



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

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

**Diogo Correia Costa da Silva**

Dissertação para obtenção do grau de mestre em:

**Engenharia civil**

**Júri**

Presidente: Prof. Dr. Fernando Manuel Fernandes Simões  
Orientador: Prof. Dr. Jorge Manuel Calição Lopes de Brito  
Vogal: Dr. António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

**Outubro 2012**



## Resumo

A exploração descontrolada dos recursos naturais, pelo Homem tem sido alvo de duras críticas nas últimas décadas. Todos os anos, milhões de toneladas de desperdício de mármore são acumuladas nas escombrelas dos concelhos de Estremoz, Borba e Vila Viçosa (zona dos mármore) pela indústria extrativa local. Este enorme desperdício ronda 80 a 90% do total da rocha extraída. Assim, impõe-se a criação de destinos sustentáveis para este resíduo que atenuem ou eliminem a tendência verificada. Neste sentido, estuda-se a utilização de agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore na produção de betões estruturais como uma alternativa útil, tanto do ponto de vista da proteção ambiental, como da sustentabilidade das reservas naturais. Não obstante, para que esta alternativa seja amplamente difundida no sector da construção, é necessário assegurar a sua qualidade e segurança, bem como compreender de forma clara o desempenho de betões com agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore.

Nesta investigação, pretendeu-se avaliar o desempenho mecânico de betões com diferentes percentagens de agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore. Mais concretamente, para o betão no estado fresco, procedeu-se à análise da trabalhabilidade e da massa volúmica. Nas propriedades do betão no estado endurecido, examinou-se a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência ao desgaste por abrasão.

Para a realização dos ensaios, procedeu-se à elaboração de provetes cúbicos e cilíndricos, para dez diferentes tipologias de betão: três betões de referência (incorporando agregados finos de areia de basalto, siliciosa (rio tejo) e granito) e composições com 4 percentagens de substituição dos agregados finos primários por agregados secundários finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore (em volume do total de agregados - 20, 50 e 100%).

De um modo geral, os betões com agregados secundários demonstraram piores características mecânicas, por comparação com os betões de referência. Esta redução de desempenho é tanto mais acentuada quanto maior a percentagem de substituição de agregados. No entanto, a redução observada é aceitável e não compromete o uso destes agregados secundários em betão estrutural.

Palavras-chave:

Agregados finos secundários de mármore; betão estrutural; desempenho mecânico.

## Abstract

The uncontrolled exploitation of natural resources by humanity has been harshly criticized in the past decades. Every year millions of tons of marble waste are accumulated in dumps in the Estremoz, Borba and Vila Viçosa counties (marble zone) by the local quarrying industry. This enormous waste approaches 80% to 90% of the total extracted rock. It has therefore become necessary to create sustainable destinations for this waste material in order to mitigate or eliminate this trend. The use of fine aggregates from the waste generated by the marble quarrying industry in the production of structural concrete has therefore been studied as a useful alternative, from the perspective of both environmental protection and sustainability of natural resources. However, in order to disseminate this alternative widely within the construction sector, it is necessary to ensure quality and safety, in addition to providing a clear understanding of the performance of concrete containing fine aggregates from the waste generated by the marble quarrying industry.

The aim of this research is to assess the mechanical performance of concrete containing different percentages of fine aggregates from the waste generated by the marble quarrying industry. In more specific terms, the workability and bulk density of fresh concrete was analysed and the compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and abrasion resistance properties of hardened concrete were examined.

In order to carry out the tests, cubic and cylindrical specimens were prepared from ten different types of concrete: three standard concrete mixes (containing fine basalt, granite and silicious aggregates), and mixes containing 4 substitution percentages of the primary fine aggregates by secondary fine aggregates from the waste generated by the marble quarrying industry (representing 20%, 50% and 100% of the total volume of the aggregates).

In general, concrete containing secondary aggregates was shown to have worse mechanical properties than the standard concrete. This reduced performance was clearer when the substitution percentage was higher. However, the reduction in mechanical performance is acceptable and does not compromise the use of these secondary aggregates in structural concrete.

Keywords:

Secondary fine marble aggregates; structural concrete; mechanical performance.

## Agradecimentos

A presente dissertação é resultado de um ano de trabalho. Este período foi marcado por inúmeros obstáculos e dificuldades que, com a ajuda de algumas pessoas, se tornaram menos difíceis. Quero, por isso, expressar-lhes o meu agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador científico desta dissertação, expresso o meu agradecimento pelas críticas e sugestões que contribuíram definitivamente para o rigor e exigência deste trabalho. Não quero deixar de reconhecer também a sua disponibilidade e simpatia ao longo deste trabalho.

Aos meus colegas do IST, Jorge Pontes, António André, Pedro Martins e, principalmente, ao Filipe Gameiro pela sua ajuda na atividade experimental.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do IST, em particular aos senhores Leonel Silva, João Lopes e Fernando Alves, pela sua ajuda no trabalho realizado.

Às empresas Lagogaest, SOLUBEMA, Grupo LENA, José Marques Galo S.A, Grupo Soarvamil, Grupo Motaengil e SECIL pela disponibilidade em ceder os materiais necessários à realização deste estudo.

Ao João Durão, pela revisão atenta da dissertação.

Ao Miguel Bravo pela sua indispensável ajuda e paciência.

Ao Francisco Martinho, Carlos Lagareiro, Diogo Rego, Filipe Gameiro, Ruben Timóteo, Miguel Garcia, Rui Silva, Daniel Carrasqueiro, Hugo Domingos, Luís Tavares, Cláudia Maurício, Joana Maurício, João Madeira, Miguel Paleta, António Cardoso, João Caldinhas, Sofia Ximenes, Inês Lopes, Alberto Silva e aos restantes amigos e colegas de curso que me acompanharam no meu percurso académico.

À Ana Margarida pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

À minha Família, pelo esforço, incentivo, preocupação e apoio que demonstraram ao longo de todo o meu percurso académico.

Por fim, a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para melhorar a minha vida universitária.

## Índice geral

Resumo.....	i
Abstract .....	ii
Agradecimentos.....	iii
1. Introdução .....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	3
1.3. Metodologia e organização da dissertação.....	4
2. Estado da arte .....	7
2.1. Introdução .....	7
2.2. Propriedades dos agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore .....	7
2.2.1. Propriedades físicas.....	7
2.2.2. Propriedades mecânicas .....	9
2.3. Propriedades mecânicas dos betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no estado endurecido .....	11
2.3.1. A influência dos agregados no betão.....	11
2.3.2. Resistência à compressão .....	13
2.3.3. Resistência à tração .....	22
2.3.4. Módulo de elasticidade.....	25
2.3.5. Resistência à abrasão.....	27
2.4. Propriedades dos betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no estado fresco.....	30
2.4.1. Massa volúmica.....	30
2.4.2. Trabalhabilidade.....	32
2.5. Aplicação de agregados provenientes de resíduos de mármore em pavimentos .....	35
2.6. Conclusões .....	36
2.6.1. Massa volúmica.....	36
2.6.2. Trabalhabilidade.....	36
2.6.3. Resistência à compressão .....	36
2.6.4. Resistência à tração .....	38
2.6.5. Módulo de elasticidade.....	39
2.6.6. Resistência à abrasão.....	39
3. Campanha experimental .....	41
3.1. Introdução .....	41

3.2.	Planeamento da campanha experimental .....	41
3.2.1.	Primeira fase experimental.....	41
3.2.2.	Segunda fase experimental.....	41
3.2.3.	Terceira fase experimental .....	42
3.3.	Formulação dos betões .....	43
3.3.1.	Introdução.....	43
3.3.2.	Betão de referência.....	43
3.3.3.	Betões com agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore .....	54
3.4.	Ensaio de caracterização dos agregados .....	55
3.4.1.	Análise granulométrica .....	55
3.4.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	58
3.4.3.	Massa volúmica aparente .....	61
3.4.4.	Desgaste de Los Angeles.....	63
3.4.5.	Índice de forma.....	65
3.5.	Ensaio ao betão fresco .....	67
3.5.1.	Abaixamento (cone de Abrams).....	67
3.5.2.	Massa volúmica.....	69
3.6.	Ensaio ao betão endurecido .....	72
3.6.1.	Resistência à compressão .....	72
3.6.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	75
3.6.3.	Módulo de elasticidade.....	77
	Resistência à abrasão.....	79
4.	Resultados da campanha experimental.....	83
4.1.	Introdução .....	83
4.2.	Ensaio de caracterização dos agregados .....	83
4.2.1.	Análise granulométrica .....	83
4.2.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	92
4.2.3.	Massa volúmica aparente .....	93
4.2.4.	Desgaste de Los Angeles.....	94
4.2.5.	Índice de forma.....	94
4.3.	Ensaio ao betão fresco .....	95
4.3.1.	Abaixamento (cone de Abrams).....	95
4.3.2.	Massa volúmica no estado fresco.....	97
4.4.	Ensaio ao betão endurecido .....	100
4.4.1.	Resistência à compressão .....	100

4.4.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	108
4.4.3.	Módulo de elasticidade.....	112
4.4.4.	Resistência à abrasão.....	115
4.5.	Conclusões .....	120
4.5.1.	Propriedades dos agregados .....	120
4.5.2.	Propriedades dos betões no estado fresco .....	120
4.5.3.	Propriedades dos betões no estado endurecido .....	121
5.	Conclusão e desenvolvimentos futuros .....	123
5.1.	Considerações finais.....	123
5.2.	Conclusões gerais.....	123
5.3.	Propostas de desenvolvimento futuro.....	126

ANEXO A	Composição dos betões
ANEXO B	Curvas granulométricas dos agregados naturais
ANEXO C	Massa volúmica e absorção de água
ANEXO D	Massa volúmica aparente
ANEXO E	Desgaste de <i>Los Angeles</i>
ANEXO F	Índice de Forma
ANEXO G	Abaixamento e massa volúmica do betão no estado fresco
ANEXO H	Resistência à compressão
ANEXO I	Resistência à tração por compressão diametral
ANEXO J	Módulo de elasticidade
ANEXO K	Resistência à abrasão



## Índice de figuras

Figura 1.1 - Escombreira.....	2
Figura 1.2 - Centro de produção de agregados de Vila Viçosa.....	3
Figura 1.3 - Agregados finos provenientes do processamento dos resíduos da indústria do mármore .....	4
Figura 2.1 - Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial para os dois grupos de provetes e para provetes intactos.....	10
Figura 2.2 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade .....	11
Figura 2.3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos .....	13
Figura 2.4 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos .....	13
Figura 2.5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos e finos .....	14
Figura 2.6 - Ensaio de resistência à compressão em função dos dias de cura para as diferentes composições.....	14
Figura 2.7 - Resistência à compressão relativa em função dos dias de cura para as diferentes composições.....	15
Figura 2.8 - Resistência à compressão aos 7 dias.....	16
Figura 2.9 - Resistência à compressão aos 28 dias.....	16
Figura 2.10 - Resistência à compressão aos 90 dias.....	17
Figura 2.11 - Resistência à compressão aos 28 dias.....	17
Figura 2.12 - Resistência à compressão do betão incorporando pozolanas naturais.....	18
Figura 2.13 - Resistência à compressão dos betões incorporando pozolana natural e pó de mármore .....	18
Figura 2.14 - Resistência à compressão .....	19
Figura 2.15 - Resistência à compressão .....	20
Figura 2.16 - Resistência à compressão em função dos dias de cura.....	21
Figura 2.17 - Resistência à compressão em função da percentagem de substituição.....	22
Figura 2.18 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos .....	22
Figura 2.19 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos .....	23
Figura 2.20 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos e finos.....	23
Figura 2.21 - Resistência à tração aos 28 dias.....	24
Figura 2.22 - Resistência à tração pura .....	25
Figura 2.23 - Resistência à tração por compressão diametral .....	25
Figura 2.24 - Módulo de elasticidade.....	26
Figura 2.25 - Módulo de elasticidade.....	27
Figura 2.26 - Variação da espessura em função dos dias de cura .....	28
Figura 2.27 - Rácio de abrasão em relação ao betão de referência .....	28
Figura 2.28 - Perda de massa aos 30 mins de abrasão em função dos dias de cura.....	29
Figura 2.29 - Resistência à abrasão relativa .....	29
Figura 2.30 - Massa volúmica em função da taxa de substituição .....	30

Figura 2.31 - Massa volúmica em função da taxa de substituição .....	31
Figura 2.32 - Massa volúmica dos betões em função da taxa de substituição dos agregados finos .....	32
Figura 2.33 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição.....	32
Figura 2.34 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição .....	33
Figura 2.35 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição .....	34
Figura 2.36 - Perda de <i>slump</i> em função do tempo após a finalização da mistura.....	35
Figura 2.37 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	36
Figura 2.38 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	37
Figura 2.39 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	37
Figura 2.40 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	37
Figura 2.41 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	38
Figura 2.42 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	38
Figura 2.43 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	38
Figura 3.1 - Correlação entre $f_{cm,28}$ e a relação A/C.....	45
Figura 3.2 - Curva de referência de Faury com cimento.....	50
Figura 3.3 - Curva de referência de Faury sem cimento .....	50
Figura 3.4 - Curva de referência de Faury e curvas granulométricas dos agregados .....	51
Figura 3.5 - Esquema dos vários níveis de substituição.....	55
Figura 3.6 - Balança .....	56
Figura 3.7 - Estufa ventilada .....	56
Figura 3.8 - Agitador de peneiros.....	56
Figura 3.9 - Série de peneiros.....	56
Figura 3.10 - Termómetro .....	58
Figura 3.11 - Picnómetro.....	58
Figura 3.12 - Molde troncocónico, funil e pilão.....	60
Figura 3.13 - Exemplo do processo de verificação da superfície seca .....	60
Figura 3.14 - Contentor cilíndrico.....	62
Figura 3.15 - Máquina de <i>Los Angeles</i> .....	64
Figura 3.16 - Esferas de aço .....	64
Figura 3.17 - Peneiros da série ASTM.....	64
Figura 3.18 - Paquímetro.....	65
Figura 3.19 - Molde troncocónico.....	67
Figura 3.20 - Utensílios usados no ensaio.....	68
Figura 3.21 - Leitura do abaixamento .....	69
Figura 3.22 - Formas de abaixamento (NP EN 12350-2 (2002)).....	69
Figura 3.23 - Balança de precisão .....	70
Figura 3.24 - Agulha vibratória.....	70
Figura 3.25 - Recipiente estanque e rasoira de aço .....	70
Figura 3.26 - Vibração do provete, alisamento da superfície e limpeza do recipiente.....	71
Figura 3.27 - Pesagem do recipiente com betão fresco .....	71
Figura 3.28 - Controlador da prensa hidráulica de 4 colunas.....	72
Figura 3.29 - Prensa hidráulica de 4 colunas.....	72
Figura 3.30 - Provetes após ensaio de compressão .....	73
Figura 3.31 - Posicionamento do provete.....	74

Figura 3.32 - Rotura .....	74
Figura 3.33 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3 (2003)) .....	74
Figura 3.34 - Rotura não satisfatória de provetes cúbicos (NP EN 12390-3 (2003)).....	74
Figura 3.35 - Posicionador e peça de carga.....	75
Figura 3.36 - Proвете.....	76
Figura 3.37 - Posicionamento do provete.....	76
Figura 3.38 - Rotura .....	76
Figura 3.39 - <i>Data logger</i> e prensa hidráulica.....	78
Figura 3.40 - Ensaio a decorrer .....	79
Figura 3.41 - Posicionamento e preparação do provete .....	79
Figura 3.42 - Máquina de abrasão de Böhme.....	80
Figura 3.43 - Pó abrasivo .....	80
Figura 3.44 - Equipamento de limpeza .....	80
Figura 3.45 - Preparação dos provetes .....	81
Figura 3.46 - Proвете de ensaio (resistência à abrasão) .....	81
Figura 3.47 - Distribuição dos pontos de medição do desgaste .....	82
Figura 3.48 - Decorrer do ensaio.....	82
Figura 4.1 - Curva granulométrica da brita 2 .....	84
Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 1 .....	85
Figura 4.3 - Curva granulométrica do bago de arroz .....	86
Figura 4.4 - Curva granulométrica da areia grossa .....	87
Figura 4.5 - Curva granulométrica da areia fina .....	88
Figura 4.6 - Curva granulométrica da areia de basalto.....	89
Figura 4.7 - Curva granulométrica da areia de granito.....	90
Figura 4.8 - Curva granulométrica da areia de mármore .....	91
Figura 4.9 - Resultados do ensaio de abaixamento em função da taxa de substituição (3ª fase experimental).....	96
Figura 4.10 - Valores da relação A/C em função da taxa de substituição (3ª fase experimental)97	97
Figura 4.11 - Massa volúmica do betão no estado fresco (3ª fase experimental).....	98
Figura 4.12 - Comparação de resultados do ensaio de determinação da massa volúmica com Belachia e Hebhoub (2011).....	99
Figura 4.13 - Comparação de resultados do ensaio de determinação da massa volúmica com Hebhoub et al. (2011).....	100
Figura 4.14 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (7 dias) .....	101
Figura 4.15 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (28 dias) .....	102
Figura 4.16 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (56 dias) .....	102
Figura 4.17 - Evolução da resistência à compressão da família BB .....	105
Figura 4.18 - Evolução da resistência à compressão da família BC .....	105
Figura 4.19 - Evolução da resistência à compressão da família BG .....	105
Figura 4.20 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Hebhoub et al. (2011) .....	106
Figura 4.21 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Belachia e Hebhoub (2011) .....	106
Figura 4.22 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Martins (2012).....	107

Figura 4.23 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à tração para o betão de referência (28 dias) .....	108
Figura 4.24 - Resistência relativa à compressão aos 28 dias em função da resistência relativa à tração aos 28 dias .....	110
Figura 4.25 - Comparação de resultados do ensaio de tração aos 28 dias com Martins (2012) .....	111
Figura 4.26 - Comparação de resultados do ensaio de tração aos 28 dias com Hebhouh et al. (2011) .....	111
Figura 4.27 - Influência da percentagem de substituição de agregados na redução do módulo de elasticidade para o betão de referência aos 28 dias .....	112
Figura 4.28 - Resistência relativa à compressão aos 28 dias em função do módulo de elasticidade relativo aos 28 dias .....	114
Figura 4.29 - Comparação de resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias com Martins (2012) .....	114
Figura 4.30 - Influência da percentagem de substituição de agregados na percentagem da profundidade de desgaste para o betão de referência aos 91 dias .....	115
Figura 4.31 - Resistência à compressão relativa aos 28 dias em função da profundidade de desgaste por abrasão relativa aos 91 dias .....	117
Figura 4.32 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BB aos 91 dias .....	119
Figura 4.33 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BC aos 91 dias .....	119
Figura 4.34 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BG aos 91 dias .....	119
Figura 4.35 - Comparação de resultados da resistência à abrasão aos 91 dias com Martins (2012) .....	120
Figura 4.36 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BB .....	122
Figura 4.37 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BC .....	122
Figura 4.38 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BG .....	122
Figura 5.1 - Resistência média relativa em função da taxa de substituição .....	126

## Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Valores globais obtidos para a totalidade das escombeiras inventariadas .....	1
Tabela 2.1 - Massas volúmicas, porosidade e absorção de água dos mármore do anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa .....	7
Tabela 2.2 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade para três tipos de mármore turcos .....	8
Tabela 2.3 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade para os mármore Carrara e Dionyso .....	8
Tabela 2.4 - Propriedades físicas dos mármore de Menderes Massif no sudoeste da Turquia ...	8
Tabela 2.5 - Resistência à compressão dos mármore .....	9
Tabela 2.6 - Resistência à tração dos mármore através do ensaio brasileiro .....	9
Tabela 2.7- Valores do ensaio de Los Angeles .....	9
Tabela 2.8 - Resistência à compressão.....	19
Tabela 2.9 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias .....	24
Tabela 2.10 - Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade .....	26
Tabela 2.11 - Massa volúmica dos betões.....	31
Tabela 2.12 - Resultados do ensaio de abaixamento para os vários betões .....	34
Tabela 3.1- Idade, número e dimensões dos provetes a ensaiar na segunda e terceira fases experimentais .....	42
Tabela 3.2 - Desvio padrão em função das condições de produção do betão, para resistências médias à compressão superiores a 35 MPa. ....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Tabela 3.3 - Volume de vazios em função da máxima dimensão dos agregados.....	46
Tabela 3.4 - Valores dos parâmetros K e K' para a determinação do índice de vazios .....	47
Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury .....	49
Tabela 3.6 - Distribuição dos agregados por cada tipo de agregado fino, em percentagem .....	51
Tabela 3.7 - Valores do módulo de finura em função dos parâmetros $D_{max}$ .....	52
Tabela 3.8 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de rio.....	53
Tabela 3.9 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de basalto .....	53
Tabela 3.10 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de mármore .....	53
Tabela 3.11 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de granito .....	53
Tabela 3.12 - Composição dos betões de referência .....	54
Tabela 3.13 - Massa mínima dos provetes de ensaio em função de $D_{max}$ (NP EN 933-1).....	56
Tabela 3.14 - Massa dos provetes de ensaio em função de $D_{max}$ (NP EN 1097-6) .....	59
Tabela 3.15 - Volume do recipiente de ensaio (massa volúmica aparente) .....	62
Tabela 3.16 - Massa mínima dos provetes de ensaio em função de $D_{max}$ (NP EN 933-4) .....	66
Tabela 4.1 - Massas $M_1$ e $M_2$ relativas à análise granulométrica da brita 2 .....	83
Tabela 4.2 - Análise granulométrica da brita 2 .....	84
Tabela 4.3 - Massas $M_1$ e $M_2$ relativas à análise granulométrica da brita 1 .....	85
Tabela 4.4 - Análise granulométrica da brita 1 .....	85
Tabela 4.5 - Massas $M_1$ e $M_2$ relativas à análise granulométrica do bago de arroz.....	86

Tabela 4.6 - Análise granulométrica do bago de arroz.....	86
Tabela 4.7 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia grossa.....	87
Tabela 4.8 - Análise granulométrica da areia grossa.....	87
Tabela 4.9 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia fina.....	88
Tabela 4.10 - Análise granulométrica da areia fina.....	88
Tabela 4.11 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de basalto .....	89
Tabela 4.12 - Análise granulométrica da areia de basalto.....	89
Tabela 4.13 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de granito .....	90
Tabela 4.14 - Análise granulométrica da areia de granito.....	90
Tabela 4.15 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de mármore .....	91
Tabela 4.16 - Análise granulométrica da areia de mármore.....	91
Tabela 4.17 - Absorção de água dos agregados .....	92
Tabela 4.18 - Massas volúmicas dos agregados.....	92
Tabela 4.19 - Comparação dos valores obtidos da absorção de água do mármore .....	93
Tabela 4.20 - Massas volúmicas aparentes dos agregados.....	93
Tabela 4.21 - Desgaste de Los Angeles .....	94
Tabela 4.22 - Índice de forma .....	94
Tabela 4.23 - Abaixamento e relações A/C para as misturas da 2ª fase experimental .....	95
Tabela 4.24 - Abaixamento e relações A/C para as misturas da 3ª fase experimental .....	95
Tabela 4.25 - Massa volúmica do betão no estado fresco para a 2ª fase experimental .....	97
Tabela 4.26 - Massa volúmica do betão no estado fresco para a 3ª fase experimental .....	97
Tabela 4.27 - Parâmetros e dados estatísticos da Eq 4.1 para os resultados da massa volúmica	99
Tabela 4.28 - Resistência à compressão aos 28 dias (2ª fase experimental) .....	100
Tabela 4.29 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de basalto (BB) (3ª fase experimental).....	100
Tabela 4.30 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de areia de rio (BC) (3ª fase experimental).....	101
Tabela 4.31 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de granito (BG) (3ª fase experimental).....	101
Tabela 4.32 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	103
Tabela 4.33 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	104
Tabela 4.34 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 56 dias.....	104
Tabela 4.35 - Resistência à tração por compressão diametral.....	108
Tabela 4.36 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.5, 4.6 e 4.7 para os resultados à tração aos 28 dias.....	110
Tabela 4.37- Módulo de elasticidade aos 28 dias.....	112
Tabela 4.38 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.8, 4.9 e 4.10 para os resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias .....	113
Tabela 4.39 - Profundidade de desgaste por abrasão, após 91 dias.....	115
Tabela 4.40 - Desgaste de Los Angeles (André, 2012).....	116
Tabela 4.41 - Parâmetros e dados estatísticos das equações 4.11, 4.12 e 4.13 para os resultados da profundidade de desgaste por abrasão após 91 dias. ....	117
Tabela 4.42 - Parâmetros e dados estatísticos das equações 4.14, 4.15 e 4.16 para os resultados da profundidade de desgaste por abrasão após 91 dias. ....	118

Tabela 5.1 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 20% para os ensaios efetuados .....	125
Tabela 5.2 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 50% para os ensaios efetuados .....	125
Tabela 5.3 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 100% para os ensaios efetuados .....	125

## Abreviaturas

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.



## 1. Introdução

### 1.1. Considerações iniciais

A exploração descontrolada dos recursos naturais, pelo Homem, tem sido alvo de duras críticas nas últimas décadas. Tem sido difundida por vários países e organizações uma crescente preocupação e sensibilização da população para os cuidados a ter com o meio ambiente. Devido ao crescimento industrial, os recursos naturais têm registado um crescente consumo, havendo mesmo casos onde se registou o seu esgotamento (Ribeiro, 2011).

O sector da produção e extração de pedra é um exemplo deste incremento do consumo, tendo-se registado entre 1986 e 1998, segundo dados da OSNET (Ornamental Stones Network), um incremento de cerca de 118% da produção mundial de pedra. De acordo com Midha (2003), posteriormente às datas referidas, esta taxa de crescimento tem mantido valores semelhantes ao indicado pela OSNET. O relatório das Nações Unidas para o meio ambiente sublinha que é preciso fazer mais com menos, alertando que a perspectiva de consumo de pedra natural em 2050 será cerca do triplo do atualmente consumido.

No sector da extração de pedra, a questão ambiental ganha cada vez mais importância uma vez que, para além do problema do consumo excessivo, existem ainda as enormes quantidades de desperdício gerado.

No âmbito nacional, milhões de toneladas de desperdício de mármore são acumuladas todos os anos nas escombrelas dos concelhos de Estremoz, Borba e Vila Viçosa (zona dos mármore) pela indústria extrativa local. Este enorme desperdício, que ronda 80 a 90% do total da rocha extraída, deve-se à conjugação de fatores de várias ordens, entre os quais predominam o elevado grau de fraturação da jazida, que impede a produção de blocos com dimensão comercial mínima e aspetos de ordem estética (presença de manchas, fios, entre outros), que desvalorizam a pedra, ao ponto de a tornar inaproveitável para uso como rocha ornamental (Ribeiro, 2011).

Ribeiro (2011) inventariaram as escombrelas da zona dos mármore e os cálculos efetuados apresentaram um valor global de quantidade de matéria-prima próximo de 70 milhões de toneladas (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Valores globais obtidos para a totalidade das escombrelas inventariadas (Ribeiro, 2011)

Volume total	Volume de sólidos	Matéria-prima	
		Volume	Quantidade
(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(10 <sup>6</sup> t)
41,7	30,9	25,7	69,5

A gravidade e dimensão deste problema forçaram uma discussão generalizada sobre os possíveis destinos a dar a estes resíduos. Do ponto de vista mineralógico, o mármore é, à semelhança dos calcários sedimentares, praticamente constituído por calcite, ou seja, quimicamente é carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Independentemente da sua proveniência (sedimentar / metamórfica), o (CaCO<sub>3</sub>) possui diversas aplicações, designadamente para vários tipos de indústrias. Especificamente para os desperdícios de mármore, Ladeira (1977) refere que as suas aplicações são muito numerosas, principalmente na indústria química.

## INTRODUÇÃO

Souza *et al.* (2009) demonstraram que a aplicação de resíduos oriundos do corte do mármore no sector dos polímeros gerou resultados que indicam a possibilidade da utilização destes como carga no processamento de compósitos à base de polipropileno.

Bakken *et al.* (2000) e Van Straaten (2007) referem haver também possibilidade de aplicação de resíduos oriundos do corte de mármore no sector agrícola para correcção do pH do solo, podendo também utilizar-se resíduos de granitos na fertilização de solos graças à libertação de potássio.

Cetin (1997) e Terzin e Karasahin (2003) indicam que os agregados produzidos a partir de resíduos resultantes da indústria de extracção do mármore poderiam vir a ser utilizados na construção de pavimentos rodoviários. Na mesma linha de utilização, Zorluer (2003) aponta o sector dedicado à fabricação de produtos utilizados na construção civil como sendo especialmente capaz de absorver uma grande parte dos resíduos provenientes da produção de rocha ornamental.

Hebhoub *et al.* (2011), Binici *et al.* (2008), Akbulut e Cahit (2007) e Zorluer (2003) mostram que produção de betão usando resíduos de mármore como agregado poderá ser um destino rentável e ecologicamente benéfico.

As experiências feitas por Saboya *et al.* (2007) mostram que a inclusão de 15-20% de pó de mármore no material cerâmico vermelho, em bruto, pode ser considerada a melhor proporção para alcançar as melhores características do tijolo cerâmico.

Todos estes possíveis destinos para as escombrelas da zona dos mármore têm um problema ou seja, não geram consumos em grande escala, pelo que não são soluções viáveis tendo em conta a quantidade de resíduos acumulados nas escombrelas (Figura 1.1).



**Figura 1.1 - Escombrela**

As únicas aplicações que podem a um grande consumo deste material são as que se destinam às indústrias da construção civil e, não em tão grande escala, na fabricação de cal e cimento e na calagem de solos ácidos, na agricultura.

No caso da utilização de cal, uma aplicação interessante passa pela sua utilização no tratamento de solos argilosos visando contrariar comportamentos geotécnicos deficientes típicos deste tipo de solo. Em Portugal, destacam-se também os estudos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil na aplicação de cal na construção de estradas e aeródromos. Mais recentemente, esta técnica foi utilizada em sublanços das autoestradas A2 e A10 (Silva, 2011).

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Segundo Costa et al. (1991), na década de 90, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil realizou alguns estudos que demonstraram que os desperdícios de mármore possuem boas características físicas e mecânicas confirmando a sua viabilidade na utilização em grandes empreendimentos da construção civil e obras públicas.

O centro de produção de agregados de Vila Viçosa (Figura 1.2), encontra-se próximo das explorações de mármore da região aproveitando, como matéria-prima os blocos de menores dimensões resultantes da produção de rocha ornamental. Este centro de produção tem sido pioneiro na utilização do mármore como matéria-prima para o fabrico de agregados, contribuindo de forma reconhecida para a diminuição do volume das escombrelas resultantes da produção de blocos. A capacidade de produção deste centro é superior a 300.00 t/ano e os seus agregados ali produzidos já foram usados em numerosas obras, nomeadamente: na barragem do Loureiro, na construção do 1º e 2º troço do canal Álamos / Loureiro, na circular sul Reguengos de Monsaraz, na beneficiação da EN4 em Estremoz, no aeródromo de Évora, no túnel Loureiro, entre outras.



**Figura 1.2 - Centro de produção de agregados de Vila Viçosa**

### **1.2.Objetivos da dissertação**

Esta dissertação surge no âmbito da necessidade de encontrar soluções que possibilitem a utilização de resíduos resultantes da indústria de extração do mármore, pretendendo-se no presente caso analisar a incorporação de agregados provenientes desses resíduos em betão estrutural que, uma vez viabilizada, possibilita a minimização dos impactes ambientais e visuais causados pelas escombrelas. Assim, procurou-se realizar um que objetiva ir ao encontro das investigações mais recentes dos países com mais experiência nesta área. Neste trabalho, dá-se foco exclusivo às características mecânicas, mas convém notar que os betões aqui desenvolvidos também são analisados do ponto de vista da sua durabilidade.

O estudo realizado consiste numa análise de viabilidade, efetuada através da realização de ensaios para determinação do comportamento mecânico do betão com incorporação sucessiva de agregados provenientes do processamento dos resíduos da indústria do mármore (Figura 1.3). Para este efeito, criaram-se 3 betões de referência com agregados grossos naturais e para cada um procedeu-se à substituição de 0, 20, 50, 100% dos agregados finos de referência por agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore.



Figura 1.3 - Agregados finos provenientes do processamento dos resíduos da indústria do mármore

### 1.3. Metodologia e organização da dissertação

A primeira etapa da presente dissertação teve como principal objetivo dispor do máximo de informação através de uma pesquisa bibliográfica extensa, a nível nacional e, principalmente, internacional. Deste modo, procurou-se adquirir uma ideia global sobre o tema, inserir este trabalho no conhecimento já adquirido e ganhar sensibilidade para a análise dos resultados subsequentes.

A segunda etapa deste estudo consistiu em preparar o plano de ensaios pela consulta das normas referentes à quantificação das características físicas dos agregados e do betão estrutural. A importância desta fase prende-se com motivos de operacionalidade, isto é, com a necessidade de planificar com detalhe os ensaios a realizar, por questões de monitorização de resultados e a indispensabilidade de uma programação rigorosa dos materiais e das respetivas quantidades necessárias.

Após a calendarização, a campanha experimental, composta pela preparação dos materiais, realização de ensaios e recolha de resultados, foi executada. Antes de iniciar a campanha experimental, procedeu-se à obtenção dos materiais que permitem a realização dos vários betões: cimento e todas as frações granulométricas de agregados minerais e secundários. A primeira fase da campanha experimental foi reservada para a caracterização física dos materiais de modo a produzir corretamente as composições pretendidas, facilitar comparações com outros estudos e possibilitar eventuais conclusões. Numa segunda fase, com o objetivo de assegurar a inexistência de problemas na fase que conduziu aos resultados finais, foram tidas em conta questões relacionadas com o betão no estado fresco, nomeadamente a trabalhabilidade, através da betonagem e vibração de algumas misturas. Por último, para a terceira fase, objetivou-se avaliar os diferentes betões produzidos do ponto de vista do seu desempenho mecânico e da sua deformabilidade.

A quarta etapa incidiu sobre o tratamento e análise conjunta dos resultados obtidos para os betões desenvolvidos. Foram discutidos os resultados, procurou-se explicação para as tendências presenciadas e confrontou-se exaustivamente os resultados desta dissertação com os obtidos por outros investigadores.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

A quinta e última etapa consiste na elaboração deste texto que pretende transmitir de forma clara e concisa todas as informações, análises e conclusões que este estudo permitiu. De modo a tornar mais perceptível a organização da presente dissertação, procede-se à sua descrição:

- capítulo 1: contém a introdução à problemática do tema e as considerações iniciais acompanhadas das razões que motivam este trabalho; são também apresentados os objetivos traçados e a metodologia utilizada na sua elaboração;
- capítulo 2: tem como objetivo fazer um levantamento do estado da arte (nacional e internacional), com a descrição dos resultados obtidos nas diferentes investigações desenvolvidas por outros autores; faz um cruzamento das características mecânicas de betões com incorporação de agregados provenientes do mármore em termos de trabalhabilidade, massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão; procura estabelecer o nível de conhecimento existente nesta matéria;
- capítulo 3: consiste numa descrição do programa experimental desenvolvido, nomeadamente em termos de apresentação dos ensaios realizados (objetivos, norma, procedimentos, amostras, aparelhos e utensílios), bem como os cálculos efetuados para a determinação dos betões testados.
- capítulo 4: pretende expor os resultados obtidos durante a campanha experimental, para todos os ensaios descritos no capítulo 3; descreve o comportamento desses resultados e conclui acerca do desempenho mecânico dos betões com incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore em termos de resistência à compressão, tração, abrasão e módulo de elasticidade; procede à comparação, quando oportuno, dos resultados obtidos com os presentes no capítulo 2, como forma de conferir fiabilidade aos resultados apresentados;
- capítulo 5: faz a conclusão da dissertação, realçando os principais resultados obtidos, para além das justificações encontradas para estes; propõe assuntos a desenvolver futuramente, com vista a caracterizar os parâmetros em falta ou no sentido de esclarecer dúvidas pendentes.

No final, surgem os anexos referidos ao longo do texto.

## INTRODUÇÃO

## 2. Estado da arte

### 2.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar de forma sucinta os resultados obtidos em outras investigações relativas ao uso de resíduos na construção civil, nomeadamente ao uso de resíduos resultantes da indústria de extração do mármore.

### 2.2. Propriedades dos agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore

#### 2.2.1. Propriedades físicas

Costa et al. (1991) realizaram um estudo no LNEC sobre as propriedades físicas dos mármore, visando o aproveitamento dos desperdícios de mármore para uma extensa gama de aplicações. Este estudo incidiu não sobre amostras de mármore selecionado para uso como rocha ornamental, mas sobre amostras colhidas em várias escombrelas de mármore ao longo de toda a jazida, supostamente de menor qualidade. Foram determinadas, entre outras propriedades físicas, as massas volúmicas, porosidade e absorção de água, diferenciando, em alguns casos, as variedades cromáticas dentro do mesmo núcleo de extração (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1 - Massas volúmicas, porosidade e absorção de água dos mármore do anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa (Costa et al., 1991)**

Concelho	Zona	Variedade	Massas volúmicas (kg/m <sup>3</sup> )			Porosidade (%)	Absorção (%)
			Real	Aparente	Saturada		
Estremoz	S. António	Branco	2782	2772	2776	0,36	0,13
	Casqueira	Branco-anil	2778	2765	2769	0,43	0,16
Borba	Escostinha	Creme	2781	2769	2773	0,43	0,16
Vila Viçosa	El-Rei	Creme	2774	2764	2767	0,40	0,15
		Rosa	2773	2765	2768	0,32	0,12
		C/vergada	2780	2769	2772	0,33	0,12
	Vigária	Branco	2779	2768	2772	0,36	0,13
	Pardais	Cinzento	2774	2755	2765	0,69	0,26
Branco		2771	2758	2763	0,50	0,19	

Destes resultados, as conclusões foram que as massas volúmicas variam entre estreitos limites (com os mármore de Pardais a diferenciarem-se por apresentarem os valores mínimos) e as absorções são baixas (sendo mais notórias para a variedade cinzenta de Pardais, com cerca do dobro da porosidade e absorção das de S. António, El-Rei e Vigária).

Ugur et al. (2009) concluíram no seu estudo que as porosidades de três mármore turcos são as apresentadas na Tabela 2.2.

Cardani e Meda (1999) estudaram o mármore Carrara (Itália) e o mármore Dionysos (Grécia), obtendo os valores para massa volúmica aparente e porosidade apresentados na Tabela 2.3.



**Tabela 2.2 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade para três tipos de mármore turcos (Igur et al., 2009)**

Tipo de mármore	Porosidade (%)	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Crema Zelve	0.386±0,039	2690±0,002
Afyon Sugar	0.257±0,205	2702±0,002
Salome	0.363±0,028	2707±0,004

**Tabela 2.3 - Valores da massa volúmica aparente e porosidade para os mármore Carrara e Dionysos (Cardani e Meda, 1999)**

Tipo de mármore	Porosidade (%)	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Carrara	0,13	2670
Dionysos	0,37	2692

Yavuz et al. (2005) estudaram as propriedades dos mármore Menderes Massif (também conhecidos como Mugla Black, Mugla White, Milas Lemon, Lilac, Aubergine, Pearl, Veined and White e Aegean Bordeaux) do sudoeste da Turquia. As propriedades físicas foram determinadas segundo as *Turkish Standards* (TS, 699) e segundo os procedimentos sugeridos pela *International Society of Rock Mechanics* (ISRM, 1981). Deste modo, os ensaios foram feitos em cubos de 7 cm de acordo com a referida norma (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4 - Propriedades físicas dos mármore de Menderes Massif no sudoeste da Turquia (Yavuz, 2001)**

Idade	Mármore	Variedade	Massas volúmicas (kg/m <sup>3</sup> )		Porosidade (%)	Absorção (%)
			Real	Saturada		
Paleoceno	Aegean Bordeaux		2742	2743	0,184	0,07
Cretáceo	Mugla White	Orucoglu	2711	2714	0,308	0,11
		Ozer	2703	2707	0,407	0,15
		Mersan	2704	2707	0,372	0,14
Triássico	Milas	White	2725	2726	0,108	0,04
		Veined	2718	2719	0,102	0,04
		Pearl	2736	2739	0,230	0,08
		Aubergine	2761	2762	0,165	0,06
		Lilac	2730	2731	0,100	0,04
		Lemon	2715	2717	0,158	0,06
Permo-Carbonífero	Mugla Black		2720	2722	0,250	0,09

As conclusões tiradas pelos autores indicam que estes mármore têm, em geral, baixas porosidades e altas massas volúmicas. Mostram também que não há nenhuma diferença significativa entre as propriedades físicas dos mármore do Permo-Carbonífero, do Triássico e do Paleoceno. No entanto, os mármore com maiores cristais do Cretáceo demonstram ter maior porosidade e absorção de água.



