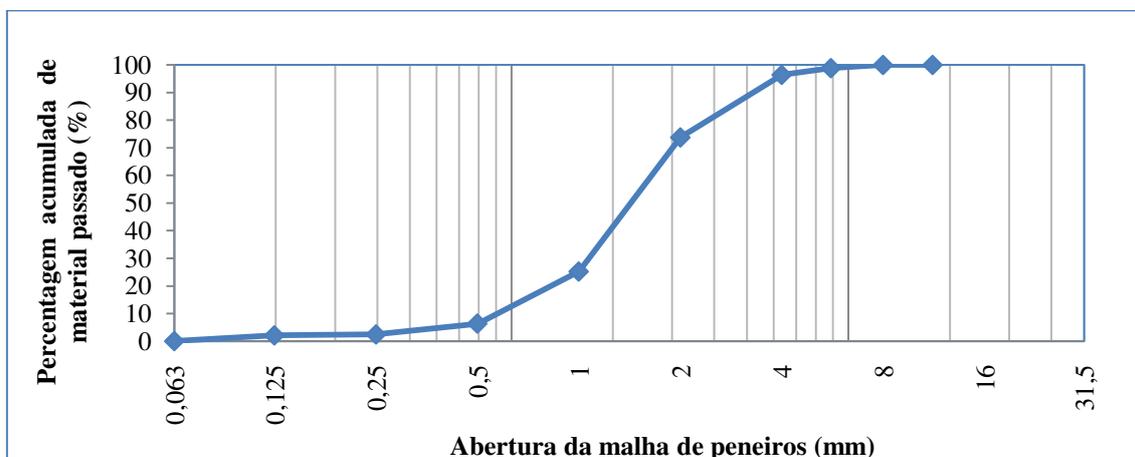


Figura 4.4 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia grossa de rio

#### 4.2.2.5. Areia fina de rio

Na Tabela 4.6, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica à areia fina de rio. A Figura 4.5 representa-a graficamente.

Tabela 4.6 - Ensaio de análise granulométrica à areia fina de rio

Areia fina de rio					
$M_1$ (g)	996,8	%f	0,02		
$M_2$ (g)	996,6	M.F.	2,9		
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
	(g)	(%)	Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 8	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	0	0,00	0	0,00	100,00
4 - 5,6	0	0,00	0	0,00	100,00
2 - 4	0,8	0,08	0,8	0,08	99,92
1 - 2	12,5	1,25	13,3	1,33	98,67
0,5 - 1	250,6	25,14	263,9	26,47	73,53
0,25 - 0,5	517,3	51,90	781,2	78,37	21,63
0,125 - 0,25	50	5,02	831,2	83,39	16,61
0,063 - 0,125	165,4	16,59	996,6	99,98	0,02
Refugo (< 0,063)	0,2	0,02	996,8	100,00	0,00

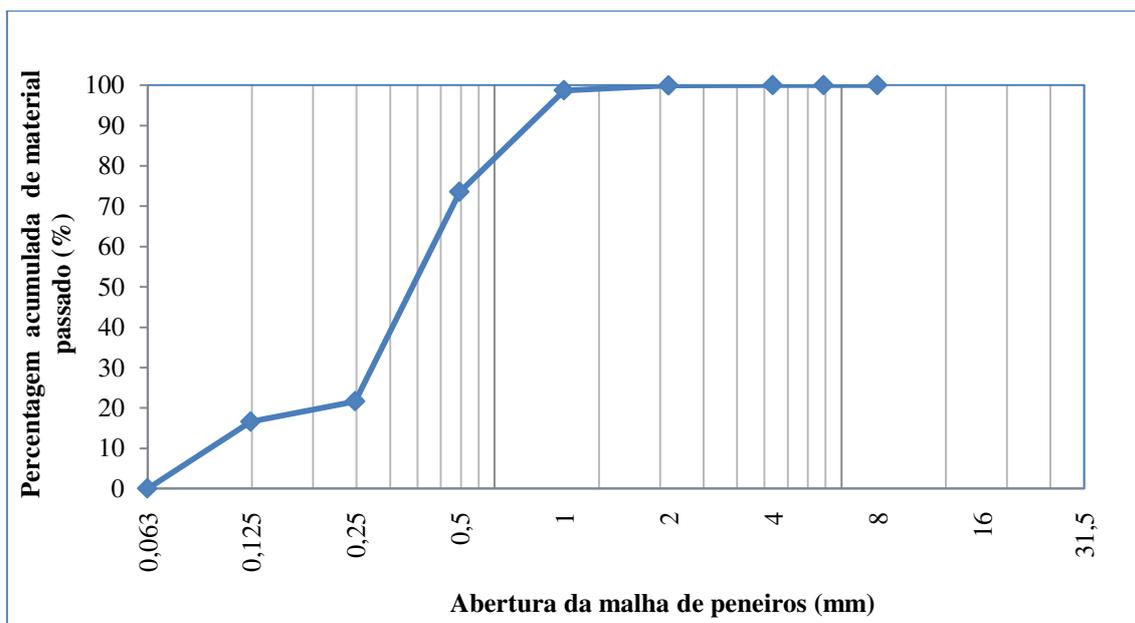


Figura 4.5 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia fina de rio

#### 4.2.2.6. Areia de basalto

Na Tabela 4.7, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica à areia de basalto. A Figura 4.6 representa-a graficamente

Tabela 4.7 - Ensaio de análise granulométrica à areia de basalto

Areia de basalto					
$M_1$ (g)	1000,5		%f	5,40	
$M_2$ (g)	1000,2		M.F.	4,24	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 8	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	0	0,00	0	0,00	100,00
4 - 5,6	1,2	0,12	1,2	0,12	99,88
2 - 4	322,6	32,25	323,8	32,37	67,63
1 - 2	261,9	26,18	585,7	58,56	41,44
0,5 - 1	120	12,00	705,7	70,56	29,44
0,25 - 0,5	85,5	8,55	791,2	79,10	20,90
0,125 - 0,25	98,3	9,83	889,5	88,93	11,07
0,063 - 0,125	56,7	5,67	946,2	94,60	5,40
Refugo (< 0,063)	54	5,40	1000,2	100,00	0,00

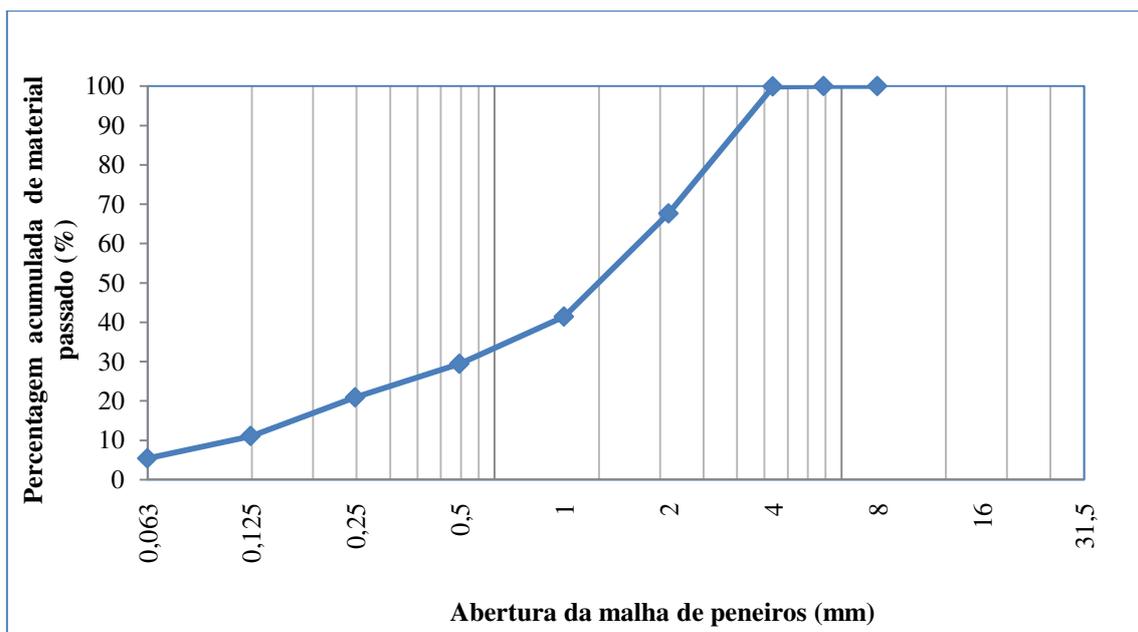


Figura 4.6 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de basalto

### 4.2.2.7. Areia de granito

Na Tabela 4.8, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica à areia de granito. A Figura 4.7 representa-a graficamente.

Tabela 4.8 - Ensaio de análise granulométrica à areia de granito

Areia de granito					
$M_1$ (g)	1011,9		%f	9,41	
$M_2$ (g)	1004,3		M.F.	3,76	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
	(g)	(%)	Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 8	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	0	0,00	0	0,00	100,00
4 - 5,6	1,2	0,12	1,2	0,12	99,88
2 - 4	220,1	21,92	221,3	22,04	77,96
1 - 2	232,9	23,19	454,2	45,23	54,77
0,5 - 1	183,5	18,27	637,7	63,50	36,50
0,25 - 0,5	86,1	8,57	723,8	72,07	27,93
0,125 - 0,25	99,8	9,94	823,6	82,01	17,99
0,063 - 0,125	86,2	8,58	909,8	90,59	9,41
Refugo (< 0,063)	94,5	9,41	1004,3	100,00	0,00

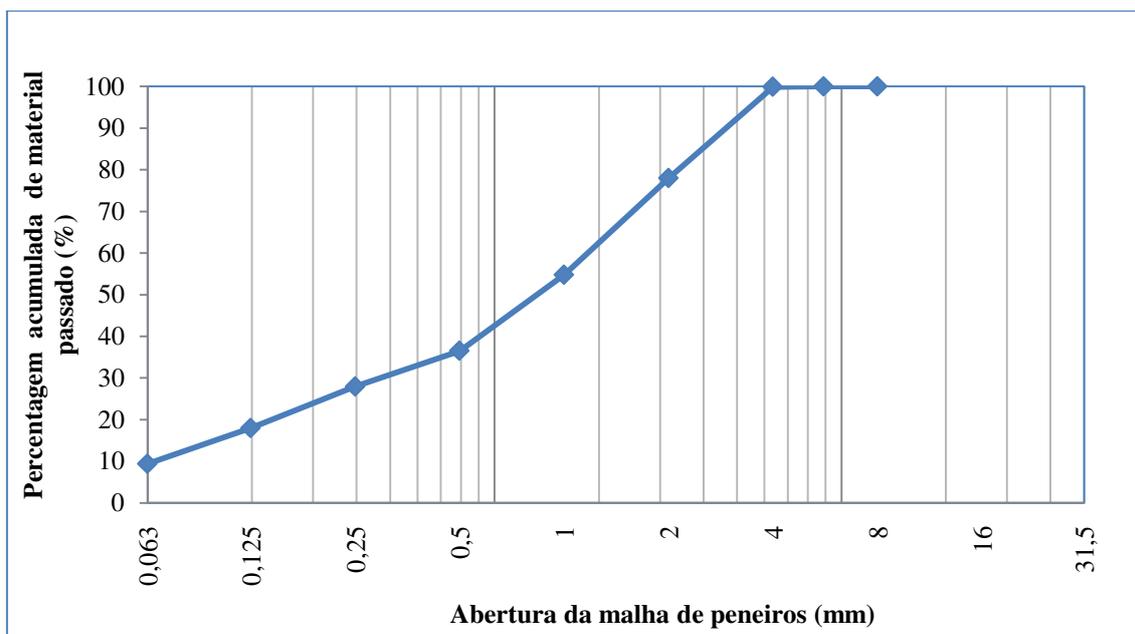


Figura 4.7 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de granito

#### 4.2.2.8. Areia de mármore

Na Tabela 4.9, encontram-se as massas  $M_1$  e  $M_2$ , o módulo de finura (M.F.), a percentagem de material fino que atravessa o peneiro de 0,063 mm (%f) e a análise granulométrica à areia de mármore. A Figura 4.8 representa-a graficamente.

Tabela 4.9 - Ensaio de análise granulométrica à areia de mármore

Areia de mármore					
$M_1$ (g)	1001		%f	9,41	
$M_2$ (g)	994,2		M.F.	3,76	
Fração granulométrica (mm)	Massa retida		Massa acumulada		
			Retida		Passante
	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
> 8	0	0,00	0	0,00	100,00
5,6 - 8	0	0,00	0	0,00	100,00
4 - 5,6	95,3	9,59	95,3	9,59	90,41
2 - 4	181,2	18,23	276,5	27,81	72,19
1 - 2	135,9	13,67	412,4	41,48	58,52
0,5 - 1	103,2	10,38	515,6	51,86	48,14
0,25 - 0,5	68,3	6,87	583,9	58,73	41,27
0,125 - 0,25	118,4	11,91	702,3	70,64	29,36
0,063 - 0,125	109,3	10,99	811,6	81,63	18,37
Refugo (< 0,063)	182,6	18,37	994,2	100,00	0,00

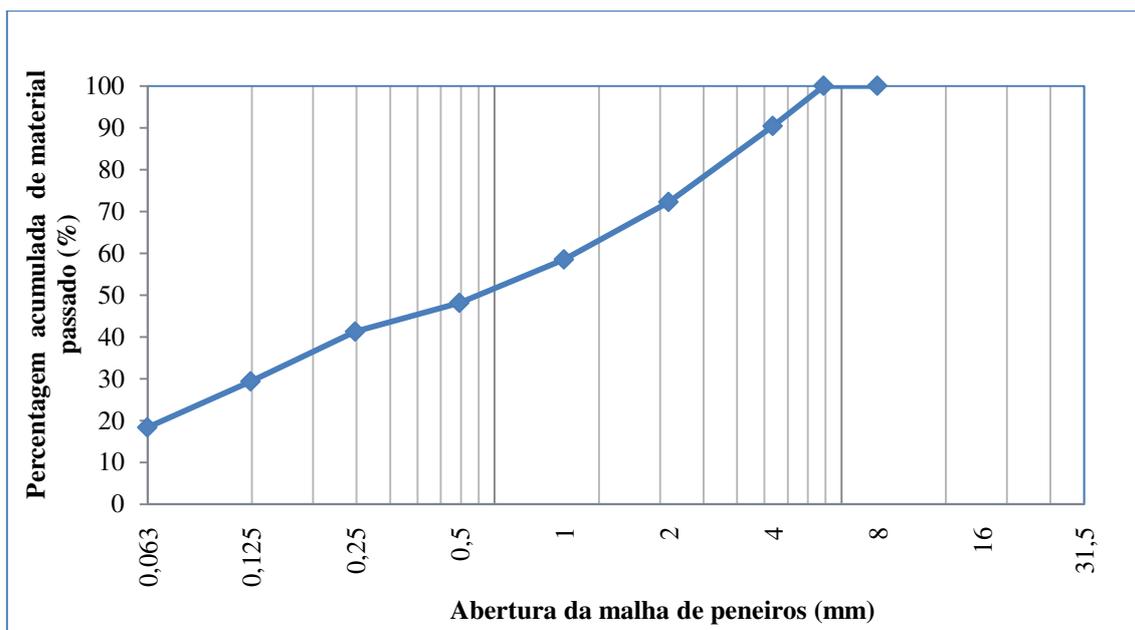


Figura 4.8 - Representação gráfica da análise granulométrica da areia de mármore

### 4.2.3. Baridade e volume de vazios

A baridade e o volume de vazios foram determinados em conformidade com a norma NP EN 1097-3 (2003), tal como descrito no subcapítulo 3.5.4. Para o cálculo destes parâmetros, foram necessários os dados do Anexo D, sendo que a Tabela 4.10 apresenta o resultado destes ensaios.

**Tabela 4.10 - Baridade e volume de vazios dos diferentes tipos de agregados**

		<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de vazios (%)</b>
<b>Agregados grossos</b>	Brita 2	1363	47,7
	Brita 1	1356	48,3
	Bago de arroz	1354	45,6
<b>Agregados finos</b>	Areia grossa	1542	40,7
	Areia fina	1526	39,5
	Basalto	1838	34,8
	Mármore	1784	33,5
	Granito	1560	36,8

Dos valores obtidos, pode concluir-se que a tendência existente nas massas volúmicas dos agregados se mantém para as suas baridades. Assim, os agregados finos de basalto possuem o valor mais elevado de baridade, seguindo-se do mármore, granito e areia de rio. Por outro lado, os agregados grossos apresentam menores valores de baridades, face aos finos, sendo que esta diminui ligeiramente com a redução da granulometria das partículas.

Quanto ao volume de vazios, a Tabela 4.10 indica que os agregados finos de mármore são os menos porosos, característica esta importante em termos de durabilidade nos betões.

### 4.2.4. Desgaste de Los Angeles

De acordo com a especificação LNEC E-237 (1970), descrita no subcapítulo 3.5.5, este ensaio só se aplica a agregados de granulometria compreendida entre 2,38 e 76,1 mm. Assim, tendo em conta a análise granulométrica apresentada em 4.2.2, o ensaio de desgaste de Los Angeles foi aplicado apenas aos agregados grossos: brita 2, brita 1 e bago de arroz. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.11 e, no Anexo E, os dados necessários à sua determinação.

Tabela 4.11 - Desgaste de Los Angeles para os agregados grossos

	Desgaste de Los Angeles (%)
<b>Brita 2</b>	26,52
<b>Brita 1</b>	25,45
<b>Bago de arroz</b>	22,45

Através da análise dos resultados deste ensaio, conclui-se que, tal como na baridade, o desgaste nos agregados diminui ligeiramente com a diminuição da sua granulometria. Consta-se também que o valor de desgaste registado para cada agregado é inferior aos 50% definidos na especificação LNEC E-237 (1970), valor máximo admissível em agregados de betões estruturais.

Observando a Tabela 4.12, conclui-se que o resultado médio obtido do desgaste de Los Angeles está de acordo com o levantamento bibliográfico efetuado, se bem que ligeiramente inferior.

Tabela 4.12 - Levantamento bibliográfico a ensaios de desgaste de Los Angeles

	Desgaste de Los Angeles (%)
<b>Gameiro (2012)</b>	24,8
<b>André (2012)</b>	32,3
<b>Pereira et al. (2007)</b>	37,0
<b>Bravo (2009)</b>	27,4

#### 4.2.5. Índice de forma

O ensaio de índice de forma, de acordo com a norma NP EN 933-4 (2002) descrita em 3.5.6, é aplicável apenas às frações granulométricas compreendidas entre 4 e 63 mm. Como tal, os agregados ensaiados foram a brita 2, brita 1 e bago de arroz.

No anexo F, encontram-se os dados necessários para a determinação dos valores do índice de forma ( $I_f$ ) dos diferentes agregados, apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Índice de forma dos agregados grossos

	$I_f$ (%)
<b>Brita 2</b>	15,3
<b>Brita 1</b>	16,8
<b>Bago de arroz</b>	18,4

A regulamentação portuguesa não estabelece valores de referência para o índice de forma. Porém, na legislação húngara, em “Technical guideline for recycled aggregate concrete in Hungary”, é apontado o valor de 20% como o máximo recomendado do índice de forma para agregados reciclados a incorporar em betões de classe igual ou superior a C20/25. Para classes entre C8/10 e C16/20, o mesmo guia define em 40% o valor máximo desse índice. Estes limites são estabelecidos tendo em conta a trabalhabilidade exigida nos betões, sendo que o valor médio obtido para os agregados grossos neste trabalho foi de 16,8%. Sob as mesmas condições de trabalho, André (2012) avaliou o valor médio do índice de forma para os agregados grossos de calcário em 16,2%. Estes resultados permitem antever betões com uma trabalhabilidade adequada.

### 4.3. Propriedades do betão no estado fresco

Este subcapítulo tem como objetivo a apresentação e análise dos resultados dos ensaios ao betão no estado fresco. Assim, contempla o ensaio de abaixamento do cone de Abrams e a massa volúmica em estado fresco das diversas misturas produzidas. Os seus resultados encontram-se detalhados no Anexo G.

#### 4.3.1. Abaixamento do cone de Abrams

A trabalhabilidade do betão no estado fresco foi determinada através do ensaio de abaixamento do cone de Abrams, segundo a norma NP EN 12350-2 (2002), tal como descrito em 3.6.2. Inicialmente, definiu-se a classe S3 como a classe de consistência pretendida. Segundo a regulamentação, esta classe de consistência define o abaixamento do cone de Abrams entre 100 e 150 mm. Contudo, para um maior rigor de resultados, optou-se por considerar o abaixamento do cone de Abrams no intervalo de  $125 \pm 15$  mm.

Tal como sugerido no subcapítulo 2.4.2, a bibliografia existente aponta para fatores de grandeza física e geométrica dos agregados, entre outros, como responsáveis pelas variações na trabalhabilidade de um betão. Uma vez que não seria viável o ajuste da trabalhabilidade através do controlo destas propriedades para se obter a consistência desejada, optou-se por fazer as correções necessárias através de pequenas alterações na relação água / cimento. Para esse efeito foram realizadas betonagens experimentais dos betões de referência, incluídas na 2ª fase experimental,

tal como descrito em 3.2.2. Os resultados obtidos nas betonagens experimentais e betonagens efetivas encontram-se nas Tabelas 4.14 e 4.15, respetivamente, de acordo com o Anexo G.

Tabela 4.14 - Abaixamento do cone de Abrams nas betonagens experimentais

Betonagens experimentais		
Betão	Relação a/c	h (mm)
BRB	0,55	121
BRM	0,54	129
BRC	0,49	131
BRG	0,53	125

Tabela 4.15 - Abaixamento do cone de Abrams nas betonagens efetivas

Betonagens efetivas		
Betão	Relação a/c	h (mm)
BRB	0,55	113
BB/M20	0,55	143
BB/M50	0,56	143
BRM	0,54	135
BRC	0,49	133
BC/M20	0,5	127
BC/M50	0,5	132
BRG	0,53	127
BG/M20	0,55	116
BG/M50	0,56	130

A Tabela 4.15 demonstra que os valores dos abaixamentos obtidos nos vários betões produzidos nem sempre se encontraram no intervalo definido. No entanto, devido à imprecisão experimental do ensaio provocar pequenas alterações nos resultados dos abaixamentos em betonagens nas mesmas condições, consideraram-se válidos os valores obtidos. A Figura 4.9 representa graficamente os resultados da Tabela 4.15.

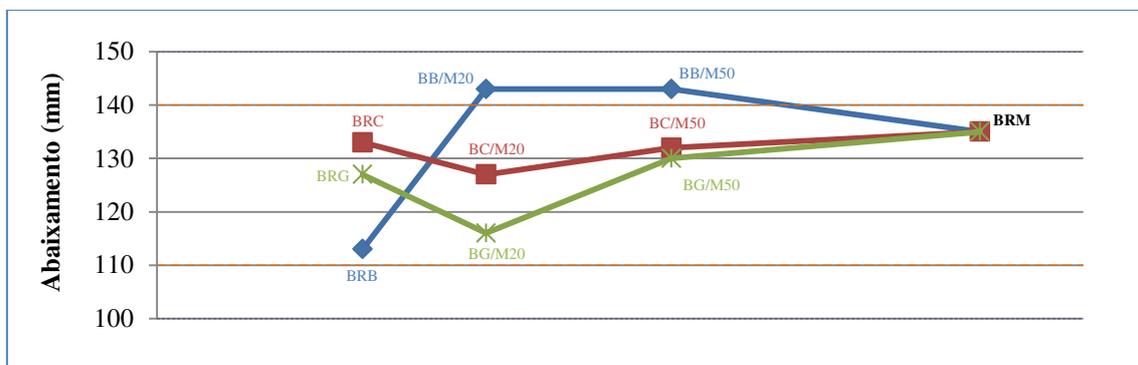


Figura 4.9 - Valores do abaixamento do cone de Abrams para os betões produzidos

Pela análise da Figura 4.9, observa-se que as famílias de betões com agregados finos de areia de rio, granito e mármore respeitam o intervalo de abaixamento de  $125 \pm 15$  mm, mas o mesmo não acontece para o conjunto de betões com basalto.

A Figura 4.10 pretende representar a variação da relação água / cimento nos três betões de referência com a gradual incorporação de agregados finos de mármore.

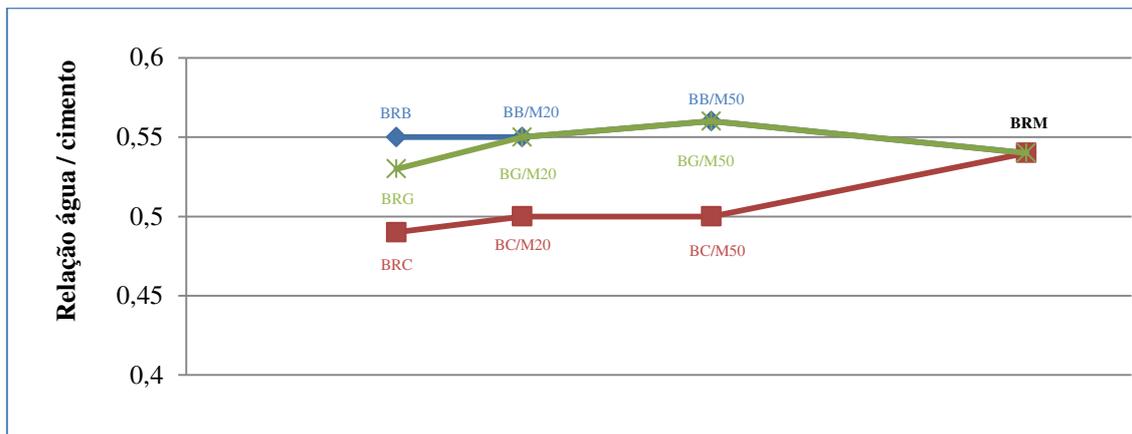


Figura 4.10 - Valores de relação água / cimento para os betões produzidos

Tendo em conta os trabalhos referidos no subcapítulo 2.4.5, relativamente à absorção de água e à sua relação com a trabalhabilidade, seria de esperar que, pela incorporação de mármore, fosse necessária uma menor relação água / cimento, devido à sua menor absorção. No entanto, tal não se verifica nos betões produzidos, especialmente na família de betão com agregados finos de areia de rio. Quanto à família de betões de basalto e granito, a Figura 4.10 demonstra que a relação água / cimento se manteve praticamente constante. Esta situação pode ser justificada pelas propriedades físicas e geométricas dos agregados finos de mármore. As partículas de mármore utilizadas para substituir os agregados originais revelaram-se alongadas e angulosas, contrariamente às de areia de rio, que eram simultaneamente arredondadas e lisas. Com isto, a interação da matriz rochosa com a pasta de cimento para betões de granito e basalto manteve-se semelhante, ao invés do betão com agregados finos de areia de rio. Neste, a trabalhabilidade foi sendo comprometida com a incorporação de mármore, necessitando assim de um aumento na relação água / cimento.

Em termos gerais, constata-se na Figura 4.10 que a incorporação de agregados finos de mármore provocou um ligeiro aumento na relação água / cimento.

Em conformidade com Binici et al. (2007) e Hebhouh et al. (2011), concluiu-se que o aumento da taxa de substituição de agregados tem influência na trabalhabilidade da mistura, sendo que, para trabalhabilidades semelhantes, são necessárias relações água / cimento superiores.

### 4.3.2. Massa volúmica no estado fresco

Considerando a metodologia descrita no subcapítulo 3.6.3, a massa volúmica no estado fresco foi obtida de acordo com a norma NP EN 12350-6 (2002). Na Tabela 4.16, encontram-se os resultados das massas volúmicas nas betonagens experimentais e efetivas, como apresentado no anexo G.

Tabela 4.16 - Massa volúmica no estado fresco dos betões produzidos

	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	
	Betonagem experimental	Betonagem efetiva
<b>BRB</b>	2420,2	2412,5
<b>BB/M20</b>	-	2389,5
<b>BB/M50</b>	-	2385,2
<b>BRM</b>	2378,6	2387,6
<b>BRC</b>	2349,4	2356,4
<b>BC/M20</b>	-	2381,7
<b>BC/M50</b>	-	2384,2
<b>BRG</b>	2367,6	2361,6
<b>BG/M20</b>	-	2360,4
<b>BG/M50</b>	-	2381,1

Pela análise da Tabela 4.16, observa-se que a massa volúmica no estado fresco dos betões experimentais e efetivos se manteve praticamente inalterada, registando-se uma variação máxima de 0,4% no BRM. Assim, garantiu-se que o betão efetivo produzido para a realização dos ensaios no estado endurecido, descritos no subcapítulo 3.7, decorreu conforme idealizado.

Pela observação da Figura 4.11, consegue-se verificar a baixa influência que a substituição dos agregados finos primários por mármore tem na massa volúmica no estado fresco do betão. Este fenómeno é justificado pela semelhança dos elementos utilizados, tratando-se todos de materiais pétreos com ligeiras diferenças na massa volúmica. Pelos resultados da Tabela 4.16, é de referir que a maior variação de massa volúmica em estado fresco de uma família de betão de referência até à substituição completa, ocorre na areia de rio, na ordem de 1,3%.

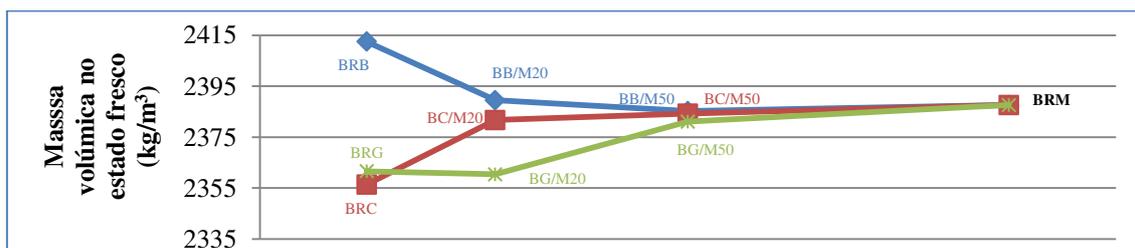


Figura 4.11 - Representação gráfica da massa volúmica no estado fresco dos betões produzidos

Tendo em conta a Tabela 4.1, constata-se que a massa volúmica do betão no estado fresco segue a tendência imposta pela massa volúmica dos agregados, isto é, uma vez que o basalto é o agregado de maior massa volúmica, a gradual incorporação de mármore traduz-se numa diminuição da massa volúmica da mistura. Contrariamente, no caso da areia de rio e de granito, cuja massa volúmica é inferior à de mármore, ocorre um aumento na massa volúmica do betão produzido resultante da sua incorporação. Este aspeto está de acordo com as investigações referidas no estado da arte, onde se evidencia que a massa volúmica do betão no estado fresco depende das massas volúmicas dos seus constituintes.

## 4.4. Propriedades do betão no estado endurecido

Neste subcapítulo, pretende-se descrever e analisar as propriedades do betão tendo em conta os resultados dos ensaios no seu estado endurecido, no âmbito da durabilidade. Tal como referido em 3.7, serão abordados os ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão, resistência à carbonatação e penetração de cloretos, assim como o ensaio de retração. Ainda assim, antes destes, apresenta-se uma breve análise dos resultados obtidos quanto à resistência mecânica à compressão dos betões, de forma a poder enquadrar e melhor compreender alguns resultados obtidos em termos de durabilidade.

### 4.4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão não caracteriza diretamente a durabilidade de um betão. Contudo, a sua resistência mecânica, traduzida por este ensaio, é uma forma de estimar indiretamente a respetiva durabilidade. Deve ainda considerar-se que, apesar de elementos com elevada resistência à compressão indicarem boas características de durabilidade, também se pode verificar o contrário, devido, por exemplo, a uma deficiente camada de recobrimento.

A resistência mecânica dos betões produzidos à compressão, sob tensão uniforme, foi avaliada segundo a norma NP EN 12390-3 (2003), tal como descrito no subcapítulo 3.7.2. Uma vez que se realizaram betonagens experimentais, para calibrar alguns parâmetros, e efetivas para realizar os ensaios que se pretendia, foram ensaiados à compressão os primeiros aos 28 dias e os segundos aos 7, 28 e 56 dias. Como tal, as Tabelas 4.17 e 4.18 demonstram os resultados obtidos nessas betonagens, respetivamente, sendo que os dados necessários para a sua determinação se encontram no Anexo H.

Analisando os resultados da Tabela 4.17 e 4.18, observa-se que as resistências à compressão dos betões são superiores às pretendidas, face à classe de betão inicialmente prevista, C30/37. Com isto, os valores obtidos enquadram-se na classe de resistência C35/45, apontando-se a relação água / cimento como a causa da discrepância ocorrida, uma vez que se seguiu a correlação seguida por Nepomuceno (1999). Como nesta dissertação se utilizou um cimento tipo II 42,5R ao invés do tipo II 32,5 apresentado nesse estudo, obtiveram-se resistências à compressão efetivas superiores.

**Tabela 4.17 - Valores da resistência à compressão dos betões de referência na betonagem experimental**

Betonagem experimental	
Tipo de betão	$f_{cm28, exp}$ (MPa)
BRB	50,7
BRM	45,2
BRC	56,1
BRG	49,2

**Tabela 4.18 - Valores da resistência à compressão dos betões na betonagem efetiva**

Betonagem efetiva							
	Tipo de betão	$f_{cm7, ef.}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm28, ef.}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm56, ef.}$ (MPa)	$\Delta$ (%)
Conjunto de betões BB	BRB	38,1	-	50,4	-	54,2	-
	BB/M20	35,8	-6,0	49,2	-2,4	58,4	7,7
	BB/M50	35,6	-6,6	46,7	-7,3	54,6	0,7
	BRM	36,8	-3,4	45,3	-10,1	51,4	-5,2
Conjunto de betões BC	BRC	45,6	-	56,9	-	62,0	-
	BC/M20	42,7	-6,4	56,0	-1,6	60,8	-1,9
	BC/M50	40,1	-12,1	51,2	-10,0	54,3	-12,4
	BRM	36,8	-19,3	45,3	-20,4	51,4	-17,1
Conjunto de betões BG	BRG	39,6	-	49,2	-	51,3	-
	BG/M20	38,6	-2,5	47,6	-3,3	49,7	-3,1
	BG/M50	38,3	-3,3	46,2	-6,1	50,7	-1,2
	BRM	36,8	-7,1	45,3	-7,9	51,4	0,2

De forma a interpretar os resultados expressos na Tabela 4.18, as Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 pretendem representar o comportamento do betão em termos de resistência à compressão face à incorporação de agregados finos de mármore, aos 7, 28 e 56 dias, respetivamente.

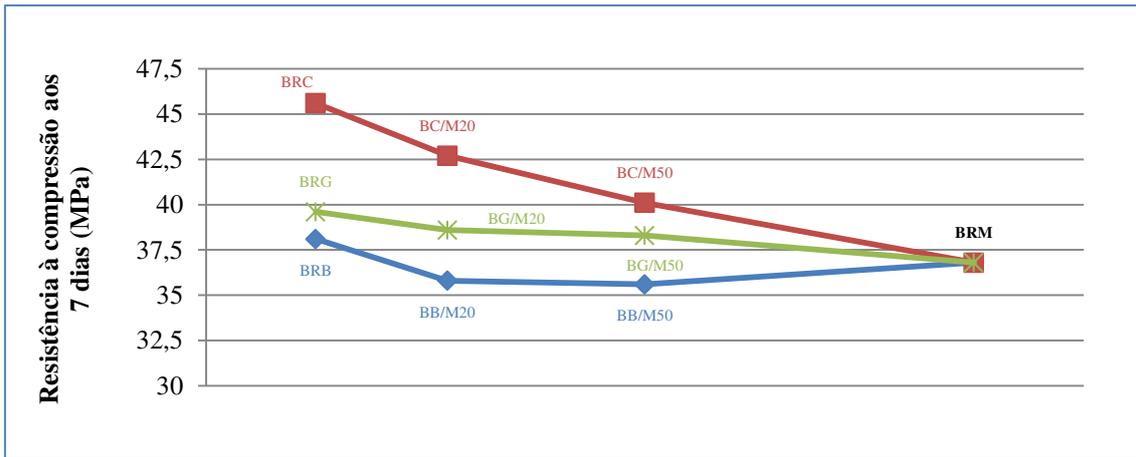


Figura 4.12 - Resistência à compressão aos 7 dias para os vários betões

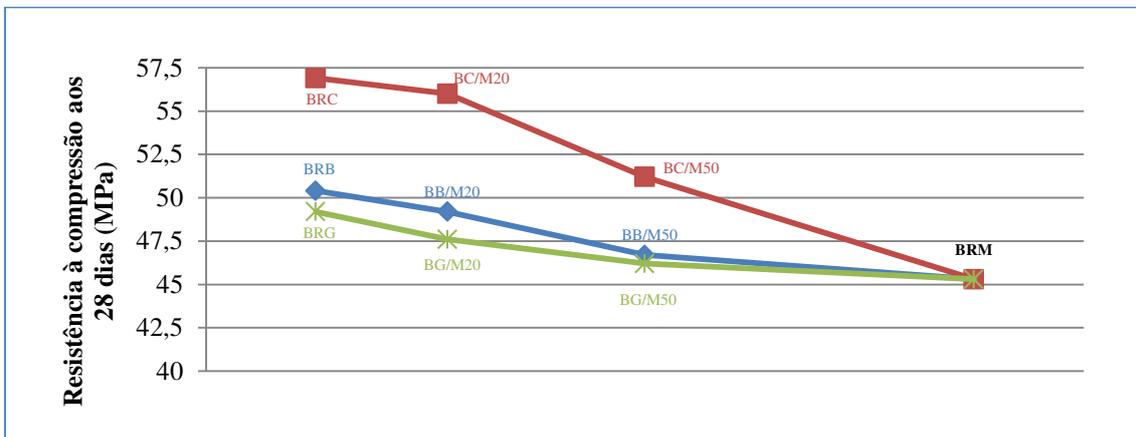


Figura 4.13 - Resistência à compressão aos 28 dias para os vários betões

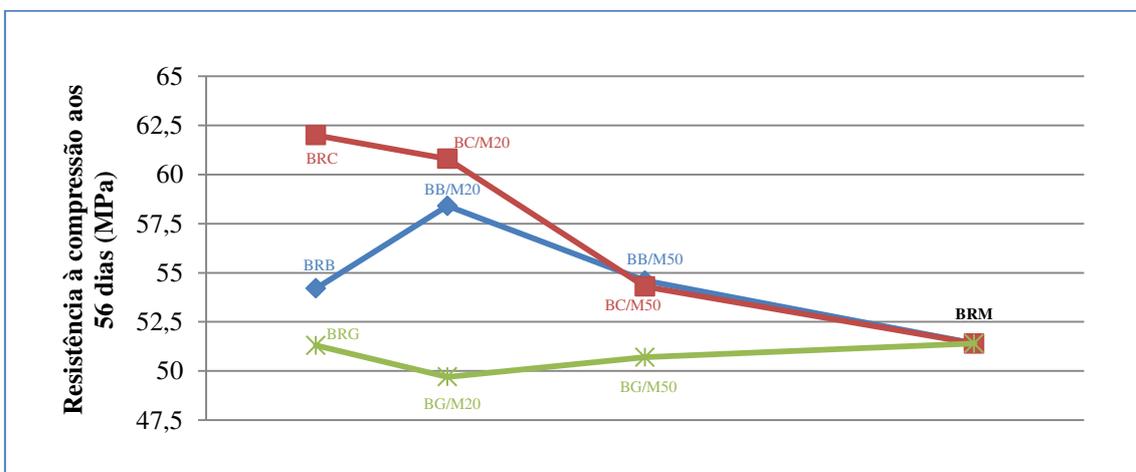


Figura 4.14 - Resistência à compressão aos 56 dias para os vários betões

A análise da Figura 4.12 permite observar uma quebra generalizada na resistência à compressão nos betões com incorporação de agregados finos de mármore. Dos elementos representados destaca-se a diminuição acentuada do conjunto de betões com areia de rio, com uma variação de resistência, após total substituição, de -19,3%, tal como referido na Tabela 4.18. Nos restantes betões, constata-se também uma descida nos valores de resistência à compressão, se bem que menos acentuada, sendo que no caso dos betões com basalto, a resistência se manteve praticamente constante.

Na Figura 4.13, verifica-se que a tendência registada aos 7 dias se mantém. Por outras palavras, aos 28 dias de cura, os betões com incorporação de mármore têm tendência para perder resistência à compressão, sendo que este fenómeno é mais acentuado em betões com agregados finos de areia de rio. No entanto, observa-se que, aos 28 dias, os betões de basalto perdem maior resistência à compressão em comparação aos betões de granito, se bem que com ordens de grandeza semelhantes (-10,1 e -7,9%).

A Figura 4.14 demonstra que a resistência à compressão da família de betões com agregados finos de areia de rio segue a tendência verificada aos 7 e 28 dias, observando-se uma diminuição nesta propriedade de 17,1% face à resistência inicial. Por sua vez, os betões de granito revelam um comportamento estável relativamente à substituição dos agregados finos originais por mármore, mantendo-se a resistência à compressão praticamente constante para uma substituição total. Finalmente, os betões produzidos com agregados finos de basalto apresentam uma tendência decrescente para incorporações de mármore acima de 20%. No entanto, abaixo desse valor, o mármore revela-se uma adição benéfica para as características mecânicas destes betões, contribuindo para um aumento de 7,7% no valor da resistência à compressão. Observando detalhadamente os elementos do Anexo H, verifica-se também que os resultados da resistência à compressão do BRB e do BB/M20 não são causados por um ensaio pontual num provete, pelo que se atribui como causa deste resultado incoerente um erro experimental na produção desta mistura específica ou na execução do ensaio, assumindo-se como anormal o valor do BRB.

A Figura 4.15 compara os resultados da resistência à compressão entre betões com substituição de agregados finos primários por mármore e betões com substituição de agregados grossos primários por mármore, de Martins (2012).

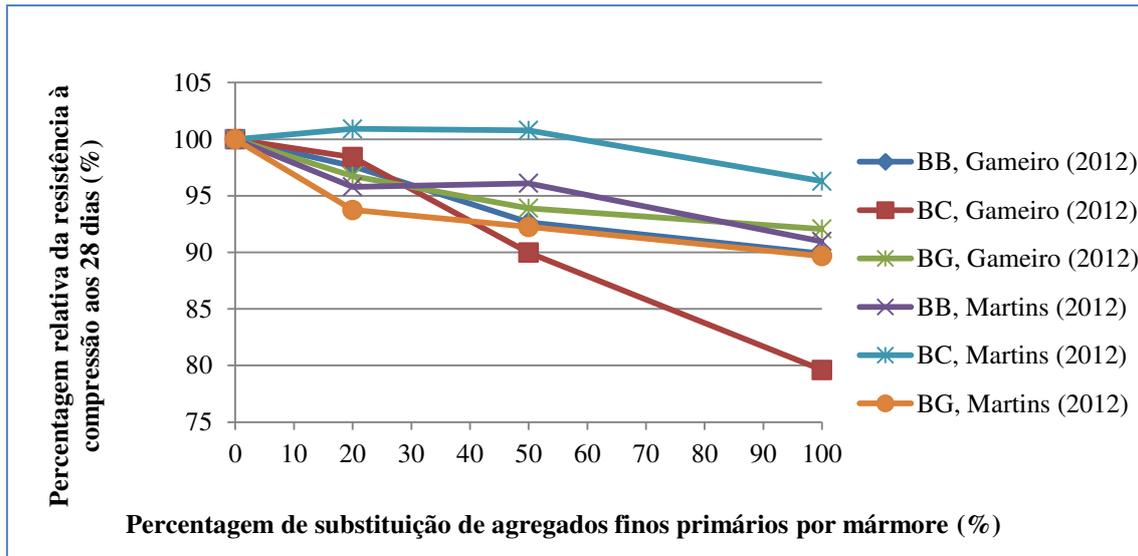


Figura 4.15 - Percentagem relativa da resistência à compressão dos betões com substituição de finos e grossos de mármore

Como é possível observar, a incorporação de mármore em betões, como agregado fino ou grosso, resulta na diminuição da resistência mecânica à compressão. De entre os resultados obtidos, destaca-se o comportamento da família de betões de calcário, uma vez que, para Martins (2012), na substituição por agregados grossos de mármore, a variação da resistência demonstrou-se residual, ao invés do da substituição dos agregados finos, onde a variação da resistência à compressão foi a maior, na ordem de 20%. Este facto deve-se à diferente influência dos agregados na resistência, de acordo com a sua dimensão. Assim, analisando os agregados grossos, o aspeto que condiciona a resistência do betão é a sua resistência mecânica, onde a do mármore se assemelha à do calcário. Contudo, analisando os agregados finos, a sua contribuição para a resistência mecânica do betão é estabelecida pela coesão da mistura que estes, conjuntamente com o cimento e água, conseguem garantir. Assim, devido às características geométricas dos agregados finos de mármore diferirem das de areia de rio, como referido no subcapítulo 4.3.1, o decréscimo acentuado de resistência torna-se evidente.

Analisando a Figura 4.15 relativamente aos tipos de betão BB e BG, observa-se que estes apresentam variações de resistência semelhantes na incorporação de agregados finos e grossos de mármore, assinalando-se um ligeiro decréscimo nesta propriedade.

Em suma, os resultados obtidos vão ao encontro de outras investigações neste domínio. No trabalho de Corinaldesi et al. (2010), é registada uma ligeira quebra de resistência à compressão para substituições de 10% de agregados finos primários por mármore. Já Aruntaş et al. (2010) constataram que a incorporação de agregados secundários no betão resulta numa diminuição da resistência mecânica.

#### 4.4.2. Absorção de água por capilaridade

Como descrito no subcapítulo 3.7.3, o ensaio de absorção de água decorreu segundo a especificação LNEC E-393 (1993). A absorção de água, por capilaridade ou imersão, tem muita importância no estudo da durabilidade dos betões uma vez que permite compreender a forma como estes se opõem à penetração de cloretos.

Neste ensaio, determinou-se a altura de ascensão capilar de água de cada betão produzido e a sua respetiva variação de massa. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.19 assim como as variações destes parâmetros para as sucessivas incorporações de mármore nos betões de referência. Todos os dados relativos aos cálculos destes resultados encontram-se detalhados no Anexo I.

**Tabela 4.19 - Absorção e altura de água por ascensão capilar dos vários betões às 72 horas**

	Tipo de betão	Absorção de água por capilaridade às 72 h (g/mm <sup>3</sup> )	Δ (%)	Altura de absorção de água por capilaridade às 72 h (mm)	Δ (%)
Conjunto de betões BB	BRB	4,14E-03	-	46,9	-
	BB/M20	2,96E-03	-28,5	38,5	-17,8
	BB/M50	3,34E-03	-19,3	38,4	-18,1
	BRM	3,20E-03	-22,8	41,3	-12,0
Conjunto de betões BC	BRC	3,01E-03	-	34,7	-
	BC/M20	2,47E-03	-18,1	43,6	25,5
	BC/M50	3,04E-03	0,8	40,3	16,1
	BRM	3,20E-03	6,1	41,3	18,8
Conjunto de betões BG	BRG	3,93E-03	-	39,3	-
	BG/M20	2,56E-03	-34,9	38,5	-2,0
	BG/M50	2,81E-03	-28,4	38,7	-1,5
	BRM	3,20E-03	-18,6	41,3	5,1

A análise da Tabela 4.19, em conjunto com a Figura 4.16, permite concluir que a introdução de agregados finos de mármore na substituição de agregados finos de basalto e granito, provoca um decréscimo significativo na absorção de água por capilaridade às 72 horas. Essa diminuição é de 22,8 e 18,6%, para esses conjuntos de betões, respetivamente. Relativamente aos betões com areia de rio, nota-se uma diminuição de absorção de água com a introdução de 20% de agregados finos de mármore, seguida de uma subida gradual até cerca de 6% de absorção superior à de referência. Assim, neste caso, constata-se que a incorporação de mármore não tem

praticamente efeito nesta propriedade de durabilidade em betões com agregados finos de areia de rio.

Os resultados obtidos permitem concluir que, tal como verificaram Binici et al. (2007), Hameed e Sekar (2009), Corinaldesi et al. (2009) e André (2012), os betões com incorporação de mármore obtêm um melhor desempenho na absorção de água por capilaridade devido a substituições em percentagem de volume até 50%, especialmente entre 15 e 30%. Nos trabalhos de Hanžič (2003) e Topçu et al. (2008), verificou-se que a porosidade aparente e o coeficiente de capilaridade diminuem para pequenas substituições, aumentando posteriormente, tal como se observa na Figura 4.16. Estes autores, com investigação em betões auto-campactáveis, concluíram que, através da adição de pó de mármore, em pequenas quantidades, os vazios ficam mais preenchidos e, conseqüentemente, a capilaridade do betão diminuiu devido à elevada trabalhabilidade. No entanto, para elevados teores de adições, o tamanho médio dos poros aumenta devido ao aumento da área de superfície específica de materiais finos.

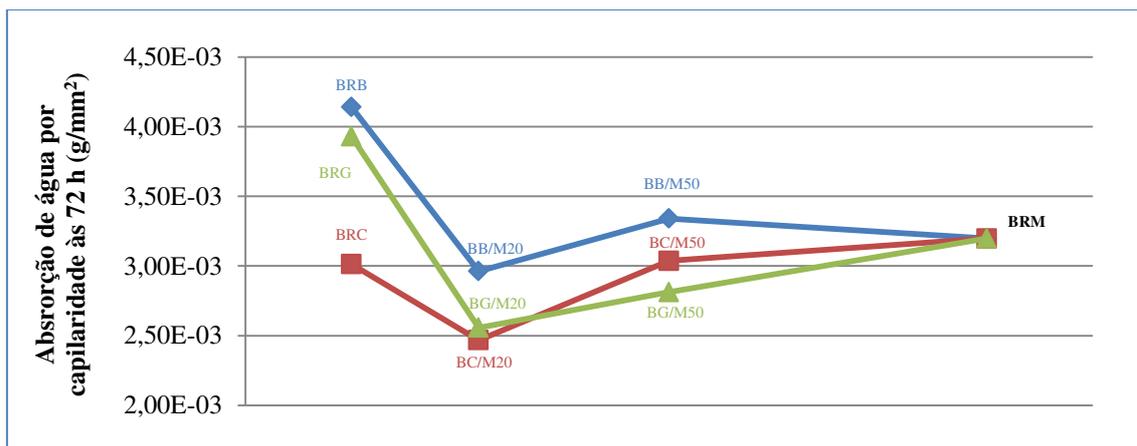


Figura 4.16 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas para os vários betões

A Figura 4.17 representa a altura de ascensão capilar para os diferentes tipos de betão às 72 horas de ensaio. Analisando a figura, observa-se uma quebra na altura de capilaridade no conjunto de betões com agregados finos de basalto, de acordo com o decréscimo na absorção de água verificado na Tabela 4.19. Ainda que na família de betões de granito também se verifique um decréscimo na absorção de água, a altura de ascensão capilar mantém-se praticamente constante, com um aumento de 5,1% face ao valor do betão de referência. Finalmente, para betões com agregados finos de areia de rio, a Figura 4.17 demonstra um aumento de 18,8% na altura de ascensão capilar. Assim, conclui-se que a diminuição da variação total de absorção de água provoca uma diminuição inferior nas alturas de capilaridade, em que no limite, para o caso

de não haver variação de absorção capilar, essa altura aumenta, como no caso do betão com areia de rio. Contudo, há que referir que a altura de ascensão de água nos provetes de betão se trata do parâmetro de maior dificuldade de leitura neste ensaio devido à superfície manchada que estes por vezes apresentam. Como tal, os valores apresentados na Figura 4.17, apesar de considerados válidos, podem diferir ligeiramente da realidade.

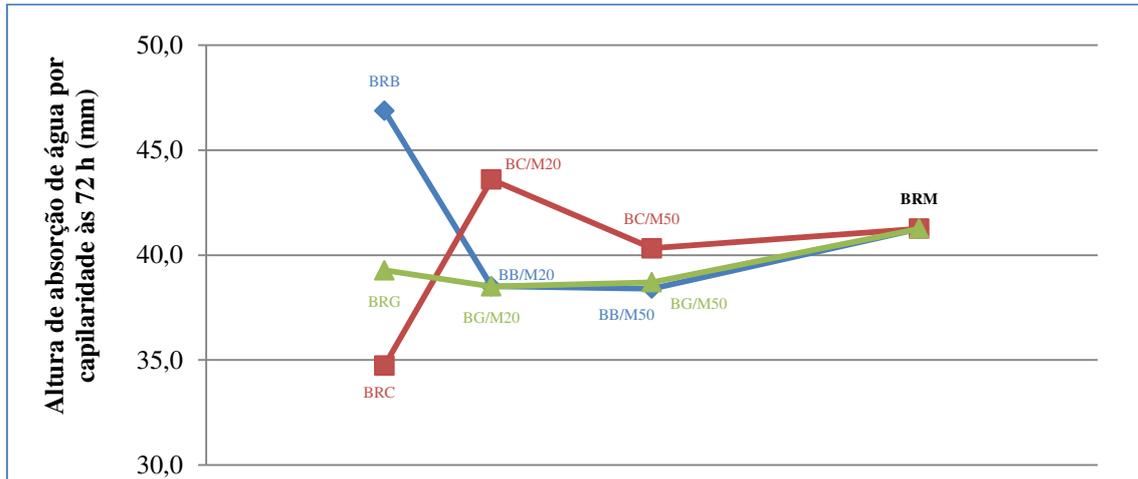


Figura 4.17 - Altura de absorção de água por capilaridade às 72 horas para os vários betões

As alterações verificadas nas alturas de ascensão capilar também se devem ao facto de a superfície dos agregados finos de mármore ser mais lisa do que a dos de basalto, semelhante à dos de granito e mais rugosa do que o dos de areia de rio. Este aspeto reflete-se na distribuição espacial dos agregados, sendo que, quanto mais rugosas forem as partículas, pior o seu arranjo na mistura e maior a quantidade de pasta cimentícia nos seus interstícios. Desta forma, visto que a ascensão capilar se processa através dos capilares dessa pasta, os resultados da altura de ascensão capilar apresentados na Figura 4.17 tornam-se evidentes.

As Figuras 4.18 e 4.19 representam o comportamento global dos provetes de betão no decorrer do ensaio de absorção de água por capilaridade. Nelas, estão representadas as absorções e alturas de ascensão capilar da água, respetivamente. Pela sua análise, em conjunto com os dados disponíveis no Anexo I, conclui-se que o fenómeno de capilaridade ocorre de uma forma mais intensa nas primeiras 24 horas de ensaio, correspondendo a uma média de 70,6 e 73,7% da totalidade de absorção e altura de água atingidas nas 72 horas de ensaio. Após estas primeiras horas, a capacidade de o provete absorver água por capilaridade tem tendência a reduzir gradualmente uma vez que se começa a atingir um equilíbrio de pressões no interior da rede porosa do betão, tornando-se progressivamente mais difícil a água ascender pela mesma.

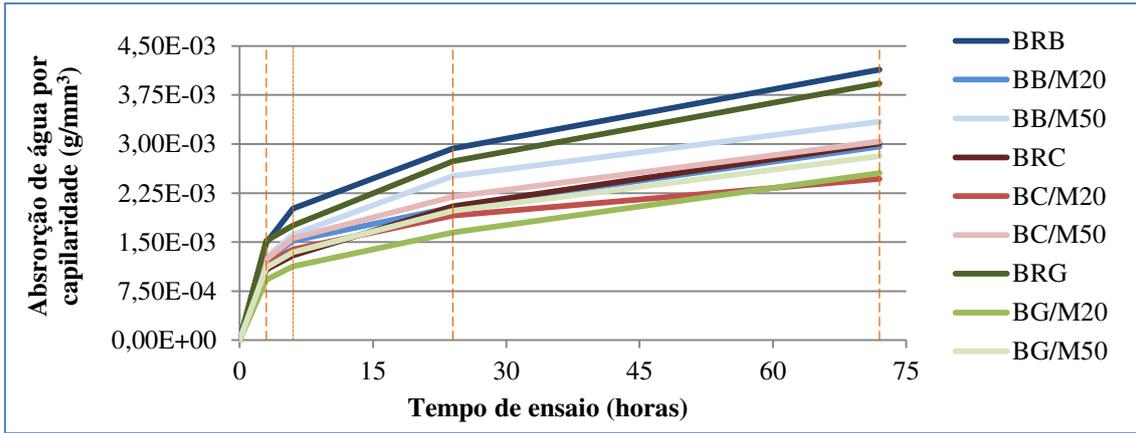


Figura 4.18 - Absorção de água dos vários betões ao longo de 72 horas de ensaio

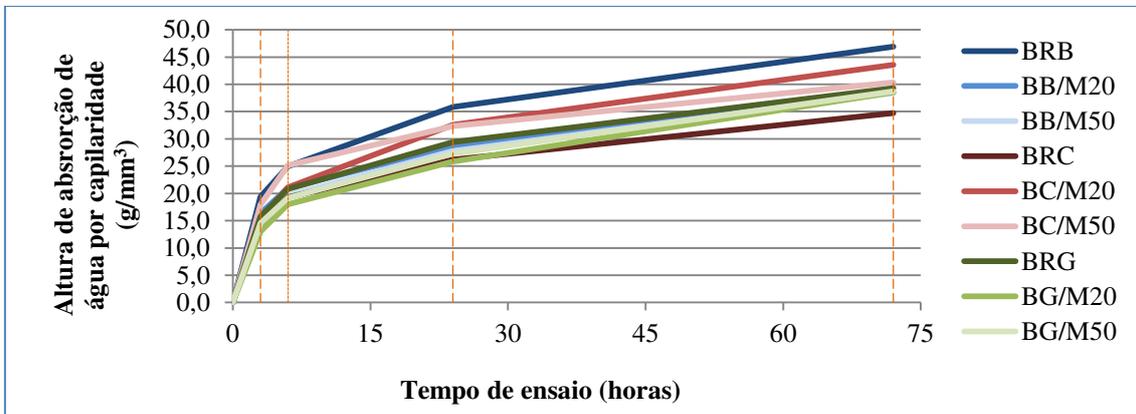


Figura 4.19 - Altura de ascensão capilar dos vários betões ao longo de 72 horas de ensaio

Com os resultados obtidos neste ensaio, determinou-se o coeficiente de absorção por capilaridade,  $K_c$ , dos vários betões durante o período de ensaio. Este coeficiente foi determinado pela expressão 4.1.

$$K_c = \frac{p}{s \times \sqrt{t}} \quad (4.1)$$

Onde,

$K_c$  - coeficiente de absorção por capilaridade ( $\text{g}/\text{mm}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ );

$p$  - quantidade de água absorvida (g);

$s$  - superfície inferior do provete ( $\text{mm}^2$ );

$t$  - tempo (horas).

A Figura 4.20 apresenta a variação da média dos coeficientes de absorção por capilaridade dos vários betões para diferentes taxas de incorporação de agregados finos de mármore.

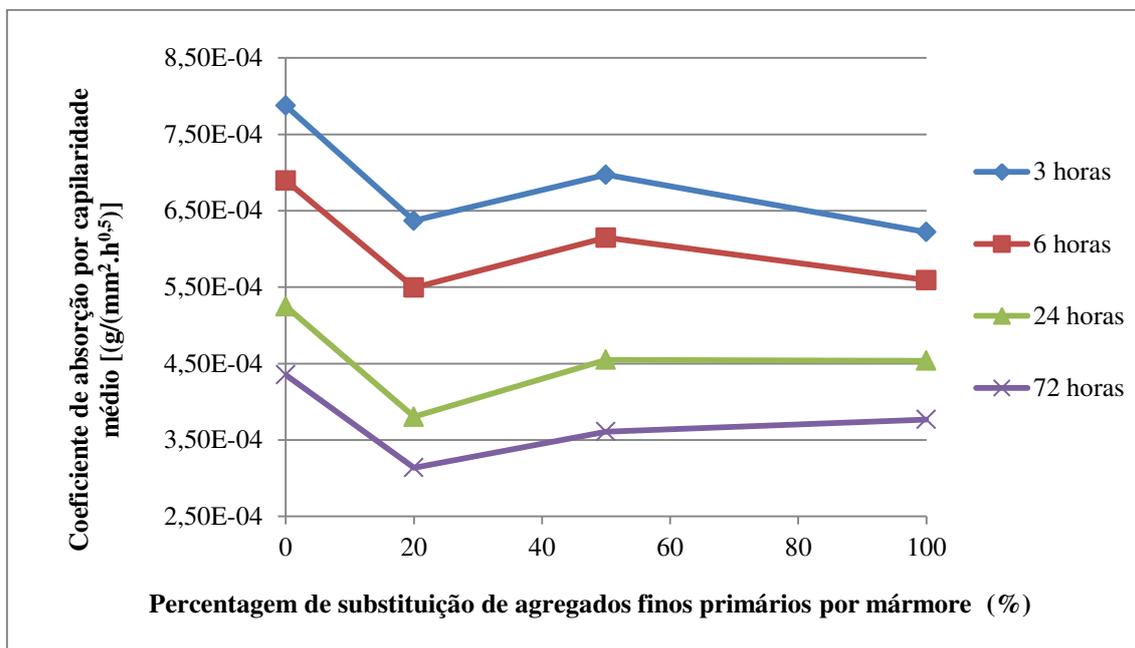


Figura 4.20 - Coeficiente de capilaridade médio dos vários betões para diferentes durações de ensaio

É possível observar, pela análise da Figura 4.20, que o coeficiente de absorção por capilaridade médio apresenta um comportamento decrescente, de acordo com uma maior percentagem de substituição de agregados finos primários por mármore, no mesmo período de ensaio. Contudo, a Figura 4.20 permite também concluir que essa variação é progressivamente menor para medições registadas em períodos de tempo de ensaio mais longos. Assim, torna-se evidente a estabilização do coeficiente de absorção por capilaridade médio nos betões com uma qualquer percentagem de agregados de mármore, para maiores durações do ensaio.

Outro aspeto que se verifica na Figura 4.20 é a grande variação que se verifica para 20% de substituição dos agregados finos. Este facto está diretamente relacionado com os resultados apresentados na Tabela 4.19 e Figura 4.16, justificando a redução na absorção de água por capilaridade nestas representada.

Obtidos estes resultados, analisou-se a investigação de André (2012) para fins comparativos visto que esta é em tudo semelhante a este estudo, diferindo apenas no tipo de agregados substituídos, isto é, nos grossos. A Figura 4.21 representa a variação do coeficiente de absorção por capilaridade médio que, em concordância com este trabalho, também apresenta menores valores para maiores durações do ensaio. André (2012) também verificou uma quebra no valor dos coeficientes de capilaridade médios para maiores taxas de substituição, se bem que bastante

menos acentuada do que na substituição de agregados finos. Contudo, os resultados associados à substituição dos agregados grossos apresentam valores inferiores de capilaridade para os betões produzidos. Uma vez que o menor valor do coeficiente de absorção de capilaridade é obtido para os betões de referência com agregados finos de areia de rio, tal ocorrência torna-se expetável visto que André (2012) produziu todas as misturas com estes mesmos agregados finos.

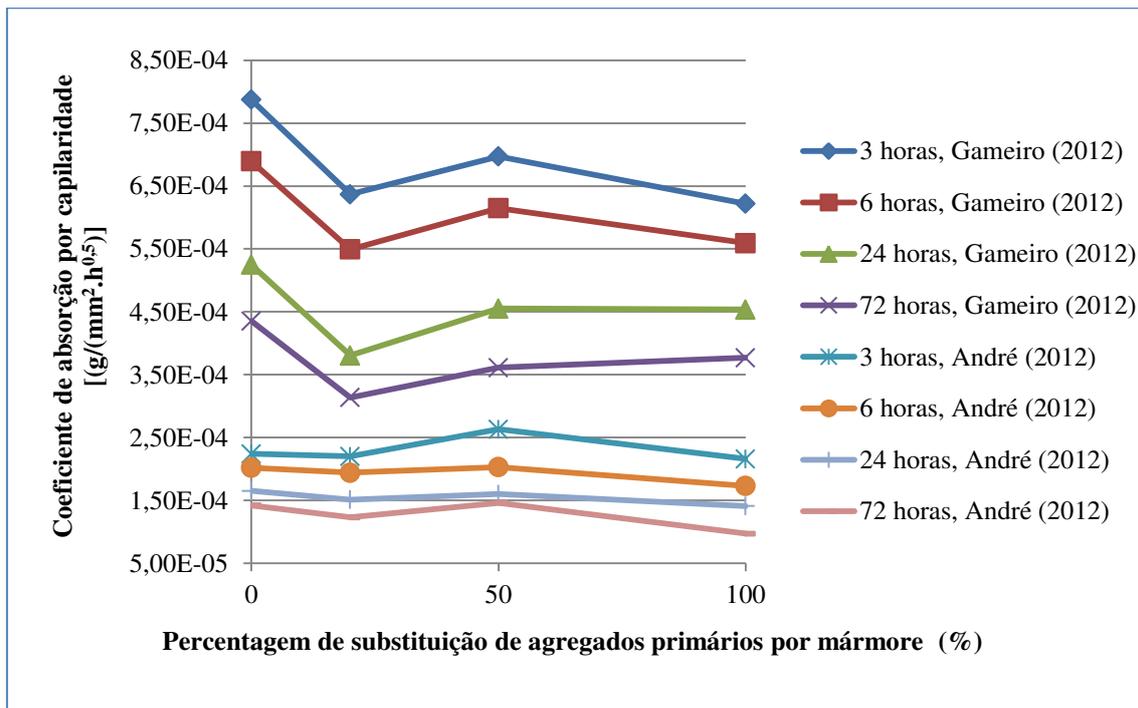


Figura 4.21 - Comparação de coeficientes de absorção por capilaridade em betões com substituição de finos e grossos de mármore

#### 4.4.3. Absorção de água por imersão

Em conformidade com a especificação LNEC E-394 (1993), a avaliação dos poros abertos presentes nos betões produzidos foi realizada através do ensaio de absorção de água por imersão, tal como descrito no subcapítulo 3.7.4.

Tendo em conta o mecanismo de ocorrência deste fenómeno, consideraram-se os poros devido à evaporação do excesso de água de amassadura, ao ar retido na amassadura e aos poros presentes na estrutura dos agregados.

A Tabela 4.20 contém os resultados da absorção de água dos vários betões produzidos, assim como a variação da absorção de água dos betões com substituição de agregados finos,

relativamente aos de referência. No Anexo J, encontram-se todos os dados e cálculos intermédios para a obtenção destes valores.

**Tabela 4.20 - Absorção de água por imersão dos vários betões produzidos**

	Tipo de betão	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta$ (%)
Conjunto de betões BB	BRB	16,4	-
	BB/M20	17,1	3,8
	BB/M50	15,7	-4,5
	BRM	15,9	-3,1
Conjunto de betões BC	BRC	14,3	-
	BC/M20	13,5	-5,9
	BC/M50	13,9	-2,9
	BRM	15,9	11,2
Conjunto de betões BG	BRG	19,4	-
	BG/M20	17,1	-11,4
	BG/M50	16,7	-13,8
	BRM	15,9	-17,8

Da análise da Tabela 4.20, conclui-se que a incorporação de agregados finos de mármore tem um efeito benéfico na redução da absorção de água em betões de agregados finos de basalto e granito, com variações de -3,1 e -17,8%, respetivamente. No entanto, relativamente ao betão de referência de areia de rio, verifica-se um aumento de 11,2% na quantidade de água absorvida resultante da substituição total dos agregados finos. Ainda assim, neste betão observam-se reduções da absorção de água para taxas de substituição de 20 e 50%.

Estas variações, no potencial de absorção dos betões, devem-se essencialmente às propriedades do mármore, que, tal como descrito no subcapítulo 4.2.1, é o agregado com menor absorção de água. Por outro lado, quando se analisa o comportamento do mármore na família de betões de areia de rio, torna-se evidente a influência da variação das características físicas e geométricas dos agregados finos originais e secundários. Neste sentido, é de referir que vários autores, como por exemplo Metha e Monteiro (1994), concluíram que betões com agregados rugosos têm uma maior absorção de água. É possível chegar a este consenso uma vez que a quantidade de ar contido na mistura tem uma importância significativa na variação da absorção de água por imersão. Desta forma, para substituições acima de 50% de agregados finos de areia de rio por mármore, a compacidade da mistura fica comprometida devido à rugosidade do mármore, traduzindo-se num pior arranjo espacial dos agregados e, naturalmente, numa maior retenção de ar. Consequentemente, esse ar retido origina uma rede porosa aberta que, superando a

característica de fraca absorção dos agregados de mármore, origina betões com maior absorção de água por imersão.

A Figura 4.22 representa os valores da Tabela 4.20, onde melhor se verifica a variação da absorção de água de acordo com as diferentes taxas de substituição dos agregados finos.

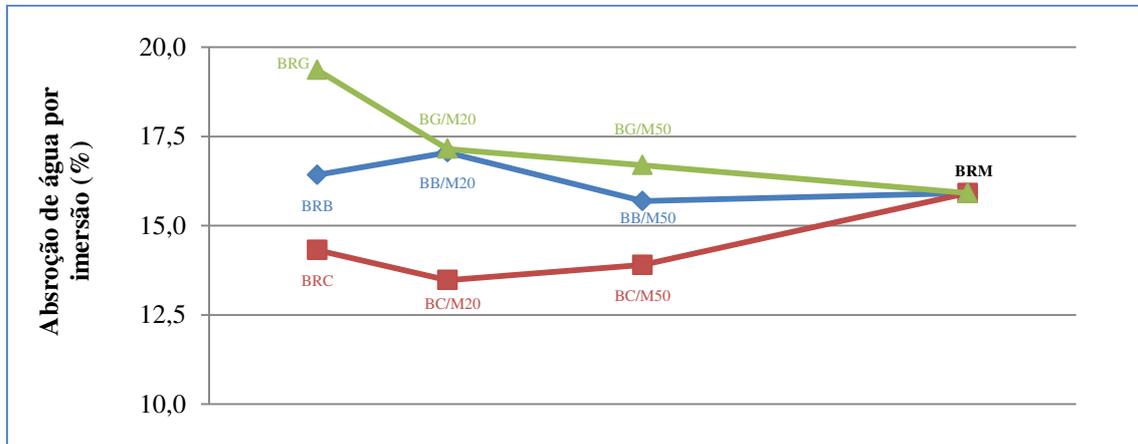


Figura 4.22 - Absorção de água por imersão para os vários betões

Observando a Figura 4.23, verifica-se que a média das absorções de água por imersão dos betões com as mesmas percentagens de substituição segue uma tendência polinomial. Assim, identifica-se uma tendência decrescente na absorção média de água por imersão para percentagens de substituição até 50% do volume de agregados e, posteriormente, um crescimento progressivamente maior desse valor até à substituição completa. A variação média da absorção de água descrita pela Figura 4.23 termina com um valor inferior ao inicial, registando-se uma diminuição de sensivelmente 4,7% neste parâmetro, representando uma melhoria devido à incorporação de mármore em betão. A relação estabelecida apresenta um coeficiente de determinação de 0,995, considerando-se então uma aproximação válida.