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

### 2.2.2. Propriedades mecânicas

Ugur et al. (2009) estudaram o efeito das propriedades das rochas nos resultados do ensaio de abrasão e impacto de *Los Angeles*. Foram estudados quatro calcários, três mármores e uma andesite. De modo a estabelecer a relação entre o ensaio de *Los Angeles* e as restantes propriedades mecânicas dos agregados, foram determinadas as várias características mecânicas dos agregados. Uma vez que esta dissertação tem como objetivo o estudo de betões integrando agregados provenientes da indústria do mármore, apenas são apresentados os resultados dos ensaios realizados na investigação em descrição referentes aos mármores.

Na Tabela 2.5, apresentam-se os resultados obtidos pelos investigadores para a resistência à compressão uniaxial. Este ensaio foi executado segundo as *Turkish Standards* e foram realizados em provetes cúbicos de 7 cm.

**Tabela 2.5 - Resistência à compressão dos mármores (Ugur et al., 2009)**

Tipo de mármore	Resistência à compressão (MPa)
Crema Zelve	126±14
Afyon Sugar	98±9
Salome	70±13

A resistência à tração foi determinada através do Ensaio Brasileiro e foi realizado de acordo com a *International Society of Rock Mechanics*. Os provetes usados foram discos com 54 mm de diâmetro e 35 mm de espessura. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6 - Resistência à tração dos mármores através do ensaio brasileiro (Ugur et al., 2009)**

Tipo de mármore	Resistência à tração (MPa)
Crema Zelve	8,23±0,81
Afyon Sugar	6,89±1,69
Salome	8,18±1,16

O ensaio de *Los Angeles* realizou-se de acordo com as *Turkish Standards 699* para ambas as medições (100 e 500 voltas). As amostras de agregados usados no ensaio foram produzidas de modo a não haver frações com tamanho superior a 20 mm nem inferior a 10 mm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7- Valores do ensaio de Los Angeles (Ugur et al., 2009)**

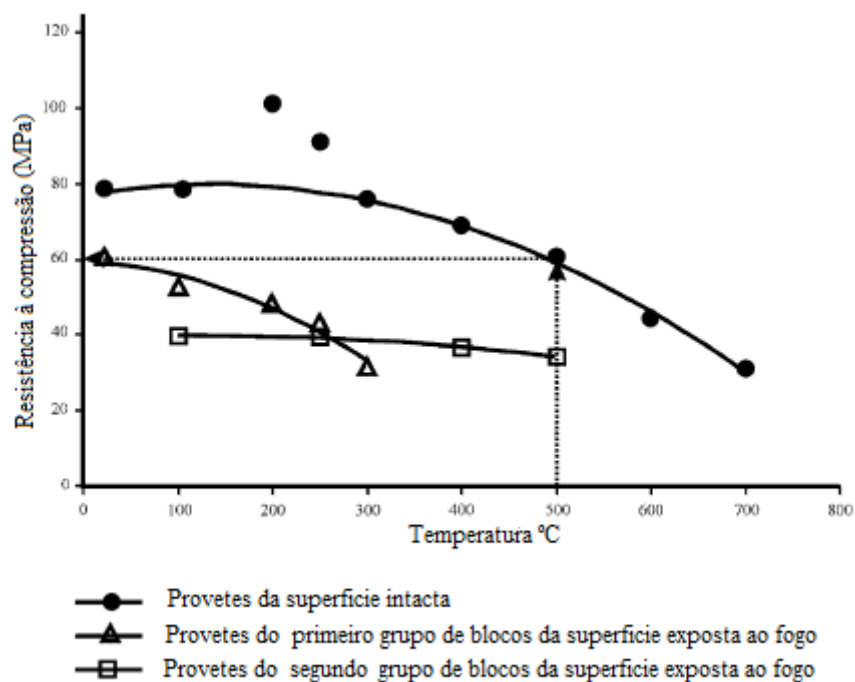
Tipo de mármore	K100 (%)	K500 (%)
Crema Zelve	7,2	33,6
Afyon Sugar	6,3	26,7
Salome	7,1	30,7

As conclusões retiradas deste estudo pelos investigadores são as seguintes: as propriedades das rochas têm influência nos valores de abrasão das rochas e podem ser usadas para prever os valores do ensaio de abrasão e impacto de *Los Angeles*; o valor do ensaio de abrasão e impacto de *Los Angeles* foi mais baixo para rochas com maior densidade, resistência à compressão e resistência à tração; existe correlação entre os valores de abrasão e cada propriedade estudada.

Kazi e Monsour (1980) efetuaram um estudo das características de abrasão de agregados provenientes de rocha britada obtida de uma grande variedade de rochas ígneas. Os investigadores concluíram no seu estudo que o tamanho do grão era um fator geológico significativo na avaliação da resistência à abrasão. De facto observaram que rochas com grão fino quando comparadas com rochas de grão maior, com a mesma porosidade, tinham maior resistência.

Koca et al. (2006) estudaram as alterações das propriedades de mármore quando expostos a fogo, sendo o principal objetivo do estudo a avaliação da capacidade de carga e capacidade no geral de colunas estruturais em mármore depois de sofrerem graves danos devido a um incêndio num edifício histórico. Para isso, os autores realizaram uma série de ensaios, nomeadamente testes mecânicos como a resistência à compressão uniaxial e a determinação do módulo de elasticidade.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com os métodos sugeridos na *International Society of Rock Mechanics* e foram ensaiados dois grupos de provetes, de cada parte oposta dos blocos expostos ao fogo. Na Figura 2.1, apresentam-se os valores obtidos pelos autores.



**Figura 2.1 - Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial para os dois grupos de provetes e para provetes intactos (Koca et al., 2006)**

Neste estudo, os autores concluíram que: a resistência à compressão uniaxial dos provetes de mármore demonstrou uma forte dependência no aumento da temperatura, o que foi facilmente observado nos provetes intactos; foi observado que a resistência à compressão uniaxial diminuiu com o aumento da temperatura na generalidade dos provetes; a resistência à compressão uniaxial apresentou uma taxa de diminuição semelhante nos dois grupos de provetes, sendo esta de 23%.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

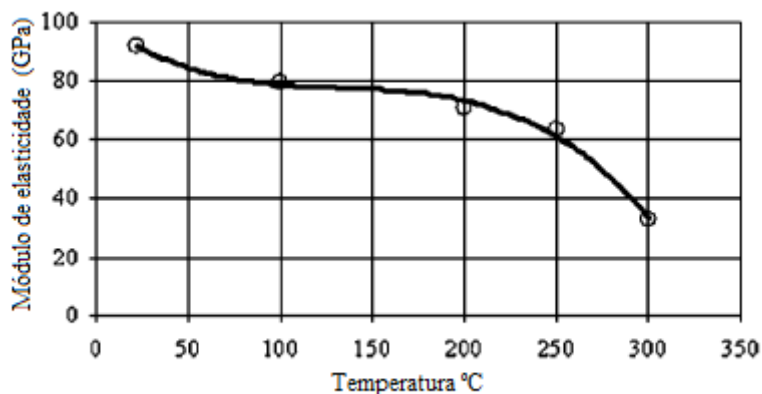


Figura 2.2 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade (Koca et al., 2006)

Na Figura 2.2, são apresentados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade. A partir destes, os autores concluíram que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura de maneira semelhante à resistência à compressão uniaxial e que a diminuição do módulo de elasticidade é muito acentuada a partir de 200 °C, o que os autores atribuíram ao facto de estes provetes terem sido previamente submetidos a temperaturas da ordem de 500 °C.

### 2.3. Propriedades mecânicas dos betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no estado endurecido

Os estudos até agora realizados com o objetivo de analisar a utilização de resíduos e subprodutos provenientes de demolição ou industriais como agregados no betão são em grande parte direcionados para o uso de RCD (Resíduos de Construção e Demolição), sendo os que se referem ao mármore ou outros agregados secundários em muito menor número.

#### 2.3.1. A influência dos agregados no betão

É consensual que os agregados têm um papel fundamental e que as suas características influenciam o comportamento do betão a que dão origem. Wu et al. (2001) investigaram a dimensão dessa influência através da utilização de quartzito triturado, granito triturado, calcário e mármore como agregados grossos, chegando a resultados que sugerem que a resistência, a rigidez e a energia de fracturação do betão para uma dada relação água / cimento dependem do tipo de agregado, especialmente em betões de alta resistência. Esta conclusão foi também alcançada por Ozturan e Cecen (1997) que, para além das conclusões acima referidas, afirmam que a importância da resistência do agregado ser maior nos betões de alta resistência advém de aí a rotura começar a ser condicionada também pelo agregado, contrariamente ao caso dos betões de menor resistência em que a rotura tende a ser condicionada pela ligação ligante / agregado.

Zhou *et al.* (1995) estudaram o efeito dos agregados grossos na resistência à compressão de betões de alta resistência, relatando que agregados mais fracos reduzem a resistência do betão, conclusão também alcançada por Aitcin e Mehta (1990) e por Beshr et al. (2003).

Gaccio e Zeberdino (1998) referem que o betão é um material compósito e, deste modo, as suas propriedades dependem das propriedades dos componentes do betão e das interações entre eles. Salientam que as interfaces entre os componentes são o elo mais fraco no betão, desempenhando um papel muito importante no processo de rotura.

Tabsh e Abdelfatah (2008) investigaram a influência de agregados reciclados de betão nas propriedades mecânicas do betão. Os resultados dos ensaios de resistência e solidez realizados nos agregados demonstram que os agregados reciclados de betão têm características piores do que os agregados naturais. Os resultados de resistência à compressão e à flexão demonstraram que o betão feito com agregados reciclados de betão é, em média, 10-25% mais fraco do que o betão feito com agregados naturais.

Evangelista e de Brito (2007) investigaram o comportamento mecânico de betão incorporando agregados reciclados finos de betão. Os ensaios realizados, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à abrasão, permitiram aos investigadores concluir que é razoável assumir que o uso de agregados reciclados finos de betão não compromete as propriedades mecânicas do betão até taxas de substituição de 30% do agregado fino natural por agregados reciclados finos. Conclusões semelhantes foram alcançadas por Khatib (2005); neste caso, o investigador concluiu que, para betão incorporando agregados reciclados provenientes de betão processado, a taxa de redução da resistência era da ordem de 15 a 30%. No caso de betão incorporando agregados reciclados finos provenientes de tijolo processado, até taxas de substituição de 50%, o betão apresenta valores de resistência semelhantes ao betão de referência (betão incorporando agregados finos naturais, neste caso) e para a taxa de substituição de 100% apresenta uma diminuição de apenas 10%.

Kiliç *et al.* (2007) estudaram a influência do tipo de agregado na resistência à compressão e na resistência à abrasão em betão de alta resistência, investigando para esse efeito 5 tipos de agregados, gabro, basalto, quartzite, calcário e arenito. As conclusões obtidas mostraram que as resistências à compressão do basalto, do calcário e do arenito limitaram as resistências à compressão dos betões produzidos com estes agregados, que a textura da quartzite limitou a resistência à compressão e à flexão do betão e que a resistência da argamassa limitou a resistência à compressão do betão produzido com gabro.

Amparano *et al.* (2000) realizaram um estudo experimental sobre a influência dos agregados na fendilhação do betão. Os resultados do estudo mostraram que, com o aumento do volume de agregados entre as percentagens de 45 e 75%, a resistência à compressão do betão decresce moderadamente (15%), a energia de fratura varia cerca de 25% e o tamanho da zona de fractura diminui.

Feng *et al.* (1995) efetuaram um estudo preliminar e ensaiaram betões com vários volumes de frações de agregados grossos. Concluíram que o fator de tensão crítica e a energia de fratura crescem monotonamente com a crescente parcela de agregados grossos desde 0% (pasta de cimento pura) até 75% do volume de betão.

### 2.3.2. Resistência à compressão

Devido à extrema importância da resistência à compressão na caracterização do betão, a análise desta característica é, sem dúvida, a mais divulgada e discutida. Contudo, além da imensa variedade de materiais e dosagens presentes nos diferentes estudos, acresce ainda a utilização de provetes de geometria e dimensões distintas o que, em certos casos, impossibilita a comparação direta dos resultados. Não obstante, é razoável fazer uma análise conclusiva com base na perda de resistência, que aliás foi a metodologia proposta por diversos investigadores.

Hebhoub et al. (2011) investigaram o uso de agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore da pedreira Fil-Fila, na Argélia. Para este estudo, os investigadores procederam à substituição de 25, 50 e 75% dos agregados (finos, grossos e ambos simultaneamente) naturais por agregados reciclados de mármore. Os ensaios de resistência à compressão foram feitos aos 2, 14, 28 e 90 dias e em provetes cilíndricos de 16 x 32 cm. Apresentam-se nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos, grosso e ambos.

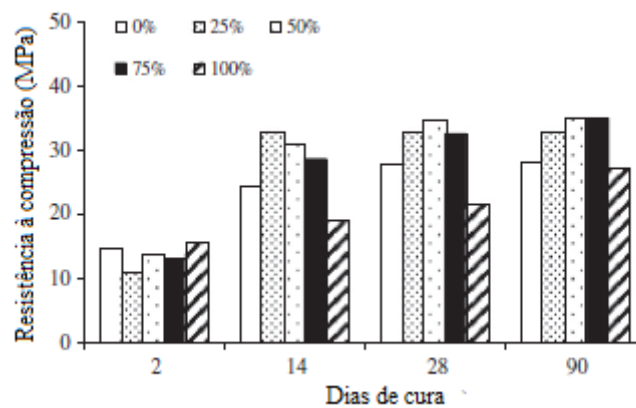


Figura 2.3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos (Hebhoub et al., 2011)

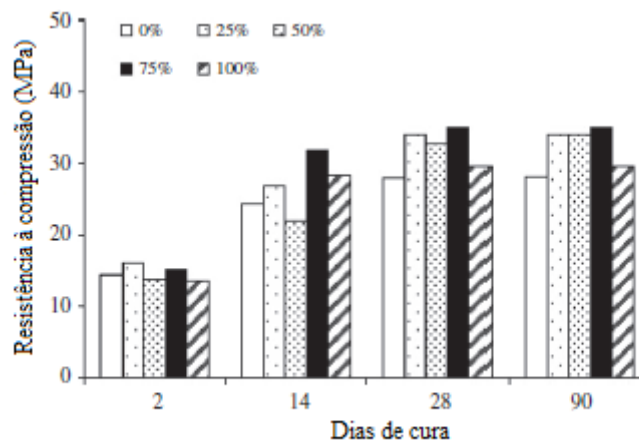


Figura 2.4 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos (Hebhoub et al., 2011)

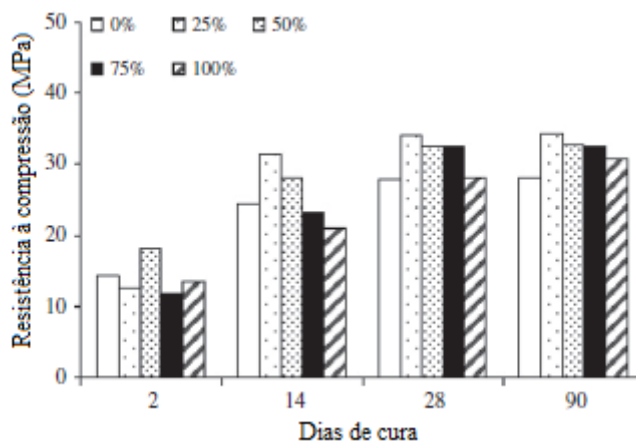


Figura 2.5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos e finos (Hebhoub et al., 2011)

As conclusões retiradas destes ensaios pelos autores foram: a formulação em que apenas se substituíram os agregados finos demonstrou um ganho de resistência significativo nas taxas de substituição até 75%; no entanto, o mesmo já não se observou para a taxa de substituição de 100%; nas duas restantes formulações, observaram-se muito bons resultados em relação à resistência à compressão nas taxas de substituição de 25, 50, 75% e, no caso de 100%, obtiveram-se resultados relativamente próximos do betão sem substituição.

Binici et al. (2007) realizaram uma investigação onde procuravam perceber a influência do uso de pó de calcário e mármore como adições em algumas propriedades mecânicas do betão. Deste modo, foram produzidas três famílias de betões: uma de referência, onde os investigadores não substituíram nenhuma parcela fina, outra onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados de areia fina por pó de mármore (MD) e uma terceira onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados naturais por pó de calcário (LD).

Todos os betões foram produzidos de acordo com as *Turkish Standards* (EN TS 802) e foram preparados com a mesma média de abaixamento de 8-12 cm. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 28, 90 e 360 dias e foram usados provetes cúbicos com 150 mm de aresta. Na Figura 2.6, são apresentados os resultados obtidos pelos investigadores para a resistência à compressão em função da idade de cura para as todas composições.

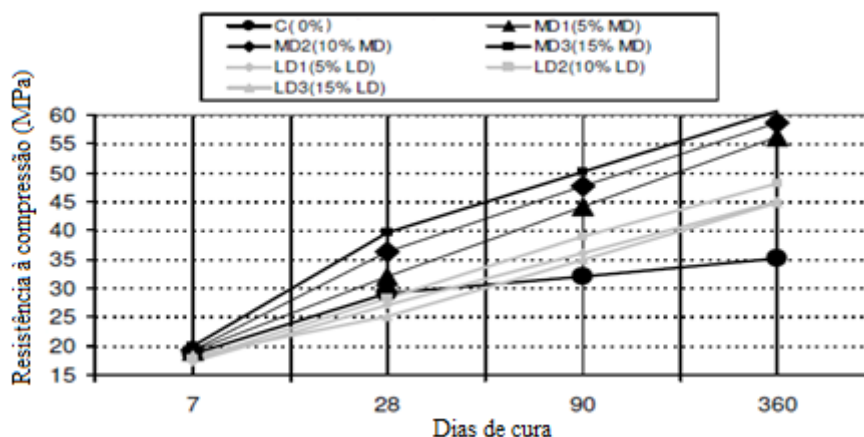


Figura 2.6 - Ensaio de resistência à compressão em função dos dias de cura para as diferentes composições (Binici et al., 2007)

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Nesta investigação, foram ensaiados mais de 200 provetes cúbicos e, de acordo com as *Turkish Standards* e com a *International Society of Rock Mechanics*, todos os resultados foram aceitáveis. Deste modo, os investigadores tiraram deste estudo as seguintes conclusões referentes à resistência à compressão: pode ser observado através da Figura 2.6, que houve um claro aumento na resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de pó de mármore; na Figura 2.7, pode ser visto que a resistência à compressão dos provetes aos 7 dias é próxima da dos provetes de referência; no entanto, a resistência à compressão dos betões das famílias MD e LD, em particular aos 90 dias, é superior à do de referência; o maior aumento de resistência à compressão foi observado nos betões da família MD aos 28 dias, provetes MD3 (ou seja, com uma taxa de substituição de 15%), um aumento 38% superior aos da família LD e 24% superior aos da família de referência; o desenvolvimento das características de resistência dos betões não é só afetado pelo tipo de pó, mas também pelas percentagens de substituição.

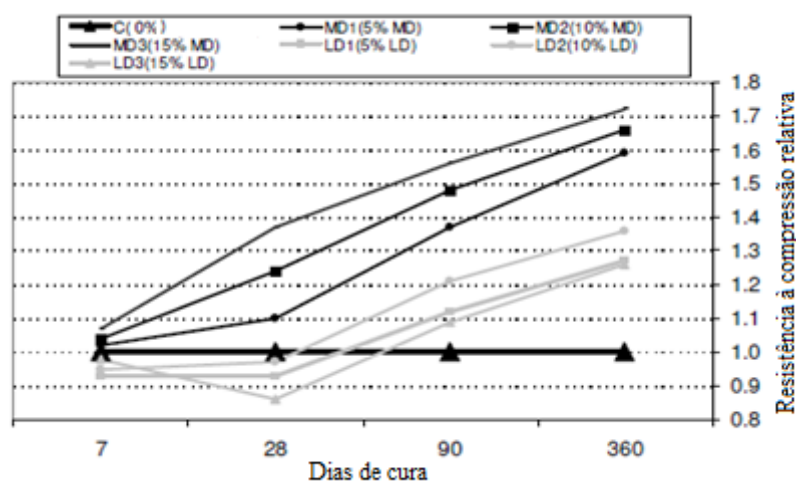


Figura 2.7 - Resistência à compressão relativa em função dos dias de cura para a diferentes composições (Binici et al., 2007)

Ergün (2010) efetuou uma investigação cujo objetivo era estudar a influência em termos de resistência da substituição parcial de cimento por diatomite e pó de mármore no betão. A diatomite é uma rocha sedimentar de origem biogénica com um alto teor de sílica amorfa e pode ser usada como pozolana natural uma vez que satisfaz os requisitos da EN 197-1. O uso desta rocha como material pozolânico para substituição parcial no betão já foi provado. Fragoulis *et al.* (2005) constatou um aumento na resistência à compressão ao adicionar 10% de diatomite à argamassa de cimento. No entanto, o uso da diatomite na produção de argamassa e betão acarreta a desvantagem da maior necessidade de água que resulta num decréscimo da resistência. O uso do pó de mármore como adição na argamassa e no betão tem um efeito de fíler. Assim, o uso de pó de mármore como adição mineral em argamassas e betões, especialmente em betões auto-compactáveis na presença de um superplastificante, resulta na máxima resistência à compressão com o mesmo nível de trabalhabilidade.



Para observar os efeitos da substituição parcial do cimento por diatomite ou por pó de mármore no betão, o autor ensaiou três famílias de betões: Série I, onde substituiu 5, 7,5 e 10% do cimento por diatomite; Série II, onde substituiu 5, 7,5, 10% do cimento por pó de mármore; e Série III, onde 5 e 10% do cimento foi substituído por diatomite e pó de mármore simultaneamente. Todos estes betões foram produzidos com uma relação água / cimento constante e igual a 0,5. Os ensaios realizados para caracterizar as propriedades mecânicas dos betões foram o ensaio de resistência à compressão e o ensaio de resistência à flexão. O ensaio de resistência à flexão foi conduzido de acordo com a *Turkish Standards TS EN 12390* e os provetes usados foram seis cubos com 100 mm de aresta. Nas Figuras 2.8, 2.9 e 2.10, são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 7, 28, 90 dias em função das taxas de substituição.

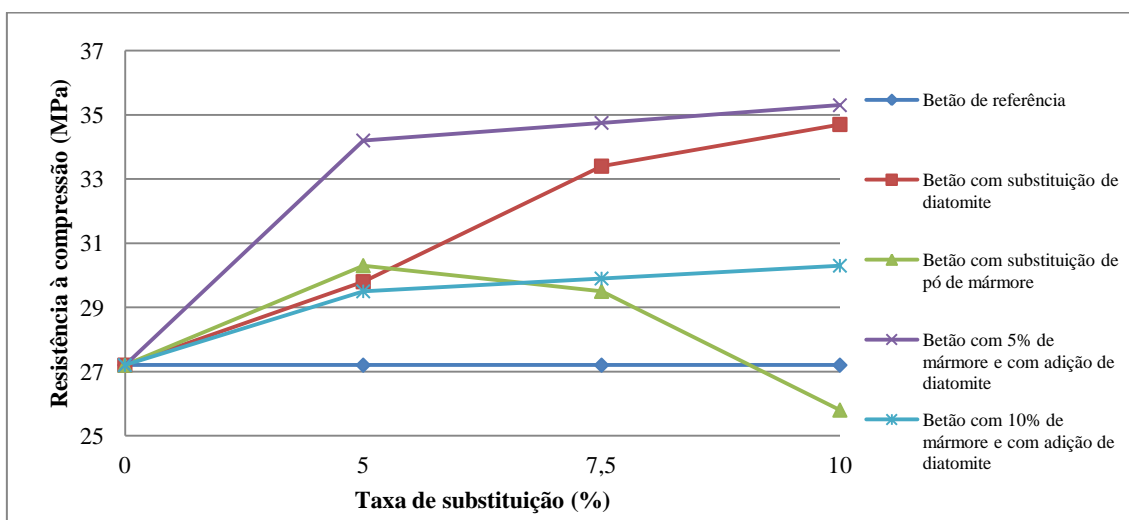


Figura 2.8 - Resistência à compressão aos 7 dias (adaptado de Ergun, 2011)

Deste estudo, o autor concluiu que a resistência à compressão de betões com substituição do cimento por diatomite melhorou. Este resultado pode dever-se à influência que a sílica tem no desenvolvimento de resistência dos betões. Concluiu também que o betão com substituição de 5% do cimento por pó de mármore e com superplastificante tem um significativo aumento da resistência à compressão, sendo este aumento devido às propriedades de filer do pó de mármore.

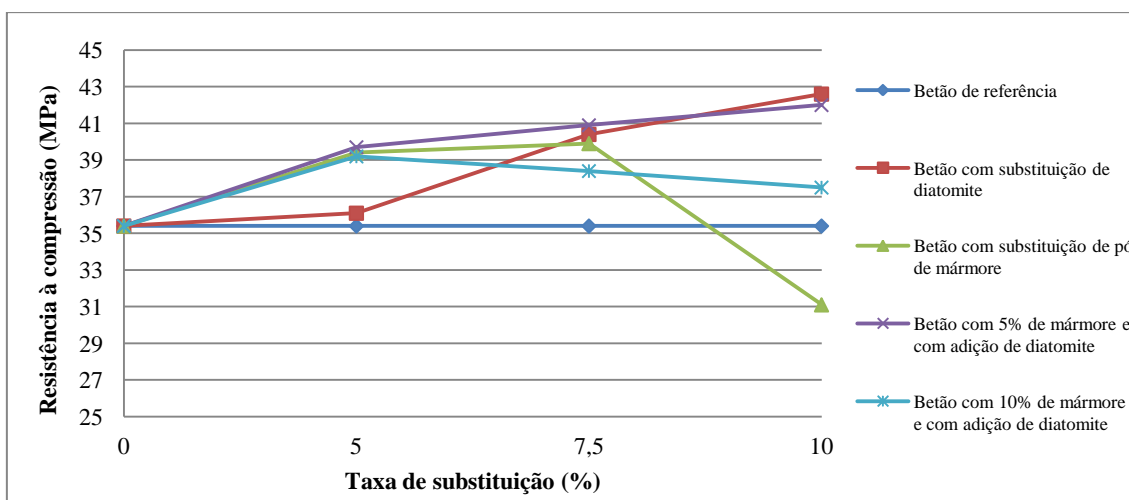


Figura 2.9 - Resistência à compressão aos 28 dias (adaptado de Ergun, 2011)



DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

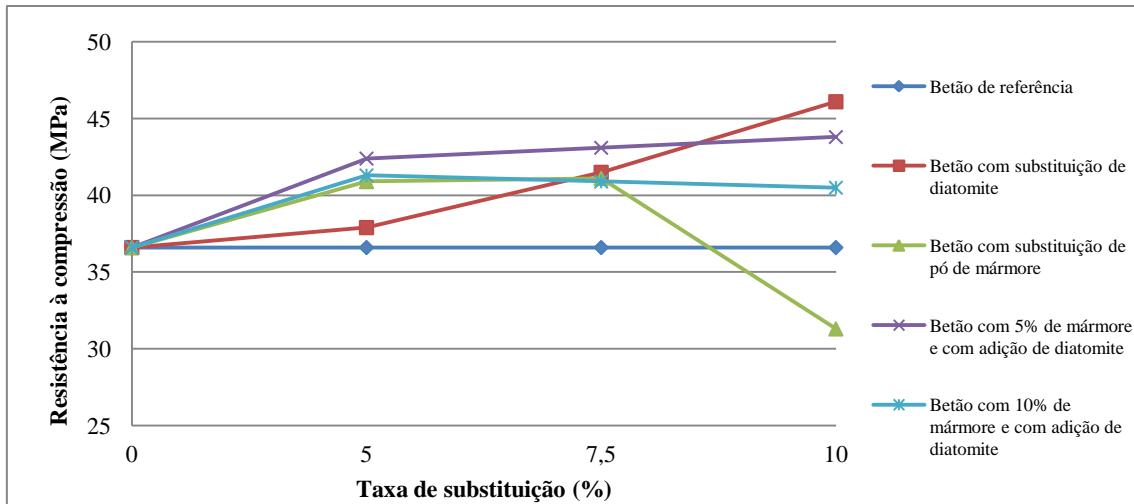


Figura 2.10 - Resistência à compressão aos 90 dias (adaptado de Ergun, 2011)

Belachia e Hebhouh (2011) efetuaram um estudo que previa avaliar o uso de resíduos de mármore como agregados em betão. Neste estudo, os investigadores usaram o mármore da pedra Fil-Fila nas imediações da cidade Skikda, Turquia. Para perceberem a adequabilidade destes agregados para betão, procederam a uma campanha experimental que consistia em formular 4 famílias de betões; B1.i, onde variou a taxa de substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) mantendo a trabalhabilidade do betão constante e, B2.i.k (com  $k = 1, 2$  e  $3$ ), onde procederam à substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) para três relações de água-cimento diferentes  $0,45, 0,55$  e  $0,65$ , respetivamente. Os resultados relativos à resistência à compressão são apresentados na Figura 2.11.

Deste estudo, os autores concluíram que, para uma relação água-cimento de  $0,55$  (B2.i.2), os betões ensaiados demonstraram uma resistência à compressão aproximadamente constante para todas as taxas de substituição e concluíram também que as maiores resistências à compressão obtidas foram na taxa de substituição de  $25\%$ .

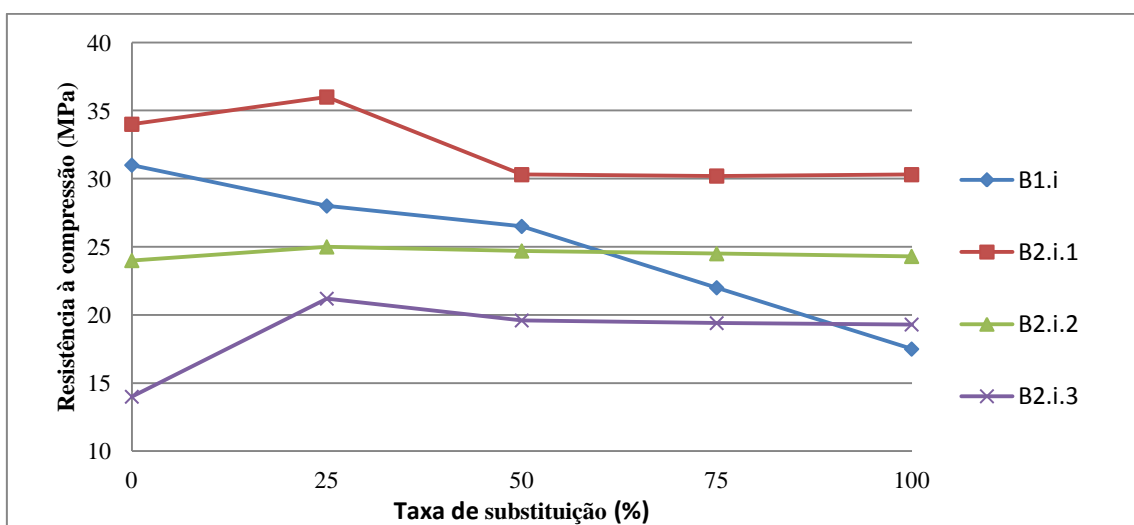


Figura 2.11 - Resistência à compressão aos 28 dias (adaptado de Belachia e Hebhouh, 2011)

Belaidi et al. (2012) estudaram os efeitos do uso de pozolana natural e pó de mármore nas propriedades de betões auto-compactáveis. Para este estudo, efetuaram duas famílias de betões, uma substituindo 5, 10, 15, 20 e 25% do cimento por pozolana natural (em peso) e outra com as mesmas taxas de substituição de 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40% mas por pozolana e pó de mármore simultaneamente. Os provetes usados no ensaio de resistência à compressão foram prismas de dimensões 70 x 70 x 280 mm e estes foram ensaiados aos 7, 28, 56 e 90 dias. Os resultados dos ensaios à compressão são apresentados nas Figuras 2.12 e 2.13.

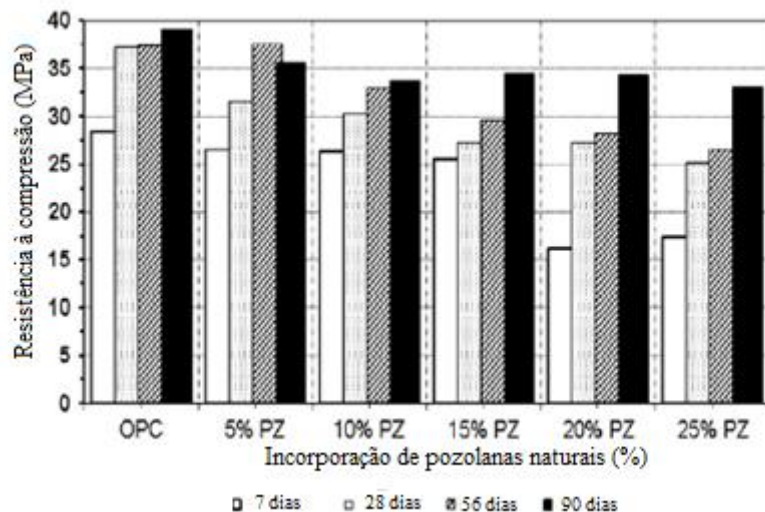


Figura 2.12 - Resistência à compressão do betão incorporando pozolanas naturais (Belaidi et al., 2012)

Destes resultados, os autores concluíram que a resistência diminui com a incorporação de pozolanas naturais, o que também acontece com os betões incorporando pozolanas naturais e pó de mármore. No entanto, no seu estudo, os autores referiram que o decréscimo de resistência observado para os betões incorporando pozolana natural e pó de mármore pode ser satisfatório tendo em conta que, para idades mais avançadas, o decréscimo de resistência é menos significativo.

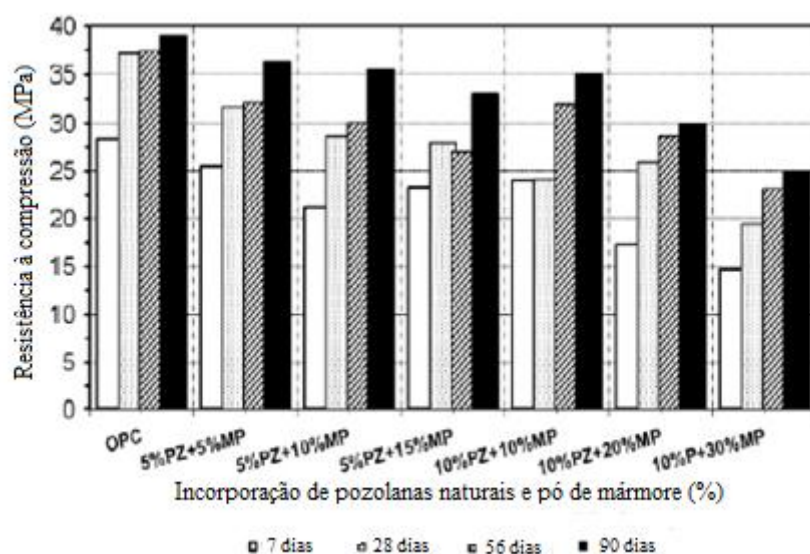


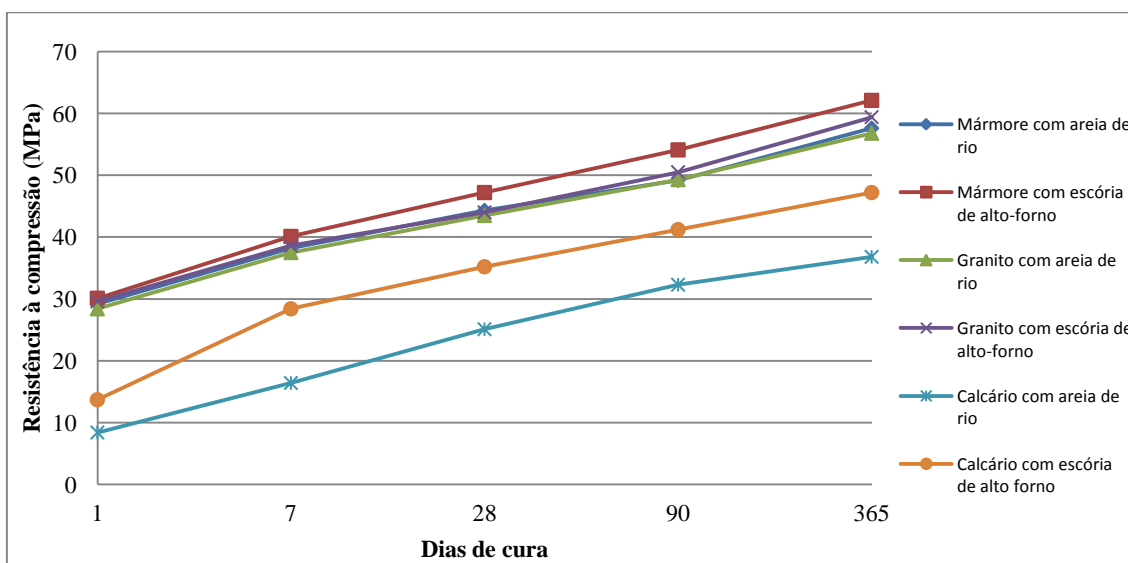
Figura 2.13 - Resistência à compressão dos betões incorporando pozolana natural e pó de mármore (Belaidi et al., 2012)

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Binici et al. (2008) estudaram a possibilidade de incorporar subprodutos da indústria turca das rochas ornamentais no betão. Investigaram a viabilidade e adequabilidade do uso combinado, no betão, de agregados grossos provenientes de resíduos de mármore ou granito com diâmetro máximo de 19 mm e de agregados finos de escória de alto-forno ou areia de rio, com diâmetro máximo de 4.75 mm, comparando-os com dois betões de referência compostos por agregados grosso de calcário e finos de areia de rio ou escória de alto-forno. Para efetuar esta comparação, estudaram a resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade (ou de Young), resistência à abrasão, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação dos vários betões. Para cada agregado grosso, obtiveram dois tipos de betões: um com finos de areia de rio e outro com escórias de alto-forno resultando no total em seis tipos de betões. Foi utilizado super-plastificante em todas as amostras, o qual foi ajustado para produzir um abaixamento no cone de Abrams de aproximadamente 80-150 mm. Os provetes usados para os ensaios de resistência à compressão foram cilindros e os ensaios realizaram-se aos 1, 7, 28, 90 e 365 dias. Na Tabela 2.8, são apresentados os resultados obtidos e, na Figura 2.14, é possível observar a progresso dos betões ao longo dos dias de cura.