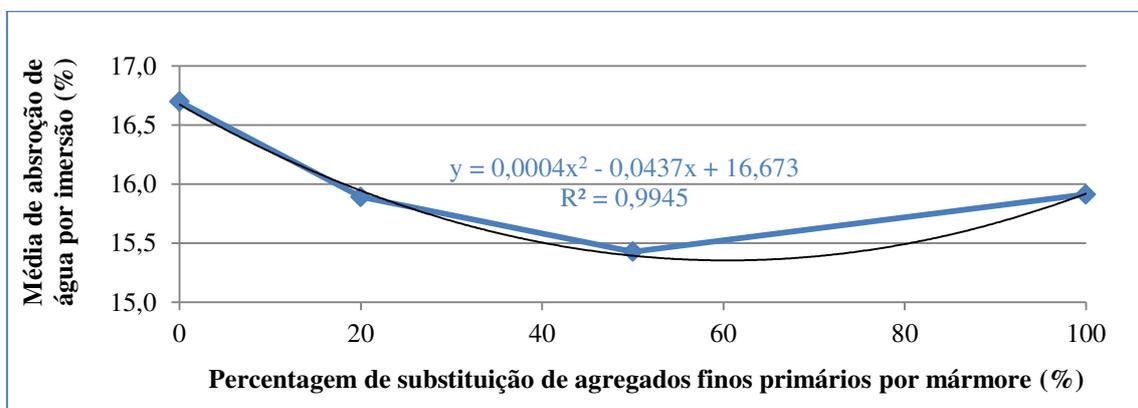


Figura 4.23 - Média de absorção de água por imersão dos vários betões

Tendo em conta a dependência das características de durabilidade face às propriedades mecânicas, avaliou-se a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água por imersão dos betões produzidos, representada na Figura 4.24.

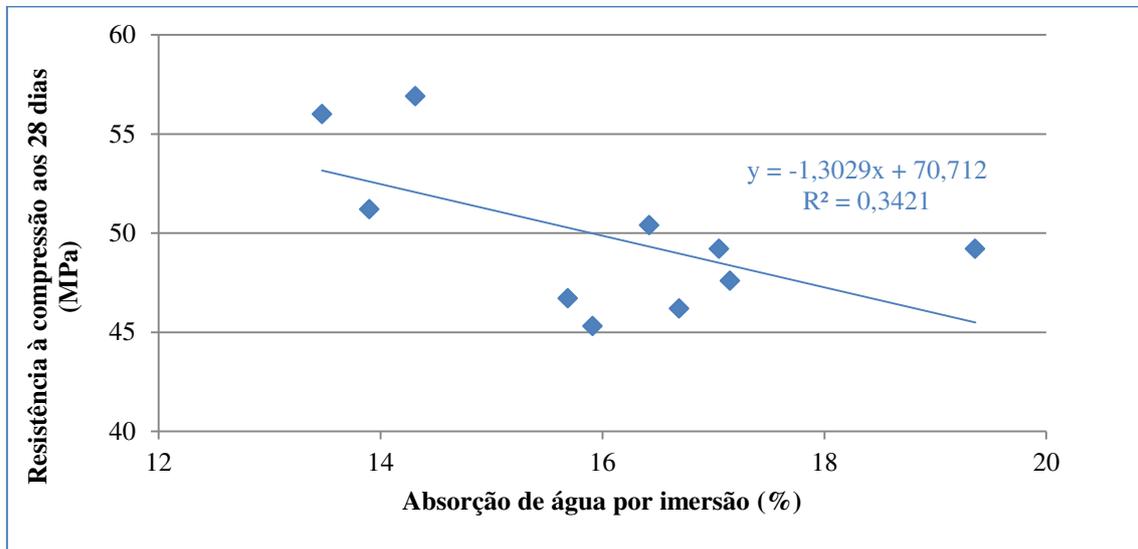


Figura 4.24 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos vários betões

Na Figura 4.24, constata-se que a resistência à compressão está fortemente relacionada com a absorção de água do betão, registando-se uma quebra de 14,5% de resistência devido a um incremento de 5,9% de absorção de água. Ainda assim, não se considera válida a aproximação linear sugerida devido ao baixo coeficiente de determinação.

É unânime, entre vários autores, tais como Evangelista (2007) e Bravo (2009), que a resistência à compressão é reduzida pelo aumento de absorção de água, tal como demonstra a Figura 4.25. Note-se ainda, que os autores citados fizeram investigações com materiais diferentes deste estudo, levando a querer que, para maiores variações na porosidade dos betões, se obtêm menores quebras na resistência à compressão.

A Figura 4.25 demonstra o sucessivo aumento no declive das aproximações lineares estimadas, sendo que os materiais utilizados foram agregados finos reciclados de betão, agregados finos reciclados de mármore e agregados finos de borracha, de Evangelista (2007), Gameiro (2012) e Bravo (2009), respetivamente. Este fenómeno deve-se à influência que os agregados finos têm na resistência à compressão. Uma vez que este tipo de agregados não é o principal responsável por garantir a resistência dos betões, a sua função neste contexto passa pela coesão da mistura, interferindo, através da porosidade, na melhor ou pior aderência da pasta cimentícia ao conjunto

de agregados. Assim, para menores porosidades, como no caso dos agregados finos de borracha, observa-se um elevado decréscimo na resistência à compressão.

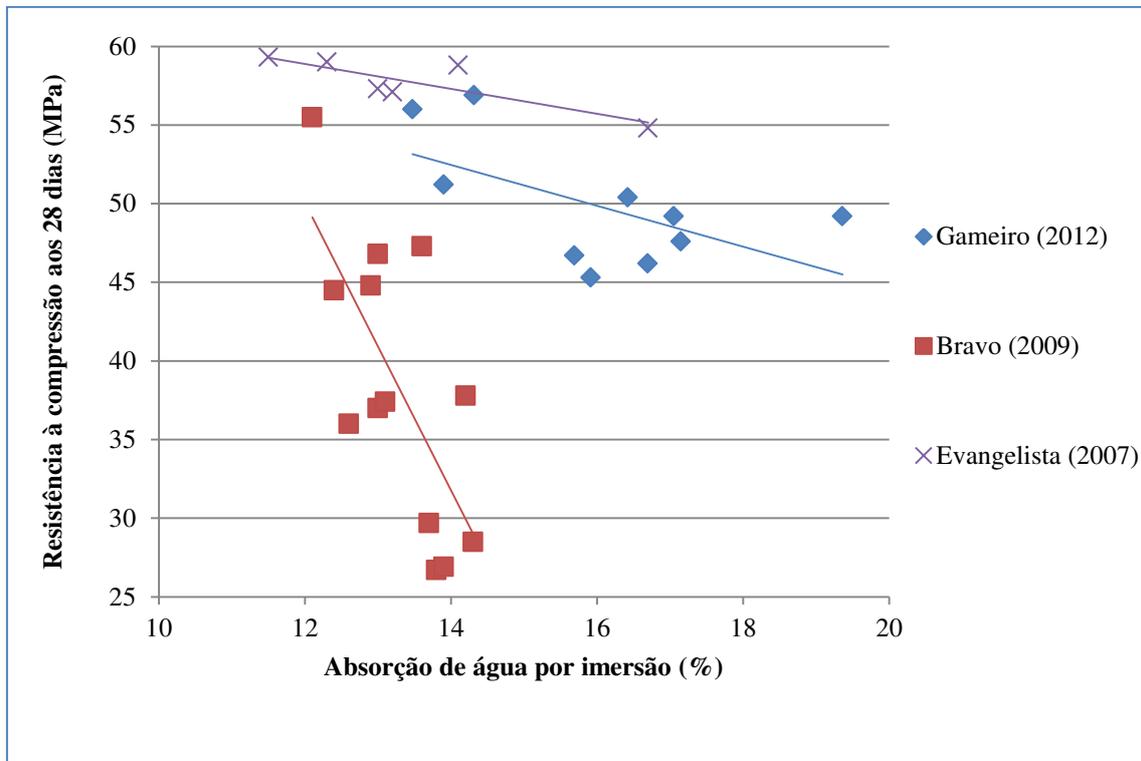


Figura 4.25 - Resistência à compressão aos 28 dias com a absorção de água por imersão de vários estudos

#### 4.4.4. Resistência à carbonatação

A resistência à carbonatação dos betões produzidos foi analisada de acordo com a especificação LNEC E 391 (1993), em conformidade com o procedimento descrito no subcapítulo 3.7.5.

Resultante da reação do dióxido de carbono existente na atmosfera com os componentes do cimento hidratado, a carbonatação provoca a deterioração do betão armado, na presença de humidade. Ainda assim, provoca um ligeiro incremento na densidade do betão, aumentando consequentemente a sua resistência.

O aspeto com maior influência no fenómeno de carbonatação é a permeabilidade do betão, parâmetro que se conseguiu caracterizar, para o mesmo tipo de cimento utilizado, nos subcapítulos 4.4.2 e 4.4.3, através da análise da absorção de água.

Os resultados obtidos da frente de carbonatação, utilizados no cálculo do coeficiente de carbonatação, dos vários betões produzidos encontram-se na Tabela 4.21, sendo que os dados e cálculos intermédios para a sua obtenção são apresentados no Anexo K.

**Tabela 4.21 - Profundidade de carbonatação com a substituição de AP por AGM**

	Tipo de betão	Carbonatação aos 7 dias (mm)	$\Delta$ (%)	Carbonatação aos 28 dias (mm)	$\Delta$ (%)	Carbonatação aos 56 dias (mm)	$\Delta$ (%)	Carbonatação aos 91 dias (mm)	$\Delta$ (%)
Conjunto de betões BB	BRB	2,15	-	4,60	-	7,91	-	10,25	-
	BB/M20	2,37	10,2	5,13	11,5	8,02	1,4	10,73	4,7
	BB/M50	1,97	-8,4	5,41	17,6	7,68	-2,9	10,94	6,7
	BRM	2,28	6,0	5,53	20,2	9,09	14,9	11,02	7,5
Conjunto de betões BC	BRC	2,13	-	4,08	-	5,90	-	7,52	-
	BC/M20	2,57	20,7	4,35	6,6	6,59	11,7	8,08	7,4
	BC/M50	2,55	19,7	5,61	37,5	6,71	13,7	10,19	35,5
	BRM	2,28	7,0	5,53	35,5	9,09	54,1	11,02	46,5
Conjunto de betões BG	BRG	3,96	-	8,44	-	12,02	-	15,21	-
	BG/M20	3,61	-8,8	7,17	-15,0	9,87	-17,9	12,78	-16,0
	BG/M50	3,52	-11,1	6,91	-18,1	9,33	-22,4	12,08	-20,6
	BRM	2,28	-42,4	5,53	-34,5	9,09	-24,4	11,02	-27,5

Pela análise da Tabela 4.21, em conjunto com as Figuras 4.26 a 4.29, observa-se que, para maiores taxas de substituição de agregados finos de areia de rio e basalto por agregados finos de mármore, a frente de carbonatação avança mais rapidamente. Entre estes dois conjuntos de betões, a adição de mármore tem consequências mais intensas nos betões de areia de rio face aos de basalto. A maior variação registada entre o betão de referência de areia de rio e o betão com total substituição de agregados finos ocorre aos 56 dias, onde há um aumento no coeficiente de carbonatação de 54,1%. Por sua vez, no caso do basalto, a maior variação ocorre aos 28 dias, traduzindo-se numa variação do coeficiente de carbonatação de 20,2%.

Relativamente à família de betões de granito, há uma variação negativa no avanço da carbonatação relativamente ao seu betão de referência. Esse maior impedimento ao fenómeno de carbonatação aumenta com a percentagem de substituição de agregados finos de granito por mármore, registando-se a maior variação aos 7 dias de ensaio, com um valor de -42,5%.

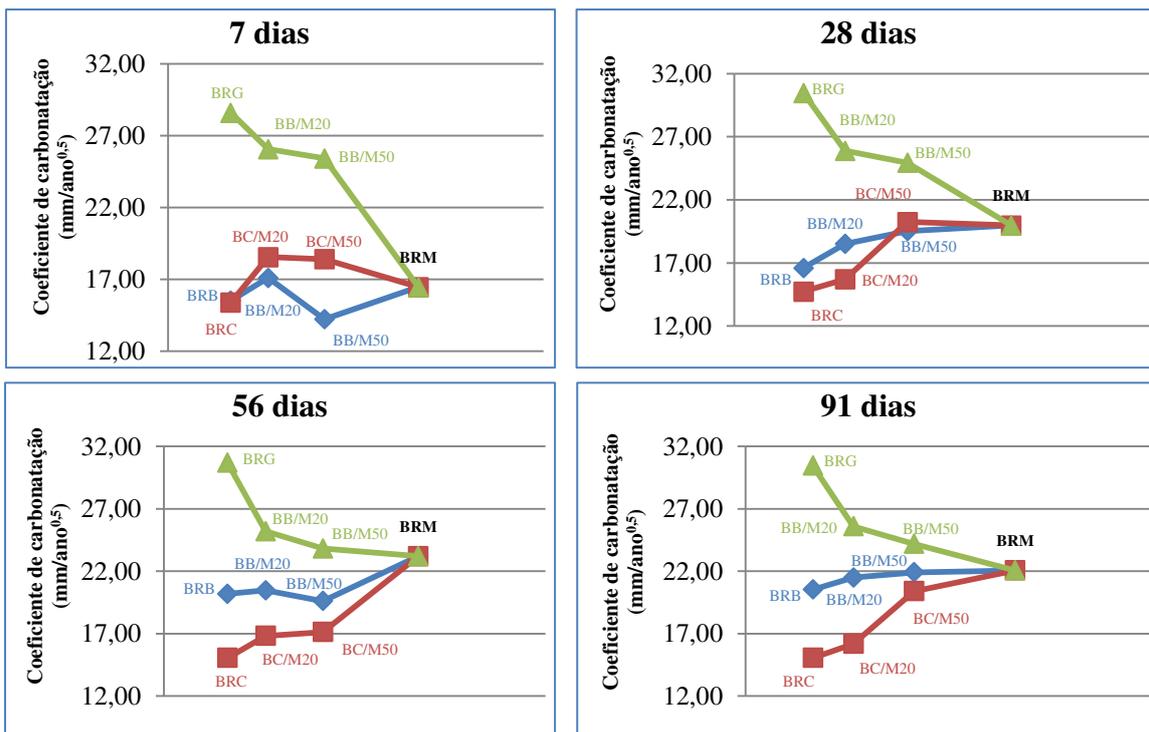


Figura 4.26 - Coeficiente de carbonatação dos diferentes betões para vários tempos de exposição ao CO<sub>2</sub>

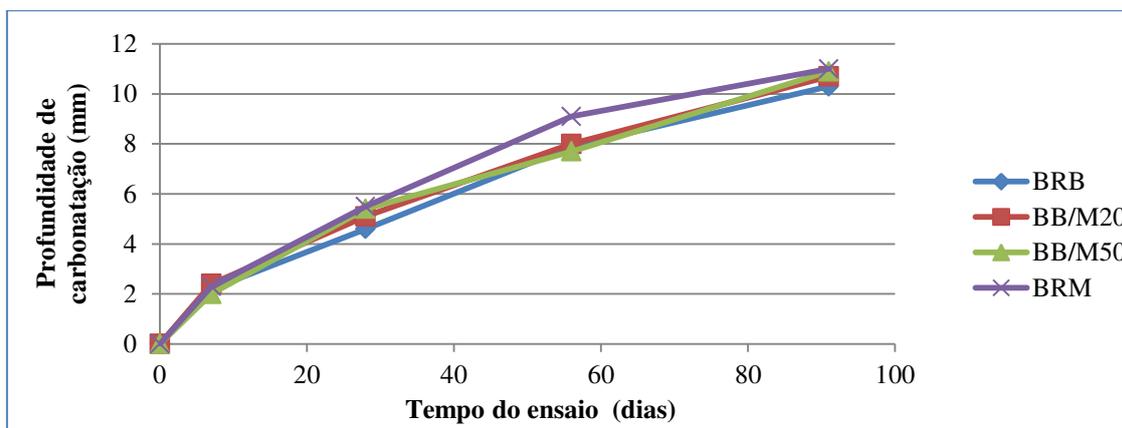


Figura 4.27 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de basalto

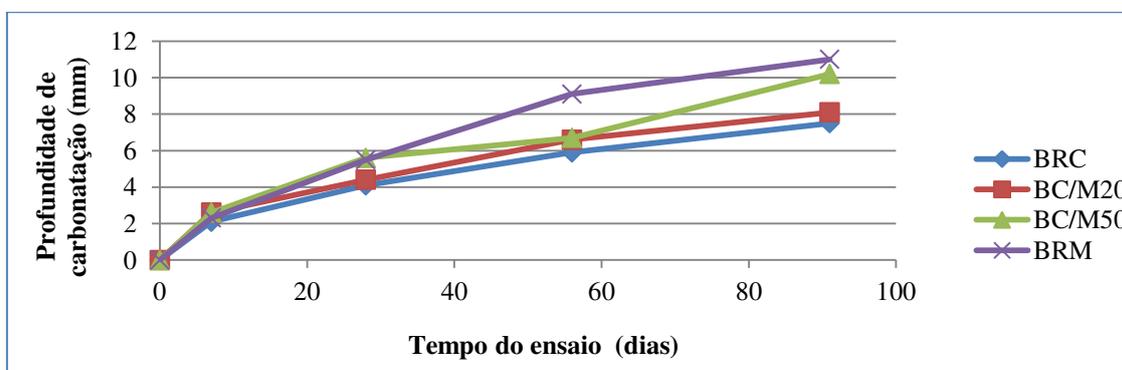


Figura 4.28 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de areia de rio

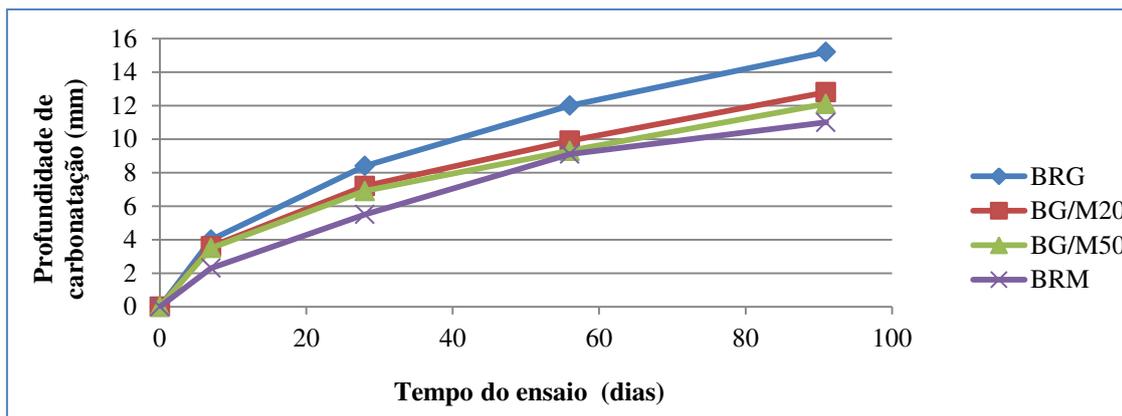


Figura 4.29 - Profundidade de carbonatação para os vários betões produzidos com agregados finos de granito

As Figuras 4.27 a 4.29 demonstram também que o efeito de carbonatação se faz sentir mais nos primeiros 7 dias de ensaio, observando-se uma quebra progressiva no avanço da frente de carbonatação para os tempos de ensaio posteriores.

Na Figura 4.30, encontram-se os resultados obtidos nesta investigação e na de André (2012). Pela sua análise, conclui-se que a profundidade de carbonatação nos betões depende da sua porosidade. Esta relação na manutenção, aumento e diminuição da carbonatação nos betões com basalto, areia de rio e granito, tal como verificado no ensaio de absorção de água, e pelo facto de André (2012) referir que a variação residual dos valores da profundidade de carbonatação estar também de acordo com os resultados do mesmo ensaio.

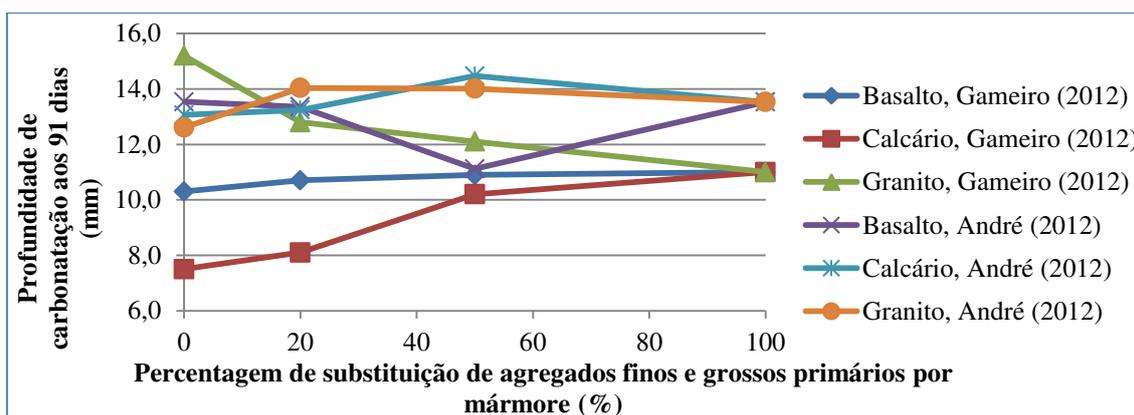


Figura 4.30 - Comparação de profundidades de carbonatação em betões com substituição de finos e grossos de mármore

Outro aspeto a referir é a importância da dimensão dos agregados na durabilidade de betões sujeitos a carbonatação, isto é, observa-se que o tipo de agregados finos tem maior influência neste fenómeno do que os grossos visto que as suas propriedades, físicas e geométricas, condicionam fortemente a disposição da mistura, afetando posteriormente a estrutura porosa.

Visto que os betões produzidos com os três agregados finos primários revelaram três comportamentos distintos relativamente à profundidade de carbonatação, obtiveram-se valores médios, desta grandeza, constantes para sucessivas taxas de substituição de agregados finos e grossos. Esta tendência é ilustrada na Figura 4.31, verificando-se que a profundidade de carbonatação segue esta tendência no caso de substituição de agregados finos e grossos. Ainda assim, com alterações nos agregados grossos, André (2012) verificou que as profundidades de carbonatação foram ligeiramente superiores.

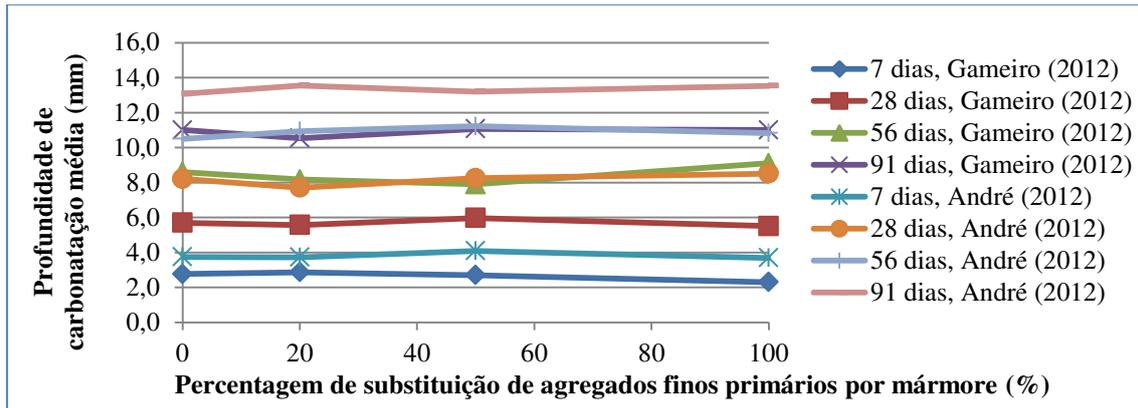


Figura 4.31 - Profundidade de carbonatação média para diferentes percentagens de substituição e tempos de ensaio em betões com substituição de finos e grossos de mármore

No caso dos agregados utilizados nesta dissertação, é possível concluir que a profundidade de carbonatação apresenta variações que não podem ser desprezadas, reforçando a influência que os agregados finos têm na durabilidade do betão. Basheer et al. (2001) referem que a resistência à carbonatação depende da permeabilidade dos gases, parâmetro este que por sua vez depende da porosidade. Por sua vez, de acordo com o subcapítulo 4.4.3, a resistência dos betões produzidos à carbonatação varia com a permeabilidade dos mesmos, aspeto este já esperado devido à relação entre os dois fenómenos. Assim, a Figura 4.32 pretende demonstrar a relação entre a profundidade de carbonatação com a absorção de água por imersão, verificando a ligação entre os mesmos.

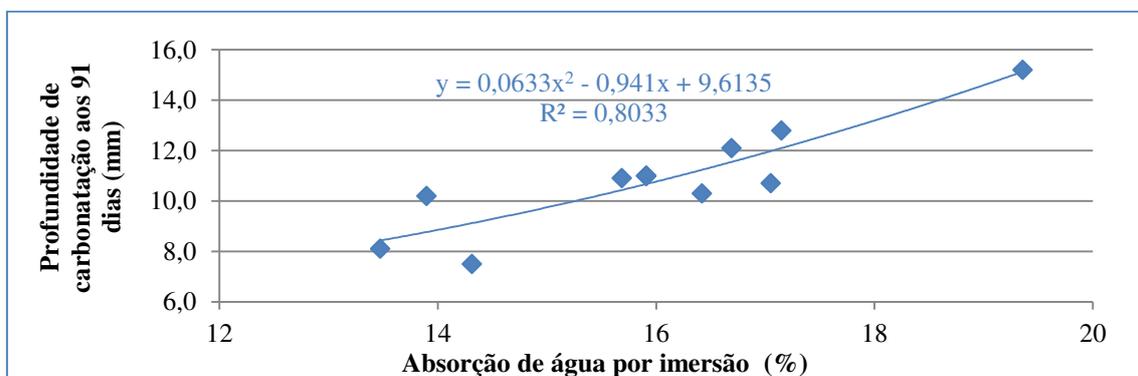


Figura 4.32 - Relação entre a absorção de água por imersão e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

Pela análise da Figura 4.32, verifica-se que, para maiores valores de absorção de água, a profundidade de carbonatação será maior. Esta aproximação polinomial considera-se válida devido ao elevado coeficiente de determinação obtido.

Outra interação que importa avaliar é entre a profundidade de carbonatação aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias. A Figura 4.33 pretende demonstrar essa relação.

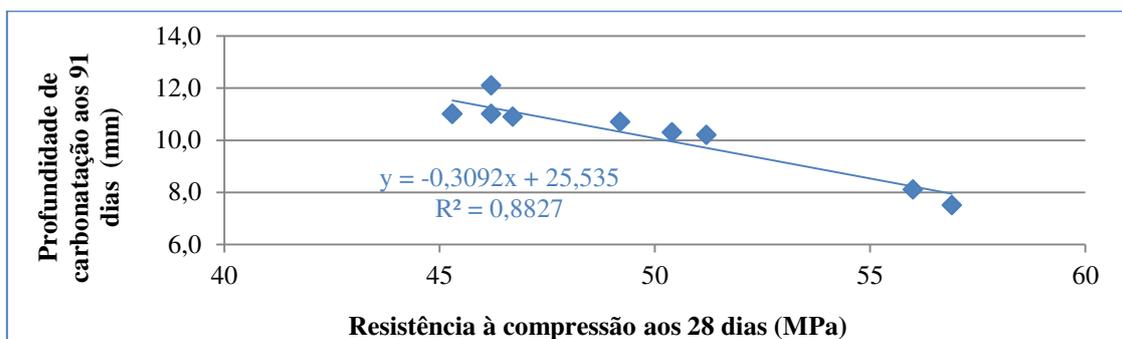


Figura 4.33 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

A análise da Figura 4.33 permite concluir que o aumento da resistência à compressão nos betões garante uma maior resistência dos mesmos à carbonatação, tal como observado por Bravo (2009) e Nisher (1984). Esta relação foi estabelecida por uma aproximação linear, obtendo-se um elevado coeficiente de determinação e considerando-se portanto válida a estimativa de variação destes parâmetros.

#### 4.4.5. Resistência à penetração de cloretos

De acordo com o subcapítulo 3.7.6, o ensaio que permitiu avaliar a resistência à penetração de cloretos no betão realizou-se segundo a especificação LNEC E-463 (2004). Assim, determinou-se o coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário dos betões.

Englobando três mecanismos de transporte de iões cloreto, nomeadamente o de difusão, o de diferenças de pressão e o de absorção capilar de águas, este processo, a par da carbonatação, é muito prejudicial para as armaduras. A penetração de cloretos ocorre de forma mais ou menos intensa de acordo com a estrutura porosa da matriz cimentícia do betão, que por sua vez está em constante alteração devido às reações de hidratação do cimento.

No Anexo L, podem ser consultados os dados e cálculos necessários para a obtenção dos valores do coeficiente de difusão de cloretos e respetivas variações, apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Valores do coeficiente de difusão de cloretos dos vários betões aos 28 e 91 dias

	Tipo de betão	Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias ( $\times 10^{-12}$ )	$\Delta$ (%)	Coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias ( $\times 10^{-12}$ )	$\Delta$ (%)
Conjunto de betões BB	BRB	15,40	-	15,67	-
	BB/M20	17,62	14,4	16,71	6,7
	BB/M50	16,02	4,1	13,73	-12,4
	BRM	13,99	-9,1	13,36	-14,7
Conjunto de betões BC	BRC	13,82	-	11,05	-
	BC/M20	13,37	-3,3	10,98	-0,7
	BC/M50	14,63	5,9	13,46	21,8
	BRM	13,99	1,2	13,36	20,9
Conjunto de betões BG	BRG	19,92	-	17,93	-
	BG/M20	16,64	-16,5	14,97	-16,5
	BG/M50	14,66	-26,4	13,61	-24,1
	BRM	13,99	-29,8	13,36	-25,5

As Figuras 4.34 e 4.35 demonstram, de acordo com a Tabela 4.22, que a tendência verificada no coeficiente de difusão de cloretos segue o mesmo padrão da profundidade de carbonatação e da absorção de água por imersão. Os resultados obtidos vão ao encontro da relação existente entre os parâmetros referidos, estando muito condicionados pela porosidade dos betões produzidos. Deste modo, observa-se um ligeiro aumento no coeficiente de difusão para pequenas substituições de agregados finos de basalto por mármore, seguindo-se uma quebra de 25,9% desse coeficiente para uma substituição de 100%, aos 28 dias. Mais acentuada é a redução do coeficiente de difusão do conjunto de betões com granito, com uma redução do coeficiente de difusão de cloretos de 29,8%. Contudo, como verificado noutros ensaios, verifica-se que a família de betões com agregados finos de areia de rio revela uma ligeira tendência de aumento no coeficiente de difusão. Aos 91 dias, as tendências verificadas nos ensaios de 28 dias mantêm-se, registando-se menores amplitudes na variação dos coeficientes de difusão de cloretos dos vários betões.

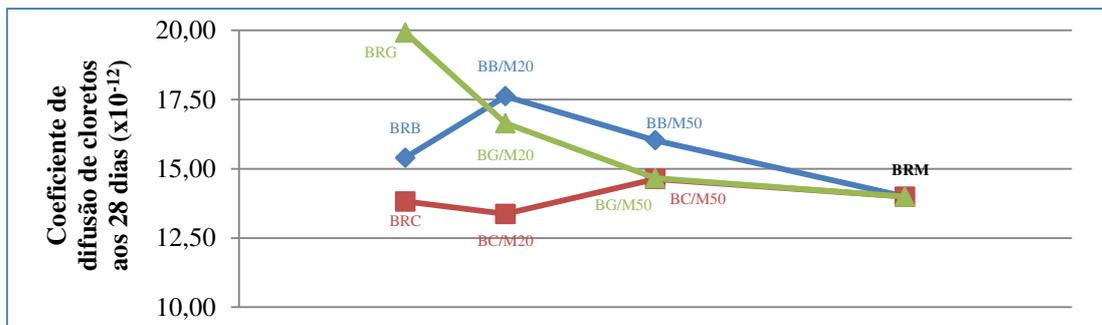


Figura 4.34 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias para os vários betões

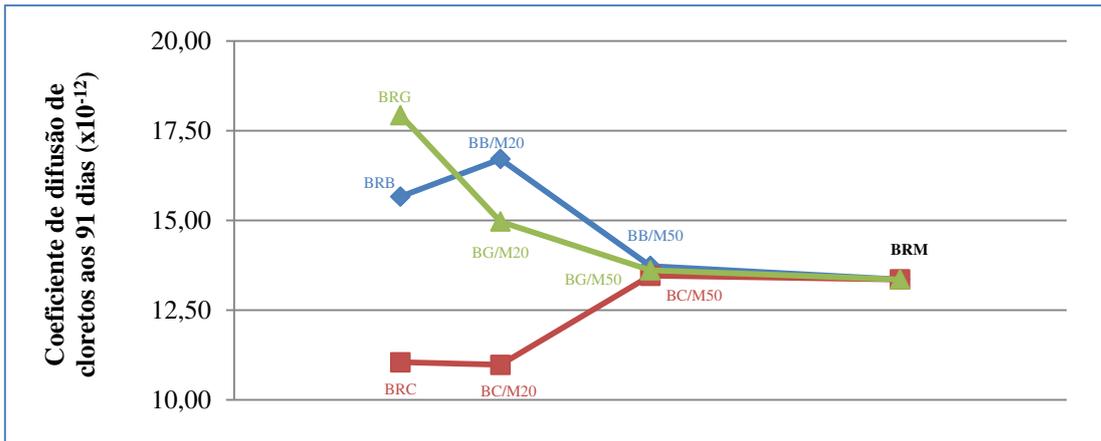


Figura 4.35 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias para os vários betões

Fazendo variar o valor do coeficiente de difusão de cloretos médio, com a gradual substituição de agregados finos primários por mármore, aos 28 e 91 dias, obtém-se a Figura 4.36.

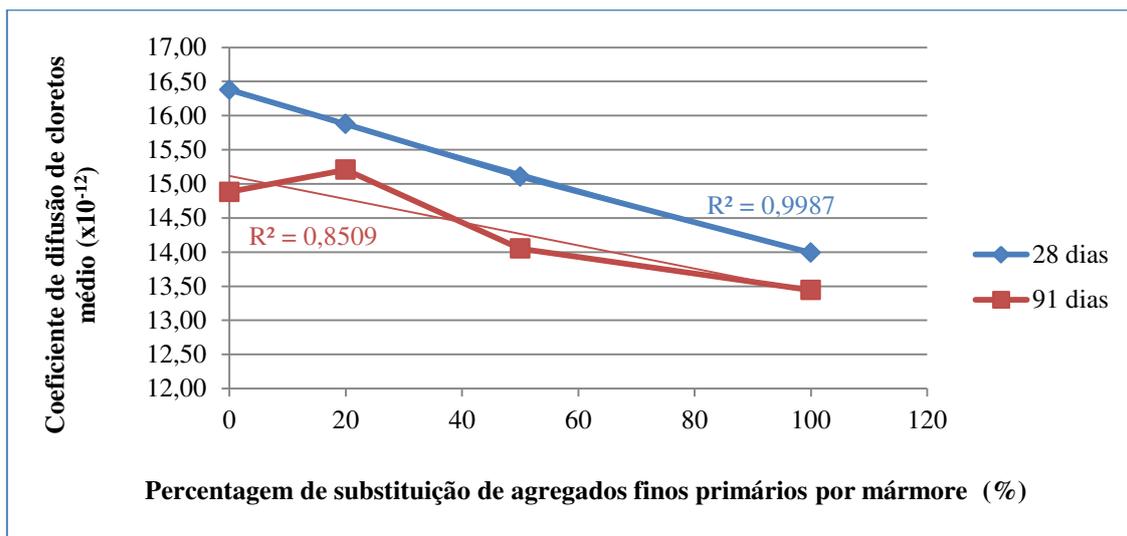


Figura 4.36 - Coeficiente de difusão de cloretos médio para diferentes percentagens de substituição de agregados finos primários por mármore

As aproximações lineares efetuadas na Figura 4.36 demonstram uma tendência consistente na variação do coeficiente de difusão de cloretos médio, concluindo-se que o mesmo diminui para períodos de cura do betão sucessivamente maiores, tal como referido por Bravo (2009) e Gesoğlu e Güneyisi (2007).