**Tabela 2.8 - Resistência à compressão (Binici et al., 2008)**

	Resistência à compressão (MPa)				
	1º dia	7º dia	28º dia	90º dia	365º dia
Mármore / areia de rio	29,2	38,2	44,3	49,2	57,6
Mármore / escória de alto-forno	30,1	40,1	47,2	54,1	62,1
Granito / areia de rio	28,4	37,5	43,5	49,3	56,8
Granito / escória de alto-forno	29,6	38,6	44,0	50,5	59,4
Calcário / areia de rio	8,4	16,4	25,1	32,3	36,8
Calcário / escória de alto-forno	13,7	28,4	35,2	41,2	47,2



**Figura 2.14 - Resistência à compressão (adaptado de Binici et al., 2008)**

Os resultados obtidos dos ensaios indicaram que o uso de mármore e escória de alto-forno resultou num significativo aumento da resistência à compressão, mas sublinhe-se que os resultados de resistência à compressão dos betões em que foram usados agregados reciclados foram sempre claramente superiores aos dos betões de referência (Tabela 2.8). Os resultados revelaram também que o desenvolvimento das características de resistência não se deve unicamente aos agregados grossos, mas também, em alguns casos, aos agregados finos.

Aruntas et al. (2010) efetuaram uma investigação que tinha como objetivo avaliar a utilização de pó de mármore como aditivo na produção de cimento. Para isso, o pó de mármore foi usado como substituto do cimento portland nas percentagens de 2.5, 5, 7.5 e 10%. Para avaliar o comportamento mecânico das argamassas, os investigadores criaram então 6 famílias de argamassas, duas de referência PC e PCC (uma contendo CEM I e a outra contendo CEM II) e quatro com substituição de cimento por pó de mármore, WMDC1, WMDC2, WMDC3 e WMDC4 correspondendo às quatro taxas de substituição, respetivamente. Para cada uma das famílias, foram efetuados ensaios de resistência à compressão e tração. Os provetes usados nos ensaios foram prismas de dimensões 40 x 40 x 160 mm e foram ensaiados aos 7, 28 e 90 dias. Na Figura 2.15, são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão em função dos dias de cura.

As conclusões retiradas pelos autores deste estudo foram que uma taxa de substituição de 10% do cimento portland por pó de mármore pode ser usada na produção de argamassa de cimento, a resistência à compressão da WMDC2 é mais alta do que a da argamassa de referência PC, todas as argamassas com substituição apresentam resistência mais altas do que a argamassa de referência PCC e as argamassas contendo substituição podem ser usadas em alternativa a argamassas PCC.

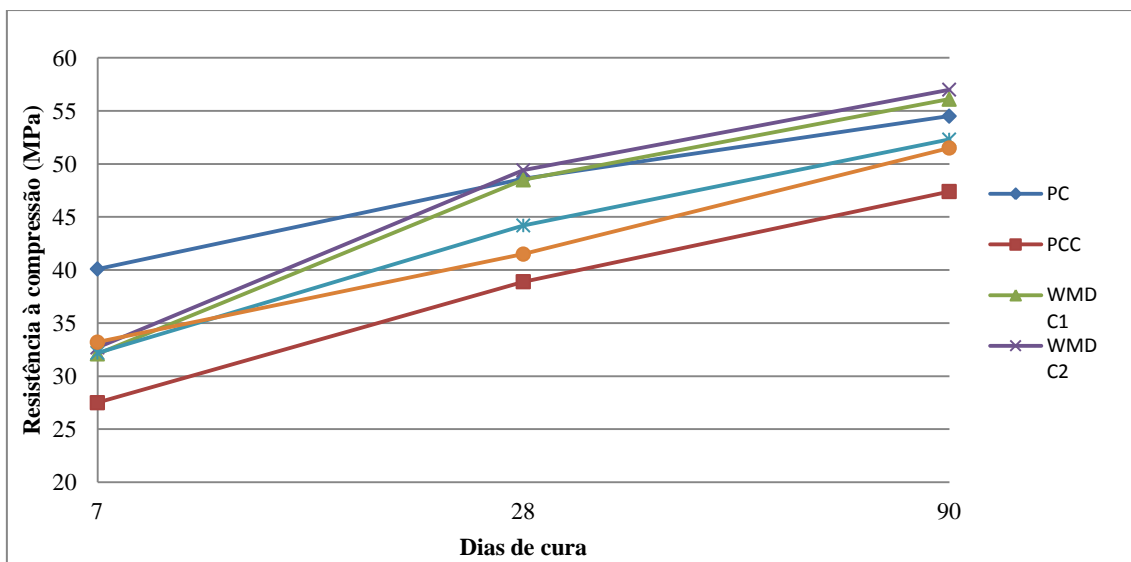


Figura 2.15 - Resistência à compressão (adaptado de Aruntas et al., 2010)

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Corinaldesi et al. (2010) caracterizaram o pó de mármore para o seu uso em argamassas e betão. Neste estudo, os autores criaram três famílias de betões: uma de referência onde usaram cimento portland (CEM II/A-L 42.5R) e areia natural, uma onde substituíram 10% do cimento por pó de mármore e uma outra onde substituíram 10% da areia. Para avaliar a resistência mecânica destes betões, foram efetuados ensaios de resistência à compressão, aos 7, 28 e 56 dias, onde usaram provetes prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm. Na Figura 2.16, são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão em função dos dias de cura para as três famílias.

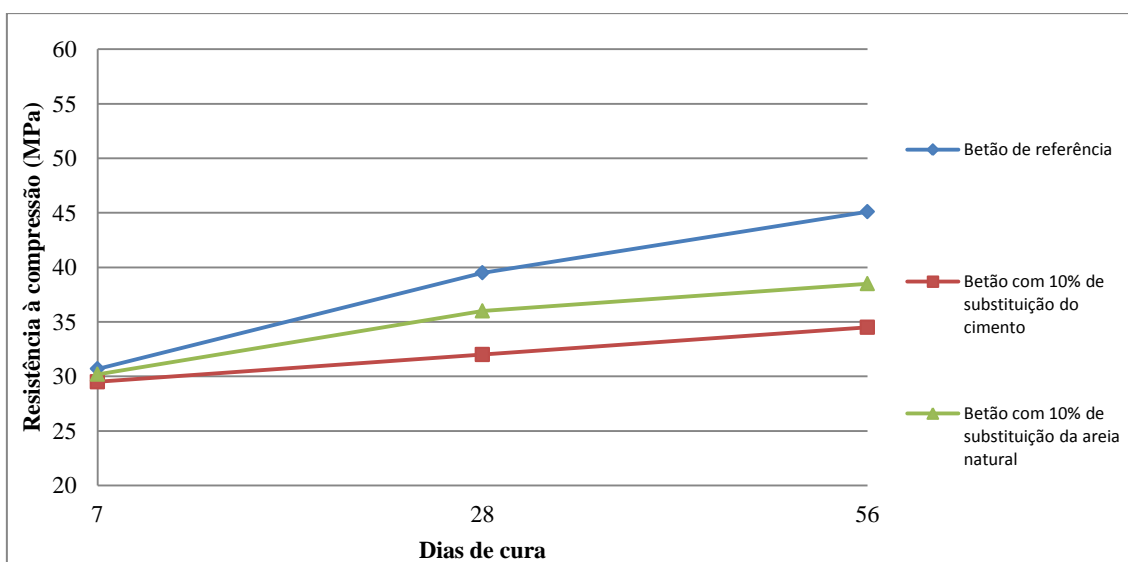


Figura 2.16 - Resistência à compressão em função dos dias de cura (adaptado de Corinaldesi, 2010)

As conclusões tiradas pelos autores deste estudo foram que uma taxa de substituição de 10%, de cimento ou de areia, por pó de mármore resulta num decréscimo de resistência e que o uso de pó de mármore em substituição de areia de rio demonstra melhores resultados do que em substituição de cimento.

Martins (2012) efetuou um estudo que consistiu em incorporar agregados grossos secundários resultantes da indústria do mármore. Neste estudo, o autor procedeu à criação de 3 famílias de betões, uma com agregados grossos primários de basalto, outra com agregados grossos primários de calcário e uma terceira com agregados grossos primários de granito. As percentagens de substituição de agregados estudadas foram de 0 (betão de referência), 20, 50 e 100%. O objetivo deste estudo era a caracterização das propriedades mecânicas de cada um dos betões criados; para isso, fizeram-se ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à abrasão.

O estudo efetuado por Martins (2012) é semelhante ao da presente dissertação, com a diferença que neste caso se está a substituir agregados primários finos, e não grossos. Deste modo, são apresentados, na Figura 2.17, os resultados obtidos pelo autor no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

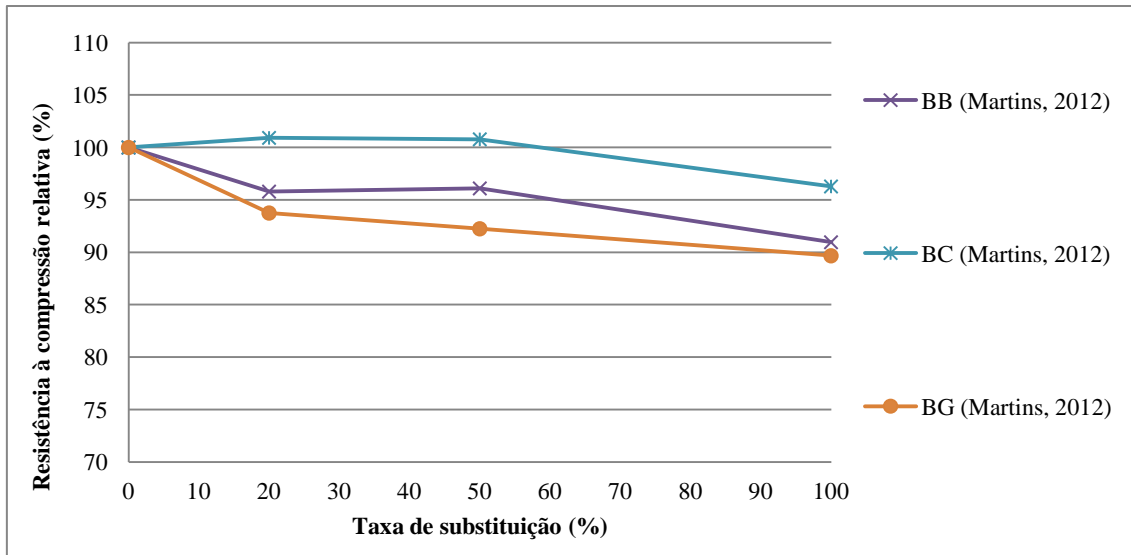


Figura 2.17 - Resistência à compressão em função da percentagem de substituição (adaptado de Martins, 2012)

### 2.3.3. Resistência à tração

Apesar de pouco importante no comportamento das estruturas aos Estados Limite Últimos, a resistência à tração desempenha um papel fundamental na resposta das mesmas aos Estados Limite de Utilização, nomeadamente no que diz respeito à fendilhação e, de forma indireta, à deformação.

Hebhoub et al. (2011), cuja investigação foi apresentada no ponto 2.3.2 referente à resistência à compressão (Figura 2.3, 2.4 e 2.5), realizaram também na sua campanha experimental ensaios de tração-flexão. Os ensaios foram feitos aos 2, 14, 28 e 90 dias e foram usados provetes prismáticos de dimensões 10 x 10 x 40 cm de acordo com a EN parte 2, 3 e 5. São apresentados, nas Figuras 2.18, 2.19 e 2.20, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos, grossos e ambos.

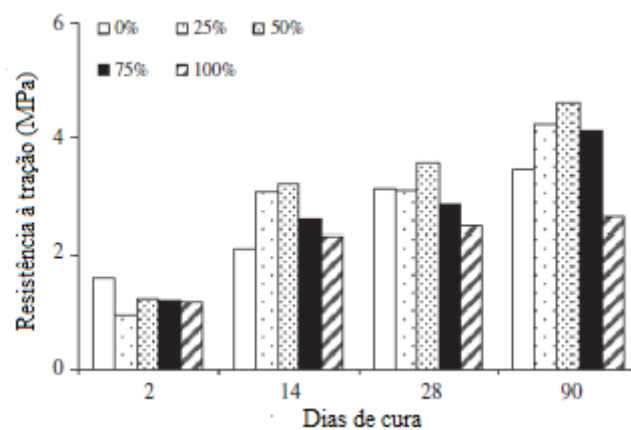


Figura 2.18 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de finos (Hebhoub et al., 2011)

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

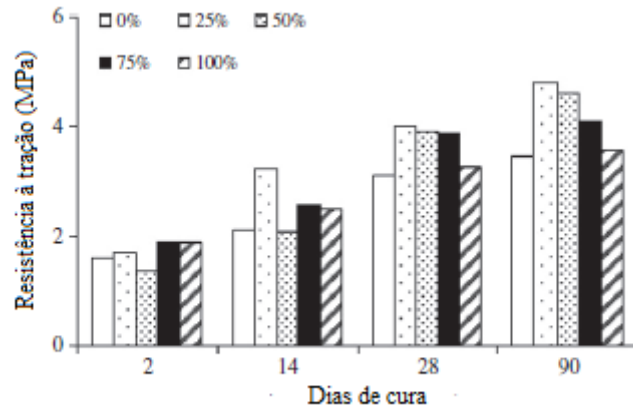


Figura 2.19 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos (Hebhoub et al., 2011)

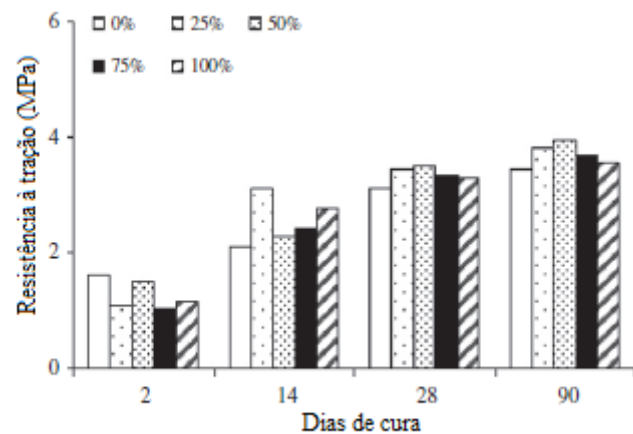


Figura 2.20 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função dos dias de cura para as várias taxas de substituição de grossos e finos (Hebhoub et al., 2011)

As conclusões, relativas à resistência à tração, tiradas pelos autores foram que a formulação em que apenas se substituíram os agregados finos demonstrou um ganho de resistência à tração significativo nas taxas de substituição de 25, 50 e 75% e as formulações em que apenas foram substituídos os grossos e ambos, demonstraram bons resultados para diferentes taxas de substituição.

Belachia e Hebhouh (2011), no seu estudo apresentado no ponto 2.3.2, avaliaram o uso de resíduos de mármore como agregados em betão. Na Figura 2.11, foram apresentados os resultados da resistência à compressão das várias famílias de betões estudadas (B1.i e B2.i.k). Nessa mesma investigação, os investigadores realizaram também ensaios de tração-flexão, cujos resultados são apresentados na Figura 2.21.



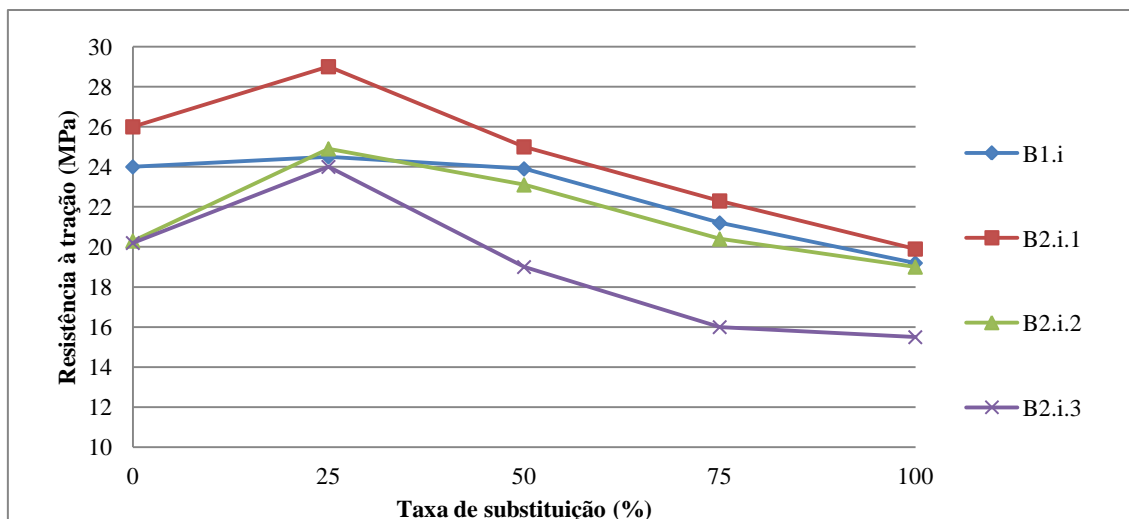


Figura 2.21 - Resistência à tração aos 28 dias (adaptado de Belachia e Hebhou, 2011)

Destes resultados, os autores concluíram que as resistências mais altas foram obtidas para taxas de substituição de 25%, os valores obtidos são aceitáveis e os agregados provenientes de resíduos de mármore podem ser usados como alternativa aos agregados naturais.

Como apresentado no ponto 2.3.2, Binici et al. (2008) estudaram a possibilidade de incorporar subprodutos da indústria turca das rochas ornamentais no betão. A resistência à tração foi determinada pelo ensaio de tração por compressão diametral e os provetes usados no ensaio foram cilindros de dimensões 100 x 200 mm. Na Tabela 2.9, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Tabela 2.9 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (Binici et al., 2008)

	Resistência à tração (MPa)
Mármore / areia de rio	3,3
Mármore / escória de alto-forno	3,5
Granito / areia de rio	3,2
Granito / escória de alto-forno	3,4
Calcário / areia de rio	2,1
Calcário / escória de alto-forno	2,4

As conclusões tiradas pelos autores foram que o uso de agregados de mármore melhora a resistência à tração e os valores obtidos para o mármore e granito foram mais altos do que os obtidos para os betões convencionais.

Aruntas et al. (2010) efetuaram uma investigação que tinha como objetivo avaliar a utilização de pó de mármore como aditivo na produção de cimento. Para isso, o pó de mármore foi usado como substituto do cimento portland nas percentagens de 2,5, 5, 7,5 e 10%. A descrição da campanha experimental fez-se em 2.3.2. Como referido, para cada uma das famílias, foram efetuados ensaios de resistência à compressão e tração pura. Os provetes usados nos ensaios foram prismas de dimensões 40 x 40 x 160 mm e foram ensaiados aos 7, 28 e 90 dias. Na Figura 2.22, são apresentados os resultados obtidos para a resistência à tração em função dos dias de cura.



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

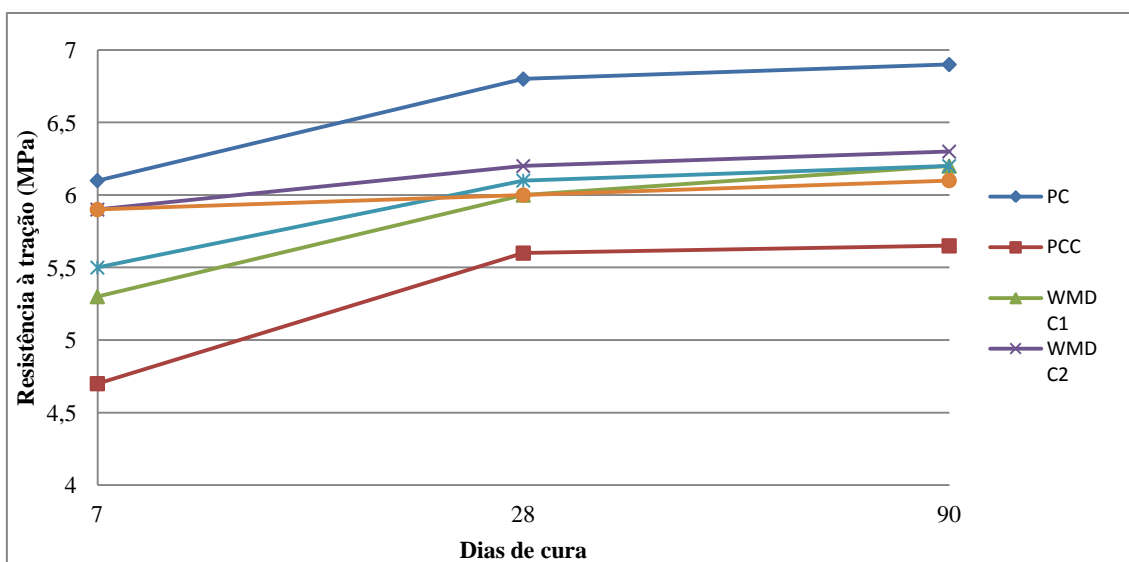


Figura 2.22 - Resistência à tração pura (adaptado de Aruntas et al., 2010)

Como descrito em 2.3.2, Martins (2012) efetuou um estudo onde caracterizou mecanicamente betões incorporando agregados grossos secundários de mármore. Na Figura 2.23, são apresentados os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral.