A comparação entre os resultados do coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias obtidos e os registados por André (2012) encontra-se representada na Figura 4.37. Uma vez que a contribuição dos agregados, no desempenho dos betões ao ataque de cloretos, varia de acordo

com as suas dimensões, é possível observar que nesse estudo a adição de agregados grossos de mármore provoca uma difusão de cloretos mais pronunciada. Este facto deve-se à baixa percentagem de alumina,  $Al_2O_3$ , presente no mármore. Este óxido beneficia a formação de aluminato tricálcico,  $C_3A$ , que fixa os iões cloreto, formando compostos insolúveis. Assim, com a redução de iões livres no betão, ocorre uma penetração inferior de cloretos e, conseqüentemente, menores coeficientes de difusão, tal como verificaram Missau (2004), Amrutha et al. (2011) e Uysal et al. (2012). Por sua vez, pelo facto de os agregados finos representarem um volume muito menor da mistura de betão, esta particularidade do mármore não se torna tão relevante, sendo a difusão de cloretos condicionada pela estrutura porosa criada no processo de cura do betão.

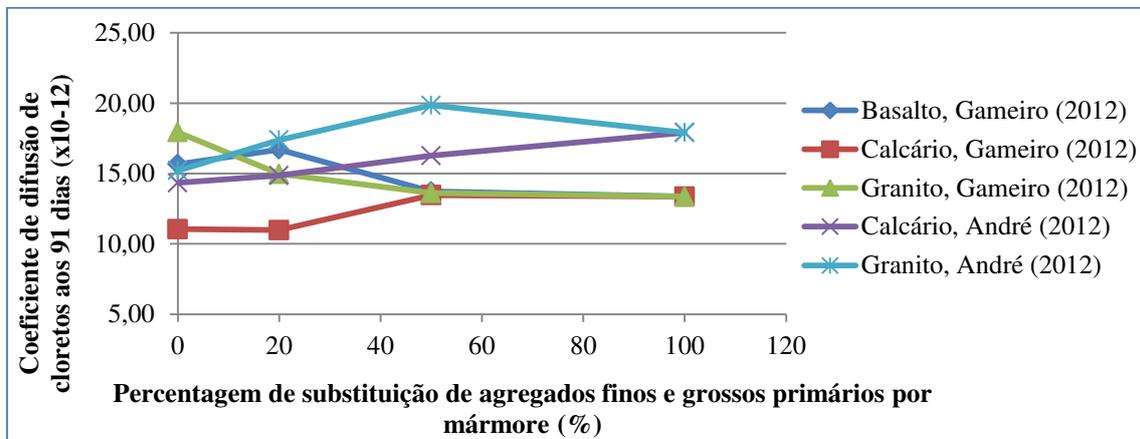


Figura 4.37 - Comparação de coeficientes de difusão de cloretos aos 91 dias em betões com substituição de agregados finos e grossos de mármore

A difusão de cloretos no interior do betão está relacionada com a estrutura porosa do mesmo. Assim, pela análise da Figura 4.38, conclui-se que esta dependência desenvolve-se de forma linear, em que para uma maior capacidade de absorção se propagam melhor os cloretos no interior do betão. Esta relação foi também registada por André (2012), na produção de betões com agregados grossos de mármore reciclado.

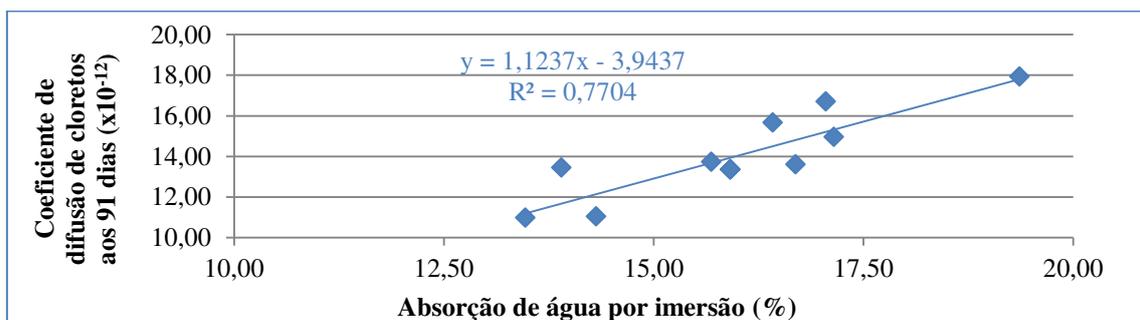


Figura 4.38 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a absorção de água por imersão

Outra relação analisada, devido à semelhança nas suas causas, foi entre a profundidade de carbonatação e o coeficiente de difusão de cloretos, aos 91 dias. Novamente, têm-se duas características de durabilidade que dependem essencialmente da permeabilidade do betão, registando-se uma relação exponencial de aproximação razoável entre as duas. A Figura 4.39 demonstra essa dependência, concluindo-se que o coeficiente de difusão de cloretos aumenta de acordo com o aumento da profundidade de carbonatação.

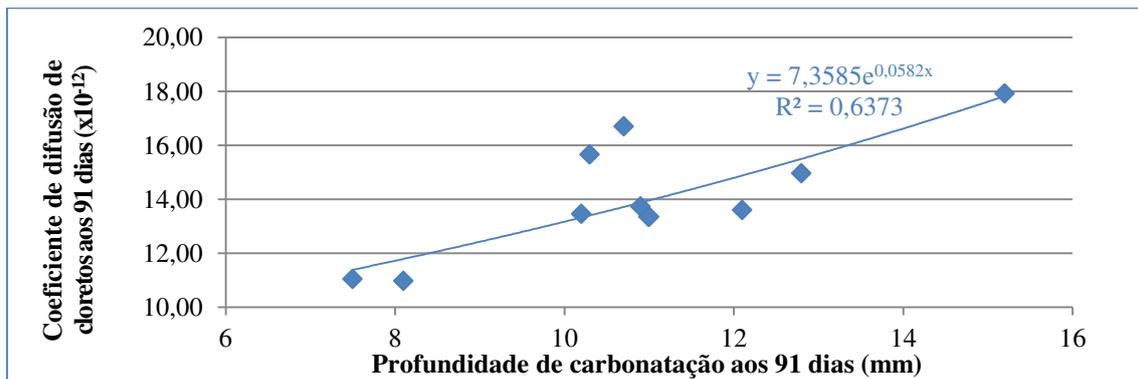


Figura 4.39 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a profundidade de carbonatação aos 91 dias

Foi também comparada a relação entre o coeficiente de difusão dos cloretos aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias dos vários betões, tal como demonstra a Figura 4.40. É possível observar que, de uma forma geral, para betões com maiores resistências à penetração de cloretos se constata maiores resistências à compressão. Contudo, a baixa expressividade desta relação, indicada pelo reduzido coeficiente de determinação, deve-se ao facto de os betões analisados terem diferentes agregados finos e as suas propriedades mecânicas estarem diretamente relacionadas com as propriedades mecânicas destes, tal como observado por Özturan and Çeçen (1997) e Zhou et al. (1995) onde se concluiu que quanto menos resistentes forem os agregados, menor será a resistência mecânica do betão.

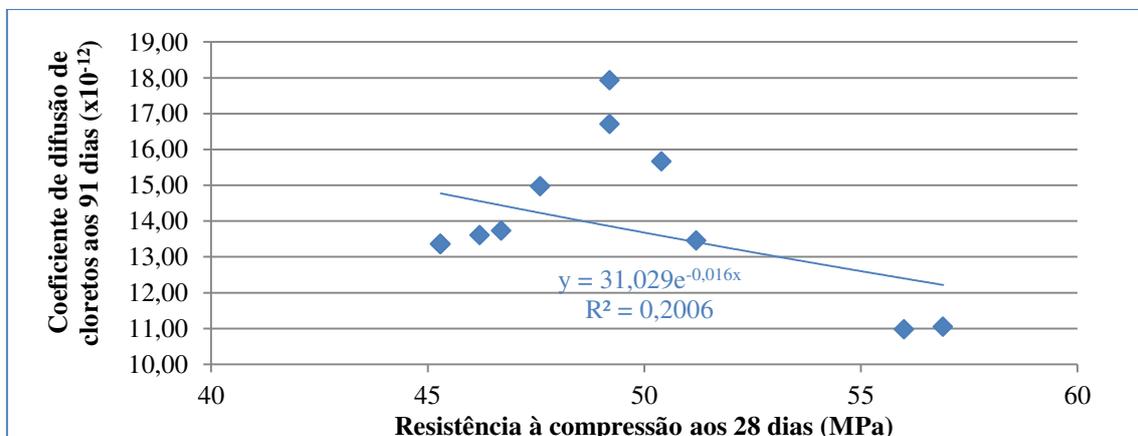


Figura 4.40 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias

### 4.4.6. Retração

De acordo com o subcapítulo 2.4.8, a retração é a diminuição das dimensões de elementos de betão, diferida no tempo, que pode conduzir à sua fissuração. Tal como especificado no subcapítulo 3.7.7, o ensaio de determinação da retração do betão no estado endurecido foi realizado em conformidade com a especificação LNEC E-398 (1993).

A retração é condicionada, essencialmente, pela relação água / cimento e características dos agregados. Estes dois parâmetros refletem a quantidade de água evaporável assim como a “elasticidade” da retração, respetivamente.

As Figuras 4.41 a 4.43 representam os dados obtidos no ensaio de retração, apresentados detalhadamente no Anexo L. Contudo, é de referir que ocorreram problemas de elevadas humidades na câmara seca inicialmente utilizada o que obrigou à transferência dos provetes para uma segunda câmara seca e a uma correção das leituras.

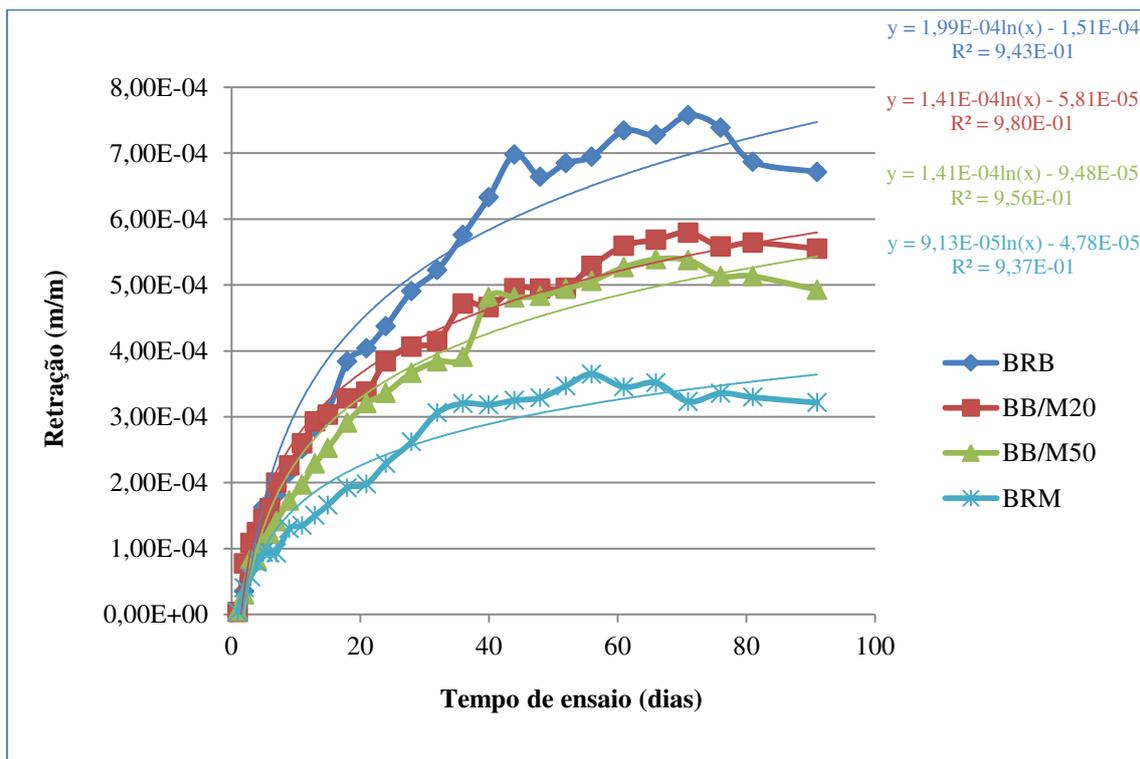


Figura 4.41 - Retração do conjunto de betões de basalto ao longo de 91 dias

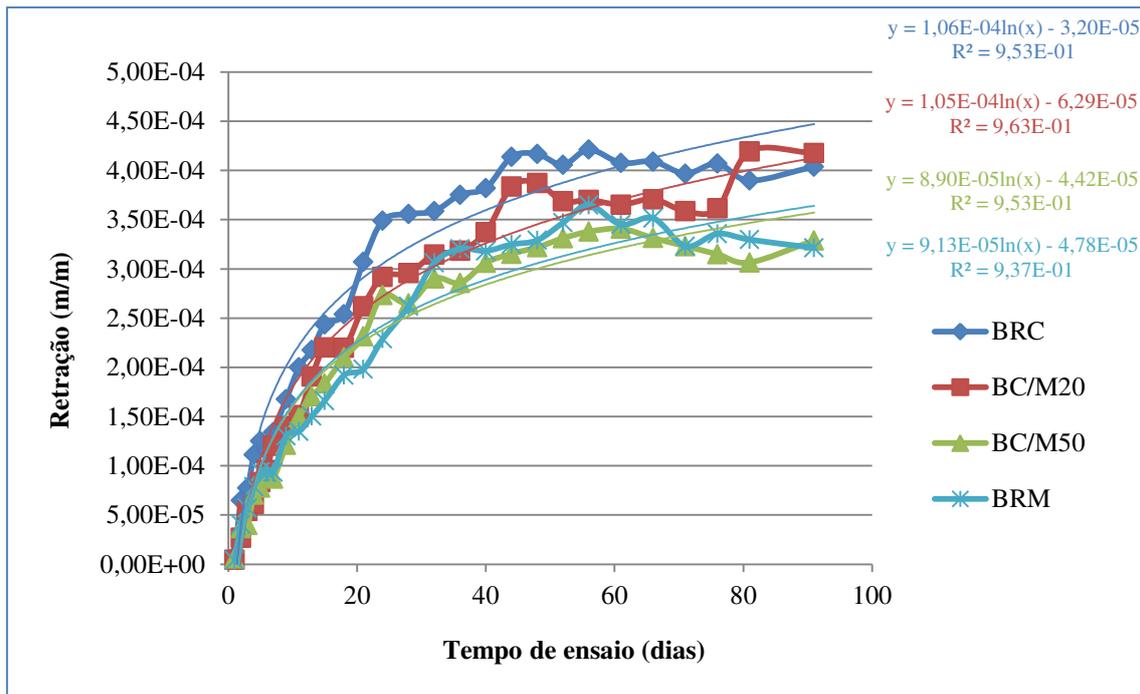


Figura 4.42 - Retração do conjunto de betões de areia de rio ao longo de 91 dias

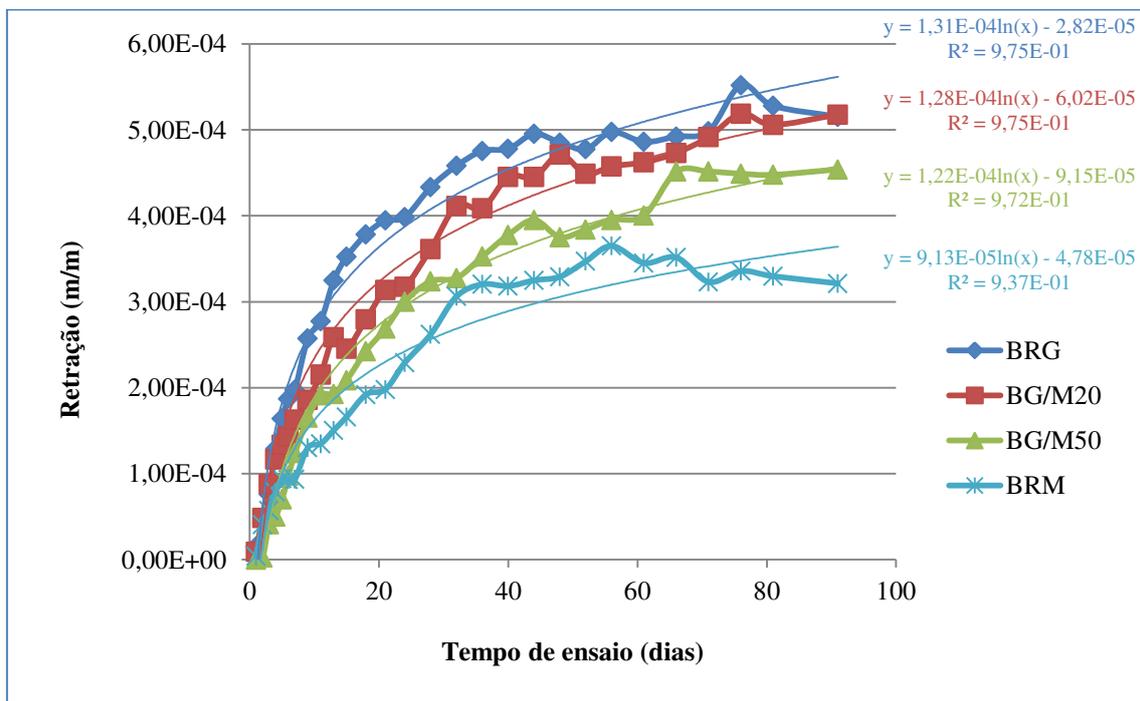


Figura 4.43 - Retração do conjunto de betões de granito ao longo de 91 dias

Pela análise das Figuras 4.41 a 4.43, observa-se que a introdução do mármore nos betões provoca uma quebra na retração dos mesmos ao longo do ensaio. Uma vez que a relação água /

cimento das misturas produzidas se manteve praticamente constante, seria de esperar que a baixa absorção de água do mármore, referida no subcapítulo 4.2.1, levaria a um aumento na retração devido à maior quantidade de água disponível na mistura. Contudo, tendo em conta que a porosidade dos agregados não é determinante na retração verificada no betão, a inclusão do mármore no betão provocou retrações menos pronunciadas nos provetes devendo-se à menor estrutura porosa da pasta cimentícia resultante da combinação dos agregados utilizados. Neste sentido, tendo em conta as características geométricas das partículas de mármore, obtiveram-se betões com melhores compacidades e uma menor quantidade de pasta cimentícia nos interstícios entre partículas, reduzindo por sua vez a estrutura porosa do betão. Assim, devido à dificuldade gerada para a libertação de água por evaporação, a retração processou-se de um modo mais lento, provocando, por sua vez, menores tensões de compressão no interior dos provetes. Pela análise dos ensaios efectuados, destacam-se os conjuntos de betão de basalto e granito, onde este fenómeno se demonstrou mais acentuado. Por outro lado, relativamente ao conjunto de betões com areia de rio, pelas suas semelhanças físicas com os agregados finos de mármore, face aos outros agregados, essa variação foi menos acentuada, gerando variações menos pronunciadas. Estes resultados experimentais estão de acordo com a investigação de Troxell et al. (1958), referida no subcapítulo 2.4.8, observando-se que os betões produzidos apresentam a mesma posição relativa em termos de retração. Não obstante, também os valores registados neste estudo se encontram dentro da ordem de grandeza dos obtidos por Troxell et al. (1958).

Através das Figuras 4.41 a 4.43, também se conclui que a retração ocorre de uma forma mais intensa nos primeiros 20 dias de cura, sendo que evolui segundo uma escala logarítmica.

Por outro lado, é possível deduzir que a gradual incorporação de agregados finos de mármore provoca uma diminuição linear da retração, tal como consta na Figura 4.44. Esta representa a variação da retração média para betões com as mesmas taxas de substituição de agregados finos.

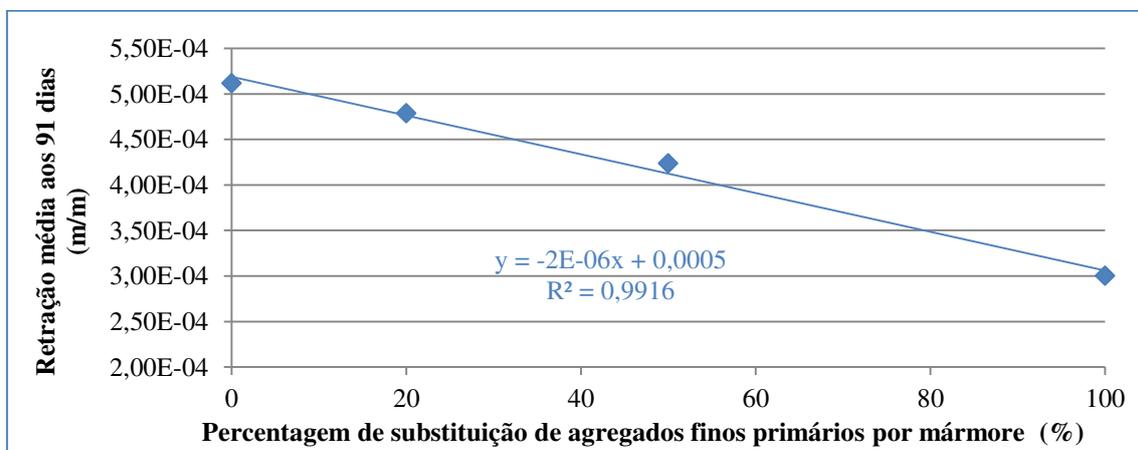


Figura 4.44 - Retração média após 91 dias de cura para diferentes percentagens de substituição de agregados finos

Snowdon e Edwards (1962) referem que é possível observar uma dependência entre a retração no betão e a absorção de água dos agregados que o compõem. Mais concretamente, verificaram que betões com agregados menos porosos correspondem a retrações de betões menos significativas. Neste sentido, a Figura 4.45 demonstra a relação constatada nesta investigação.

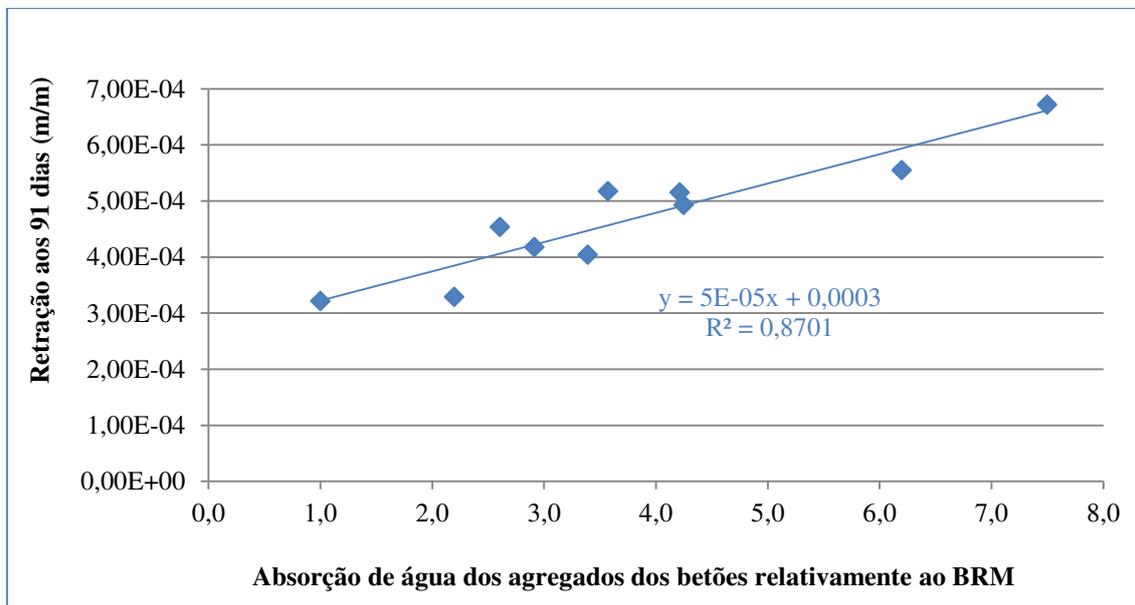


Figura 4.45 - Variação da retração dos betões em função do tipo de agregados da sua composição

Tal como se pode observar na Figura 4.45, os resultados experimentais vão ao encontro das conclusões de Snowdon e Edwards (1962), onde se obteve uma aproximação linear com um bom coeficiente de determinação. Nesta relação, o eixo das abcissas corresponde à absorção de água ponderada dos agregados dos vários betões relativamente aos agregados do betão de referência com a totalidade de agregados finos de mármore (com abcissa igual à unidade).

A Figura 4.46 realça a relação entre a absorção de água por imersão e a retração nos vários betões. Como é possível observar, existe alguma correlação entre estas propriedades, sendo que, para maiores absorções de água e subseqüentes maiores permeabilidades, os betões estudados apresentam maior retração aos 91 dias de cura. Isto deve-se ao facto de a permeabilidade no betão resultar da evaporação do excedente de água no seu interior. Assim, para uma evaporação mais acentuada, resulta uma retração mais pronunciada ao longo do processo de cura, como se pode verificar na Figura 4.46. Ainda assim, a correlação determinada não pode ser considerada válida devido ao reduzido coeficiente de determinação que esta apresenta.

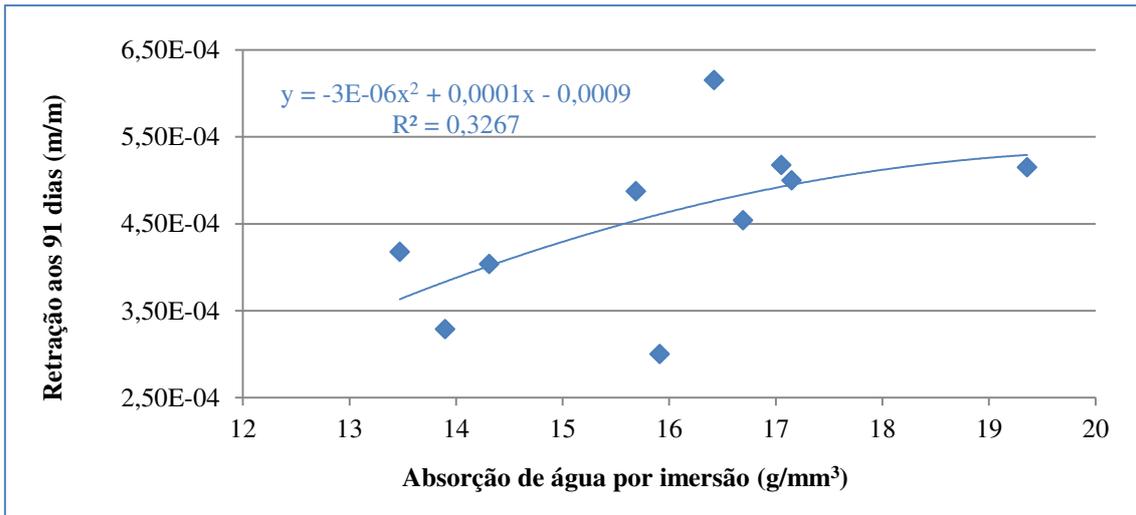


Figura 4.46 - Relação entre a retração aos 91 dias de ensaio e a absorção de água por imersão nos vários betões

Relacionando a retração do betão com a resistência do mesmo à compressão constatou-se uma tendência assinalável, tal como demonstra a Figura 4.47. Assim, deduz-se desta investigação que a retração é condicionada pelas resistências dos constituintes da mistura de betão, sendo afetada pela ligação dos agregados e da pasta cimentícia.

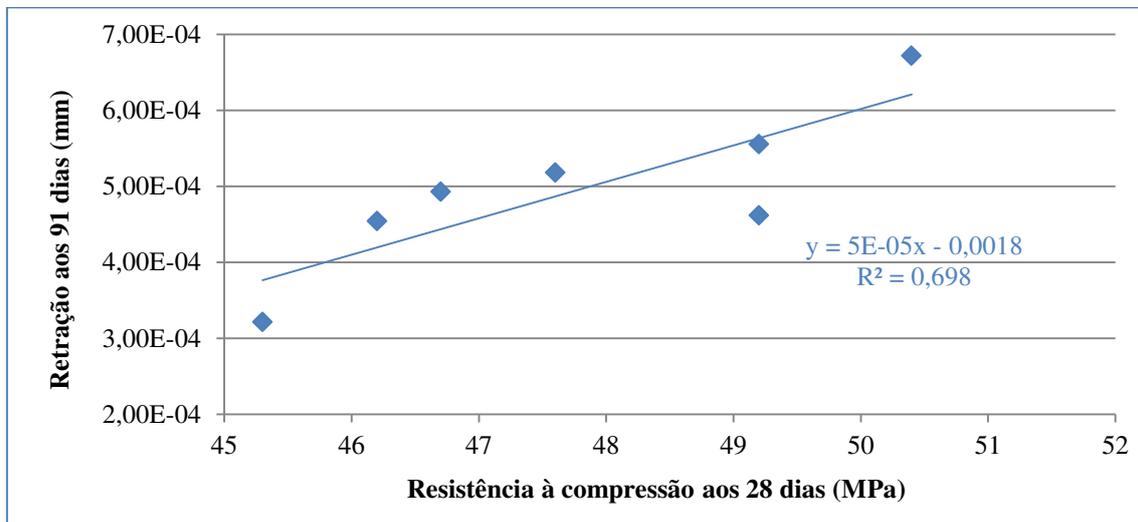


Figura 4.47 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à compressão aos 28 dias

Contrariamente à tendência verificada para a resistência à compressão, na relação entre a retração dos betões e a sua resistência à carbonatação verificou-se uma fraca dependência de resultados. Ainda assim, analisando a Figura 4.48, pode-se observar uma ligeira tendência no aumento da frente de carbonatação com o aumento da retração no betão. De facto, seria esta a

tendência expetável, uma vez que a frente de carbonatação aumenta com a existência de uma rede porosa maior, e consequente retração mais pronunciada.

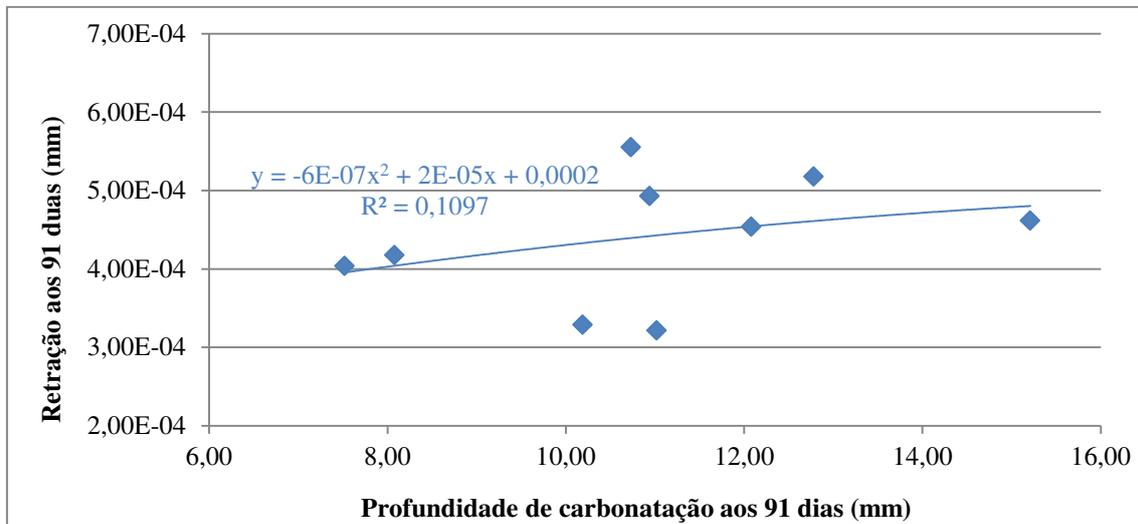


Figura 4.48 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à carbonatação aos 91 dias

Finalmente, relacionando a retração e a penetração de cloretos, verifica-se que os fenómenos apresentam alguma conformidade com as características expetáveis dos betões. De facto, observando a Figura 4.49, verifica-se que o aumento da retração é acompanhado pelo aumento na profundidade de penetração de cloretos, evidenciando a relação da permeabilidade do betão e a sua resistência à penetração de cloretos. Ainda assim, efetuando uma aproximação polinomial à tendência verificada, constata-se que o coeficiente de determinação é reduzido (0,38) e, dessa forma, a aproximação não é considerada válida para descrever o fenómeno ocorrido.

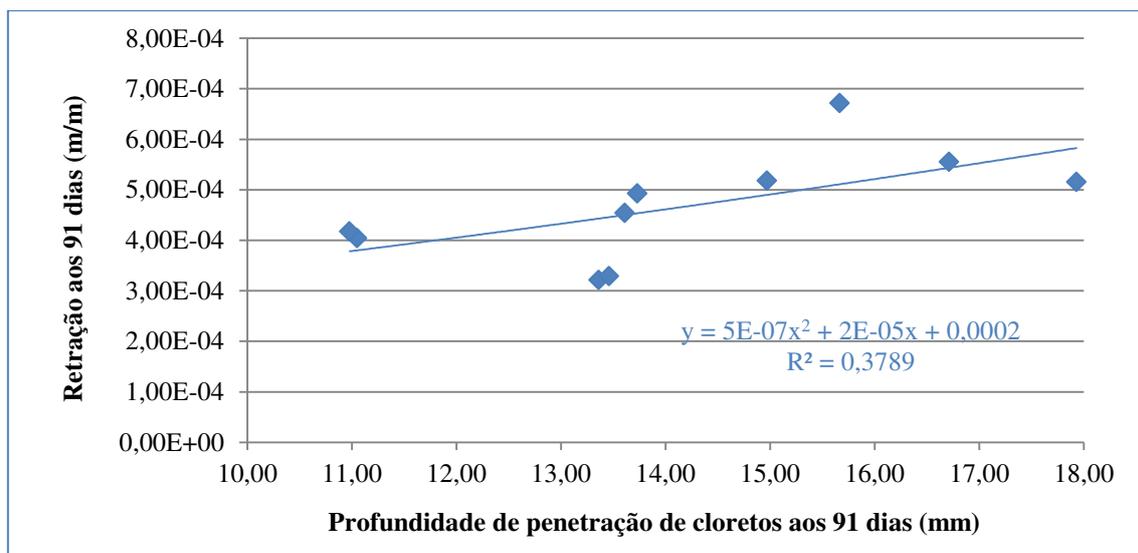


Figura 4.49 - Relação entre a retração aos 91 dias e a resistência à penetração de cloretos aos 91 dias

## 4.5. Conclusões

Apresentados os resultados obtidos ao longo da campanha experimental, encontram-se devidamente caracterizadas as propriedades dos agregados utilizados, primários e secundários, do betão no estado fresco e no estado endurecido. Neste subcapítulo, pretende-se então fazer uma compilação das conclusões mais importantes a que se chegou, associadas aos betões com progressivas substituições de agregados finos primários pelo secundário, o mármore.

### 4.5.1. Propriedades dos agregados

Com os resultados dos ensaios realizados, descritos no subcapítulo 4.2, concluiu-se que os resíduos provenientes da indústria de mármore têm características semelhantes aos restantes agregados utilizados nesta dissertação. Ainda assim, registou-se um valor de massa volúmica, para o mármore utilizado, inferior à dos agregados finos de basalto e superior à de granito e areia de rio. Em conformidade com estes resultados, observou-se a uma relação semelhante nos valores das baridades dos vários agregados.