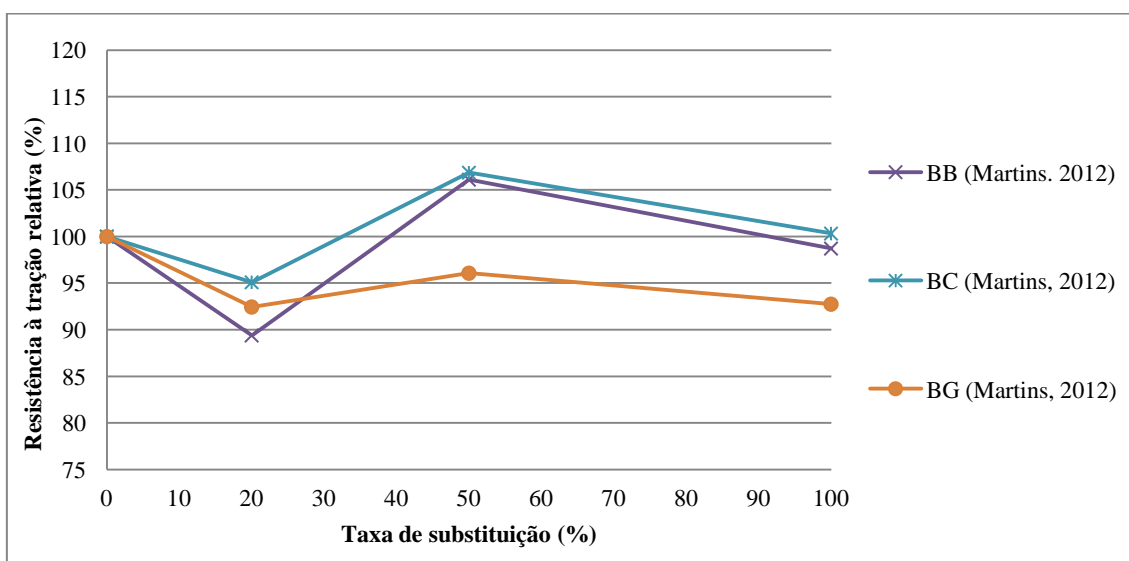


Figura 2.23 - Resistência à tração por compressão diametral (adaptado de Martins, 2012)

### 2.3.4. Módulo de elasticidade

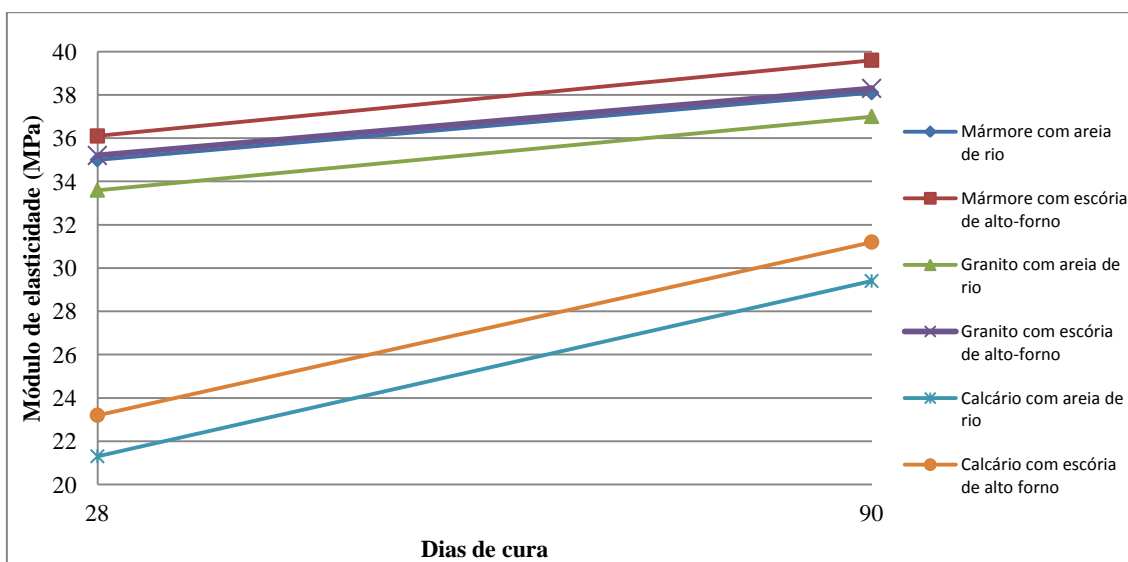
Observa-se que o número de estudos que apresentam resultados relativos ao módulo de elasticidade é muito menor do que o dos que apresentam valores em relação à resistência à compressão e tração.

No ponto 2.3.2 e 2.3.3 desta dissertação, foi apresentada a investigação efetuada por Binici et al. (2008), bem como os seus resultados para resistência à compressão e tração. Deste modo, apresenta-se agora os valores obtidos para o módulo de elasticidade. Binici et al. (2008) estudaram a possibilidade de incorporar subprodutos da indústria turca das rochas ornamentais no betão. Investigaram a viabilidade e adequabilidade do uso combinado, no betão, de agregados grossos provenientes de resíduos de mármore ou granito com diâmetro máximo de 19

mm com o de agregados finos de escória de alto-forno ou areia de rio, com diâmetro máximo de 4.75 mm, comparando-os com dois betões de referência compostos por agregados grosso de calcário e finos de areia de rio ou escória de alto-forno. Os provetes usados para os ensaios de módulo de elasticidade foram cilindros de dimensões 100 x 200 mm e os ensaios realizaram-se aos 28 e 90 dias. Na Tabela 2.10, são apresentados os resultados obtidos e, na Figura 2.24, é possível observar a progresso dos betões ao longo dos dias de cura.

**Tabela 2.10 - Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade (Binici et al., 2008)**

	Módulo de elasticidade	
	28º dia	90º dia
Mármore / areia de rio	35	38,1
Mármore / escória de alto-forno	36,1	39,6
Granito / areia de rio	33,6	37,0
Granito / escória de alto-forno	35,2	38,3
Calcário / areia de rio	21,3	29,4
Calcário / escória de alto-forno	23,2	31,2



**Figura 2.24 - Módulo de elasticidade (adaptado de Binici et al., 2008)**

A conclusão tirada pelos autores foi que os valores do módulo de elasticidade obtidos neste estudo foram, em média, 79% superiores aos valores obtidos para os betões convencionais. Esta diferença de valores deve-se principalmente à diferença da relação A/C e não à diferença de agregados entre os betões.

Em 2.3.2 e 2.3.3, foi referido que Martins (2012) efetuou um estudo que tinha como objetivo avaliar mecanicamente os efeitos da incorporação de agregados secundários grossos de mármore no betão. Deste modo, são apresentados na Figura 2.25 os resultados obtidos para o módulo de elasticidade em função da percentagem de substituição de agregados grossos.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

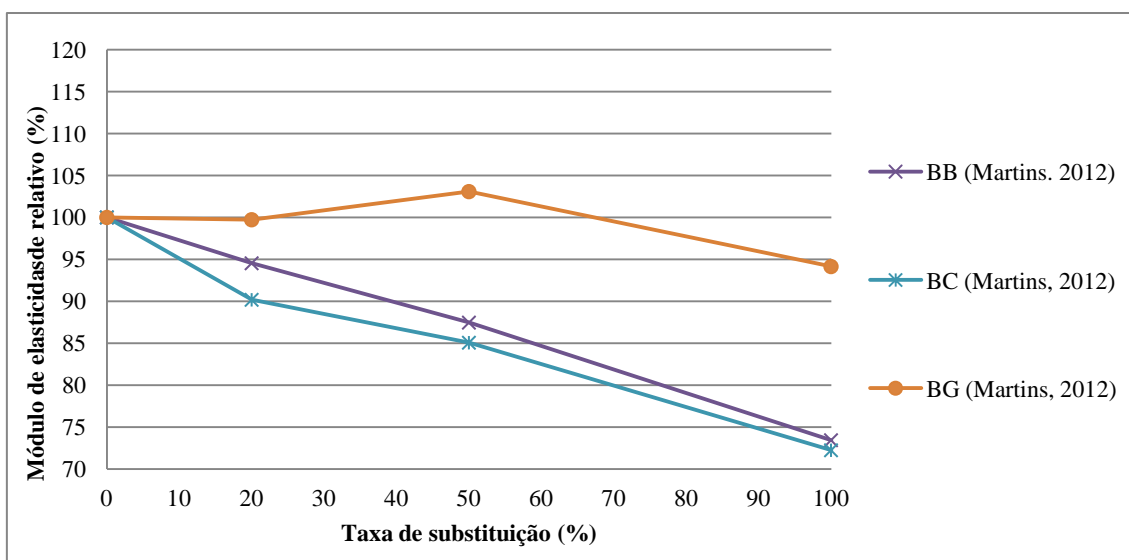


Figura 2.25 - Módulo de elasticidade (adaptado de Martins, 2012)

### 2.3.5. Resistência à abrasão

A medida da resistência ao desgaste, em especial por abrasão, é de fundamental importância para elementos cuja superfície desprotegida esteja sujeita a ações de erosão contínua, quer por ação humana (tráfego pedestre, circulação automóvel, entre outras), quer por ação dos elementos (canais hidráulicos, comportas, entre outras). Poucos estudos são conhecidos sobre a matéria, no que concerne à utilização de agregados reciclados, muito provavelmente por esta propriedade ser particularmente importante apenas para um estreito leque de estruturas e elementos de betão, para as quais se espera usar betões de melhor qualidade (Evangelista, 2007).

Relativamente à resistência à abrasão, apenas Binici et al. (2007) (2008) e Martins (2012) dispõem de resultados experimentais. Deste modo, nesta fase, a discussão desta propriedade cinge-se à análise detalhada dos trabalhos desenvolvidos por estes autores e das suas conclusões.

Como descrito no ponto 2.3.2 desta dissertação, Binici et al. (2007) realizaram uma investigação onde procuravam perceber a influência do uso de pó de calcário e mármore como aditivos em algumas propriedades mecânicas do betão. Produziram três famílias de betões, uma de referência onde os investigadores não substituíram nenhuma parcela fina, outra onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados de areia fina por pó de mármore (MD) e uma terceira onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados naturais por pó de calcário (LD).

Os ensaios de resistência à abrasão tinham como objetivo estabelecer os efeitos do tipo e quantidade de pó usado na resistência à abrasão. Os ensaios foram realizados de acordo com a DIN 52108/2002, os provetes usados foram prismas de dimensões 75 x 75 x 55 mm e o ensaio foi realizado aos 28, 90 e 360 dias. Na Figura 2.26, são apresentados os resultados obtidos para a variação de espessura dos provetes aos 60 min de abrasão em função dos dias de cura.

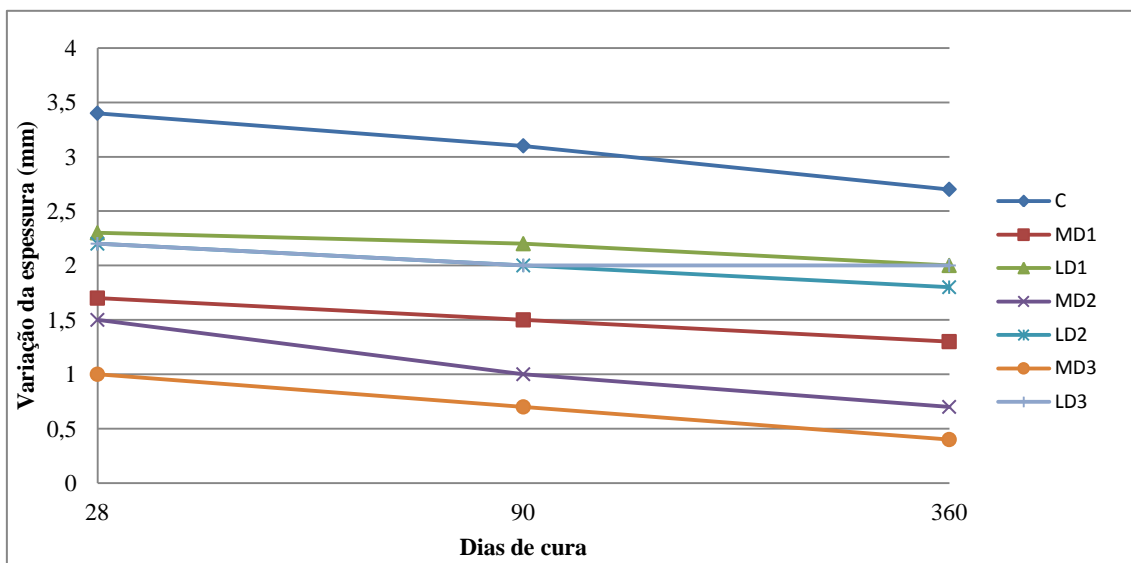


Figura 2.26 - Variação da espessura em função dos dias de cura (adaptado de Binici et al., 2007)

Na Figura 2.27, é apresentado o rácio de abrasão em relação ao betão de referência.

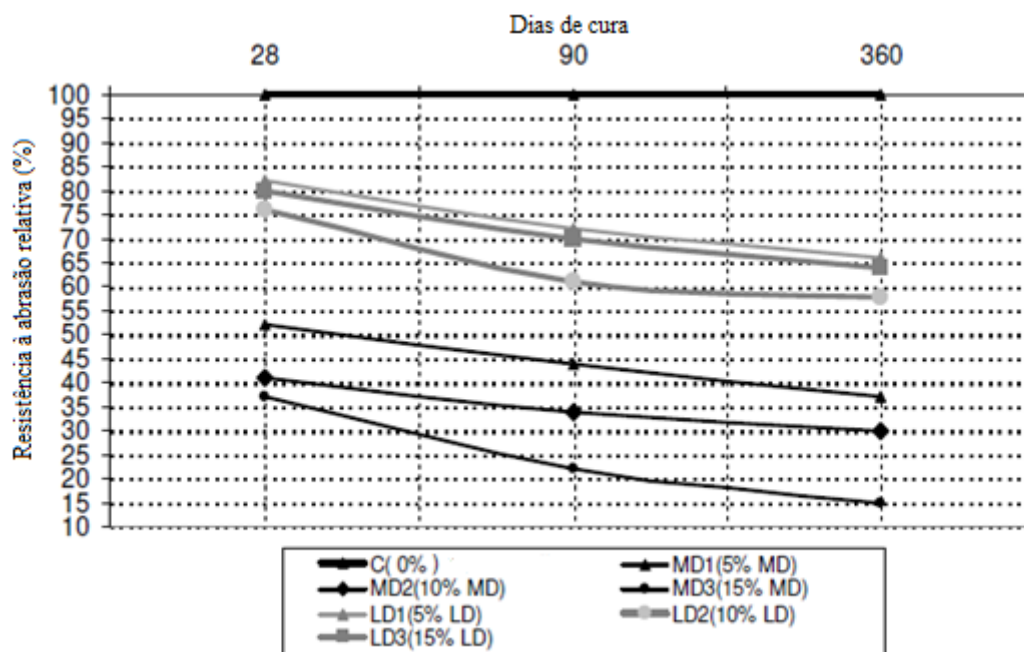


Figura 2.27 - Rácio de abrasão em relação ao betão de referência (Binici et al., 2007)

As conclusões retiradas pelos autores deste estudo, em relação à resistência à abrasão, foram as seguintes: a Figura 2.26 mostra que a resistência à abrasão dos provetes C se revelou insuficiente para resistir à abrasão; os betões contendo pó de mármore como agregado fino (MD) mostraram melhores capacidade de resistir à abrasão do que os provetes C e LD; por análise da Figura 2.27, concluíram que o valor máximo de resistência à abrasão foi obtido pelos provetes MD3 e o mínimo pelo betão de referência; a resistência à abrasão aumenta com a taxa de substituição de agregados finos naturais por pó; a resistência à abrasão é fortemente influenciada pela resistência à compressão e, em geral, a resistência à abrasão aumenta com a inclusão de pó de mármore e de calcário em substituição dos agregados finos naturais.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Nos pontos 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4 desta dissertação, foi apresentada a investigação efetuada por Binici et al. (2008), bem como os seus resultados para resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade. Deste modo, apresenta-se agora os valores obtidos para a resistência à abrasão. O ensaio de resistência à abrasão foi efetuado em provetes cúbicos de dimensões 150 x 150 x 50 mm e fez-se aos 28, 90 e 365 dias. Na Figura 2.28, são apresentados os resultados da perda de massa aos 30 minutos de abrasão para os vários betões em função dos dias de cura.

As conclusões tiradas pelos autores deste estudo, relativamente à resistência à abrasão, foram que a variação da espessura variou de 1.8 a 4.5 mm, o valor mais baixo de abrasão observado foi o do betão com mármore e o mais alto o do betão de referência, os valores da abrasão tendem para ser função da resistência à compressão e os valores da abrasão dos betões convencionais são 2.2 vezes superiores aos dos betões com mármore e granito, aos 365 dias.

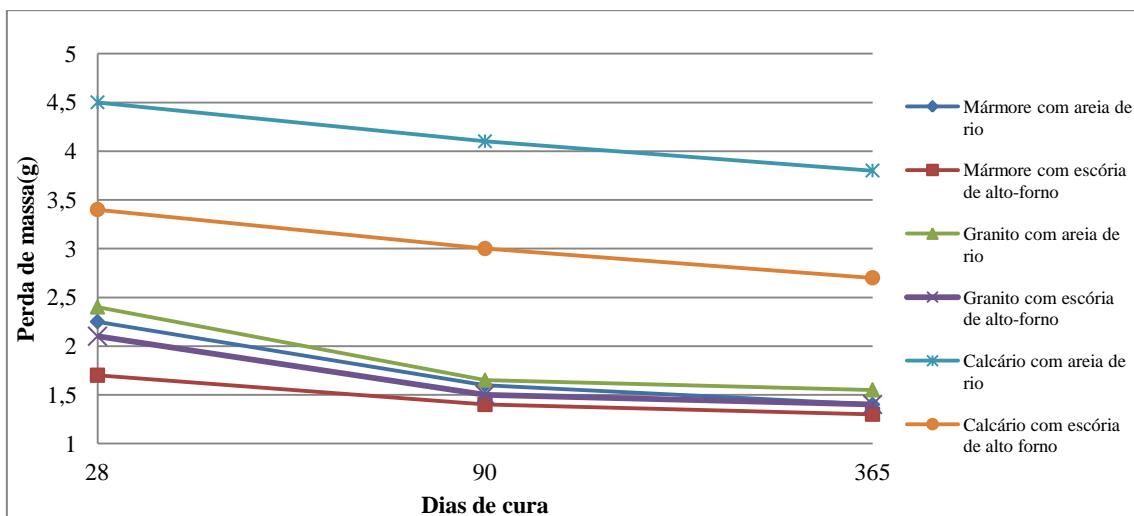


Figura 2.28 - Perda de massa aos 30 mins de abrasão em função dos dias de cura (adaptado de Binici et al. 2008)

Nos pontos 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4, foram apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade do estudo efetuado por Martins (2012). Deste modo, são apresentados, na Figura 2.29, os resultados obtidos pelo investigador relativamente à resistência à abrasão.

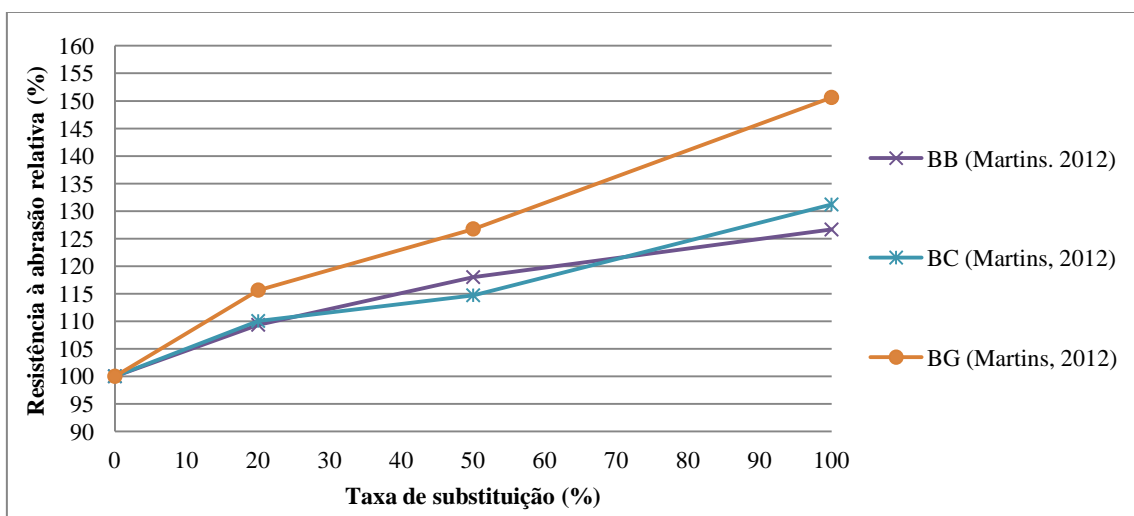


Figura 2.29 - Resistência à abrasão relativa (adaptado de Martins, 2012)

## 2.4. Propriedades dos betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no estado fresco

### 2.4.1. Massa volúmica

A massa volúmica do betão no estado fresco depende diretamente da massa volúmica dos elementos que o compõe, com especial ênfase nos agregados, assim como do grau de compactação (existência de ar retido no interior do betão).

Belachia e Hebhouh (2011), como descrito em 2.3.2, efetuaram um estudo que previa avaliar o uso de resíduos de mármore como agregados em betão. Relembre-se que as 4 famílias de betões produzidas foram: B1.i, onde variou a taxa de substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) mantendo a trabalhabilidade do betão constante e B2.i.k (com  $k = 1, 2$  e  $3$ ), onde procederam à substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) para três relações de água-cimento diferentes  $0,45, 0,55$  e  $0,65$ , respetivamente. Na Figura 2.30, são apresentadas as massas volúmicas dos betões em função da sua taxa de substituição.

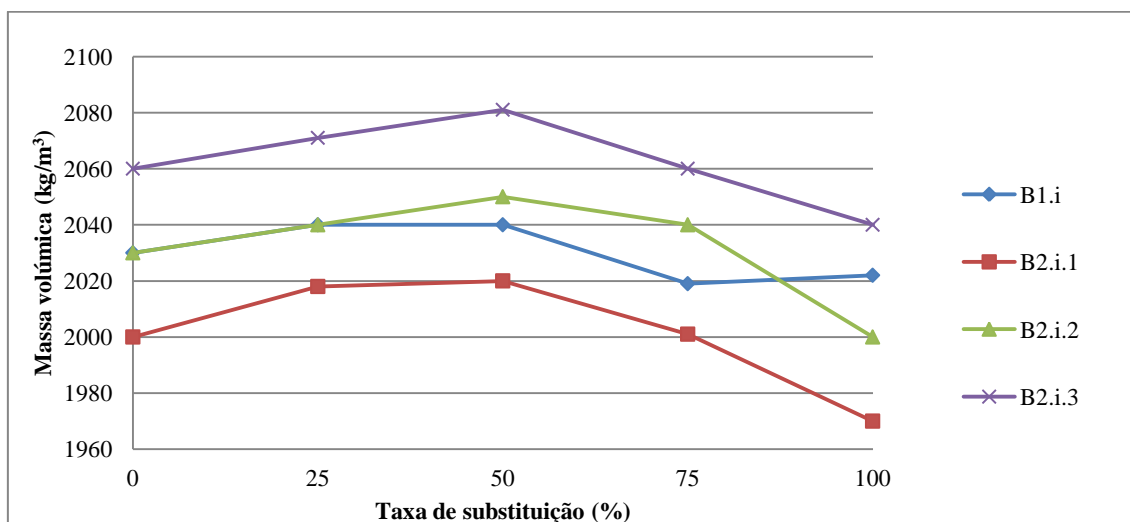
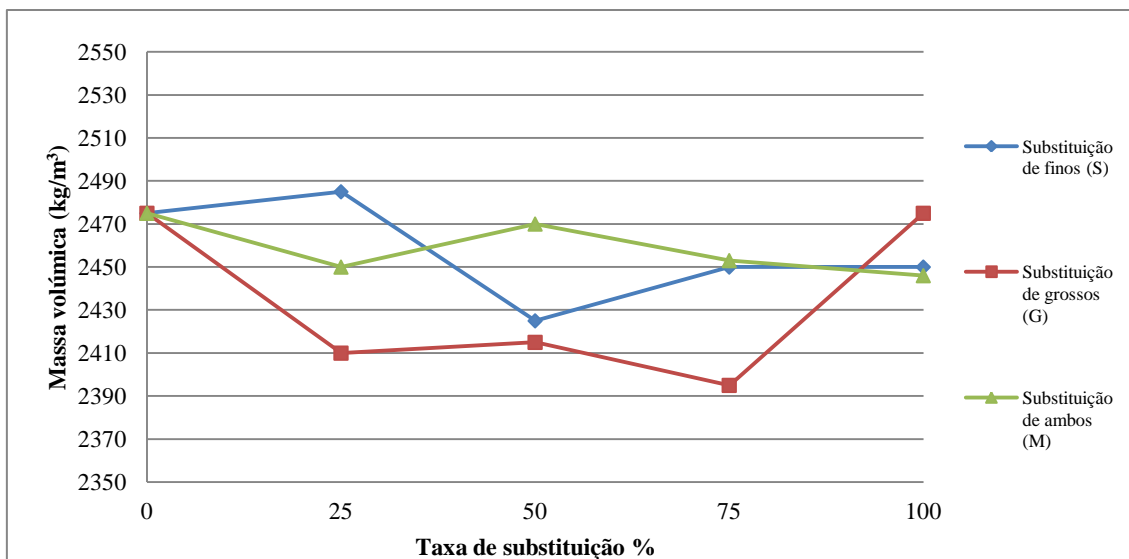


Figura 2.30 - Massa volúmica em função da taxa de substituição (adaptado de Belachia e Hebhouh, 2011)

No ponto 2.3.2 desta dissertação, foi referido que Hebhouh et al. (2011) investigaram o uso de agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore da pedreira Fil-Fila, na Argélia. Para este estudo, os investigadores procederam à substituição de 25, 50 e 75% dos agregados (finos, grossos e ambos simultaneamente) naturais por agregados reciclados de mármore. São apresentadas, na Figura 2.31, as massas volúmicas em função das taxas de substituição dos vários agregados.

Os autores concluíram que a massa volúmica não se altera substancialmente com a substituição de agregados e que a massa volúmica do betão é função das densidades iniciais dos materiais, da composição da mistura, da água inicial e final e grau de hidratação.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE



**Figura 2.31 - Massa volúmica em função da taxa de substituição (adaptado de Hebhouh et al., 2011)**

Nos pontos 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 e 2.3.5 desta dissertação, foi apresentada a investigação efetuada por Binici et al. (2008), bem como os seus resultados para resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão. Apresenta-se na Tabela 2.11 os valores obtidos de massa volúmica dos vários betões produzidos.

**Tabela 2.11 - Massa volúmica dos betões (Binici et al., 2008)**

	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Mármore / areia de rio	2375
Mármore / escória de alto-forno	2352
Granito / areia de rio	2395
Granito / escória de alto-forno	2368
Calcário / areia de rio	2396
Calcário / escória de alto-forno	2378

Binici et al. (2007) realizaram uma investigação onde procuravam perceber a influência do uso de pó de calcário e mármore como adições em algumas propriedades mecânicas do betão. Os resultados da resistência à compressão e à abrasão bem como a descrição da campanha experimental podem ser consultados nos pontos 2.3.2 e 2.3.5 desta dissertação. Como referido, foram produzidas três famílias de betões, uma de referência onde os investigadores não substituíram nenhuma parcela fina, outra onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados de areia fina por pó de mármore (MD) e uma terceira onde substituíram 5, 10 e 15% dos agregados naturais por pó de calcário (LD). São apresentadas, na Figura 2.32, os valores da massa volúmica para os diferentes betões em função da taxa de substituição dos agregados finos.

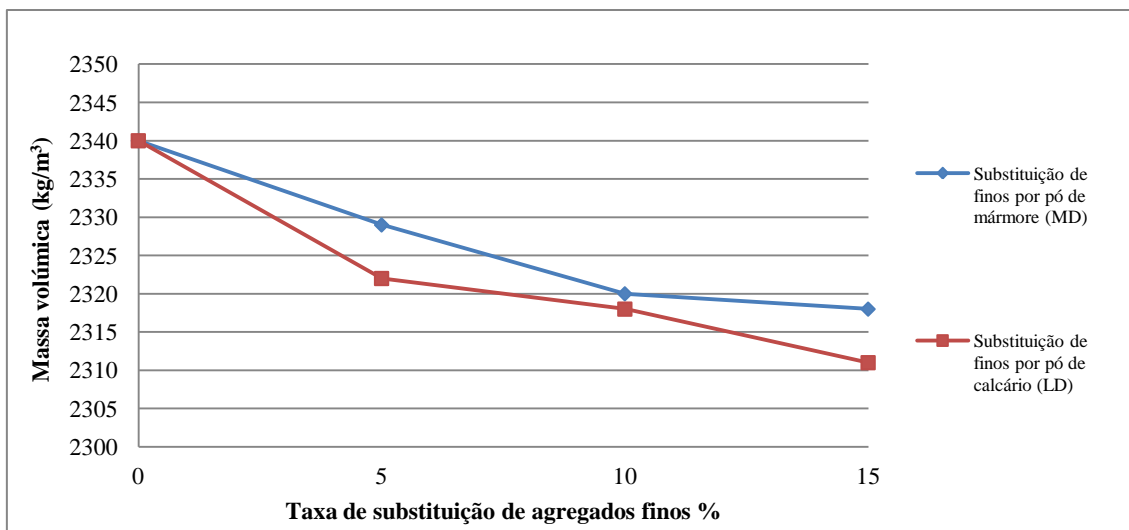


Figura 2.32 - Massa volúmica dos betões em função da taxa de substituição dos agregados finos (adaptado de Binici et al., 2007)

#### 2.4.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade fundamental para distinguir betões com diferentes aplicações. Desta forma, será indispensável determinar esta característica quando se pretende avaliar a influência da introdução de materiais reciclados no betão.

Belachia e Hebhouh (2011), como descrito em 2.3.2, efetuaram um estudo que previa avaliar o uso de resíduos de mármore como agregados em betão. É apresentada, na Figura 2.33, a variação dos valores do ensaio de abaixamento em função das taxas de substituição para os betões B1.i onde variou a taxa de substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) mantendo a trabalhabilidade do betão constante e B2.i.k (com  $k = 1, 2$  e  $3$ ), onde procederam à substituição dos agregados naturais por reciclados de mármore ( $i = 25, 50, 75$  e  $100\%$ ) para três relações de água-cimento diferentes  $0,45, 0,55$  e  $0,65$ , respetivamente.

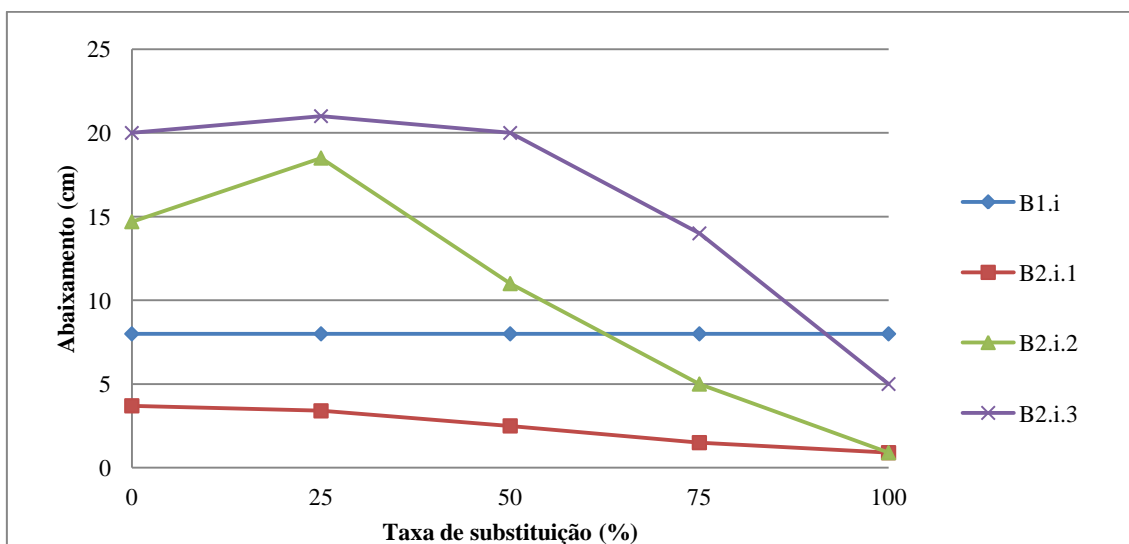


Figura 2.33 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição (adaptado de Belachia e Hebhouh, 2011)



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Destes resultados, os autores concluíram que a taxa de substituição dos agregados influencia a trabalhabilidade do betão, com exceção do B1.i onde o ensaio de abaixamento revelou valores constantes para todas as taxas de substituição. Nos restantes betões, os autores concluíram que a trabalhabilidade decresce após um ligeiro aumento na taxa de substituição de 25%.

No ponto 2.3.2 desta dissertação, foi referido que Hebhouh et al. (2011) investigaram o uso de agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore da pedreira Fil-Fila, na Argélia. Para este estudo, os investigadores procederam à substituição de 25, 50 e 75% dos agregados (finos, grossos e ambos simultaneamente) naturais por agregados reciclados de mármore. São apresentados, na Figura 3.34, os resultados do ensaio de abaixamento em função das taxas de substituição dos vários agregados.

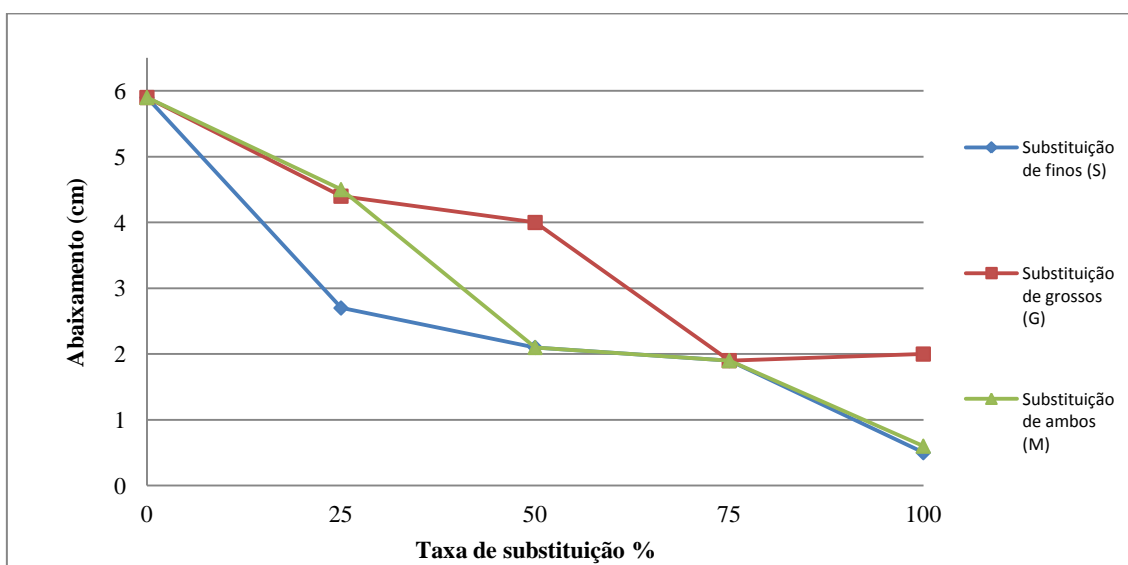
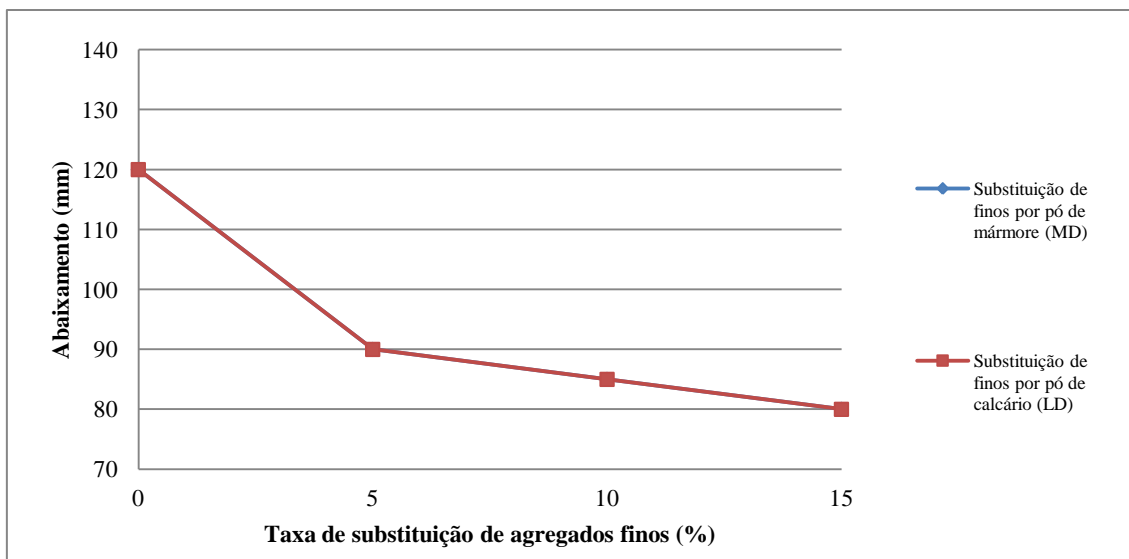


Figura 2.34 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição (adaptado de Hebhouh et al., 2011)

Os autores concluíram que a trabalhabilidade do betão diminui com o aumento da taxa de substituição, a trabalhabilidade decresce para todos os betões com agregados reciclados de mármore e o principal parâmetro da trabalhabilidade é o facto de os agregados naturais absorverem mais água do que os agregados reciclados de mármore e, em função disso, a quantidade de água na amassadura deve, ser corrigida.

Binici et al. (2007) realizaram uma investigação onde procuraram perceber a influência do uso de pó de calcário e mármore como adições em algumas propriedades mecânicas do betão. Os resultados da resistência à compressão e à abrasão bem como a descrição da campanha experimental e massa volúmica podem ser consultados nos pontos 2.3.2, 2.3.5 e 2.4.1 desta dissertação. São apresentados, na Figura 2.35, os valores obtidos nos ensaios de abaixamento dos vários betões produzidos.



**Figura 2.35 - Trabalhabilidade em função da taxa de substituição (adaptado de Binici et al., 2008)**

Nos pontos 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5 e 2.4.1 desta dissertação, foi apresentada a investigação efetuada por Binici et al. (2008), bem como os seus resultados para resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade, resistência à abrasão e massa volúmica. São apresentados, na Tabela 2.12, os valores obtidos no ensaio de abaixamento dos vários betões produzidos.

**Tabela 2.12 - Resultados do ensaio de abaixamento para os vários betões (Binici et al., 2008)**

	Abaixamento (mm)
Mármore / areia de rio	110
Mármore / escória de alto-forno	95
Granito / areia de rio	100
Granito / escória de alto-forno	80
Calcário / areia de rio	150
Calcário / escória de alto-forno	140

Na Figura 3.36, é apresentada a perda de abaixamento em função do tempo após a finalização da mistura.