Quanto ao volume de vazios, registaram-se valores compreendidos entre 30 e 50% do volume total para os agregados utilizados, sendo a sequência de mármore, basalto, granito e areia de rio, a que correspondeu ao aumento da percentagem do volume de vazios. Por sua vez, o menor valor para a absorção de água às 24 horas também se verificou nos agregados finos reciclados de mármore.

### 4.5.2. Propriedades do betão no estado fresco

Avaliando os resultados obtidos no subcapítulo 4.3, comprovaram-se as características previstas pela bibliografia investigada e referida no capítulo 2.

Do ponto de vista da trabalhabilidade, tal como sugerido por vários autores, obteve-se um pior comportamento nos betões com maiores taxas de substituição de agregados finos primários por mármore. Como tal, controlou-se este parâmetro com variações na relação água / cimento, tendo em conta que esta foi ligeiramente aumentada para maiores quantidades de resíduos de mármore na mistura.

Relativamente à massa volúmica, obtiveram-se pequenas variações associadas à incorporação de mármore, devendo-se essencialmente à semelhança dos valores das massas volúmicas dos agregados. A ligeira variação nesta propriedade foi definida pela relação individual entre as massas volúmicas de cada constituinte dos betões.

#### 4.5.3. Propriedades do betão no estado endurecido

Analisando os resultados obtidos no subcapítulo 4.4, verificou-se que as características de durabilidade dos betões produzidos têm uma forte relação com a sua permeabilidade. Assim, de um modo geral, para melhorias na permeabilidade, isto é, menor estrutura porosa, obtiveram-se melhorias nas várias características estudadas.

Como a resistência à compressão está diretamente relacionada com as propriedades de durabilidade do betão, os resultados deste ensaio também foram considerados. Com estes, comprovou-se que o aumento da incorporação de agregados finos reciclados de mármore provoca uma redução progressiva na resistência à compressão do betão. Contudo, a redução obtida não foi muito acentuada, considerando-se que esta não põe em causa o uso do mármore no betão.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, observou-se uma redução na água absorvida para as sucessivas incorporações de mármore no conjunto de betões de basalto e granito. Porém, no conjunto de betões com areia de rio, a presença do mármore não alterou substancialmente a capilaridade, registando-se alguma estabilidade nesta propriedade. Outro aspeto da capilaridade, a altura de ascensão capilar, revelou-se decrescente para o conjunto de betões de basalto, constante no caso do granito e crescente para a areia de rio. Concluiu-se que as tendências verificadas se deveram ao arranjo espacial dos agregados finos na mistura efetuada, impostas pela sua forma e textura.

Considerada a característica de maior importância investigada, a absorção de água por imersão revelou-se decrescente nos betões com agregados finos de granito, constante para betões com basalto e crescente no caso da areia de rio, para progressivas incorporações de mármore. Novamente, a obtenção destes resultados deveu-se às características físicas dos agregados finos utilizados, com influência direta na compacidade da mistura, provocando variações significativas na retenção de ar no seu interior devido à maior ou menor quantidade de água disponível para evaporação.

Associado à permeabilidade, o ensaio de carbonatação tornou evidente o efeito benéfico da substituição de agregados finos de granito por mármore. Relativamente ao conjunto de betões de basalto e de areia de rio, verificou-se que, no primeiro caso, o mármore não alterou as características do betão, ao invés do segundo onde a adição de mármore piorou as características de resistência à carbonatação do betão. Neste sentido, notou-se uma estreita relação entre a profundidade de carbonatação e a absorção de água por imersão e, apesar de com um maior grau de incerteza, um aumento de profundidade de carbonatação para menores resistências à compressão.

Relativamente à penetração de cloretos, obtiveram-se resultados conformes com a porosidade do betão. Por outras palavras, concluiu-se que a permeabilidade no betão é o fator que condiciona a penetração de gases ou líquidos no interior do mesmo, deteriorando-o de acordo com os mecanismos estudados. Como tal, obtiveram-se maiores valores de profundidade de penetração de cloretos para maiores valores de permeabilidade, tal como esperado. Dos conjuntos de betões estudados, verificou-se uma redução no coeficiente de difusão de cloretos no conjunto de betões de agregados finos de granito e basalto, contrariamente ao conjunto de betões de agregados finos de areia de rio, onde se constatou um aumento neste parâmetro. Não obstante, estimou-se uma redução no coeficiente de difusão de cloretos médio dos betões com o aumento da percentagem de substituição de agregados finos e registou-se que ocorre um aumento no coeficiente de difusão de cloretos proporcional ao aumento na profundidade de carbonatação nos betões.

Finalmente, através do ensaio de retração, concluiu-se que os agregados finos de mármore são uma adição benéfica nesta característica, uma vez que a sua inclusão faz com que se reduza a estrutura porosa da pasta cimentícia. Concluiu-se que este fenómeno se deve ao aumento da compacidade da mistura, refletindo-se na menor quantidade de pasta cimentícia existente nos interstícios entre agregados, e consequente restrição na retração.

Em suma, verificou-se que, sendo a permeabilidade a propriedade de o betão se deixar atravessar por gases e líquidos, atuando com ou sem pressão e com ou sem substâncias em solução ou suspensão, a sua importância reflete-se em todos os fenómenos que condicionam a durabilidade dos betões. Assim, pelos resultados obtidos no programa experimental deste estudo, registaram-se mais-valias na utilização de agregados finos de mármore em diversos ensaios e, conseqüentemente, conclui-se que se trata de um agregado com viabilidade de utilização para fins de durabilidade.

## 5. Conclusões

Neste capítulo, pretende-se apresentar as conclusões resultantes do programa experimental, de forma a caracterizar a viabilidade de utilização de agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore em betão. Apresenta-se também um conjunto de propostas de desenvolvimento futuro, com temas de carácter semelhante ao tema desta dissertação assim como de dúvidas referentes a conceitos utilizados mas ainda pouco explorados.

### 5.1. Considerações finais

Tratando-se de um setor com inúmeras repercussões no desenvolvimento sustentável, o setor das rochas ornamentais é fundamental na indústria extrativa e, conseqüentemente, na economia nacional. Contudo, a quantidade de resíduos gerados nesta atividade é enorme e incontrolável. De acordo com Valadares (2009), a pressão exercida nas diversas indústrias tem vindo a crescer de forma a colmatar processos de fabrico poluentes e melhorar os tratamentos de produtos em fim de vida.

Os resíduos de mármore utilizados nesta dissertação tiveram origem na região do Alentejo, mais concretamente no anticlinal de Estremoz, cuja relevância no contexto nacional se traduz num contributo superior a um quarto do valor global da produção das pedreiras do país. A necessidade do aumento da exploração de rochas ornamentais registada ao longo dos últimos anos tem contribuído para a extração de blocos com maiores impurezas e afloramentos de menor qualidade, aumentando consideravelmente o volume de resíduos nos aterros. Assim, nesta dissertação, pretendeu-se reutilizar os resíduos de mármore acumulados, resultantes da indústria de extração, sendo que, atualmente, essa necessidade se tem revelado crescente.

Dos vários setores associados à reutilização de resíduos de rochas ornamentais destaca-se a indústria da construção uma vez que, devido à sua dimensão e variabilidade de aplicações, se trata do melhor destino para esses detritos. Neste domínio, destaca-se a sua utilização em pavimentos rodoviários, túneis e barragens. Desta forma, a incorporação de agregados finos de mármore em betões permite ampliar o leque de soluções para a reutilização de resíduos de rochas ornamentais no setor da construção civil. Tendo em conta o fim a que se destinam, é fundamental o conhecimento das propriedades dos resíduos utilizados, assim como do produto final produzido, para avaliar a sua viabilidade de utilização. Mais concretamente, torna-se

necessária uma avaliação em termos de durabilidade e características mecânicas de betões com agregados finos de mármore provenientes da indústria de extração, sendo que nesta dissertação se caracterizou o comportamento do betão em termos de durabilidade.

## 5.2. Conclusões gerais

Ao invés do comportamento mecânico, a bibliografia existente relativamente ao desempenho em termos de durabilidade de betões produzidos com agregados finos de mármore revelou-se bastante reduzida. Adicionalmente, constatou-se que a consulta de bibliografia internacional permitiu a obtenção de informação mais consistente e consolidada neste domínio. Como tal, esta dissertação pretende contribuir para uma melhor compreensão e uniformização do conhecimento do uso de agregados finos de mármore proveniente de resíduos da indústria de mármore em betão, de forma a suprir algumas lacunas existentes.

Visto tratar-se de uma investigação sobre o desempenho de betões em termos de durabilidade, optou-se pela realização dos ensaios que melhor caracterizem este âmbito de estudo. Neste sentido, e de acordo com as conclusões apresentadas nos subcapítulos que se seguem, a distribuição espacial dos componentes, composição e dimensão e propriedades da estrutura porosa foram os fatores que mais condicionaram o desempenho do betão ao longo do programa experimental.

### 5.2.1. Propriedades dos agregados

Através dos resultados obtidos, concluiu-se que as características dos agregados finos variaram significativamente de acordo com os diversos ensaios realizados.

A absorção de água registada revelou-se mais acentuada nos agregados finos de basalto e mais reduzida para os de mármore, com valores de 1,05 e 0,14%, respetivamente. A variação máxima da massa volúmica foi avaliada em 14,8%, sendo que o granito obteve o valor mais baixo e o basalto o mais elevado. Quanto à baridade, observou-se uma variação total de 20,5% entre os agregados finos de areia fina de rio e basalto e, em termos de volume de vazios, registou-se o valor mais elevado para a areia grossa de rio, com 40,7%, e o valor mais reduzido para os agregados finos de mármore, com 33,5%. No ensaio de desgaste de Los Angeles, concluiu-se que o desgaste diminuiu de acordo com a diminuição da dimensão dos agregados. Apesar de não

se ter efetuado o ensaio de Los Angeles ao mármore, segundo André (2012), verificou-se que, de entre os agregados utilizados, este é o que possui maior resistência ao desgaste. Por sua vez, na análise do índice de forma, registou-se que para agregados grossos de menores dimensões se obtêm maiores valores deste parâmetro.

### 5.2.1. Propriedades do betão no estado fresco

O primeiro aspeto considerado nas propriedades do betão no estado fresco foi a trabalhabilidade. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a introdução de agregados secundários de mármore afetou negativamente este parâmetro, tal como seria de esperar de acordo com a bibliografia existente. Esta conclusão resulta do facto de, no presente estudo, se ter mantido uma trabalhabilidade constante, definida pela classe de consistência S3, e de se ter calibrado a mesma com a variação da relação água / cimento. Uma vez que a trabalhabilidade se revelou decrescente com a gradual incorporação de agregados finos de mármore, tornou-se evidente uma maior necessidade de água de forma a mantê-la constante.

Relativamente à massa volúmica do betão no estado fresco, observaram-se variações residuais nos vários betões produzidos, devidas à introdução de agregados finos de mármore. Esta tendência revelou-se conforme com a ordem de grandeza das massas volúmicas dos agregados finos usados nas composições, concluindo-se que a massa volúmica dos betões se estabelece de acordo com as propriedades dos seus componentes. A maior variação da massa volúmica no estado fresco registou-se no conjunto de betões com agregados finos de areia de rio, com um aumento de 1,32% obtido pela substituição total dos agregados finos pelos resíduos de mármore.

### 5.2.2. Betão no estado endurecido

Os ensaios realizados ao betão no estado endurecido foram a resistência à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade, resistência à carbonatação e penetração de cloretos e retração.

No ensaio mecânico de resistência à compressão, verificou-se que o aumento da percentagem de substituição de agregados finos primários por secundários de mármore provocou uma diminuição na resistência dos betões. Assim, concluiu-se que, de um modo geral, a adição de mármore não é benéfica em betões com exigências estruturais. Dos vários conjuntos

investigados, o conjunto de betões com agregados finos de areia de rio foi o que registou uma quebra mais acentuada, com um valor de 20,4% aos 28 dias de idade, devendo-se essencialmente à baixa relação água / cimento do BRC relativamente ao BRM. Por outro lado, observou-se que, no conjunto de betões com granito, a quebra da resistência à compressão foi bastante reduzida devido às semelhanças físicas das partículas de granito e mármore. Neste ensaio, concluiu-se também que as tendências de evolução ao longo dos dias de cura da resistência à compressão dos betões de referência corresponderam aos valores esperados em betões convencionais. Finalmente, constatou-se que a incorporação de agregados finos de mármore provocou as tendências verificadas nos estudos de outros investigadores.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, concluiu-se que a substituição de agregados finos primários por secundários de mármore no betão reduz significativamente a quantidade de água absorvida. Mais concretamente, observou-se uma diminuição de absorção de água por capilaridade média, nos vários conjuntos de betões, de 30,1, 17,9 e 14,9% referentes à substituição de 20, 50 e 100% de agregados finos primários por secundários de mármore, respetivamente. Assim, concluiu-se que o mármore tem um efeito benéfico nesta propriedade, se bem que, para substituições superiores a 50%, não seja tão evidente, devido ao aumento da área de superfície específica de materiais finos e conseqüente aumento do tamanho médio dos poros. Relativamente à altura de ascensão capilar, concluiu-se que esta se processa de forma mais acentuada nas primeiras horas de ensaio e que a sua maior ou menor ocorrência se deve à quantidade de pasta cimentícia nos interstícios entre partículas. Como tal, constatou-se que esta propriedade depende do arranjo espacial das partículas, definido essencialmente pela sua forma e textura. Por fim, concluiu-se que o coeficiente de capilaridade tem tendência a diminuir para percentagens superiores de substituição de agregados finos primários por secundários de mármore, sendo que essa variação é menor para durações superiores do ensaio. Os resultados obtidos nesta investigação demonstraram coerência e consistência com outras campanhas experimentais no que diz respeito à absorção de água por capilaridade.

Através do ensaio de absorção de água por imersão, concluiu-se que a rugosidade dos agregados condiciona consideravelmente o comportamento global do betão na absorção de água. De acordo com outras investigações, demonstrou-se neste estudo que a evolução dos resultados obtidos se deveu à compacidade das misturas. Assim, o conjunto de betões com agregados finos de granito foi o que registou uma quebra de absorção de água superior e, contrariamente, o conjunto de betões com agregados finos de areia de rio aumentou a absorção por imersão com o aumento da taxa de substituição. Concluiu-se também que, de um modo geral, a absorção de água média por imersão é decrescente para maiores percentagens de substituição, sendo mais representativa até aos 50%. Esta tendência já seria de prever atendendo também ao contributo

da reduzida absorção de água dos agregados finos de mármore. Finalmente, provou-se a existência de uma correlação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão do betão, verificando-se que o aumento de uma grandeza reflete-se na diminuição da outra, novamente de acordo com os resultados das investigações existentes neste domínio.

Pela análise do comportamento dos vários conjuntos de betão à carbonatação, concluiu-se que os agregados finos de mármore têm efeitos benéficos quando substituem os agregados finos de granito. Contudo, a mesma substituição no conjunto de betões de agregados finos de basalto e areia de rio revelou-se ligeiramente e consideravelmente prejudicial, respetivamente. Destes resultados concluiu-se que o aumento da resistência de um betão à carbonatação está relacionado com a sua estrutura porosa, sendo esta medida indiretamente pelo ensaio de absorção por imersão, verificando-se nos resultados uma coerência com a forma como se processa o mecanismo de carbonatação. Não obstante, também se concluiu que a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão estão relacionadas, sendo que betões com uma carbonatação mais acentuada apresentam menores resistências à compressão, e vice-versa, tal como apontado pelos estudos de outros autores.

Após o ensaio de resistência à penetração de cloretos do betão, concluiu-se que esta propriedade, tal como a resistência à carbonatação e a absorção de água por imersão, é condicionada pela sua porosidade. Nos ensaios realizados, constatou-se, aos 91 dias, uma diminuição no coeficiente de difusão de cloretos no conjunto dos betões com agregados finos de basalto e granito e um aumento do mesmo parâmetro para o conjunto de betões de areia de rio. Esta tendência verificou-se igualmente aos 28 dias mas de uma forma menos acentuada. Constatou-se também com este ensaio que o coeficiente de difusão de cloretos médio, para ambas as idades de estudo, tende a decrescer. Tal como verificado noutras propriedades, o coeficiente de difusão de cloretos relaciona-se com a absorção de água por imersão, concluindo-se que estes parâmetros dependem linearmente um do outro. Assim, para maiores valores de absorção por imersão, registaram-se betões com maior suscetibilidade à penetração de cloretos. Não obstante, uma relação exponencial entre o coeficiente de penetração de cloretos e a profundidade de carbonatação também se demonstrou consistente. Neste sentido, registaram-se valores superiores de penetração de cloretos em betões com menor resistência à carbonatação, e vice-versa. Relativamente aos estudos existentes, os valores obtidos demonstraram-se unânimes e coerentes com as propriedades do betão que se relacionam com o fenómeno de penetração de cloretos.

No ensaio de retração, constatou-se que a influência da natureza pétreia é condicionante para a retração do betão. Este fenómeno foi verificado pela diminuição generalizada das retrações nos betões com a substituição dos seus agregados de referência por agregados finos de mármore. Neste sentido, concluiu-se que a geometria do mármore contribui significativamente para a

produção de misturas com compacidades mais elevadas e, por sua vez, para uma distribuição mais eficiente da pasta cimentícia na ligação dos agregados, resultando em estruturas porosas de diâmetros inferiores e assim retrações menos pronunciadas. Como tal, concluiu-se que o conjunto de betões de basalto e granito são os que evidenciam mais este fenómeno, contrariamente ao conjunto de betões com agregados finos de areia de rio, em que a retração apresenta menores variações. Nesta investigação, constatou-se também que a retração média aos 91 dias diminui com o aumento da percentagem de substituição de agregados finos e que, para maiores valores de absorção de água no betão, se obtêm maiores retrações. Não obstante, das várias relações investigadas, concluiu-se que a profundidade de penetração de cloretos é a que apresenta uma maior conformidade com a retração. Assim, verificou-se que é mais elevada em betões com maiores retrações, fenómeno que resulta do maior diâmetro dos poros existentes no interior do betão.

De forma a sintetizar os valores obtidos ao longo deste trabalho, as Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 representam os resultados dos ensaios efetuados aos agregados, as propriedades do betão no estado fresco e as propriedades do betão no estado endurecido, respetivamente. Nestas, optou-se por colocar os valores dos agregados de mármore (Tabela 5.1) ou do BRM (Tabela 5.2 e 5.3), e as variações, em percentagem, dos outros elementos relativamente a estes

**Tabela 5.1 - Variação em percentagem das propriedades dos agregados relativamente ao mármore**

Propriedades dos agregados	Agregados finos				Agregados grossos			
	Basalto	Areia de rio		Mármore	Granito	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2
		Fina	Grossa					
Absorção de água	650,00	42,86	435,71	0,14%	321,43	1928,57	828,57	971,43
Massa volúmica	5,07	-6,00	-3,13	2684 kg/m <sup>3</sup>	-8,08	-7,27	-2,38	-1,45
Baridade	3,03	-14,46	-13,57	1784 kg/m <sup>3</sup>	-12,56	-24,10	-23,99	-23,60
Volume de vazios	3,88	17,91	21,49	33,50%	9,85	36,12	43,88	42,39

**Tabela 5.2 - Variação percentual das propriedades do betão no estado fresco relativamente ao BRM**

Propriedades do betão fresco	Abaixamento do cone de Abrams	Relação a / c	Massa volúmica
BRB	-16,30	1,85	1,04
BB/M20	5,93	1,85	0,08
BB/M50	5,93	3,70	-0,10
BRM	135 mm	0,54	2387,6 kg/m <sup>3</sup>
BRC	-1,48	-9,26	-1,31
BC/M20	-5,93	-7,41	-0,25
BC/M50	-2,22	-7,41	-0,14
BRG	-5,93	-1,85	-1,09
BG/M20	-14,07	1,85	-1,14
BG/M50	-3,70	3,70	-0,27

Tabela 5.3 - Variação percentual das propriedades do betão no estado endurecido relativamente ao BRM

Propriedades do betão endurecido	Resistência à compressão (28 dias)	Capilaridade (72 horas)	Absorção por imersão	Carbonatação (91 dias)	Coef. difusão de cloretos (91 dias)	Retração aos 90 dias
BRB	11,26	47,5	3,14	-6,36	31,52	108,96
BB/M20	8,61	-7,5	7,55	-2,73	50,24	72,77
BB/M50	3,09	9,0625	-1,26	-0,91	42,24	53,32
BRM	45,3 MPa	3,20E-03 g/mm <sup>3</sup>	11,20%	11 mm	6,25E-12	3,21E-4 m/m
BRC	25,61	-5,9375	-10,06	-31,82	-7,68	25,68
BC/M20	23,62	-22,8125	-15,09	-26,36	-27,36	29,97
BC/M50	13,02	-5	-12,58	-7,27	4,16	2,34
BRG	8,61	22,8125	22,01	38,18	80,48	60,32
BG/M20	5,08	-20	7,55	16,36	26,40	61,09
BG/M50	1,99	-12,1875	5,03	10,00	-9,44	41,25

Nas Tabelas 5.1 a 5.3, a cor verde indica que o respetivo tipo de agregado ou betão tem um valor da característica em causa melhor do que o agregado de mármore ou o BRM, sendo que no caso de se verificar o contrário se utiliza a cor vermelha. Desta forma, pela predominância de células vermelhas nas propriedades de absorção por imersão, coeficiente de difusão de cloretos e retração, conclui-se que estas propriedades são as que mais podem beneficiar com os agregados finos de mármore.

De acordo com as análises efetuadas, apresenta-se como conclusão geral deste trabalho que a incorporação de agregados finos de mármore produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria de mármore em betão se revelou benéfica em algumas características. Não obstante, concluiu-se que, nas características onde a incorporação de mármore apresenta piores resultados, estes não são insatisfatórios, não comprometendo de forma significativa a durabilidade do betão estrutural produzido.

### 5.3. Propostas de desenvolvimento futuro

Com este estudo, pretendeu-se aproximar a ideia da reutilização dos resíduos provenientes da indústria do mármore à realidade. Assim, espera-se ter contribuído, de uma forma rápida e fundamentada, para a concretização deste projeto, tendo em vista a extração e exploração sustentável dos recursos naturais.

Ainda assim, ao longo da investigação realizada, surgiram temas e conceitos que do ponto de vista técnico suscitaram dúvidas e alguma curiosidade. Desta forma, no sentido de proceder a

uma caracterização pormenorizada e aprofundada deste projeto, surgem os seguintes temas a desenvolver futuramente:

- análise físico-química dos mármore do anticlinal de Estremoz;
- análise do impacto económico resultante da utilização dos resíduos de mármore;
- desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore com superplastificantes e adições;
- desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados finos e grossos provenientes de resíduos da indústria do mármore;
- desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados provenientes de resíduos da indústria do mármore em diferentes ambientes de cura;
- desempenho em termos térmicos de betões com incorporação de agregados provenientes de resíduos da indústria do mármore;
- desempenho em termos acústicos de betões com incorporação de agregados provenientes de resíduos da indústria do mármore;
- desempenho de betões com incorporação de agregados provenientes de resíduos da indústria do mármore à fadiga, resistência ao impacto, fogo, ciclos gelo-degelo e reações alcalis-sílica;
- desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de pó de mármore provenientes de resíduos da indústria do mármore.

## Bibliografia

**AEP - Associação Empresarial de Portugal (2003)** - Rochas ornamentais. AEP/Departamento de estudos e desenvolvimento;

**Aïtcin, P.-C. (1998)** - High-performance concrete. Modern concrete technology 5, E. & F.N. Spon, London and New York;

**Aïtcin, P.-C. (2003)** - The durability characteristics of high performance concrete: a review. Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issues 4-5, pp. 409-420;

**Akbulut, H., Gürer, C. (2007)** - Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. Building and Environment, Volume 42, Issue 5, pp. 1921-1930;

**Alyamaç, K. Esat, Ince, Ragip (2008)** - A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, pp. 1201-1210;

**Amrutha, Nayak, G., Narasimhan, M., Rajeeva, S. V. (2011)** - Chloride-ion impermeability of self-compacting high-volume fly ash concrete mixes. International Journal of Civil & Environmental Engineering, Volume 11, Issue 4, pp. 29-35;

**André, A. P. (2012)** - Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Aruntaş, H. Y., Gürü, M., Dayı, M., Tekin, I. (2010)** - Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. Materials and Design, Volume 31, Issue 8, pp. 4039-4042;

**Basheer, L., Kropp, J., Cleland, D. J. (2001)** - Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and Building Materials, Volume 15, Issues 2-3, pp. 93-103;

**Bakken, A. K., Gautneb, H., Sveistrup, T., Myhr, K., (2000)** - Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems, Volume 56, Issue 1, pp. 53-57;

**Binici, H., Kaplan, H., Yilmaz, S. (2007)** - Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. Scientific Research and Essay, Volume 2, Issue 9, pp. 372-379;

**Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., Kaplan, H. (2008)** - Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 208, Issues 1-3, pp. 299-308;

**Bravo, M. (2009)** - Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados provenientes da trituração de borracha de pneus usados. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Brito, J. de (2005)** - Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões. *Lição de síntese, Provas de Agregação em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Çetin, A. (1997)** - Assessment of industrial wastes in asphalt concrete pavement. *Master Dissertation*, Department of Civil Engineering, Natural Science Institute, Anadolu University, Turkey;

**Çelik, Mustafa Y., Sabah, E. (2008)** - Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management*, Volume 87, Issue 1, pp. 106-116;

**Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R. (2010)** - Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 1, pp. 113-117;

**Costa, A., Appleton, J. (2002)** - Estruturas de Betão I. Parte II - Materiais, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Costa, C., Pinelo, A., Rodrigues, J. D. (1991)** - Caracterização das escombreyras das explorações de mármore da região de Estremoz, Borba e Vila Viçosa. *Relatório 246/91 - NPR/GERO, LNEC*;

**Coutinho, A. S., Gonçalves, A. (2006)** - Fabrico e propriedades do betão. Volume I, LNEC, Lisboa;

**Coutinho, A. S., Gonçalves, A. (2006)** - Fabrico e propriedades do betão. Volume II, LNEC, Lisboa;

**Coutinho, A. S., Gonçalves, A. (1994)** - Fabrico e propriedades do betão. Volume III, LNEC, Lisboa;

**Decreto Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro (2006)**, *Diário da República*, 1ª Série, Nº171, pp. 6526-6545;

**Evangelista, L. (2007)** - Betões executados com agregados finos reciclados de betão. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Faury, J. (1958)** - Le Betón. 3ª Edição, Dunod, Paris;

**Felekoğlu, B., Türkel, S., Baradan, B. (2007)** - Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environmental, Volume 42, Issue 4, pp. 1795-1802;

**Ferreira, R. (2000)** - Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Materiais e Reabilitação da Construção, Universidade do Minho, Guimarães;

**Ferreira, L. (2007)** - Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Gencil, O., Ozel, C., Koksal, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., Brostow, W. (2012)** - Properties of concrete paving blocks made with waste marble. Journal of Cleaner Production, Volume 21, Issue 1, pp. 62-70;

**Gesoğlu, M., Güneyisi, E. (2007)** - Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without sílica fume. Materials and Structures, Volume 40, Issue 9, pp. 953-964;

**Gettu, R., Aguado, A., Martín, M. A. (1998)** - Retracción del hormigón y el uso de aditivos reductores de retracción, IV Simposio ANFAH, Especialidades Química para la construcción, Madrid, pp. 1-12;

**Hameed, M. S., Sekar, A. S. S. (2009)** - Properties of Green Concrete containing Quarry Rock Dust and Marble Sludge powder as a fine aggregate. ARPN J Engineering Applied Sciences, Volume 4, Issue 4, pp. 83-89;

**Hanžič, L., Ilić, R. (2003)** - Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 9, pp. 1385-1388;

**Hebhoub, H., Belachia, M. (2011)** - Use of the marble wastes in the hydraulic concrete. 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazig, Turkey;

**Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E. (2011)** - Use of waste marble aggregates in concrete. Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 3, pp. 1167-1171;

**INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2001)** - Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais (PNAPRI) - Guia Técnico do Sector da Pedra Natural, Lisboa, pp. 1-71;

**Karaşahin, M., Terzi, S. (2005)** - Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 3, pp. 616-620;

**LNEC (1991)** - Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz - Borba - Vila Viçosa (1º Estudo). CEVALOR, Borba, pp. 1-48;

**LNEC (1992)** - Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz - Borba - Vila Viçosa (2º Estudo). CEVALOR, Borba, pp. 1-37;

**Lopes, Luís (2003)** - Recursos Naturais - Rochas ornamentais: o mármore. Alentejo Digital, pp. 1-3;

**Lopes, L., Silva, J. B. (2005)** - Controle estrutural e constrangimentos geológicos na exploração de mármore no anticlinal de Estremoz - Alentejo – Portugal. I CIRO - I Congresso de Rochas Ornamentais do Brasil;

**Lopes, L., Carrilho Lopes, J., Cabral, J. P., Sarantopoulos, P. (2000)** - Caracterização Petrográfica dos Monumentos Romanos de Évora. *Revista “Cidade de Évora.”*, II Série, Nº4, pp. 129-142;

**Lourenço, Jorge F. (1989)** - Metodologia da composição de betões., Livraria Almedina, Coimbra;

**Martins (2012)** - Desempenho mecânico de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Metha, P. K., Monteiro, P. J. M. (1994)** - Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Projeto de divulgação tecnológica, CIMINAS/HOLDERCHEM, Editora PINI, 1ª Edição, pp. 1-573;

**Midha, S., Paspaliaris, I. (2003)** - A review of stone processing industry in five EU regions. OSNET Editions, Volume 8;

**Missau, F. (2004)** - Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS;

**Montani, Carlo C. (2010)** - XXI Report World Marble and Stones, Casa de Edizioni in Carrara, pp. 1-192;

**Montero, M. A., Jordán, M. M., Hernández-Crespo, M. S., Sanfeliu, T. (2009)** - The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies, Applied Clay Science, Volume 46, Issue 4, Pages 404-408;

**Moura, A. Casal, Carvalho, C., Almeida, I. A., Saúde, J. G., Ramos, J. M. F., Augusto, J. P., Rodrigues, J. D., Carvalho, J. M. F., Martins, L. P., Matos, M. J., Machado, M. J. C., Sobreiro, M. J., Peres, M., Martins, N. A., Bonito, N., Henriques, P., Sobreiro, S. (2007)** - Mármore e calcários ornamentais de Portugal. Porto: INETI, pp. 1-383;

**UN - United Nations (2006)** - World Population Prospects - The 2006 revision. Highlight. Department of Economic and Social Affairs, New York, pp. 1-114;

**Nepomuceno, M. (1999)** - Estudo da composição de betões. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica para carreira de docente universitário. Universidade da Beira Interior, Covilhã;

**Neville, A. (2002)** - Properties of concrete. 4th Edition. Pearson, Prentice Hall, Essex, England;

**Nischer, P. (1984)** - Influence of Concrete Quality and Environment on Carbonation. Rilem Seminar, pp. 231-238;

**Okagbue, C. O., Oneyobi, T. U. S. (1999)** - Potential of marble dust to stabilize red tropical soils for road construction. Engineering Geology, Volume 53, Issue 3-4, pp. 371-380;

**Oliveira, C.N., Ribeiro, R., Queiroz, J. (2010)** - Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos. Série Tecnologia Ambiental, Volume 30, pp. 1-34;

**OSNET Editions (2004)** - Environmental friendly practices for natural stone exploitation. Risk Assessment, Safety and Environment Sector, European Commission, Volume 12, pp. 1-124;

**Ödman, S. T. (1968)** - Effects of variations in volume, surface area exposed to drying and composition of concrete shrinkage. RILEM Int. Coll. On the Shrinkage of Hydraulic Concretes, Madrid, Volume 1, pp. 1-20;

**Özturan, T., Çeçen, C. (1997)** - Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. Cement and Concrete Research, Volume 27, Issue 2, pp. 165-170;

- Pacheco Torgal, F., Castro-Gomes, J. P. (2006)** - Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 20, Issue 10, pp. 1079-1088;
- Pereira C.G., Castro-Gomes J., Oliveira J.P. (2007)** - Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete, *Construction and Building Material*, Volume 21, Issue 3, pp. 616-620;
- Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C., Spiratos, N. (1998)** - Superplasticizers: properties and applications in concrete. CANMET, Ottawa, Canada;
- Resolução do conselho de ministros n.º 86/94 de 21 de Setembro**, Diário da República, 1ª Série-B, N.º 219, pp. 5655;
- Rochas e equipamentos (2011)** - Portugal em oitavo lugar no ranking dos países produtores e exportadores de Pedra Natural. *Rochas e Equipamentos*, N.º 101, 2º Trimestre, pp. 61-62;
- Rodrigues, G. F. (2009)** - Reciclagem de resíduos visando à produção de lã mineral, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto; pp. 1-98;
- Rutley, F. (1916)** - Elements of mineralogy. T. Murby &co., 19<sup>th</sup> Edition, pp. 1-394;
- Saboya Jr., F., Xavier, G. C., Alexandre, J. (2005)** - The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 10, pp. 1950-1960;
- Shelke, V.M., Pawde, P.Y., Shrivastava, R.R. (2012)** - Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete. G. H. Rasoni College of Engineering & Technology, India, *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE)*, Volume 1, Issue 1, pp. 40-45;
- Silva, J. B., Hotza, D., Segadães, A. M., Acchar, W. (2005)** - Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*, Volume 51, pp. 325-330;
- Snowdon, L. C., Edwards, A. G., (1962)** - The Moisture Movement of Natural Aggregate and Its Effect on Concrete. *Magazine of Concrete Research*, Volume 14, Issue 41, pp. 109-116;
- Solubema - Sociedade Luso - Belga de mármore S.A. (2010)** - Processo produtivo (Extracção de mármore a céu aberto). Vila Viçosa, pp. 1-19;

**Sousa Coutinho, J. (1999)** - Agregados para argamassas e betões. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, pp.1-135;

**Souza, L. R., Ribeiro, R. C. C., Carriso, R. C. C., Silva, L. P., Pacheco, E. B. A. V., Visconte, L. L. Y. (2009)** - Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica. Série Tecnologia Ambiental, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, pp. 1-40;

**Terzi, S., Karasahin, M. (2003)** - Use of marble dust in the hot mix asphalt as a filler material. Journal of Technology Chamber Civil Engineering, Volume 14, pp. 2903-3022;

**Topçu, I. B., Bilir, T., Uygunoğlu, T. (2008)** - Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Volume 23, pp. 1947-1953;

**Troxell, G. E., Raphael, J. M., Davis, R. E. (1958)** - Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete. Proceedings - American Society for Testing Materials, Volume 58, pp. 1-1101;

**UNEP - United Nations Environment Programme (2011)** - Humanity can and must do more with less: “*Decouple*” rate of resource consumption from economic growth rate, experts warn. 19<sup>th</sup> annual meetings of the Commission for Sustainable Development, UN Secretariat, New York;

**Uysal, M., Yilmaz, K., Ipek, M. (2012)** - The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, pp. 263-270;

**Valadares, F. (2009)** - Desempenho mecânico de betões com granulado de borracha proveniente de pneus usados. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

**Van Straaten, P. (2007)** - Agrogeology: The use of rocks for crops. University of Guelph, Enviroquest Ltd., Ontario, pp.1-426;

**Zhou, F. P., Lydon, F. D., Barr, B. I. G. (1995)** - Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concretes. Cement and Concrete Research, Volume 25, Issue 1, pp. 177-186.

▪ **Normas / Especificações de ensaios:**

**BV-MI 01:2005** - Production of concrete using demolition, construction and material production recycled waste, Hungarian Technical Guideline of concrete and reinforced concrete production, Hungarian group of FIB;

**BS EN 14158 (2004)** - Natural stone test methods. Determination of rupture energy, British Standards Institution;

**LNEC E 237 (1971)** - Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles, LNEC, Lisboa;

**LNEC E 391 (1993)** - Betões: Determinação da resistência à carbonatação, LNEC, Lisboa;

**LNEC E 393 (1993)** - Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade, LNEC Lisboa;

**LNEC E 394 (1993)** - Betões: Determinação da absorção da água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica, LNEC, Lisboa;

**LNEC E-398 (1993)** - Betões: Determinação da retracção e da expansão. LNEC, Lisboa;

**LNEC E 463 (2004)** - Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário, LNEC, Lisboa;

**NP EN 197-1 (2001) + A 1 (2005)** - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, IPQ, Lisboa;

**NP EN 206-1 (2007)** - Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, Lisboa;

**NP EN 933-1 (2000)** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração, IPQ, Lisboa;

**NP EN 933-2 (1999)** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas, IPQ, Lisboa;

**NP EN 933-4 (2002)** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma, IPQ, Lisboa;

**NP EN 1097-3 (2003)** - Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios, IPQ, Lisboa;

**NP EN 1097-6 (2003)** - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ, Lisboa;

**NP EN 12350-2 (2002)** - Ensaio do betão fresco: Ensaio de Abaixamento, IPQ, Lisboa;

**NP EN 12350-6 (2002)** - Ensaio do betão fresco: Massa Volúmica, IPQ, Lisboa;

**NP EN 12390-3 (2003)** - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaios, IPQ, Lisboa;

**NP EN 12620 (2002) + A1 (2010)** - Agregados para betão, IPQ, Lisboa.



# ANEXOS



## A. COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Conjunto de betões com agregados finos de basalto

		BRB		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de basalto	< 0,063	0,063	90,72
		0,063	0,125	113,78
		0,125	0,25	158,37
		0,25	0,5	78,42
		0,5	1	107,63
		1	2	127,62
		2	4	118,39
		≥ 4		76,88
	Grossos	Bago de arroz		235,21
		Brita 1		149,68
Brita 2		577,33		
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
Água			242,43	

		BB/M20		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de basalto	< 0,063	0,063	72,57
		0,063	0,125	91,03
		0,125	0,25	126,7
		0,25	0,5	62,73
		0,5	1	86,1
		1	2	102,1
		2	4	94,72
		≥ 4		61,5
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	17,02
		0,063	0,125	21,34
		0,125	0,25	29,71
		0,25	0,5	14,71
		0,5	1	20,19
		1	2	23,94
		2	4	22,21
		≥ 4		14,42
	Grossos	Bago de arroz		235,21
		Brita 1		149,68
		Brita 2		577,33
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
Água			242,43	

		BB/M50		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de basalto	< 0,063	0,063	45,36
		0,063	0,125	56,89
		0,125	0,25	79,19
		0,25	0,5	39,21
		0,5	1	53,81
		1	2	63,81
		2	4	59,2
		≥ 4		38,44
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	42,55
		0,063	0,125	53,35
		0,125	0,25	74,28
		0,25	0,5	36,78
		0,5	1	50,48
		1	2	59,85
		2	4	55,53
		≥ 4		36,05
	Grossos	Bago de arroz		235,21
		Brita 1		149,68
		Brita 2		577,33
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
Água			246,71	

Conjunto de betões com agregados finos de areia de rio

		BRC		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de areia de rio	< 0,063	0,063	57,64
		0,063	0,125	72,29
		0,125	0,25	100,62
		0,25	0,5	49,82
		0,5	1	68,38
		1	2	81,08
		2	4	75,22
		≥ 4		48,84
	Grossos	Bago de arroz		213,83
		Brita 1		256,59
Brita 2		748,39		
<b>Ligante</b>	Cimento CEM I 42,5 R		440,68	
		Água	216,57	

		BC/M20		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de areia de rio	< 0,063	0,063	46,11
		0,063	0,125	57,83
		0,125	0,25	80,5
		0,25	0,5	39,86
		0,5	1	54,71
		1	2	64,68
		2	4	60,18
		≥ 4		39,08
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	11,63
		0,063	0,125	14,59
		0,125	0,25	20,3
		0,25	0,5	10,05
		0,5	1	13,8
		1	2	16,36
		2	4	15,18
		≥ 4		9,86
	Grossos	Bago de arroz		213,83
		Brita 1		256,59
		Brita 2		748,39
<b>Ligante</b>	Cimento CEM I 42,5 R		440,68	
		Água	220,34	

		BC/M50		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de areia de rio	< 0,063	0,063	28,82
		0,063	0,125	36,14
		0,125	0,25	50,31
		0,25	0,5	24,91
		0,5	1	34,19
		1	2	40,54
		2	4	37,61
		≥ 4		24,42
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	29,07
		0,063	0,125	36,47
		0,125	0,25	50,76
		0,25	0,5	25,13
		0,5	1	34,5
		1	2	40,9
		2	4	37,94
		≥ 4		24,64
	Grossos	Bago de arroz		213,83
		Brita 1		256,59
		Brita 2		748,39
<b>Ligante</b>	Cimento CEM I 42,5 R		440,68	
		Água	220,34	

Conjunto de betões com agregados finos de granito

		BRG		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de granito	< 0,063	0,063	72,29
		0,063	0,125	90,67
		0,125	0,25	126,2
		0,25	0,5	62,49
		0,5	1	85,77
		1	2	101,69
		2	4	94,34
		≥ 4		61,26
	Grossos	Bago de arroz		384,89
		Brita 1		85,53
Brita 2		598,71		
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
		Água	237,97	

		BG/M20		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de granito	< 0,063	0,063	57,83
		0,063	0,125	72,53
		0,125	0,25	100,96
		0,25	0,5	49,99
		0,5	1	68,61
		1	2	81,35
		2	4	75,47
		≥ 4		49,01
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	14,77
		0,063	0,125	18,53
		0,125	0,25	25,79
		0,25	0,5	12,77
		0,5	1	17,53
		1	2	20,78
		2	4	19,28
		> 4		12,52
	Grossos	Bago de arroz		284,89
		Brita 1		85,53
		Brita 2		598,71
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
		Água	242,37	

		BG/M50		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de granito	< 0,063	0,063	36,14
		0,063	0,125	45,33
		0,125	0,25	63,1
		0,25	0,5	31,24
		0,5	1	42,88
		1	2	50,85
		2	4	47,17
		≥ 4		30,63
	Finos de mármore	< 0,063	0,063	36,93
		0,063	0,125	46,32
		0,125	0,25	64,47
		0,25	0,5	31,92
		0,5	1	43,82
		1	2	51,95
		2	4	48,2
		> 4		31,3
	Grossos	Bago de arroz		284,89
		Brita 1		85,53
		Brita 2		598,71
<b>Ligante</b>		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
		Água	246,79	

Betão com agregados finos de mármore

		BRM		
		Granulometria		kg/m <sup>3</sup>
Agregados	Finos de basalto	< 0,063	0,063	69,01
		0,063	0,125	106,18
		0,125	0,25	147,7
		0,25	0,5	73,5
		0,5	1	100,29
		1	2	17,96
		2	4	109,68
		> 4		71,81
	Grossos	Bago de arroz		85,53
		Brita 1		192,44
Brita 2		705,63		
Ligante		Cimento CEM I 42,5 R	440,68	
		Água	237,97	



## **B. ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA VOLÚMICA**

	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	M <sub>4</sub> (g)
<b>Brita 2</b>	3256,4	5105,6	3080,5	3208,4
<b>Brita 1</b>	1748,0	2764,7	1675,2	1725,5
<b>Bago de arroz</b>	1002,3	2285,9	1675,2	974,6
<b>Areia grossa de rio</b>	1034,6	2314,8	1675,2	1026,9
<b>Areia fina de rio</b>	1014,3	2288,2	1675,2	1012,3
<b>Areia de basalto</b>	922,2	2274,8	1675,2	912,6
<b>Areia de mármore</b>	859,8	2217,4	1675,2	858,6
<b>Areia de granito</b>	919,1	2225,0	1675,2	913,7

	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	W <sub>24</sub> (%)
<b>Brita 2</b>	2711,40	2605,70	2644,68	1,50
<b>Brita 1</b>	2713,05	2620,35	2654,52	1,30
<b>Bago de arroz</b>	2678,21	2488,76	2559,50	2,84
<b>Areia grossa de rio</b>	2651,43	2599,75	2619,24	0,75
<b>Areia fina de rio</b>	2535,19	2522,55	2527,54	0,20
<b>Areia de basalto</b>	2906,37	2820,15	2849,81	1,05
<b>Areia de mármore</b>	2723,57	2684,24	2698,68	0,14
<b>Areia de granito</b>	2503,97	2467,46	2482,04	0,59

M<sub>1</sub> - massa do agregado saturado com superfície seca (kg);

M<sub>2</sub> - massa do picnómetro com o provete saturado em água (kg);

M<sub>3</sub> - massa do picnómetro com tampa cheio de água (kg);

M<sub>4</sub> - massa do provete seco em estufa (kg);

$\rho_a$  - massa volúmica do material impermeável dos agregados (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{rd}$  - massa volúmica dos agregados secos em estufa (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{ssd}$  - massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_w$  - massa volúmica da água à temperatura da água registada na pesagem M<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>);

W<sub>24</sub> - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%).

## **C. CURVAS GRANULOMÉTRICAS**

Brita 2



**FICHA TÉCNICA DE PRODUTO**

**JOSÉ MARQUES GOMES GALO, S.A.**  
**Apartado 1003, Santana, 2971-908 Sesimbra**



1029  
05

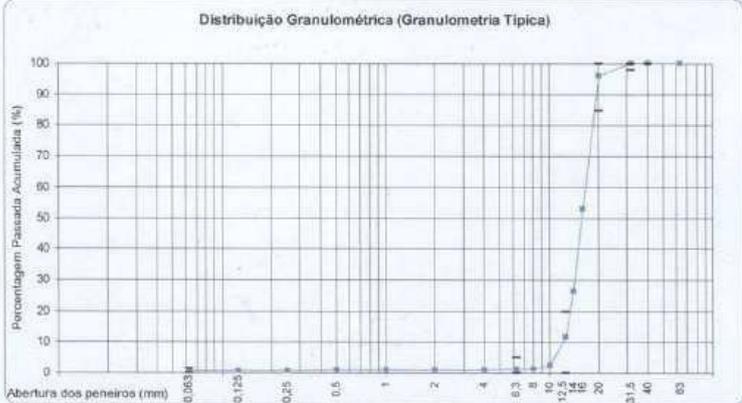
1029 - CPD – PT05/01510	EN 12620:2002+A1:2008	Agregados para Betão
1029 - CPD – PT05/01511	EN 13043:2002:AC:2004	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Designação comercial:	Agregado 12/20 (Brita 2)
Dimensão nominal (d/D):	12/20 mm
Origem:	Pedreira Ribeira de Cavalo nº3; Zambujal - Sesimbra
Ano Marcação CE:	2005
Descrição Petrográfica:	Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior

Distribuição Granulométrica	EN 12620	EN13043	Outras Características do produto	
Categoria Granulométrica	G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 85/20	Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	
Peneiro Intermediário	NA	NA	[2,70 ; 2,71]	
Série base + Série 2	Granulometria Típica			
Peneiro <sup>b)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior	Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )
63,0	100			[2,68 ; 2,69]
40,0	100	100	100	Massa Volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )
31,5	100	98	100	[2,66 ; 2,68]
20,0	96	85	100	Absorção de água (%)
16,0	53			WA <sub>24</sub> 0,6%
14,0	26			Teor de finos
12,5	12	0	20	f <sub>1,5</sub> f <sub>2</sub>
10,0	2			Índice de Achatamento
8,0	1			FI <sub>15</sub>
6,3	1	0	5	Índice de Forma
4,0	1			SI <sub>15</sub>
2,0	1			Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>
1,0	1			LA <sub>30</sub>
0,500	1			Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>
0,250	1			M <sub>DE</sub> 20
0,125	1			Retração por secagem <sup>b)</sup>
0,063	0,5	0,0	1,5	≤0,030%WS NA
				Porcentagem de partículas esmagadas
				NA C <sub>100/0</sub>
				Teor de Húmus <sup>b)</sup>
				Isento NA
				Contaminantes Orgânicos Leves <sup>b)</sup>
				≤0,1% m <sub>LPC</sub> 0,1
				Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>b)</sup>
				≤90min S≤10% NA
				Teor de Carbonatos <sup>b)</sup>
				≥42%CO <sub>2</sub> ≥96%CaCO <sub>3</sub> NA
				Teor de Cloretos <sup>b)</sup>
				≤0,001%Cl NA
				Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>b)</sup>
				AS <sub>0,2</sub> NA
				Enxofre Total <sup>b)</sup>
				≤1%S NA
				Baridade (Mg/m <sup>3</sup> )
				[1,36 ; 1,43]

<sup>a)</sup>Abertura quadrada dos peneiros em mm     
 <sup>b)</sup>Valores em Percentagem passada Acumulada     
 NA: Não aplicável     
 <sup>c)</sup>Valor determinado num agregado com a mesma origem

**Distribuição Granulométrica (Granulometria Típica)**



Elaborado por: *Bruno Teixeira* Data: 30/05/2011

(RTCP) FG.02.26 (07)

10-03-2011

Aprovado por: *[Signature]*

(Director Produção) 30.5.11

Pág. 1/1

Brita 1



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



JOSÉ MARQUES GOMES GALO, S.A.  
Apartado 1003, Santana, 2971-908 Sesimbra

1029  
05

1029 - CPD – PT05/01510	EN 12620:2002+A1:2008	Agregados para Betão
1029 - CPD – PT05/01511	EN 13043:2002:AC:2004	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Designação comercial:	Agregado 6/12 (Brita 1)
Dimensão nominal (d/D):	6/12 mm
Origem:	Pedreira Ribeira de Cavalo nº3: Zambujal - Sesimbra
Ano Marcação CE:	2005
Descrição Petrográfica:	Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior

Distribuição Granulométrica	EN 12620	EN13043	Outras Características do produto		EN 12620	EN 13043
Categoria Granulométrica	G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 90/20	Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,69 ; 2,71]	
Peneiro Intermédio	NA	G <sub>25</sub> /15	Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,67 ; 2,70]	
Série base + Série 2	Granulometria Típica			Massa Volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,65 ; 2,69]	
Peneiro <sup>a)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior	Absorção de água (%)	WA <sub>24</sub> 0,6%	WA <sub>24</sub> 1
63,0	100			Teor de finos	f <sub>1,5</sub>	f <sub>2</sub>
40,0	100			Índice de Achatamento	FI <sub>20</sub>	FI <sub>20</sub>
31,5	100			Índice de Forma	SI <sub>40</sub>	SI <sub>30</sub>
20,0	100	100	100	Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>	LA <sub>30</sub>	
16,0	100	98	100	Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>	M <sub>DE</sub> 20	
14,0	100			Retração por secagem <sup>b)</sup>	≤0,030%WS	NA
12,5	96	90	100	Porcentagem de partículas esmagadas	NA	C <sub>1000</sub>
10,0	71			Teor de Húmus <sup>b)</sup>	Isento	NA
8,0	39	25	54	Contaminantes Orgânicos Leves <sup>b)</sup>	≤0,1%	m <sub>LEC</sub> 0,1
6,3	12	0	20	Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>b)</sup>	≤90min S≤10%	NA
4,0	2	0	5	Teor de Carbonatos <sup>b)</sup>	≥42%CO <sub>2</sub> ≥96%CaCO <sub>3</sub>	NA
2,0	1			Teor de Cloretos <sup>b)</sup>	≤0,001%Cl	NA
1,0	1			Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>b)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	NA
0,500	1			Enxofre Total <sup>b)</sup>	≤1%S	NA
0,250	1			Baridade (Mg/m <sup>3</sup> )	[1,38 ; 1,39]	
0,125	1					
0,063	0,7	0,0	1,5			

<sup>a)</sup>Abertura quadrada dos peneiros em mm

Valores em Percentagem passada Acumulada

NA: Não aplicável

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



Elaborado por: Bruno Teixeira  
(RTCP)  
FG.02.26 (07)

Data: 30/05/2011  
10-03-2011

Aprovado por:  
(Director Produção)

Pág.1/1

*António*  
30.5.11

Bago de arroz



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



**JOSÉ MARQUES GOMES GALO, S.A.**  
**Apartado 1003, Santana, 2971-908 Sesimbra**

1029  
05

1029 - CPD – PT05/01510	EN 12620:2002+A1:2008	Agregados para Betão
1029 - CPD – PT05/01511	EN 13043:2002:AC:2004	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Designação comercial:	Agregado 2/6 (Bago de Arroz)
Dimensão nominal (d/D):	2/6 mm
Origem:	Pedreira Ribeira de Cavalo nº3: Zambujal - Sesimbra
Ano Marcação CE:	2005
Descrição Petrográfica:	Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior

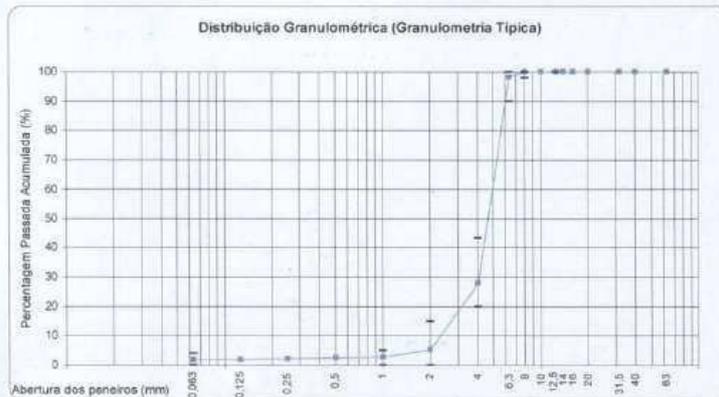
Distribuição Granulométrica	EN 12620	EN13043	Outras Características do produto		EN 12620	EN 13043
Categoria Granulométrica	Gc85/20	Gc90/15	Massa Volumica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,71 ; 2,72]	
Peneiro Intermédio	NA	G20/15	Massa Volumica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,69 ; 2,70]	
Série base + Série 2	Granulometria Típica			Massa Volumica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,68 ; 2,69]	
Peneiro <sup>a)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior	Absorção de água (%)	WA <sub>0,4</sub> 0,5%	WA <sub>0,4</sub> 1
63,0	100			Teor de finos	f <sub>4</sub>	f <sub>4</sub>
40,0	100			Índice de Achatamento	F <sub>1,35</sub>	F <sub>1,35</sub>
31,5	100			Índice de Forma	SI <sub>4,0</sub>	SI <sub>4,0</sub>
20,0	100			Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>		LA <sub>3,0</sub>
16,0	100			Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>		M <sub>0E20</sub>
14,0	100			Retração por secagem <sup>b)</sup>	≤0,030%WS	NA
12,5	100	100	100	Porcentagem de partículas esmagadas	NA	C <sub>100/0</sub>
10,0	100			Teor de Húmus <sup>b)</sup>	Isento	NA
8,0	100	98	100	Contaminantes Orgânicos Leves <sup>b)</sup>	≤0,1%	m <sub>LPC0,1</sub>
6,3	98	90	100	Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>b)</sup>	≤90min S≤10%	NA
4,0	28	20	43	Teor de Carbonatos <sup>b)</sup>	≥42%CO <sub>2</sub> ≥96%CaCO <sub>3</sub>	NA
2,0	5	0	15	Teor de Cloretos <sup>b)</sup>	≤0,001%Cl	NA
1,0	3	0	5	Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>b)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	NA
0,500	2			Enxofre Total <sup>b)</sup>	≤1%S	NA
0,250	2			Baridade (Mg/m <sup>3</sup> )		[1,31 ; 1,34]
0,125	2					
0,063	1,8	0,0	4,0			

<sup>a)</sup>Abertura quadrada dos peneiros em mm

Valores em Percentagem passada Acumulada

NA. Não aplicável

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



Elaborado por: Bruno Teixeira Data: 30/05/2011  
 (RTCP) 10-03-2011  
 FG.02.26 (07)

Aprovado por:  
 (Director Produção) Pág. 1/1

*Handwritten signature and initials*  
 30. 5. 11

Areia grossa de rio



## FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Pinhal Conde  
Cunha 4  
**04**  
1515  
1515-OPD-0014  
NP EN 12620 NP EN 13043

---

**GRUPO SOARVAMIL**

Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

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

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

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	<b>0/4</b>	
Granulometria	G <sub>85</sub>	G <sub>90</sub> -G <sub>T0,20</sub>
Massa Volúmica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de clóretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>0,2</sub>	
Enxofre total	0,07%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos livres	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico		DND

Controlo da produção

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

NA- Não aplicável      DND-Desempenho não determinado

Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção: 

---

F 06.01 - 16/09/2005

Areia fina de rio



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:  Origem:   
 Aplicação:   
 Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

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

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

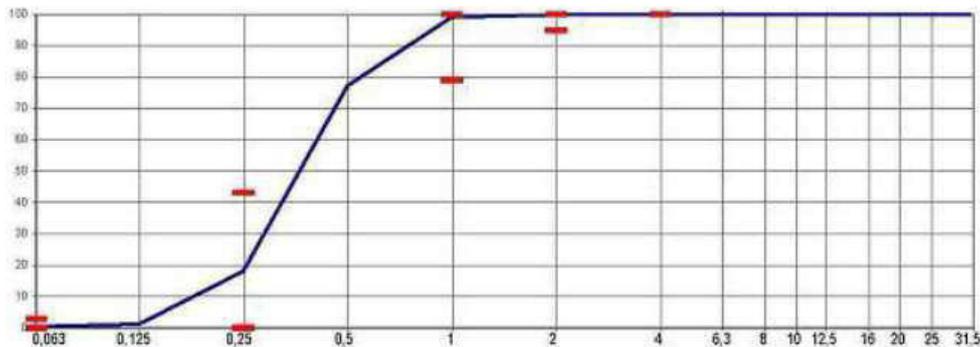
Controlo da produção

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

Outras características

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

NA-Não aplicável DND- Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

Areia de basalto

		Lena Agregados, S.A. Quinta da Sardinha - Aparto 1014 Santa catarina da Serra 2496-907 Santa Catarina da Serra - Portugal <b>08</b>		 1592 Rev.06																																																																																																																																							
<b>Ficha Técnica de Produto</b>																																																																																																																																											
<b>Produto:</b> Pó Basalto RM (0/4 mm)		<b>Centro de Produção:</b>		Rio Maior																																																																																																																																							
<b>Norma de Produto:</b> NP EN 13043:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação																																																																																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Peneiro (mm)</th> <th>Valores Típicos (%)</th> <th>Limites Mínimos (%)</th> <th>Limites Máximos (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>63.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31.500</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12.500</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10.000</td><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8.000</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr> <tr><td>6.300</td><td>100</td><td>98</td><td>100</td></tr> <tr><td>4.000</td><td>99</td><td>95</td><td>100</td></tr> <tr><td>2.000</td><td>64</td><td>54</td><td>74</td></tr> <tr><td>1.000</td><td>39</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0.600</td><td>26</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0.250</td><td>19</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0.125</td><td>14</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0.063</td><td>11,1</td><td>8,1</td><td>15,9</td></tr> </tbody> </table>		Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	63.000	100			40.000	100			31.500	100			20.000	100			16.000	100			14.000	100			12.500	100			10.000	100			8.000	100	100	100	6.300	100	98	100	4.000	99	95	100	2.000	64	54	74	1.000	39			0.600	26			0.250	19			0.125	14			0.063	11,1	8,1	15,9	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Características</th> <th>NP EN 13043</th> </tr> <tr> <th>Certificado CE</th> <th>1592-CPD-0609</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Dimensão (d/D)</td><td>0/4 mm</td></tr> <tr><td>Granulometria</td><td>G<sub>2</sub>90</td></tr> <tr><td>Tolerância da Granulometria Típica</td><td>GTc10</td></tr> <tr><td>Teor de Finos</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Qualidade dos Finos</td><td>MB<sub>2</sub>10</td></tr> <tr><td>Índice de Achatamento</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Índice de Forma</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Coefficiente de Los Angeles</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Coefficiente de micro-Deval</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Coefficiente de Polimento Acelerado</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Massa Volumica</td><td></td></tr> <tr><td>material impermeável</td><td>2,92 Mg/m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>partículas secas em estufa</td><td>2,88 Mg/m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>partículas saturadas</td><td>2,88 Mg/m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Absorção de Água</td><td>0,7 %</td></tr> <tr><td>Baridade</td><td>1,68 Mg/m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Percentagem de Vazios</td><td>41 %</td></tr> <tr><td>Teor de Cloretos</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Teor de Sulfuretos</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Reacção álcalis-silica</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Sulfatos solúveis em ácido</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Teor de Enxofre</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Teor de Húmum</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Teor de Ácido Fúlvico</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Contaminantes Leves</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Contaminantes orgânicos pelo metodo da argamassa</td><td></td></tr> <tr><td>Aumento do tempo de presa</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias</td><td>NA</td></tr> <tr><td>Retracção por secagem</td><td>NA</td></tr> </tbody> </table>				Características	NP EN 13043	Certificado CE	1592-CPD-0609	Dimensão (d/D)	0/4 mm	Granulometria	G <sub>2</sub> 90	Tolerância da Granulometria Típica	GTc10	Teor de Finos	NA	Qualidade dos Finos	MB <sub>2</sub> 10	Índice de Achatamento	NA	Índice de Forma	NA	Coefficiente de Los Angeles	NA	Coefficiente de micro-Deval	NA	Coefficiente de Polimento Acelerado	NA	Massa Volumica		material impermeável	2,92 Mg/m <sup>3</sup>	partículas secas em estufa	2,88 Mg/m <sup>3</sup>	partículas saturadas	2,88 Mg/m <sup>3</sup>	Absorção de Água	0,7 %	Baridade	1,68 Mg/m <sup>3</sup>	Percentagem de Vazios	41 %	Teor de Cloretos	NA	Teor de Sulfuretos	NA	Reacção álcalis-silica	NA	Sulfatos solúveis em ácido	NA	Teor de Enxofre	NA	Teor de Húmum	NA	Teor de Ácido Fúlvico	NA	Contaminantes Leves	NA	Contaminantes orgânicos pelo metodo da argamassa		Aumento do tempo de presa	NA	Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA	Retracção por secagem	NA
Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)																																																																																																																																								
63.000	100																																																																																																																																										
40.000	100																																																																																																																																										
31.500	100																																																																																																																																										
20.000	100																																																																																																																																										
16.000	100																																																																																																																																										
14.000	100																																																																																																																																										
12.500	100																																																																																																																																										
10.000	100																																																																																																																																										
8.000	100	100	100																																																																																																																																								
6.300	100	98	100																																																																																																																																								
4.000	99	95	100																																																																																																																																								
2.000	64	54	74																																																																																																																																								
1.000	39																																																																																																																																										
0.600	26																																																																																																																																										
0.250	19																																																																																																																																										
0.125	14																																																																																																																																										
0.063	11,1	8,1	15,9																																																																																																																																								
Características	NP EN 13043																																																																																																																																										
Certificado CE	1592-CPD-0609																																																																																																																																										
Dimensão (d/D)	0/4 mm																																																																																																																																										
Granulometria	G <sub>2</sub> 90																																																																																																																																										
Tolerância da Granulometria Típica	GTc10																																																																																																																																										
Teor de Finos	NA																																																																																																																																										
Qualidade dos Finos	MB <sub>2</sub> 10																																																																																																																																										
Índice de Achatamento	NA																																																																																																																																										
Índice de Forma	NA																																																																																																																																										
Coefficiente de Los Angeles	NA																																																																																																																																										
Coefficiente de micro-Deval	NA																																																																																																																																										
Coefficiente de Polimento Acelerado	NA																																																																																																																																										
Massa Volumica																																																																																																																																											
material impermeável	2,92 Mg/m <sup>3</sup>																																																																																																																																										
partículas secas em estufa	2,88 Mg/m <sup>3</sup>																																																																																																																																										
partículas saturadas	2,88 Mg/m <sup>3</sup>																																																																																																																																										
Absorção de Água	0,7 %																																																																																																																																										
Baridade	1,68 Mg/m <sup>3</sup>																																																																																																																																										
Percentagem de Vazios	41 %																																																																																																																																										
Teor de Cloretos	NA																																																																																																																																										
Teor de Sulfuretos	NA																																																																																																																																										
Reacção álcalis-silica	NA																																																																																																																																										
Sulfatos solúveis em ácido	NA																																																																																																																																										
Teor de Enxofre	NA																																																																																																																																										
Teor de Húmum	NA																																																																																																																																										
Teor de Ácido Fúlvico	NA																																																																																																																																										
Contaminantes Leves	NA																																																																																																																																										
Contaminantes orgânicos pelo metodo da argamassa																																																																																																																																											
Aumento do tempo de presa	NA																																																																																																																																										
Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA																																																																																																																																										
Retracção por secagem	NA																																																																																																																																										
<b>Observações:</b> NA - Não aplicável																																																																																																																																											
																																																																																																																																											
Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO)		Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO)		Emitido: 23-05-2011																																																																																																																																							
Doc.L039		1/1																																																																																																																																									

Área de granito



**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO**

**CTP.BNF.0/4.05**



0866

MOTA-ENGL ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, SA  
 Pedreira Herdade de Benafessim  
 7054-909 Montemor-o-Novo  
 04  
 CPD-2004-CE-010

Descrição do produto / Norma Europeia	Des.	EN 12 620	EN 13 043	EN 13 139	EN 13 242	EN 13 383-1	EN 13 450
Descrição petrográfica	Des.	Granodiorito	Granodiorito	Granodiorito	Granodiorito		
Dimensão das partículas	Des.	0/4	0/4	0/4	0/4		
Granulometria	C	G <sub>p</sub> 85	G <sub>a</sub> 85		G <sub>p</sub> 85		
Tolerância da granulometria	C						
Módulo de finura da areia (%)	VD						
Limpeza	C						
Teor em partículas finas	C						
Teor em finos (%)	C	<i>f</i> 10	<i>f</i> 10	4	<i>f</i> 10		
Qualidade dos finos - Equivalente de areia (%)	VL	SE <sub>60</sub>	SE <sub>60</sub>	SE <sub>60</sub>	SE <sub>60</sub>		
Qualidade dos finos - Azul de metilén	VL						
Índice de achatamento	C						
Índice de forma	C						
Comprimento das partículas	C						
Percentagem de partículas britadas	C		C <sub>3000</sub>		C <sub>60/2</sub>		
Angulosidade do agregado	C						
Resistência à fragmentação (LA)	C						
Resistência ao esmagamento	C						
Resistência ao polimento acelerado	C						
Resistência à abrasão	C						
Resistência ao desgaste <i>M<sub>DE</sub></i>	C						
Resistência à compressão	C						
Massa volumétrica das partículas	VD	2,71	2,71	2,71	2,71		
Absorção de água (%)	VD	WA <sub>24,0,7</sub>	WA <sub>24,0,7</sub>	WA <sub>24,0,7</sub>	WA <sub>24,0,7</sub>		
Resistência ao gelo/degelo	C	F 1	F 1	F 1	F 1		
Resistência ao sulfato de magnésio	C	MS <sub>12</sub>	MS <sub>12</sub>	MS <sub>12</sub>	MS <sub>12</sub>		
Afinidade aos ligantes betuminosos	VD						
Resistência ao choque térmico	VD						
Estabilidade volumétrica							
Retração por secagem (%)	VD	-0,046	-0,046	-0,046	-0,046		
Reacção alcalis-silica	VD						
Requisitos químicos							
Teor em cloretos (%)	VD	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
Sulfatos solúveis em meio ácido (%)	C	AS <sub>0,2</sub>	AS <sub>0,2</sub>	AS <sub>0,2</sub>	AS <sub>0,2</sub>		
Enxofre total (%)	VD	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
Teor em matéria orgânica							
Impurezas orgânicas leves (%)	VD	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
Solubilidade em água (%)	C	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5		
Perda por calcinação (%)	VD	0,56	0,56	0,56	0,56		
Teor de carbonato de cálcio (%)	VD						
Libertação de substâncias perigosas							
Emissão radioactiva	VD						
Libertação de metais pesados	VD						
Libert. hidrocarbonetos poliaromáticos	VD						

Aprovado (original assinado)	Emitido: _____ na data ____ / ____ / ____
------------------------------	---

Des. - Designação; C - categoria; VL - Valor Limite; VD - Valor Declarado;  
 AGE - Agregado de granulometria extensa; SBa - Sub-balastro; Ba - Balastro; B - Base; SB - Sub-base; 2A - 2ª A, 2B - 2ª B; DD - Desgaste diamante; T - Triturado; N - Natural; L - Lavado

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

**Folha de Rosto**



MOTA-ENGI  
ENGENHARIA

**C. Industrial**  
Benafessim

**Amostra**  
A0089-11

**Página**  
1/1

**Data**  
25-Jul-11

---

**Ensaio Laboratoriais**  
**Controlo de Produção - Marcação CE**

---

**INFORMAÇÕES GERAIS**

**Designação no stock:** AG 0/4  
**Localização da colheita:** Q.TAPETE  
**Condições meteorológicas:** SOL

**Data de amostragem:** 25-07-2011  
**Hora de amostragem:** 9:00:00

---

**ENSAIOS A REALIZAR**

Ensaio a realizar	Código	Ensaio	Boletim	Data de ensaio
<input checked="" type="checkbox"/>	051	Análise Granulométrica. Método de peneiração NP EN 933-1:2000; EN 933-1:1997/A1:2005		25-Jul-11
<input type="checkbox"/>	052	Determinação da forma das partículas. Índice de Achatamento NP EN 933-3:2002; EN 933-3:1997/A1:2003		
<input type="checkbox"/>	053	Determinação da forma das partículas. Índice de Forma EN 933-4:2008		
<input type="checkbox"/>	054	Determinação da resistência à fragmentação. Método de "Los Angeles" EN 1097-2:2010		
<input checked="" type="checkbox"/>	055	Determinação do teor de finos. Ensaio do Equivalente de Areia NP EN 933-8:2002		25-Jul-11
<input checked="" type="checkbox"/>	056	Determinação do teor de finos. Ensaio do Azul de Metileno EN 933-9:2009		25-Jul-11
<input type="checkbox"/>	058	Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada EN 1097-5:2008		
<input type="checkbox"/>	059	Análise granulométrica EN 13383-2:2002 (Secção 5)		
<input type="checkbox"/>	060	Determinação da percentagem de entrocamento com uma relação comprimento/espessura > 3 - EN 13383-2:2002 (Secção 7)		
<input type="checkbox"/>	061	Determinação do comprimento das partículas do balastro NP EN 13450:2005 (Secção 6.7) AC:2010		
<input type="checkbox"/>	062	Elementos prejudiciais (Balastro) I.099 LABC		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da resistência ao desgaste (Micro-Deval) NP EN 1097-1:2002; EN 1097-1:1996/A1:2003		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da massa volúmica e determinação da absorção de água EN 13383-2:2002 (Secção 6)		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da resistência à compressão NP EN 1926:2008		

---

**DEFINIÇÕES DO PRODUTO (Norma de produto)**

NORMA EUROPEIA DE PRODUTO		12620	13139	13043	13242	13450	13383-1
Designação	d/D						
Categoria granulométrica	G ou CP						
Categoria do teor de finos	f						
Categoria do índice de achatamento	FI						
Categoria do índice de forma	SI						
Valor de equivalente de areia	SE						
Valor de azul de metileno	MB						
Categoria do coeficiente de Los Angeles	LA						
Categoria do coeficiente Micro-Deval	M <sub>pe</sub>						
Conteúdo de partículas finas (% <0.5 mm)	-						
Conteúdo de finos (% <0.063 mm)	-						
Módulo de finura	FM						
Categoria Forma	LT						
Categoria Resistência Rotura	CS						
Massa Volúmica Partículas	(Mg/m <sup>3</sup> )						
Conformidade do produto* (SIM/NÃO)							

\* No caso de não conformidade do produto justificar o motivo no campo de observações

Observações:

Responsável pela amostragem

\_\_\_\_\_

Responsável do centro de produção

\_\_\_\_\_

LABC.100.7



**BOLETIM DE ENSAIO**

C. Industrial  
Benafessim

Amostra  
A0089-11

Boletim

Página  
1/1

Data  
25-Jul-11

Análise Granulométrica. Método de peneiração  
NP EN 933-1:2000; EN 933-1:1997/A1:2005

Massa inicial da amostra,  $M_1$  (0,001 kg) = **1,362**

Massa de amostra após lavagem,  $M_2$  (0,001 kg) = **1,323**

Peneiro abertura (mm)	Retidos		$N_1 = \frac{R_i}{M_1} \times 100$ (0,1%)	Passados Acumulados $N_2 = 100 - N_1$ (0,1%)
	$R_i$ (0,1g)	$R_i$ (0,001kg)		
125				100,0
80				100,0
63				100,0
50				100,0
45				100,0
40				100,0
31,5				100,0
25				100,0
22,4				100,0
20				100,0
16				100,0
14				100,0
12,5				100,0
11,2				100,0
10				100,0
8				100,0
6,3				100,0
5,6				100,0
5				100,0
4	64,9	0,065	4,8	95,2
2	484,5	0,485	35,6	59,7
1	371,2	0,371	27,3	32,4
0,5	184,5	0,185	13,5	18,9
0,25	85,2	0,085	6,3	12,6
0,125	62,5	0,063	4,6	8,0
0,063	39,5	0,040	2,9	5,1

**Determinação das categorias do agregado**  
Norma Europeia de produto

		12620	13139	13043	13242	13450
Dimensão máxima (mm)	D					
Dimensão mínima (mm)	d					
Porcentagem que passa, em massa	20					
	1,4D					
	d/2					

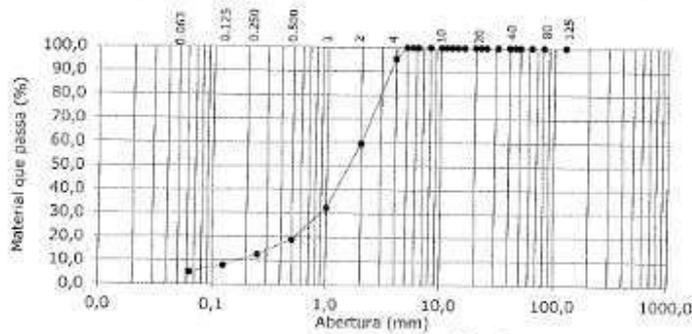
Categoria granulométrica	G				
--------------------------	---	--	--	--	--

Categoria do teor de finos	f				
----------------------------	---	--	--	--	--

Módulo de finos	FM	3,7
-----------------	----	-----

Retido no fundo, P = **30,5** **0,031**

Passados no peneiro 63  $\mu\text{m}$ ,  $f$  (0,1 %) = **5,1**



Observações:

Ensaiou \_\_\_\_\_ Aprovado \_\_\_\_\_

LABORATÓRIO

At. Silva

P. Oliveira

Areia de mármore

MOTAENGL CONSTRUÇÃO		CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO					
		CTP.VVI.0/4.05					
		CE					
		0866					
		MOTA-ENGL ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, SA Pedreira de Vila Viçosa Herdade da Vicária, Apt 163 - 7160-909 Vila Viçosa 04 CPD-2004-CE-010					
Descrição do produto / Norma Europeia		EN 12 620	EN 13 043	EN 13 130	EN 13 242	EN 13 383	EN 13 450
Descrição petrográfica	Des.	Mármore	Mármore	Mármore	Mármore		
Dimensão das partículas	Des.	0/4	0/4	0/4	0/4		
Granulometria	C	G <sub>p</sub> 85	G <sub>A</sub> 85		G <sub>p</sub> 85		
Tolerância da granulometria	C						
Módulo de finura da areia (%)	VD						
Limpeza							
Teor em partículas finas	C						
Teor em finos (%)	C	<i>f</i> <sub>10</sub>	<i>f</i> <sub>10</sub>	4	<i>f</i> <sub>10</sub>		
Qualidade dos finos - Equivalente de areia (%)	VL	SE <sub>60</sub>	SE <sub>60</sub>		SE <sub>60</sub>		
Qualidade dos finos - Azul de metileno	VL						
Índice de achatamento	C						
Índice de forma	C						
Comprimento das partículas	C						
Porcentagem de partículas britadas	C		C <sub>1000</sub>		C <sub>900</sub>		
Angulosidade do agregado	C						
Resistência a fragmentação (LA)	C						
Resistência ao esmagamento	C						
Resistência ao polimento acelerado	C						
Resistência à abrasão	C						
Resistência ao desgaste ( <i>f</i> <sub>DE</sub> )	C						
Resistência à compressão	C						
Massa volumica das partículas	VD	2,71	2,71	2,71	2,71		
Absorção de água (%)	VD	WA <sub>24</sub> 0,18	WA <sub>24</sub> 0,18	WA <sub>24</sub> 0,18	WA <sub>24</sub> 0,18		
Resistência ao gelo/degelo	C	F <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>		
Resistência ao sulfato de magnésio	C	MS <sub>18</sub>	MS <sub>18</sub>	MS <sub>18</sub>	MS <sub>18</sub>		
Afinidade aos ligantes betuminosos	VD						
Resistência ao choque térmico %	VD						
Estabilidade volumétrica							
Retração por secagem (%)	VD	-0,013	-0,013	-0,013	-0,013		
Reacção alcalis-silica	VD						
Requisitos químicos							
Teor em cloretos (%)	VD	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
Sulfatos solúveis em meio ácido (%)	C	AS <sub>0,8</sub>	AS <sub>0,8</sub>	AS <sub>0,8</sub>	AS <sub>0,8</sub>		
Enxofre total (%)	VD	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
Teor em matéria orgânica:							
Impurezas orgânicas leves (%)	VD	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
Solubilidade em água (%)	C	0,1	0,1	0,1	0,1		
Perda por calcinação (%)	VD	39,89	39,89	39,89	39,89		
Teor de carbonato de cálcio (%)	VD						
Libertação de substâncias perigosas							
Emissão radioactiva	VD						
Libertação de metais pesados	VD						
Libert. hidrocarbonetos poliaromáticos	VD						

EN 12620

Aprovado: (original assinado) Emitido: na data / /

Des. - Designação; C - categoria; VL - Valor Limite; VD - Valor Declarado;  
 AGE - Agregado de granulometria extensa; SBA - Sub-balastro; Ba - Balastro; B - Base; SB - Sub-base; 2A - 2ª A; 2B - 2ª B; DD - Desgaste drenante; T - Triturado; N - Natural; L - Lavado

ANEXO C - Curvas granulométricas



Folha de Rosto

C. Industrial  
V. Viçosa

Amostra  
A0104-11

Página  
1/1

Data  
12-Set-11

Ensaios Laboratoriais  
Controlo de Produção - Marcação CE

INFORMAÇÕES GERAIS

Designação no stock: AG 0/4 Data de amostragem: 12-09-2011  
Localização da colheita: STOCK Hora de amostragem: 8.00  
Condições meteorológicas: Sol

ENSAIOS A REALIZAR

Ensaios a realizar	Código	Ensaio	Boletim	Data de ensaio
<input checked="" type="checkbox"/>	051	Análise Granulométrica. Método de penetração NP EN 933-1:2000; EN 933-1:1997/A1:2005		12-Set-11
<input type="checkbox"/>	052	Determinação da forma das partículas. Índice de Achatamento NP EN 933-3:2002, EN 933-3:1997/A1:2003		
<input type="checkbox"/>	053	Determinação da forma das partículas. Índice de Forma EN 933-4:2008		
<input type="checkbox"/>	054	Determinação da resistência à fragmentação. Método de "Los Angeles" EN 1097-2:2010		
<input checked="" type="checkbox"/>	055	Determinação do teor de finos. Ensaio do Equivalente de Areia NP EN 933-8:2002		12-Set-11
<input checked="" type="checkbox"/>	056	Determinação do teor de finos. Ensaio do Azul de Metileno EN 933-9:2009		12-Set-11
<input type="checkbox"/>	058	Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada EN 1097-5:2008		
<input type="checkbox"/>	059	Análise granulométrica EN 13383-2:2002 (Secção 5)		
<input type="checkbox"/>	060	Determinação da percentagem de enrocamento com uma relação comprimento/espessura > 3 - EN 13383-2:2002 (Secção 7)		
<input type="checkbox"/>	061	Determinação do comprimento das partículas do balastro NP EN 13450:2005 (Secção 6.7)/AC:2010		
<input type="checkbox"/>	062	Elementos prejudiciais (Balastro) I.099.LABC		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da resistência ao desgaste (Micro-Deval) NP EN 1097-1:2002; EN 1097-1:1998/A1:2003		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da massa volúmica e determinação da absorção de água EN 13383-2:2002 (Secção 8)		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da resistência à compressão NP EN 1926:2008		

DEFINIÇÕES DO PRODUTO (Norma de produto)

NORMA EUROPEIA DE PRODUTO		12620	13139	13043	13242	13450	13383-1
Designação	d/D						
Categoria granulométrica	G ou CP						
Categoria do teor de finos	f						
Categoria do índice de achatamento	FI						
Categoria do índice de forma	SI						
Valor de equivalente de areia	SE						
Valor de azul de metileno	MB						
Categoria do coeficiente de Los Angeles	LA						
Categoria do coeficiente Micro-Deval	M <sub>DE</sub>						
Conteúdo de partículas finas (% <0.5 mm)	-						
Conteúdo de finos (% <0.063 mm)	-						
Módulo de finura	FM						
Categoria Forma	LT						
Categoria Resistência Rotura	CS						
Massa Volúmica Partículas	(Mg/m <sup>3</sup> )						
Conformidade do produto* (SIM/NÃO)							

\* No caso de não conformidade do produto justificar o motivo no campo de observações

Observações:

LABC.100.7

Responsável pela amostragem

M. Bravo

Responsável do centro de produção

P. Queiroz



**MOTAENÇIL**  
LABORATÓRIO

**BOLETIM DE ENSAIO**

C. Industrial  
V. Viçosa

Amostra  
A0104-11

Boletim

Página  
1/1

Data  
12-Ser-11

Análise Granulométrica. Método de peneiração  
NP EN 933-1:2000; EN 933-1:1997/A1:2005

Massa inicial da amostra,  $M_1$  (0,001 kg) = **0,368**

Massa da amostra após lavagem,  $M_2$  (0,001 kg) = **0,327**

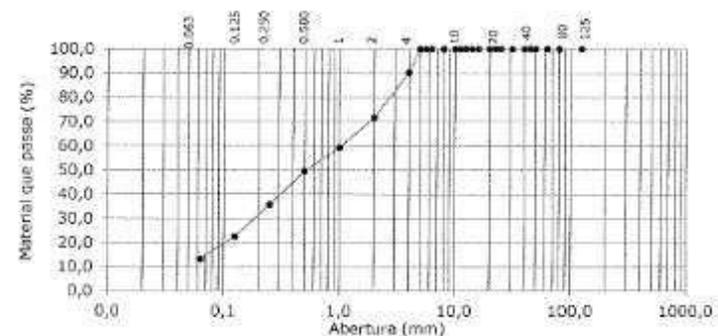
Peneiro abertura (mm)	Rebidos		Passados Acumulados	
	$R_i$ (0,1g)	$(0,001kg)$	$N_i = \frac{R_i}{M_1} \times 100$ (0,1%)	$N'_i = 100 - N_i$ (0,1%)
125				100,0
80				100,0
63				100,0
50				100,0
45				100,0
40				100,0
31,5				100,0
25				100,0
22,4				100,0
20				100,0
16				100,0
14				100,0
12,5				100,0
11,2				100,0
10				100,0
8				100,0
6,3				100,0
5,6				100,0
5				100,0
4	35,9	0,036	9,8	90,2
2	68,5	0,069	18,6	71,6
1	49,5	0,046	12,4	59,3
0,5	35,9	0,036	9,8	49,5
0,25	51,0	0,051	13,9	35,7
0,125	48,5	0,049	13,2	22,5
0,063	34,2	0,034	9,3	13,2

**Determinação das categorias do agregado**  
Norma Europeia de produto

		12620	13138	13043	13242	13460
Dimensão máxima (mm)	D					
Dimensão mínima (mm)	d					
Porcentagem que passa, em massa	20					
	1,40					
	d/2					
Categoria granulométrica	G					
Categoria de teor de finos	f					
Módulo de finos	FM					2,7

Resíduo no fundo,  $P =$  7,8 0,008

Passados no peneiro 63  $\mu m$ ,  $f$  (0,1 %) = **13,2**



Observações:

**Ensaiou**

\_\_\_\_\_

M. Bruc

**Aprovado**

\_\_\_\_\_

P. Queiroz

LAB2015



## **D. BARIDADE E VOLUME DE VAZIOS**

	Brita 2			Brita 1			Bago de arroz			Areia grossa de rio		
V (m <sup>3</sup> )	0,010			0,010			0,010			0,010		
M <sub>1</sub> (kg)	8,610			8,610			8,610			8,610		
M <sub>2</sub> (kg)	22,16	22,30	22,25	22,07	22,25	22,18	22,06	22,21	22,17	24,10	24,00	24,01
ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1363			1356			1354			1542		

	Areia fina de rio			Areia de basalto			Areia de granito			Areia de mármore		
V (m <sup>3</sup> )	0,003			0,003			0,003			0,003		
M <sub>1</sub> (kg)	1,866			1,866			1,866			1,866		
M <sub>2</sub> (kg)	17,01	17,21	17,16	20,19	20,14	20,40	17,42	17,44	17,53	19,58	19,74	19,79
ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1526			1838			1560			1784		

	ρ <sub>rd</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Ω (%)
<b>Brita 2</b>	2606	1363	47,7
<b>Brita 1</b>	2620	1356	48,3
<b>Bago de arroz</b>	2489	1354	45,6
<b>Areia grossa de rio</b>	2600	1542	40,7
<b>Areia fina de rio</b>	2523	1526	39,5
<b>Areia de basalto</b>	2820	1838	34,8
<b>Areia de mármore</b>	2684	1784	33,5
<b>Areia de granito</b>	2467	1560	36,8

V - volume do recipiente de ensaio (m<sup>3</sup>);

M<sub>1</sub> - massa do recipiente de ensaio (kg);

M<sub>2</sub> - massa do recipiente de ensaio cheio com agregado (kg);

ρ<sub>t</sub> - baridade dos agregados (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>rd</sub> - massa volúmica dos agregados secos em estufa (kg/m<sup>3</sup>);

Ω - percentagem de vazios (%).

## **E. DESGASTE DE LOS ANGELES**

---

	n	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	D (%)
<b>Brita 2</b>	11	5001,3	3675,0	26,52
<b>Brita 1</b>	8	5000,4	3727,8	25,45
<b>Bago de arroz</b>	6	5000,3	3877,7	22,45

n - número de esferas de aço que constituem a carga abrasiva;

M<sub>1</sub> - massa do provete inicial de ensaio (g);

M<sub>2</sub> - massa do provete final retido no peneiro de 1,68 mm (g);

D - percentagem de material resultante do desgaste (%).

## **F. ÍNDICE DE FORMA**

Brita 2			Brita 1			Bago de arroz		
Malha (mm)	$M_{fi}$ (g)	$M_{ni}$ (g)	Malha (mm)	$M_{fi}$ (g)	$M_{ni}$ (g)	Malha (mm)	$M_{fi}$ (g)	$M_{ni}$ (g)
31,50	0,00	-	31,50	0,00	-	31,50	0,00	-
22,40	603,20	52,40	22,40	0,00	-	22,40	0,00	-
16,00	1692,10	144,50	16,00	0,00	-	16,00	0,00	-
11,20	1589,60	379,60	11,20	89,40	14,50	11,20	0,00	-
8,00	100,90	-	8,00	319,40	52,00	8,00	0,00	-
5,60	9,20	-	5,60	307,50	55,00	5,60	27,50	6,50
4,00	4,60	-	4,00	41,80	-	4,00	83,20	13,20
$\sum M_{fi}$ (g)		3999,60	$\sum M_{fi}$ (g)		758,10	$\sum M_{fi}$ (g)		110,70
$\sum M_{ni}$ (g)		576,50	$\sum M_{ni}$ (g)		121,50	$\sum M_{ni}$ (g)		19,70
$I_f$ (%)		15,3	$I_f$ (%)		16,8	$I_f$ (%)		18,4

$I_f$  - índice de forma (%);

$\sum M_{fi}$  - somatório da massa das x partículas de cada uma das frações granulométricas de ensaio (g);

$\sum M_{ni}$  - somatório da massa das y partículas não cúbicas de cada uma das frações granulométricas de ensaio (g).

## **G. ABAIXAMENTO E MASSA VOLÚMICA DO BETÃO NO ESTADO FRESCO**

<b>Betonagem experimental</b>				
Percentagem de substituição				
0		100		
	h (mm)	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	h (mm)	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BB</b>	12,1	2420,2	12,8	2378,6
<b>BC</b>	13,1	2349,4		
<b>BG</b>	12,5	2367,6		

<b>Betonagem efetiva</b>								
Percentagem de substituição								
	0		20		50		100	
	h (mm)	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )						
<b>BB</b>	11,3	2412,5	14,3	2389,5	14,3	2385,2	13,5	2387,6
<b>BC</b>	13,3	2356,4	12,7	2381,7	13,2	2384,2		
<b>BG</b>	12,7	2361,6	11,6	2360,4	13	2381,1		

h - abaixamento da amostra de betão (mm);

$\rho_v$  - massa volúmica no estado fresco (kg/m<sup>3</sup>).

## **H. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Betoneagem experimental	Ensaio aos 28 dias						
	Tipo de betão	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	Média (kN)	Ac (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)
	<b>BRB</b>	1153,0	1120,0	1147,0	1140,0	22500	50,7
	<b>BRM</b>	1005,0	1031,0	1015,0	1017,0		45,2
	<b>BRC</b>	1278,0	1252,0	1260,0	1263,3		56,1
	<b>BRG</b>	1117,0	1107,0	1098,0	1107,3		49,2

Betoneagem efetiva	Ensaio aos 7 dias						
	Tipo de betão	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	Média (kN)	Ac (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)
	<b>BRB</b>	873,0	852,8	846,0	857,3	22500	38,1
	<b>BB/M20</b>	805,5	801,0	807,8	804,8		35,8
	<b>BB/M50</b>	814,5	810,0	774,0	799,5		35,6
	<b>BRM</b>	812,3	839,3	832,5	828,0		36,8
	<b>BRC</b>	1010,3	1062,0	1005,8	1026,0		45,6
	<b>BC/M20</b>	949,5	972,0	963,0	961,5		42,7
	<b>BC/M50</b>	922,5	933,8	850,5	902,3		40,1
	<b>BRG</b>	870,8	904,5	900,0	891,8		39,6
	<b>BG/M20</b>	839,3	891,0	879,8	870,0		38,6
	<b>BG/M50</b>	875,3	855,0	855,0	861,8		38,3

Betoneagem efetiva	Ensaio aos 28 dias								
	Tipo de betão	F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	F <sub>3</sub> (kN)	F <sub>4</sub> (kN)	F <sub>5</sub> (kN)	Média (kN)	A <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
	<b>BRB</b>	945,0	1134,0	1136,3	1147,5	1120,5	1134,6	22500	50,4
	<b>BB/M20</b>	1167,8	1053,0	1098,0	1116,0	1102,5	1107,5		49,2
	<b>BB/M50</b>	1075,5	1028,3	1050,8	1048,5	1100,3	1060,7		46,7
	<b>BRM</b>	940,5	1023,8	1003,5	1012,5	1037,3	1019,3		45,3
	<b>BRC</b>	1298,3	1269,0	1275,8	1278,0	1280,3	1280,3		56,9
	<b>BC/M20</b>	1217,3	1230,8	1323,0	1296,0	1239,8	1261,4		56,0
	<b>BC/M50</b>	1194,8	1073,3	1174,5	1125,0	1188,0	1151,1		51,2
	<b>BRG</b>	1129,5	1059,8	1125,0	1163,3	1059,8	1107,5		49,2
	<b>BG/M20</b>	1100,3	1066,5	1089,0	1023,8	1073,3	1070,6		47,6
	<b>BG/M50</b>	1048,5	1023,8	1064,3	1030,5	1035,0	1040,4		46,2

Ensaio aos 56 dias							
Betagem efetiva	Tipo de betão	F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	F <sub>3</sub> (kN)	Média (kN)	A <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
	<b>BRB</b>	1248,8	1198,0	1209,3	1218,7	22500	54,2
	<b>BB/M20</b>	1314,0	1327,5	1302,8	1314,8		58,4
	<b>BB/M50</b>	1176,8	1251,0	1260,0	1229,3		54,6
	<b>BRM</b>	1122,8	1156,5	1188,0	1155,8		51,4
	<b>BRC</b>	1325,3	1354,5	1503,0	1394,3		62,0
	<b>BC/M20</b>	1388,3	1293,8	1413,0	1365,0		60,8
	<b>BC/M50</b>	1307,3	1197,0	1161,0	1221,8		54,3
	<b>BRG</b>	1134,0	1147,5	1181,3	1154,3		51,3
	<b>BG/M20</b>	1134,0	1089,0	1156,5	1126,5		49,7
	<b>BG/M50</b>	1176,8	1143,0	1102,5	1140,8		50,7

F<sub>i</sub> - carga máxima que leva o provete i à rotura (kN);

A<sub>c</sub> - área de contato do provete com a prensa hidráulica (mm<sup>2</sup>);

f<sub>c</sub> - resistência à compressão do provete (MPa).



## **I. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

ANEXO I - Absorção de água por capilaridade

Tempo de ensaio (h)	BRB												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	5974,4	0,0	0,00E+00	6094,2	0,0	0,00E+00	6127,3	0,0	0,00E+00	6012,3	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5991,8	21,8	1,74E-03	6109,8	20,1	1,56E-03	6140,8	18,7	1,35E-03	6025,4	16,9	1,31E-03	1,49E-03	19,4
6	5997,9	26,9	2,35E-03	6115,3	25,2	2,11E-03	6145,6	23,8	1,83E-03	6030,0	23,9	1,77E-03	2,02E-03	25,0
24	6008,5	36,6	3,41E-03	6123,8	35,9	2,96E-03	6154,6	34,1	2,73E-03	6038,6	36,7	2,63E-03	2,93E-03	35,8
72	6021,6	47,4	4,72E-03	6135,5	46,8	4,13E-03	6166,8	45,8	3,95E-03	6049,8	47,6	3,75E-03	4,14E-03	46,9
Tempo de ensaio (h)	BB/M20												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	6011,6	0,0	0,00E+00	6046,5	0,0	0,00E+00	6052,3	0,0	0,00E+00	6093,7	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	6023,5	17,0	1,19E-03	6059,5	16,8	1,30E-03	6064,3	16,5	1,20E-03	6105,5	15,2	1,18E-03	1,22E-03	16,4
6	6026,2	22,4	1,46E-03	6063,0	21,4	1,65E-03	6067,3	20,6	1,50E-03	6108,4	19,5	1,47E-03	1,52E-03	21,0
24	6030,8	29,7	1,92E-03	6068,7	30,2	2,22E-03	6072,5	27,5	2,02E-03	6113,5	27,3	1,98E-03	2,03E-03	28,7
72	6040,1	39,5	2,85E-03	6078,7	39,6	3,22E-03	6081,9	36,9	2,96E-03	6121,9	38,1	2,82E-03	2,96E-03	38,5
Tempo de ensaio (h)	BB/M50												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	6029,4	0,0	0,00E+00	6105,2	0,0	0,00E+00	5970,7	0,0	0,00E+00	6065,0	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	6042,5	15,3	1,31E-03	6118,8	14,9	1,36E-03	5982,0	14,7	1,13E-03	6077,8	15,0	1,28E-03	1,27E-03	15,0
6	6046,0	20,8	1,66E-03	6122,4	19,8	1,72E-03	5985,1	19,2	1,44E-03	6081,3	18,7	1,63E-03	1,61E-03	19,6
24	6055,2	28,9	2,58E-03	6131,4	28,1	2,62E-03	5993,7	26,7	2,30E-03	6090,5	27,4	2,55E-03	2,51E-03	27,8
72	6063,4	38,7	3,40E-03	6139,5	38,3	3,43E-03	6002,2	37,4	3,15E-03	6098,8	39,2	3,38E-03	3,34E-03	38,4

$$A_p = 100 \times 100 = 10^3 \text{ mm}^2$$

Tempo de ensaio (h)	BRC												$A_{cm}$ (g/mm <sup>3</sup> )	$h_m$ (mm)
	1			2			3			4				
	$M_i$	$h_i$	$A_{ci}$											
0	6069,8	0,0	0,00E+00	6058,6	0,0	0,00E+00	6074,1	0,0	0,00E+00	5973,0	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	6080,5	13,0	1,07E-03	6069,4	15,0	1,08E-03	6085,5	14,4	1,14E-03	5983,3	13,9	1,03E-03	1,08E-03	14,1
6	6083,0	19,5	1,32E-03	6071,4	19,8	1,28E-03	6087,6	19,2	1,35E-03	5985,4	18,6	1,24E-03	1,30E-03	19,3
24	6089,7	27,1	1,99E-03	6079,0	26,6	2,04E-03	6095,6	25,5	2,15E-03	5993,1	25,6	2,01E-03	2,05E-03	26,2
72	6099,6	35,6	2,98E-03	6088,4	34,9	2,98E-03	6105,6	33,6	3,15E-03	6002,4	34,9	2,94E-03	3,01E-03	34,7
Tempo de ensaio (h)	BC/M20												$A_{cm}$ (g/mm <sup>3</sup> )	$h_m$ (mm)
	1			2			3			4				
	$M_i$	$h_i$	$A_{ci}$											
0	5986,9	0,0	0,00E+00	6037,8	0,0	0,00E+00	6067,5	0,0	0,00E+00	5823,4	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5999,0	15,6	1,21E-03	6050,3	16,1	1,25E-03	6078,8	15,6	1,13E-03	5834,2	14,5	1,08E-03	1,17E-03	15,4
6	6001,0	21,2	1,41E-03	6053,3	23,0	1,55E-03	6080,8	19,8	1,33E-03	5836,0	20,4	1,26E-03	1,39E-03	21,1
24	6006,6	31,4	1,97E-03	6058,7	35,7	2,09E-03	6085,6	32,1	1,81E-03	5841,0	30,9	1,76E-03	1,91E-03	32,5
72	6012,0	42,6	2,51E-03	6064,9	46,3	2,71E-03	6090,7	42,4	2,32E-03	5846,7	43,1	2,33E-03	2,47E-03	43,6
Tempo de ensaio (h)	BC/M50												$A_{cm}$ (g/mm <sup>3</sup> )	$h_m$ (mm)
	1			2			3			4				
	$M_i$	$h_i$	$A_{ci}$											
0	5896,8	0,0	0,00E+00	5888,4	0,0	0,00E+00	6018,8	0,0	0,00E+00	5854,6	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5908,1	16,6	1,13E-03	5900,2	16,5	1,18E-03	6032,3	19,6	1,35E-03	5867,6	18,9	1,30E-03	1,24E-03	17,9
6	5911,9	25,6	1,51E-03	5904,0	23,9	1,56E-03	6034,5	25,7	1,57E-03	5870,6	25,4	1,60E-03	1,56E-03	25,1
24	5918,5	32,8	2,17E-03	5910,4	31,5	2,20E-03	6040,5	32,4	2,17E-03	5877,0	32,5	2,24E-03	2,19E-03	32,3
72	5927,1	40,1	3,03E-03	5918,5	40,4	3,01E-03	6048,8	38,8	3,00E-03	5885,7	42,0	3,11E-03	3,04E-03	40,3

$$A_p = 100 \times 100 = 10^3 \text{ mm}^2$$

ANEXO I - Absorção de água por capilaridade

Tempo de ensaio (h)	BRG												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	5952,6	0,0	0,00E+00	6061,2	0,0	0,00E+00	6010,3	0,0	0,00E+00	5490,9	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5967,6	15,8	1,50E-03	6076,4	15,9	1,52E-03	6024,9	15,6	1,46E-03	5507,0	15,7	1,61E-03	1,52E-03	15,7
6	5970,1	20,6	1,75E-03	6078,4	20,1	1,72E-03	6027,1	20,7	1,68E-03	5509,6	22,0	1,87E-03	1,76E-03	20,8
24	5979,4	28,2	2,68E-03	6087,0	27,6	2,58E-03	6037,5	29,2	2,72E-03	5520,5	32,5	2,96E-03	2,73E-03	29,4
72	5991,3	35,3	3,87E-03	6097,2	36,4	3,60E-03	6050,0	39,8	3,97E-03	5533,7	45,6	4,28E-03	3,93E-03	39,3
Tempo de ensaio (h)	BG/M20												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	5788,6	0,0	0,00E+00	6001,4	0,0	0,00E+00	5719,1	0,0	0,00E+00	6125,1	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5797,9	12,7	9,30E-04	6011,9	12,7	1,05E-03	5728,3	13,4	9,20E-04	6133,1	13,3	8,00E-04	9,25E-04	13,0
6	5800,1	18,1	1,15E-03	6014,1	17,4	1,27E-03	5730,2	18,5	1,11E-03	6135,0	18,0	9,90E-04	1,13E-03	18,0
24	5804,2	24,9	1,56E-03	6019,7	25,8	1,83E-03	5735,5	26,5	1,64E-03	6140,7	26,1	1,56E-03	1,65E-03	25,8
72	5813,1	37,6	2,45E-03	6029,5	38,3	2,81E-03	5742,7	40,0	2,36E-03	6151,2	38,1	2,61E-03	2,56E-03	38,5
Tempo de ensaio (h)	BG/M50												A <sub>cm</sub> (g/mm <sup>3</sup> )	h <sub>m</sub> (mm)
	1			2			3			4				
	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>	M <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	A <sub>ci</sub>		
0	5690,5	0,0	0,00E+00	6192,3	0,0	0,00E+00	6062,8	0,0	0,00E+00	3323,3	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5701,5	15,7	1,10E-03	6203,0	14,2	1,07E-03	6073,8	14,4	1,10E-03	3335,1	13,8	1,18E-03	1,11E-03	14,5
6	5704,5	20,3	1,40E-03	6205,6	19,3	1,33E-03	6076,2	19,3	1,34E-03	3336,4	17,7	1,31E-03	1,34E-03	19,1
24	5710,0	28,3	1,95E-03	6212,5	27,1	2,02E-03	6082,8	26,9	2,00E-03	3342,8	26,9	1,95E-03	1,98E-03	27,3
72	5718,9	37,5	2,84E-03	6220,8	39,3	2,85E-03	6090,9	37,8	2,81E-03	3350,8	40,2	2,75E-03	2,81E-03	38,7

$$A_p = 100 \times 100 = 10^3 \text{ mm}^2$$

Tempo de ensaio (h)	BRM												$A_{cm}$ (g/mm <sup>3</sup> )	$h_m$ (mm)
	1			2			3			4				
	$M_i$	$h_i$	$A_{ci}$											
0	5874,1	0,0	0,00E+00	6096,7	0,0	0,00E+00	5923,0	0,0	0,00E+00	5916,9	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,0
3	5883,8	12,8	9,70E-04	6108,1	14,1	1,14E-03	5934,2	13,1	1,12E-03	5927,7	14,6	1,08E-03	1,08E-03	13,7
6	5886,4	17,7	1,23E-03	6111,1	18,8	1,44E-03	5937,5	19,0	1,45E-03	5930,5	21,2	1,36E-03	1,37E-03	19,2
24	5894,9	28,5	2,08E-03	6118,8	27,4	2,21E-03	5940,2	29,6	1,72E-03	5945,7	31,5	2,88E-03	2,22E-03	29,2
72	5904,2	39,8	3,01E-03	6128,6	38,7	3,19E-03	5955,6	43,2	3,26E-03	5950,2	43,4	3,33E-03	3,20E-03	41,3

$$A_p = 100 \times 100 = 10^3 \text{ mm}^2$$

$M_i$  - massa do provete após  $i$  horas em contato com a lâmina de água (g);

$h_i$  - altura de absorção de água por capilaridade após  $i$  horas em contato com a lâmina de água (mm);

$A_{ci}$  - absorção de água por capilaridade após  $i$  horas em contato com a lâmina de água (g/mm<sup>3</sup>);

$A_{cm}$  - absorção de água por capilaridade média após  $i$  horas em contato com a lâmina de água (g/mm<sup>3</sup>);

$h_m$  - altura de absorção de água por capilaridade média após  $i$  horas em contato com a lâmina de água (mm);

$A_p$  - área da superfície do provete em contato com a água (mm<sup>2</sup>).



## **J. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO**

Tipo de betão	Provete	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	A <sub>i</sub> (%)	A <sub>imédio</sub> (%)
BRB	1	2520,1	1496,0	2349,9	16,6	16,4
	2	2512,9	1491,6	2349,4	16,0	
	3	2490,2	1482,9	2326,6	16,2	
	4	2490,0	1479,8	2320,1	16,8	
BB/M20	1	2456,2	1456,2	2284,2	17,2	17,1
	2	2445,0	1450,6	2278,8	16,7	
	3	2440,9	1433,1	2271,9	16,8	
	4	2429,7	1435,2	2255,4	17,5	
BB/M50	1	2418,4	1417,5	2258,1	16,0	15,7
	2	2468,9	1454,3	2315,3	15,1	
	3	2472,0	1456,2	2314,1	15,5	
	4	2389,3	1400,4	2230,3	16,1	
BRM	1	2416,1	1412,7	2263,9	15,2	15,9
	2	2435,9	1419,9	2269,3	16,4	
	3	2417,5	1411,8	2258,2	15,8	
	4	2409,1	1405,0	2246,0	16,2	
BRC	1	2470,1	1450,2	2324,6	14,3	14,3
	2	2503,7	1475,0	2362,4	13,7	
	3	2447,6	1439,0	2300,8	14,6	
	4	2467,2	1448,2	2317,4	14,7	
BC/M20	1	2471,7	1456,8	2334,6	13,5	13,5
	2	2419,2	1422,9	2280,4	13,9	
	3	2439,3	1438,7	2308,9	13,0	
	4	2423,2	1425,2	2289,2	13,4	
BC/M50	1	2435,4	1428,2	2293,8	14,1	13,9
	2	2438,3	1425,8	2293,9	14,3	
	3	2433,3	1425,0	2292,1	14,0	
	4	2425,4	1422,1	2292,2	13,3	
BRG	1	2425,7	1403,4	2225,2	19,6	19,4
	2	2401,0	1390,4	2208,9	19,0	
	3	2402,6	1386,1	2200,7	19,9	
	4	2410,3	1394,3	2217,8	18,9	
BG/M20	1	2451,2	1425,5	2269,3	17,7	17,1
	2	2491,7	1456,0	2316,7	16,9	
	3	2437,2	1425,1	2266,8	16,8	
	4	2467,6	1442,0	2291,9	17,1	
BG/M50	1	2452,8	1434,2	2287,7	16,2	16,7
	2	2456,5	1431,4	2283,9	16,8	
	3	2423,1	1411,6	2254,4	16,7	
	4	2428,2	1415,8	2255,6	17,0	

M<sub>1</sub> - massa do provete saturado com superfície seca (g);

M<sub>2</sub> - massa hidrostática do provete saturado (g);

M<sub>3</sub> - massa do provete seco em estufa (g);

A<sub>i</sub> - absorção de água por imersão (%);

A<sub>imédio</sub> - absorção de água por imersão média (%).

## **K. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO**

ANEXO K - Resistência à carbonatação

Tempo de exposição (dias)	BRB										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,20	1,00	2,40	1,90	2,30	1,70	1,90	1,10	1,81	2,15
	2	2,50	2,00	2,20	2,90	1,90	2,50	2,00	2,30	2,29	
	3	2,80	2,40	3,00	2,40	2,10	1,80	2,10	2,30	2,36	
28	1	5,00	6,00	4,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,50	4,81	4,60
	2	3,00	5,00	4,00	5,00	3,00	4,00	3,50	5,00	4,06	
	3	5,00	6,00	5,50	4,50	5,00	5,00	5,00	3,50	4,94	
56	1	7,00	6,50	6,80	7,70	8,80	7,80	8,50	9,00	7,76	7,91
	2	8,30	8,70	5,20	9,00	7,30	7,90	8,20	6,70	7,66	
	3	8,50	7,70	6,90	10,00	8,90	7,10	8,20	9,20	8,31	
91	1	12,83	9,55	9,72	10,61	8,35	11,08	11,01	9,64	10,35	10,25
	2	7,86	9,12	10,47	11,35	8,64	10,78	8,10	9,85	9,52	
	3	12,45	12,85	7,75	13,13	10,58	12,41	7,08	10,79	10,88	
Tempo de exposição (dias)	BB/M20										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,20	1,88	2,43	1,57	1,84	2,39	2,37	1,69	2,05	2,37
	2	2,78	2,51	1,84	2,76	1,78	2,70	1,77	2,59	2,34	
	3	3,35	2,81	2,87	2,47	3,23	2,02	2,34	2,69	2,72	
28	1	5,91	6,20	7,01	6,84	6,28	5,71	6,87	6,21	6,38	5,13
	2	4,15	4,08	4,04	3,87	4,32	4,36	4,81	4,82	4,31	
	3	3,15	5,77	3,87	3,42	6,63	5,24	5,61	3,87	4,70	
56	1	8,31	7,24	7,47	8,11	7,92	8,21	8,07	8,22	7,94	8,02
	2	7,88	8,37	8,61	7,79	8,22	8,31	8,11	8,04	8,17	
	3	7,45	8,26	8,21	8,37	7,87	7,79	7,93	7,82	7,96	
91	1	11,84	11,24	10,57	10,48	10,97	10,46	10,09	11,25	10,86	10,73
	2	10,58	11,05	10,90	11,57	10,31	10,77	12,08	11,75	11,13	
	3	9,73	9,76	10,52	10,47	10,61	10,25	9,98	10,21	10,19	
Tempo de exposição (dias)	BB/M50										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,26	1,97	1,64	2,06	1,42	1,46	1,21	1,79	1,73	1,97
	2	1,62	2,18	2,04	2,11	1,54	1,34	1,87	1,87	1,82	
	3	1,89	2,16	2,57	2,78	2,69	2,35	2,21	2,35	2,38	
28	1	4,99	4,62	4,56	4,12	4,80	5,00	5,33	4,64	4,76	5,41
	2	6,12	5,41	6,09	6,04	6,18	5,24	6,23	6,35	5,96	
	3	5,91	4,60	4,26	5,48	5,59	6,21	6,14	6,01	5,53	
56	1	9,50	8,33	9,20	6,50	6,66	8,00	8,20	8,23	8,08	7,68
	2	7,35	8,90	6,37	7,90	6,81	6,80	6,90	7,22	7,28	
	3	7,30	8,94	8,10	7,10	7,90	7,20	7,94	6,90	7,67	
91	1	11,04	12,84	12,06	11,52	10,66	12,60	11,17	11,48	11,67	10,94
	2	10,51	11,26	10,47	10,03	10,24	12,24	12,16	11,14	11,01	
	3	10,77	10,19	10,44	8,24	11,33	7,23	11,81	11,22	10,15	

Tempo de exposição (dias)	BRC										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,14	2,37	1,97	1,84	1,77	2,26	2,34	2,11	2,10	2,13
	2	2,16	2,35	2,61	1,99	2,32	2,36	2,58	2,76	2,39	
	3	2,27	2,11	1,78	1,59	1,87	1,69	2,03	1,92	1,91	
28	1	3,82	5,10	4,63	3,67	3,74	4,02	4,58	3,69	4,16	4,08
	2	3,87	3,72	4,54	4,45	4,41	3,54	4,26	3,74	4,07	
	3	4,28	4,21	3,84	3,91	3,93	3,82	3,72	4,32	4,00	
56	1	6,13	6,21	6,48	5,92	6,15	6,10	5,74	6,03	6,10	5,90
	2	5,74	5,68	6,14	6,14	5,38	5,97	6,22	6,41	5,96	
	3	4,95	5,84	5,64	5,99	6,00	6,22	5,37	5,18	5,65	
91	1	6,92	5,85	7,78	7,91	7,35	8,36	8,60	7,49	7,53	7,52
	2	6,47	6,62	7,50	7,87	6,42	5,75	9,40	6,18	7,03	
	3	7,82	9,48	8,24	6,52	7,35	8,51	7,69	8,39	8,00	
Tempo de exposição (dias)	BC/M20										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,26	2,73	1,93	2,46	2,08	2,68	2,33	2,02	2,31	2,57
	2	2,55	2,22	2,78	3,10	2,72	2,48	3,63	1,73	2,65	
	3	3,04	2,64	3,39	2,24	2,06	3,69	1,79	3,13	2,75	
28	1	3,84	4,10	3,95	3,99	3,64	4,20	4,34	3,29	3,92	4,35
	2	3,55	4,74	4,82	4,44	5,18	4,22	5,12	3,86	4,49	
	3	5,21	5,46	4,01	4,49	5,57	4,14	4,66	3,67	4,65	
56	1	6,26	7,12	6,27	8,25	4,87	6,56	5,44	5,46	6,28	6,59
	2	6,25	5,80	8,15	7,80	6,79	7,38	6,24	7,81	7,03	
	3	5,57	6,02	6,35	7,77	5,84	6,87	7,10	6,23	6,47	
91	1	9,57	9,67	6,23	8,02	8,29	6,92	10,25	6,77	8,22	8,08
	2	7,59	6,91	8,20	8,91	8,21	8,08	6,67	7,57	7,77	
	3	9,65	10,19	8,64	10,05	9,34	3,38	4,39	10,30	8,24	
Tempo de exposição (dias)	BC/M50										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,81	1,50	1,61	2,71	2,97	2,85	2,64	3,08	2,52	2,55
	2	3,73	2,93	2,13	2,09	2,49	2,67	2,51	1,93	2,56	
	3	2,19	2,69	2,79	2,53	2,76	2,40	2,68	2,55	2,57	
28	1	5,30	4,11	5,11	5,99	5,49	3,94	4,91	5,53	5,05	5,61
	2	5,74	5,38	6,17	6,47	6,61	6,13	6,36	5,37	6,03	
	3	4,67	6,27	5,05	4,82	6,95	5,69	6,36	6,32	5,77	
56	1	5,68	7,60	7,17	6,74	7,21	7,59	6,17	5,57	6,72	6,71
	2	5,01	7,26	7,68	6,20	6,61	5,47	7,63	7,94	6,73	
	3	5,57	6,02	6,35	7,77	5,84	6,87	7,10	7,93	6,68	
91	1	12,86	11,19	8,96	9,55	11,78	8,81	10,51	11,54	10,65	10,19
	2	8,41	10,77	10,77	11,14	13,17	8,24	13,68	13,23	11,18	
	3	9,06	9,66	7,14	9,13	7,45	11,02	7,49	8,88	8,73	

ANEXO K - Resistência à carbonatação

Tempo de exposição (dias)	BRG										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	6,00	4,00	3,50	3,50	4,00	3,00	5,00	4,00	4,13	3,96
	2	4,00	5,00	4,00	4,00	4,50	5,00	5,00	4,00	4,44	
	3	4,50	2,00	4,50	4,00	2,50	3,00	3,00	3,00	3,31	
28	1	7,68	8,65	8,52	7,86	8,57	7,82	7,46	10,76	8,42	8,44
	2	8,10	7,68	8,26	9,17	8,16	8,29	8,44	7,28	8,17	
	3	7,54	8,42	10,72	8,36	7,49	9,26	8,37	9,69	8,73	
56	1	8,05	12,16	12,28	12,59	10,72	9,99	13,59	10,79	11,27	12,02
	2	11,56	13,15	13,36	14,63	9,82	12,46	13,40	5,24	11,70	
	3	14,54	12,00	12,59	14,16	12,18	11,96	13,65	13,71	13,10	
91	1	12,25	13,46	13,44	13,77	14,83	14,50	13,40	14,55	13,78	15,21
	2	11,90	19,38	18,25	12,00	12,50	15,45	11,80	18,26	14,94	
	3	19,10	14,24	14,69	19,65	18,44	16,93	14,86	17,43	16,92	
Tempo de exposição (dias)	BG/M20										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	2,80	3,83	3,60	4,24	3,26	2,93	2,69	3,91	3,41	3,61
	2	3,88	3,20	2,57	3,77	3,89	4,08	4,58	5,03	3,88	
	3	2,83	4,52	3,34	2,31	3,80	4,53	3,68	3,41	3,55	
28	1	7,10	8,00	7,30	10,30	7,20	8,10	7,70	6,80	7,81	7,17
	2	6,90	6,10	6,40	7,90	8,00	7,80	8,90	6,20	7,28	
	3	6,10	7,20	6,80	6,10	6,40	7,00	5,90	5,80	6,41	
56	1	9,79	9,78	10,16	10,14	8,85	9,86	7,98	9,09	9,46	9,87
	2	9,65	10,65	10,57	10,34	9,93	9,72	9,64	10,42	10,12	
	3	10,43	8,98	10,68	10,59	9,44	9,94	9,46	10,74	10,03	
91	1	12,97	12,96	13,15	12,18	13,57	12,54	12,94	11,84	12,77	12,78
	2	12,96	13,56	12,37	12,01	12,78	12,86	13,26	13,26	12,88	
	3	12,57	12,64	12,47	12,66	12,97	11,99	13,11	13,14	12,69	
Tempo de exposição (dias)	BG/M50										
	Provete	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>
7	1	4,14	3,56	3,21	3,38	4,17	4,08	3,25	3,74	3,69	3,52
	2	3,61	3,33	2,81	3,37	3,21	4,10	3,46	3,18	3,38	
	3	3,77	4,10	3,21	3,06	3,44	3,39	3,87	3,07	3,49	
28	1	6,17	7,50	8,11	7,30	8,10	7,20	6,79	7,40	7,32	6,91
	2	8,00	6,33	6,35	6,38	6,27	7,40	7,80	5,87	6,80	
	3	6,90	7,33	6,28	6,54	6,20	5,94	7,50	6,10	6,60	
56	1	9,71	8,77	8,47	8,17	7,96	9,44	8,12	9,23	8,73	9,33
	2	8,00	10,26	7,94	9,47	8,49	10,62	9,13	8,47	9,05	
	3	8,47	9,11	9,42	9,42	11,20	11,94	10,57	11,47	10,20	
91	1	11,96	13,43	14,72	12,86	12,42	11,82	13,07	12,79	12,88	12,08
	2	12,57	11,69	10,71	12,76	11,43	10,20	9,47	12,87	11,46	
	3	11,73	12,04	11,42	12,84	12,01	10,93	11,27	12,82	11,88	

Tempo de exposição (dias)	BRM										
	Provete	$X_{1m}$	$X_{2m}$	$X_{3m}$	$X_{4m}$	$X_{5m}$	$X_{6m}$	$X_{7m}$	$X_{8m}$	$X_{nm}$	$P_m$
7	1	3,12	2,32	2,69	2,13	2,34	2,67	2,47	1,44	2,40	2,28
	2	2,76	2,50	2,12	2,48	2,06	1,96	2,62	1,83	2,29	
	3	2,33	2,01	1,87	2,57	2,17	1,86	2,11	2,18	2,14	
28	1	5,03	5,90	5,34	4,43	4,83	5,30	6,56	5,04	5,30	5,53
	2	6,08	5,20	6,40	5,78	5,83	6,46	5,48	5,95	5,90	
	3	4,78	5,62	5,33	5,21	5,77	5,39	5,55	5,53	5,40	
56	1	7,51	9,03	8,09	7,65	9,98	8,57	9,44	7,77	8,51	9,09
	2	8,71	11,32	9,83	8,02	9,64	7,79	10,11	11,35	9,60	
	3	9,54	8,55	8,36	9,11	9,47	9,26	9,43	9,57	9,16	
91	1	8,51	9,79	10,37	9,05	10,66	10,63	8,81	9,74	9,70	11,02
	2	11,79	12,88	15,27	12,05	14,40	8,37	8,96	13,70	12,18	
	3	10,90	11,54	12,24	9,96	10,74	11,57	11,10	11,36	11,18	

$X_{im}$  - leitura i de profundidade da frente de carbonatação aos m dias (mm);

$X_{nm}$  - média de profundidades da frente de carbonatação do provete n aos m dias (mm);

$P_m$  - média de profundidades da frente de carbonatação dos provetes aos m dias (mm).



## **L. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

ANEXO L - Resistência à penetração de cloretos

Penetração de cloretos aos 28 Dias	Tipo de betão	Provete	Espessura (mm)	I <sub>30v</sub> (mA)	U (v)	I <sub>ajust</sub> (mA)	T <sub>i</sub> (°C)	Duração (h)	I <sub>f</sub> (mA)	T <sub>f</sub> (°C)	X <sub>1</sub> (mm)	X <sub>2</sub> (mm)	X <sub>3</sub> (mm)	X <sub>4</sub> (mm)	X <sub>5</sub> (mm)	X <sub>6</sub> (mm)	X <sub>7</sub> (mm)	X <sub>méd</sub> (mm)	
	BRB	1	52,5	86,7	25	73,3	19	24	80	18,9	18,9	28,0	24,5	25,5	27,0	28,5	24,5	26,5	26,4
		2	53,2				18,8			18,9	26,5	27,0	24,0	25,0	26,5	26,0	25,5	25,8	
		3	52,8				19,1			18,6	27,5	25,5	28,5	26,0	24,5	25,5	26,5	26,3	
	BB/M20	1	51,9	83,3	25	73,3	18,6	24	80	18,8	18,8	29,0	30,0	31,0	28,0	31,0	30,0	30,0	29,9
		2	51				18,7			18,8	30,0	27,0	31,0	33,0	30,5	30,0	30,5	30,3	
		3	51,7				18,8			18,9	32,0	31,0	30,5	33,5	30,0	30,0	29,5	30,9	
	BB/M50	1	51,3	73,3	25	60,0	18,6	24	60,0	19,3	19,3	25,5	24,0	25,5	25,5	25,0	25,5	28,0	25,6
		2	50,2				18,5			19,2	28,0	27,5	29,0	32,0	29,0	27,0	29,0	28,8	
		3	50,9				18,6			19,2	31,0	31,5	32,0	27,0	31,0	27,5	30,0	30,0	
BRM	1	53	73,3	25	60,0	20	24	63,3	20,7	20,7	21,0	23,0	25,5	25,0	25,0	23,5	24,0	23,9	
	2	53,5				20			21	24,0	21,5	27,0	26,5	25,5	20,5	22,0	23,9		
	3	51,7				20			20,8	23,5	22,5	26,0	26,0	24,5	22,0	22,5	23,9		
BRC	1	50	76,7	25	60,0	20,4	24	70,0	19,5	19,5	20,1	21,5	18,5	20,3	20,5	19,5	19,0	19,9	
	2	52,5				20,4			19,5	21,5	21	19,5	20,0	22,5	21,5	20,5	20,9		
	3	52				20,4			19,5	22,0	22,2	21,6	19,5	22,4	22,5	21,7	21,7		
BC/M20	1	50,3	76,7	25	66,7	21,6	24	66,7	22,8	22,8	23,5	26,0	24,0	26,5	25,0	23,5	23,5	24,6	
	2	52				21,3			23	25,0	22,5	21,5	21,0	21,5	22,5	25,5	22,8		
	3	52,1				21,8			23,2	23,0	21,0	23,0	22,5	22,0	22,5	22,5	22,4		
BC/M50	1	53,5	70,0	25	56,7	21,1	24	63,3	20,7	20,7	24,5	18,5	23,0	26,5	24,5	24,0	26,0	23,9	
	2	53,1				21			20,5	19,5	23,5	25,0	27,0	25,5	24,0	22,5	23,9		
	3	52,8				21			20,5	29,0	28,0	26,5	23,5	25,5	26,0	26,0	26,4		
BRG	1	50,9	103,3	20	66,7	18	24	76,7	20,5	20,5	34,0	31,5	32,5	31,5	31,5	29,5	33,0	31,9	
	2	53				18,1			20,6	31,5	27,0	23,0	24,5	22,0	25,0	28,5	25,9		
	3	50,4				18,1			2,3	27,5	25,5	23,5	24,0	23,5	25,0	28,5	25,4		
BG/M20	1	52,8	76,7	25	63,3	18,5	24	73,3	20,9	20,9	27,0	28,5	29,5	29,0	30,0	28,5	28,5	28,7	
	2	49,6				18,7			21	30,0	28,0	27,5	26,0	27,0	27,5	27,5	27,6		
	3	51,8				18,5			21	30,5	29,5	30,0	29,5	30,0	29,5	30,0	29,9		
BG/M50	1	53	73,3	25	60,0	21	24	63,3	18,5	18,5	26,5	23,5	22,0	23,5	23,5	24,5	28,0	24,5	
	2	51,6				21			19,1	25,0	24,5	25,0	25,5	27,0	23,5	25,0	25,1		
	3	52,9				20,8			19,2	25,5	25,0	23,0	25,5	23,5	24,5	32,0	25,6		

Penetração de clorretos aos 28 Dias	Tipo de betão	Espessura (m)	$x_d$ (m)	E	z	F (J/(Vmol))	R (J/(Kmol))	T (K)	t (s)	$c_d$	$c_0$	$\text{erf}^{-1}(1-2c_d/c_0)$	$\alpha$	$D_{\text{nssm}}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{\text{nssm}}$ (m <sup>2</sup> /s) $\times 10^{12}$	$D_{\text{nssm}}$ médio	Variação (%)
	BRB	0,053	0,0264	438,10	1	96480	8,314	292,10	86400	0,07	2	1,281214324	0,0194	1,5457E-11	15,457	15,398	0,00
		0,053	0,0258	432,33				292,00	86400				0,0195	1,5265E-11	15,265		
		0,053	0,0263	435,61				292,00	86400				0,0195	1,5472E-11	15,472		
	BB/M20	0,052	0,0299	443,16	1	96480	8,314	291,85	86400	0,07	2	1,281214324	0,0193	1,7420E-11	17,420	17,617	14,41
		0,051	0,0303	450,98				291,90	86400				0,0191	1,7401E-11	17,401		
		0,052	0,0309	444,87				292,00	86400				0,0193	1,8028E-11	18,028		
	BB/M50	0,051	0,0256	448,34	1	96480	8,314	292,10	86400	0,07	2	1,281214324	0,0192	1,4621E-11	14,621	16,025	4,07
		0,050	0,0288	458,17				292,00	86400				0,0190	1,6250E-11	16,250		
		0,051	0,0300	451,87				292,05	86400				0,0191	1,7204E-11	17,204		
BRM	0,053	0,0239	433,96	1	96480	8,314	293,50	86400	0,07	2	1,281214324	0,0196	1,4055E-11	14,055	13,992	-9,13	
	0,054	0,0239	429,91				293,65	86400				0,0197	1,4184E-11	14,184			
	0,052	0,0239	444,87				293,55	86400				0,0193	1,3737E-11	13,737			
BRC	0,050	0,0199	460,00	1	96480	8,314	293,10	86400	0,07	2	1,281214324	0,0190	1,3261E-11	13,059	13,819	0,00	
	0,053	0,0209	438,10				293,10	86400				0,0195	1,4250E-11	14,250			
	0,052	0,0217	442,31				293,10	86400				0,0194	1,3947E-11	13,947			
BC/M20	0,050	0,0246	457,26	1	96480	8,314	295,35	86400	0,07	2	1,281214324	0,0191	1,3899E-11	13,899	13,369	130,34	
	0,052	0,0228	442,31				295,30	86400				0,0194	1,3219E-11	13,219			
	0,052	0,0224	441,46				295,65	86400				0,0195	1,2989E-11	12,989			
BC/M50	0,054	0,0239	429,91	1	96480	8,314	294,05	86400	0,07	2	1,281214324	0,0197	1,4202E-11	14,202	14,634	152,13	
	0,053	0,0239	433,15				293,90	86400				0,0196	1,4097E-11	14,097			
	0,053	0,0264	435,61				293,90	86400				0,0195	1,5602E-11	15,602			
BRG	0,051	0,0319	353,63	1	96480	8,314	292,40	86400	0,07	2	1,281214324	0,0216	2,3143E-11	23,143	19,919	0,00	
	0,053	0,0259	339,62				292,50	86400				0,0221	1,9219E-11	19,219			
	0,050	0,0254	357,14				283,35	86400				0,0212	1,7395E-11	17,395			
BG/M20	0,053	0,0287	435,61	1	96480	8,314	292,85	86400	0,07	2	1,281214324	0,0195	1,7037E-11	17,037	16,641	-16,46	
	0,050	0,0276	463,71				293,00	86400				0,0189	1,5439E-11	15,439			
	0,052	0,0299	444,02				292,90	86400				0,0193	1,7448E-11	17,448			
BG/M50	0,053	0,0245	433,96	1	96480	8,314	292,90	86400	0,07	2	1,281214324	0,0195	1,4434E-11	14,434	14,658	-26,41	
	0,052	0,0251	445,74				293,20	86400				0,0193	1,4444E-11	14,444			
	0,053	0,0256	434,78				293,15	86400				0,0195	1,5096E-11	15,096			

ANEXO L - Resistência à penetração de cloretos

Penetração de cloretos aos 91 Dias	Tipo de betão	Provete	Espessura (mm)	I <sub>30v</sub> (mA)	U (v)	I <sub>ajust</sub> (mA)	T <sub>i</sub> (°C)	Duração (h)	I <sub>f</sub> (mA)	T <sub>f</sub> (°C)	X <sub>1</sub> (mm)	X <sub>2</sub> (mm)	X <sub>3</sub> (mm)	X <sub>4</sub> (mm)	X <sub>5</sub> (mm)	X <sub>6</sub> (mm)	X <sub>7</sub> (mm)	X <sub>méd</sub> (mm)
	BRB	1	50,46	86,6667	25	71,6667	21,3	24	80	22,7	24,5	23,7	24,8	26,2	26,2	24,7	23,7	24,8
		2	53,45				21,6			22,6	27,3	26,8	26,4	26,0	26,5	27,4	28,5	27,0
		3	52,65				21,1			22,5	27,6	26,8	27,6	28,4	30,1	26,6	29,0	28,0
	BB/M20	1	50,4	86,6667	25	73,3333	24,1	24	73,3333	23,6	29,8	27,7	29,3	31,4	30,1	29,3	27,8	29,3
		2	52,53				24			23,6	30,5	27,3	28,2	32,0	30,5	28,9	29,2	29,5
		3	52,15				24			23,6	24,6	25,2	27,1	27,5	27,3	26,3	26,2	26,3
	BB/M50	1	51,28	90	30	73,3333	22,8	24	80	23,6	28,2	24,8	25,7	25,1	27,7	26,7	27,4	26,5
		2	51,26				22,8			23,8	26,0	26,7	27,0	29,1	27,9	26,4	28,7	27,4
		3	49,71				22,8			23,4	27,3	30,4	40,1	31,6	31,1	31,9	31,0	31,9
	BRM	1	50,59	90	25	73,3333	24	24	73,3333	24,7	24,2	22,5	22,1	26,9	18,6	23,2	24,1	23,1
		2	51,2				24			24,6	23,6	26,7	25,1	21,6	26,7	24,2	23,2	24,4
		3	50,27				24,2			24,5	23,2	20,8	25,6	26,4	21,2	19,6	21,5	22,6
	BRC	1	48,98	53,3333	30	53,3333	22,8	24	60	24,2	23,1	19,5	23,2	21,4	21,8	20,8	23,3	21,9
		2	53,4				22,8			24,4	24,7	23,5	26,3	25,9	24,3	23,1	24,9	24,6
		3	51,16				22,8			24,2	22,3	23,2	22,5	22,8	23,9	21,9	21,9	22,6
	BC/M20	1	49,9	60	25	50	21,7	24	50	23,5	19,8	19,9	20,6	20,6	19,7	20,8	18,7	20,0
		2	55,81				22			23,6	18,6	16,9	14,9	17,8	15,0	15,2	18,9	16,8
		3	50,93				21,6			23,4	20,8	19,9	18,5	20,4	21,8	22,9	20,6	20,7
BC/M50	1	50,39	66,6667	25	53,3333	21,6	24	60	23,8	23,1	23,9	23,7	21,5	23,3	24,2	25,2	23,5	
	2	51,19				21,6			23,8	22,9	23,2	23,8	23,8	23,0	23,5	26,8	23,8	
	3	51,82				21,6			23,7	22,4	21,3	24,0	25,2	24,3	22,9	21,1	23,0	
BRG	1	48,28	86,6667	25	73,3333	22,5	24	73,3333	23,9	31,6	31,4	31,8	29,2	31,3	33,7	30,2	31,3	
	2	49,97				22,4			24,2	30,1	31,3	32,2	32,9	31,5	32,4	30,5	31,5	
	3	50,48				22,4			23,7	34,9	32,8	31,4	30,9	28,7	29,4	33,9	31,7	
BG/M20	1	51,82	88,3333	25	76,6667	22,9	24	76,6667	24,2	30,1	26,5	31,0	30,7	30,3	27,4	28,9	29,3	
	2	52,01				22,9			24,3	27,7	25,6	25,8	25,7	26,7	24,5	23,3	25,6	
	3	50,66				22,9			24,2	21,1	21,0	23,0	23,7	22,3	21,5	22,3	22,1	
BG/M50	1	52,11	86,6667	25	73,3333	22,8	24	73,3333	25,1	22,6	22,5	21,3	21,6	24,8	22,9	23,5	22,7	
	2	52,32				22,8			25,2	27,2	24,2	24,1	23,0	22,5	25,8	28,9	25,1	
	3	48,1				22,8			25,4	25,2	22,2	24,8	22,7	22,1	23,5	23,1	23,4	

Penetração de clorretos aos 91 Dias	Tipo de betão	Espessura (m)	$x_d$ (m)	E	z	F (J/(Vmol))	R (J/(Kmol))	T (K)	t (s)	$c_d$	$c_0$	$\text{erf}^{-1}(1-2c_d/c_0)$	$\alpha$	$D_{\text{nssm}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$D_{\text{nssm}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\times 10^{12}$	$D_{\text{nssm}}$ médio	Variação (%)
	BRB	0,050	0,0248	455,81	1	96480	8,314	295,15	86400	0,07	2	1,281214324	0,0191	1,4079E-11	14,079	15,670	0,00
		0,053	0,0270	430,31				295,25	86400				0,0197	1,6258E-11	16,258		
		0,053	0,0280	436,85				294,95	86400				0,0195	1,6672E-11	16,672		
	BB/M20	0,050	0,0293	456,35	1	96480	8,314	297,00	86400	0,07	2	1,281214324	0,0192	1,6915E-11	16,915	16,712	6,65
		0,053	0,0295	437,85				296,95	86400				0,0196	1,7681E-11	17,681		
		0,052	0,0263	441,04				296,95	86400				0,0195	1,5541E-11	15,541		
	BB/M50	0,051	0,0265	546,02	1	96480	8,314	296,35	86400	0,07	2	1,281214324	0,0175	1,2810E-11	12,810	13,733	-12,36
		0,051	0,0274	546,23				296,45	86400				0,0175	1,3262E-11	13,262		
		0,050	0,0319	563,27				296,25	86400				0,0173	1,5125E-11	15,125		
	BRM	0,051	0,0231	454,64	1	96480	8,314	297,50	86400	0,07	2	1,281214324	0,0192	1,3168E-11	13,168	13,357	-14,76
		0,051	0,0244	449,22				297,45	86400				0,0194	1,4117E-11	14,117		
		0,050	0,0226	457,53				297,50	86400				0,0192	1,2787E-11	12,787		
	BRC	0,049	0,0219	571,66	1	96480	8,314	296,65	86400	0,07	2	1,281214324	0,0171	1,0013E-11	10,013	11,049	0,00
		0,053	0,0246	524,34				296,75	86400				0,0179	1,2325E-11	12,325		
		0,051	0,0226	547,30				296,65	86400				0,0175	1,0810E-11	10,810		
	BC/M20	0,050	0,0200	460,92	1	96480	8,314	295,75	86400	0,07	2	1,281214324	0,0191	1,1083E-11	11,083	10,978	-0,64
0,056		0,0168	412,11	295,95				86400	0,0202				1,0138E-11	10,138			
0,051		0,0207	451,60	295,65				86400	0,0192				1,1714E-11	11,714			
BC/M50	0,050	0,0235	456,44	1	96480	8,314	295,85	86400	0,07	2	1,281214324	0,0192	1,3324E-11	13,324	13,458	21,80	
	0,051	0,0238	449,31				295,85	86400				0,0193	1,3705E-11	13,705			
	0,052	0,0230	443,84				295,80	86400				0,0194	1,3345E-11	13,345			
BRG	0,048	0,0313	476,39	1	96480	8,314	296,35	86400	0,07	2	1,281214324	0,0188	1,7371E-11	17,371	17,932	0,00	
	0,050	0,0315	460,28				296,45	86400				0,0191	1,8087E-11	18,087			
	0,050	0,0317	455,63				296,20	86400				0,0192	1,8338E-11	18,338			
BG/M20	0,052	0,0293	443,84	1	96480	8,314	296,70	86400	0,07	2	1,281214324	0,0194	1,7299E-11	17,299	14,970	-16,52	
	0,052	0,0256	442,22				296,75	86400				0,0195	1,5060E-11	15,060			
	0,051	0,0221	454,01				296,70	86400				0,0192	1,2551E-11	12,551			
BG/M50	0,052	0,0227	441,37	1	96480	8,314	297,10	86400	0,07	2	1,281214324	0,0195	1,3266E-11	13,266	13,609	-24,10	
	0,052	0,0251	439,60				297,15	86400				0,0196	1,4833E-11	14,833			
	0,048	0,0234	478,17				297,25	86400				0,0188	1,2729E-11	12,729			

$D_{nssm}$  - coeficiente de migração em regime não estacionário (m<sup>2</sup>/s);

R - constante dos gases, R=8,314 (J/Kmol<sup>-1</sup>);

T (K) - média de temperaturas, em Kelvins, da solução anódica no início e fim do ensaio;

U - voltagem efetiva aplicada;

L - espessura do provete (mm);

erf<sup>-1</sup> - inverso da função erro;

$c_d$  - coeficiente de cloretos para a qual o nitrato de prata reage;

$c_0$  - concentração de cloretos no cátodo.

$$D_{nssm} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

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

## **M. RETRAÇÃO**

Valores de retração em m/m

		Tipo de betão									
		BRB	BB/M20	BB/M50	BRM	BRC	BC/M20	BC/M50	BRG	BG/M20	BG/M50
Tempo de retração (dias)	1	7,03E-06	3,70E-06	5,20E-06	4,07E-06	8,75E-06	4,68E-06	5,82E-06	1,53E-05	9,32E-06	1,52E-06
	2	3,53E-05	7,74E-05	3,04E-05	4,07E-05	6,50E-05	2,69E-05	3,66E-05	4,32E-05	4,87E-05	2,50E-06
	3	7,74E-05	1,09E-04	8,44E-05	5,72E-05	7,75E-05	5,40E-05	4,00E-05	7,60E-05	8,80E-05	4,13E-05
	4	1,04E-04	1,25E-04	8,21E-05	7,88E-05	1,11E-04	6,12E-05	7,08E-05	1,29E-04	1,16E-04	5,00E-05
	5	1,63E-04	1,45E-04	1,07E-04	9,41E-05	1,25E-04	8,34E-05	7,79E-05	1,64E-04	1,34E-04	7,00E-05
	6	1,68E-04	1,61E-04	1,22E-04	9,32E-05	1,15E-04	9,56E-05	8,99E-05	1,87E-04	1,43E-04	9,75E-05
	7	1,82E-04	2,00E-04	1,41E-04	9,35E-05	1,34E-04	1,20E-04	8,70E-05	1,97E-04	1,63E-04	1,24E-04
	9	2,16E-04	2,26E-04	1,73E-04	1,30E-04	1,68E-04	1,40E-04	1,21E-04	2,57E-04	1,86E-04	1,65E-04
	11	2,51E-04	2,60E-04	1,97E-04	1,35E-04	2,00E-04	1,51E-04	1,49E-04	2,77E-04	2,15E-04	1,91E-04
	13	2,84E-04	2,93E-04	2,29E-04	1,50E-04	2,18E-04	1,91E-04	1,71E-04	3,25E-04	2,59E-04	1,93E-04
	15	3,08E-04	3,03E-04	2,53E-04	1,66E-04	2,43E-04	2,20E-04	1,84E-04	3,52E-04	2,45E-04	2,09E-04
	18	3,84E-04	3,28E-04	2,91E-04	1,92E-04	2,54E-04	2,20E-04	2,10E-04	3,78E-04	2,80E-04	2,43E-04
	21	4,04E-04	3,38E-04	3,20E-04	1,98E-04	3,07E-04	2,62E-04	2,32E-04	3,95E-04	3,14E-04	2,69E-04
	24	4,38E-04	3,84E-04	3,36E-04	2,29E-04	3,49E-04	2,92E-04	2,73E-04	3,98E-04	3,18E-04	3,00E-04
	28	4,91E-04	4,06E-04	3,67E-04	2,62E-04	3,56E-04	2,96E-04	2,65E-04	4,33E-04	3,61E-04	3,24E-04
	32	5,23E-04	4,15E-04	3,84E-04	3,06E-04	3,59E-04	3,15E-04	2,90E-04	4,58E-04	4,11E-04	3,28E-04
	36	5,76E-04	4,72E-04	3,91E-04	3,20E-04	3,75E-04	3,18E-04	2,86E-04	4,75E-04	4,09E-04	3,53E-04
	40	6,33E-04	4,67E-04	4,82E-04	3,18E-04	3,82E-04	3,37E-04	3,06E-04	4,78E-04	4,45E-04	3,78E-04
	44	6,98E-04	4,95E-04	4,81E-04	3,25E-04	4,14E-04	3,84E-04	3,15E-04	4,95E-04	4,45E-04	3,95E-04
	48	6,64E-04	4,95E-04	4,83E-04	3,29E-04	4,17E-04	3,87E-04	3,22E-04	4,85E-04	4,71E-04	3,75E-04
52	6,85E-04	4,96E-04	4,94E-04	3,47E-04	4,06E-04	3,69E-04	3,31E-04	4,78E-04	4,49E-04	3,84E-04	
56	6,95E-04	5,29E-04	5,06E-04	3,65E-04	4,21E-04	3,70E-04	3,38E-04	4,97E-04	4,58E-04	3,95E-04	
61	7,35E-04	5,60E-04	5,27E-04	3,45E-04	4,08E-04	3,65E-04	3,41E-04	4,86E-04	4,62E-04	4,00E-04	
66	7,28E-04	5,69E-04	5,39E-04	3,52E-04	4,09E-04	3,71E-04	3,31E-04	4,92E-04	4,73E-04	4,51E-04	
71	7,58E-04	5,79E-04	5,38E-04	3,23E-04	3,97E-04	3,59E-04	3,23E-04	4,98E-04	4,92E-04	4,51E-04	
76	7,39E-04	5,59E-04	5,14E-04	3,36E-04	4,07E-04	3,61E-04	3,15E-04	5,52E-04	5,19E-04	4,49E-04	
81	6,87E-04	5,64E-04	5,13E-04	3,30E-04	3,90E-04	4,19E-04	3,07E-04	5,28E-04	5,06E-04	4,48E-04	
91	6,71E-04	5,55E-04	4,93E-04	3,21E-04	4,04E-04	4,18E-04	3,29E-04	5,15E-04	5,18E-04	4,54E-04	