As conclusões tiradas pelos autores deste estudo foram: há um perda significativa de abraixamento com o tempo para todas as amassaduras e o betão fresco contendo mármore e granito demonstrou melhor trabalhabilidade do que o betão convencional, devendo-se esta situação à baixa absorção de água dos agregados reciclados de mármore e granito.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

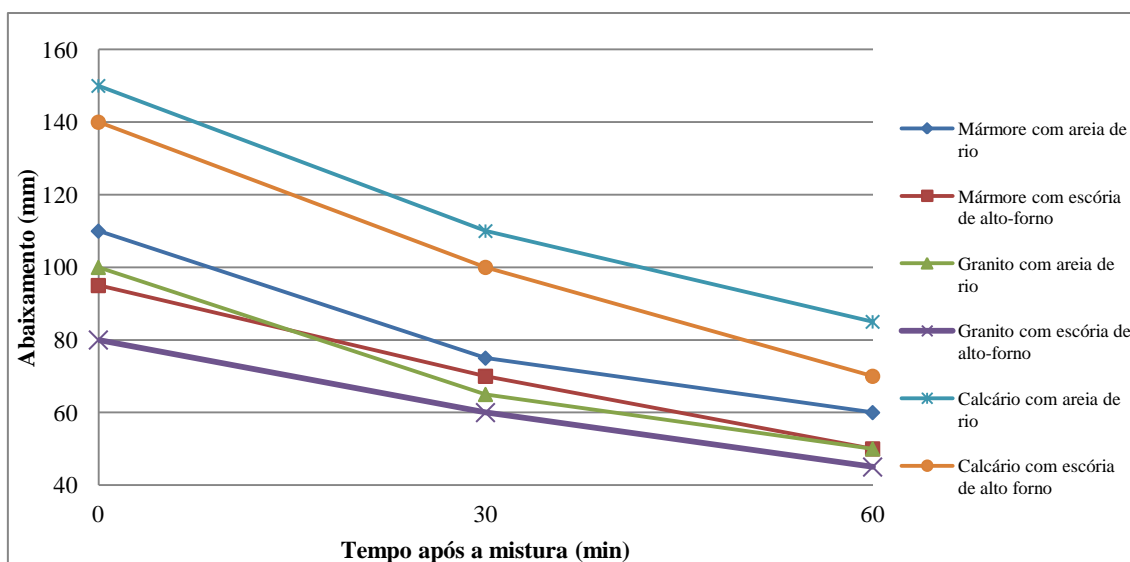


Figura 2.36 - Perda de abaixamento em função do tempo após a finalização da mistura (adaptado de Binici et al., 2007)

### 2.5. Aplicação de agregados provenientes de resíduos de mármore em pavimentos

Karaşahin em Terzi (2005) avaliaram o uso de pó de mármore e pó de calcário em betão asfáltico como fíler. Os resultados obtidos indicaram que, até cerca de 7% do rácio fíler / betume, a amostra contendo pó de calcário apresentava uma diminuição da deformação plástica, após o que a deformação plástica aumentava. Os resultados indicaram também que as amostras contendo pó de mármore e pó de calcário apresentaram deformações plásticas semelhantes, concluindo assim os autores que podem ser usados betões asfálticos contendo pó de mármore. Verificaram que os betões asfálticos contendo pó de mármore tinham um pequeno aumento de deformação plástica, recomendando assim o seu uso para estradas com baixa intensidade de tráfego.

Akbulut e Gürer (2006) investigaram o uso de agregados provenientes de resíduos resultantes da indústria do mármore em pavimentos asfálticos. Para isso, ensaiaram quatro diferentes betões asfálticos, cada um com um agregado diferente. O betão A em que foram usados resíduos de mármore, o betão B em que foi usada andesite e dois betões com tipos distintos de calcário. As conclusões retiradas deste estudo foram semelhantes às obtidas por Karaşahin em Terzi (2005) para o caso dos betões incorporando mármore.

Gencel *et al.* (2011) estudaram as propriedades de blocos de pavimento feitos a partir de betão com resíduos de mármore. O estudo foi realizado comparando os blocos com resíduos de mármore com blocos padrão, ou seja, feitos com betão de referência. As conclusões que os autores retiraram do estudo foram: a necessidade de água aumenta com o teor de mármore no betão, ou seja, a relação água / cimento aumenta devido à elevada superfície específica dos agregados finos de mármore; se o teor de mármore aumenta, a densidade diminui devido ao aumento de água; a resistência à compressão diminui com a quantidade de mármore apresentando, no entanto, valores satisfatórios aos 28 dias; a resistência à abrasão é altamente influenciada pela quantidade de mármore sendo a presença deste negativa para o efeito; a durabilidade em relação aos ciclos de gelo / degelo aumenta com o teor de mármore, ou seja, a incorporação de resíduos de mármore na produção de blocos de pavimento fornece resultados aceitáveis.

## 2.6. Conclusões

A consulta e análise da bibliografia disponível nesta área permite afirmar que existe um conhecimento consistente das principais características mecânicas de betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. Seguidamente, resumiram-se as principais conclusões já analisadas e discutidas.

### 2.6.1. Massa volúmica

A massa volúmica não sofre uma variação apreciável quando a percentagem de substituição aumenta. Esta conclusão pode dever-se ao facto dos agregados naturais terem massas volúmicas próximas das massas volúmicas dos agregados reciclados de mármore encontradas na pesquisa.

### 2.6.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é afetada negativamente pela incorporação de agregados provenientes de resíduos de mármore no betão e o agravamento é mais acentuado quanto maior for o teor introduzido. Esta característica observou-se em todos os estudos encontrados.

### 2.6.3. Resistência à compressão

Relativamente à resistência à compressão, não existe um consenso sobre o seu aumento ou decréscimo com o aumento da percentagem de substituição. No entanto, observa-se em muitos casos um ligeiro aumento de resistência, principalmente para percentagens de substituição mais baixas (até 25%). Procede-se neste ponto à comparação dos resultados obtidos por alguns dos autores analisados. Por análise das Figuras 2.37, 2.38, 2.39 e 2.40, é possível concluir que de facto há um ligeiro aumento na resistência à compressão nos betões com baixas taxas de substituição de agregados finos naturais por agregados provenientes de resíduos de mármore.

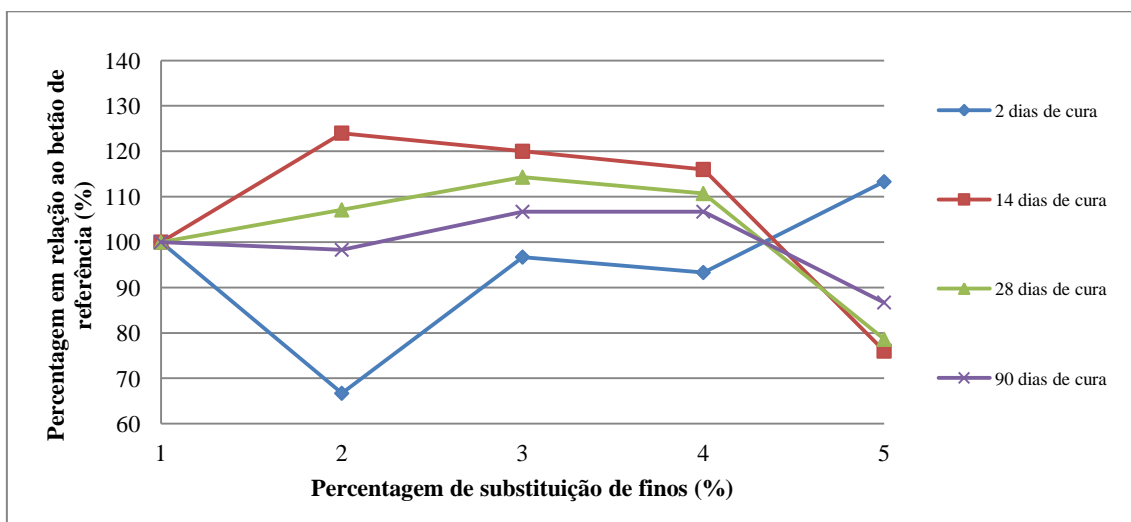


Figura 2.37 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão por Hebhoub et al. (2011)

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

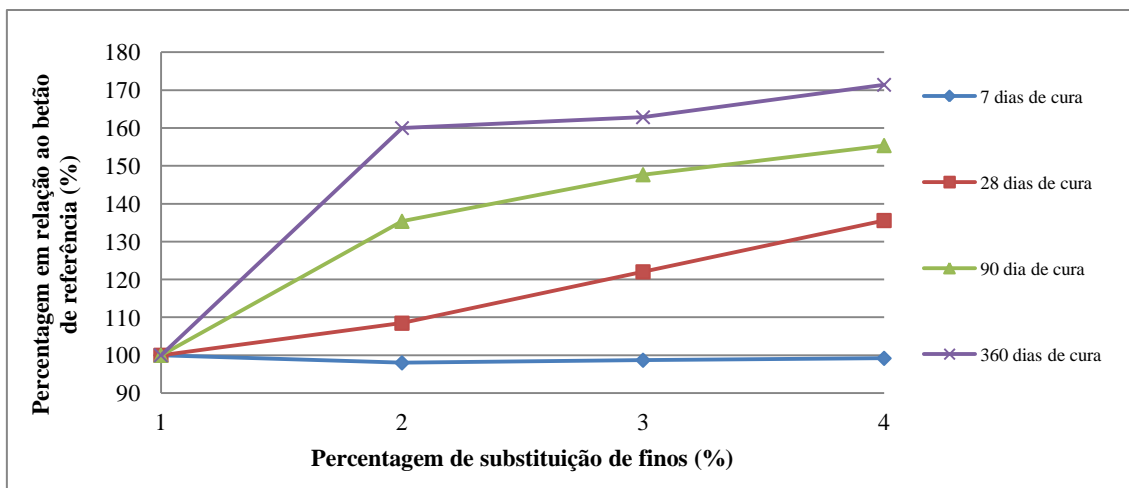


Figura 2.38 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão por Binici et al. (2007)

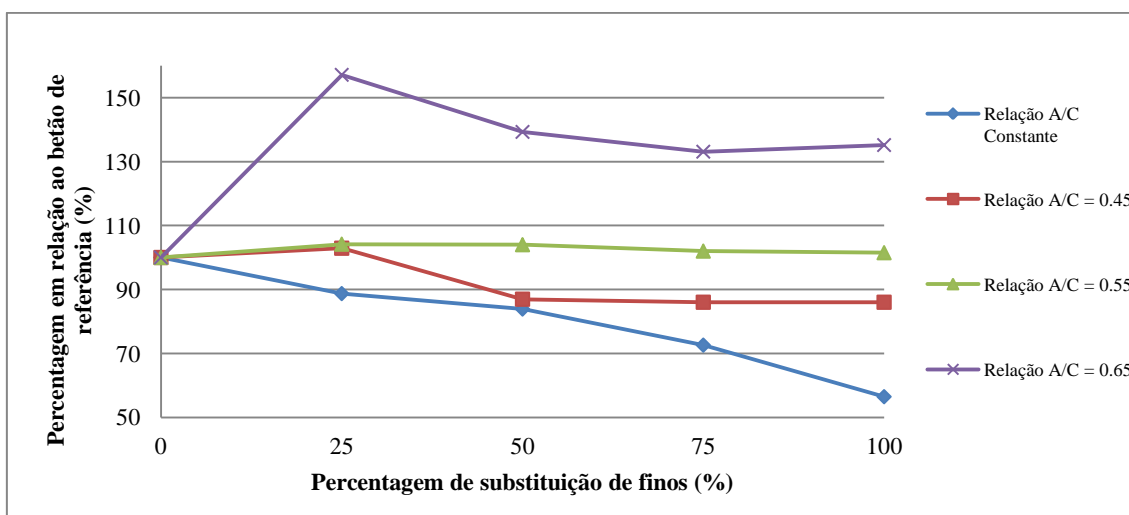


Figura 2.39 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão por Belachia e Hebhoub (2011)

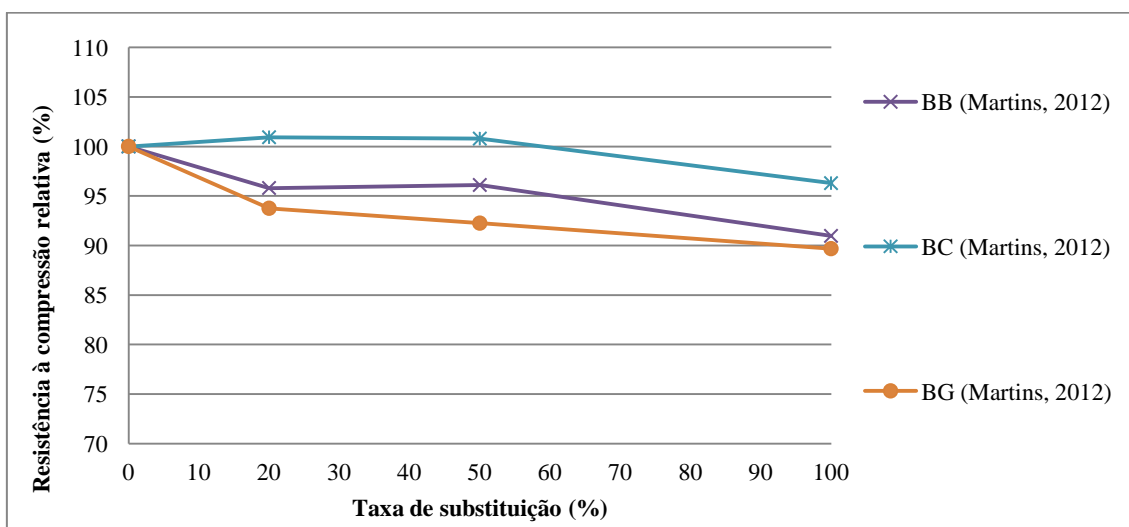


Figura 2.40 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão por Martins (2012)

### 2.6.4. Resistência à tração

A resistência à tração segue a mesma tendência apresentada na resistência à compressão. Esta afirmação torna-se evidente por análise das Figuras 2.41, 2.42 e 2.43. Acrescente-se apenas que existe forte dependência, por parte dos resultados experimentais, do ensaio utilizado (tração por compressão diametral ou tração por flexão).

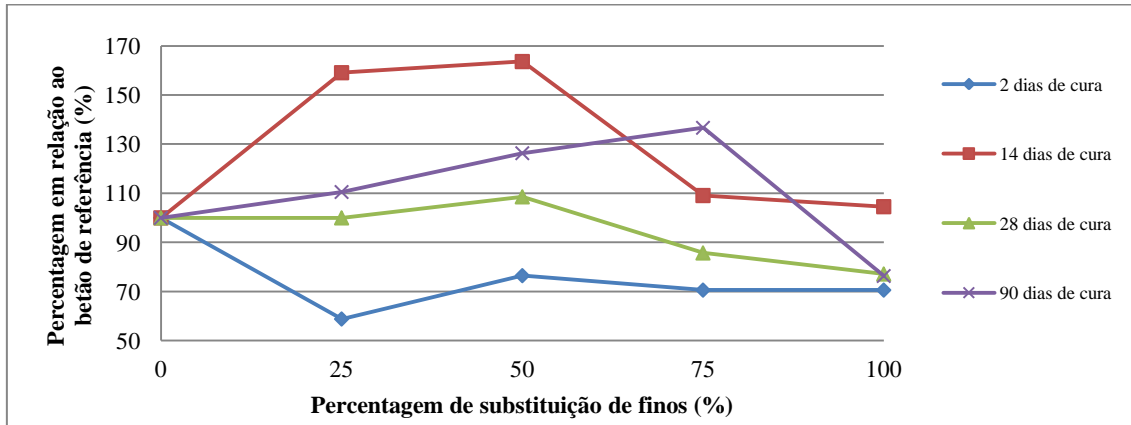


Figura 2.41 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral por Hebhoub et al. (2011)

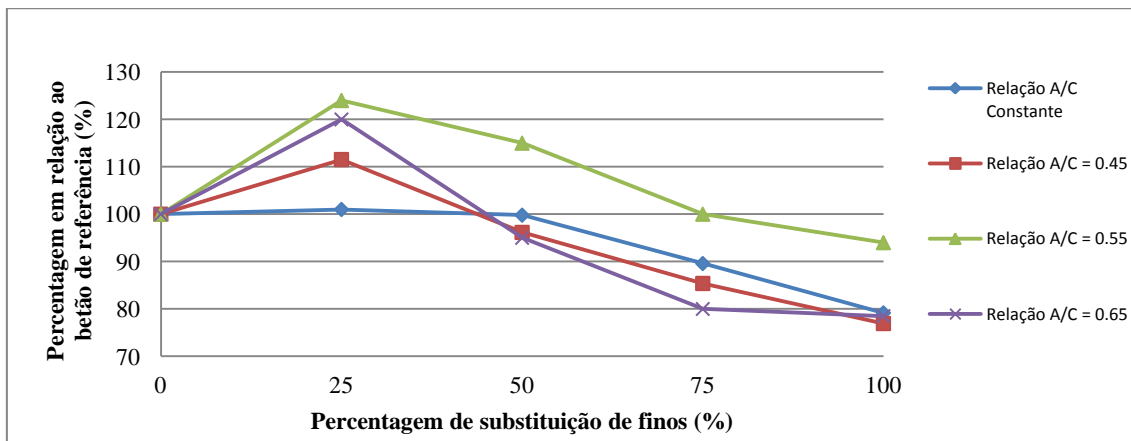


Figura 2.42 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral por Belachia e Hebhoub (2011)

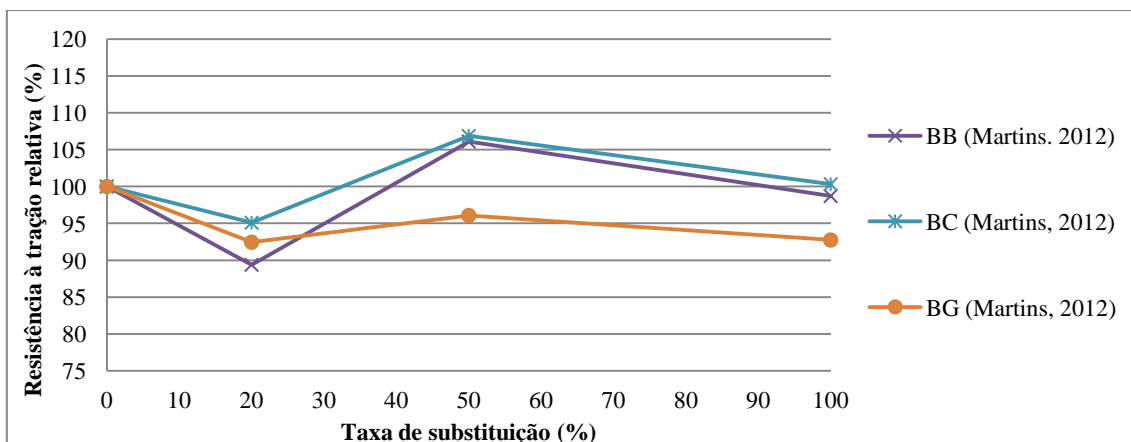


Figura 2.43 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral por Martins (2012)

#### **2.6.5. Módulo de elasticidade**

O número de estudos que apresentam resultados experimentais relativos ao módulo de elasticidade de betões com substituição dos agregados finos naturais por agregados finos provenientes de resíduos de mármore é muito reduzido. No entanto, as investigações analisadas apontam para um acréscimo do valor do módulo de Young em betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos de mármore. Apenas os resultados de Martins (2012) apresentam uma diminuição nesta propriedade.

#### **2.6.6. Resistência à abrasão**

Os valores da resistência à abrasão dos betões incorporando agregados finos provenientes de resíduos de mármore são, em geral, melhores do que os obtidos para betões convencionais à exceção de Martins (2012). Conclui-se também nesta pesquisa que a resistência à abrasão é fortemente influenciada pela resistência à compressão.





### 3. Campanha experimental

#### 3.1. Introdução

Esta campanha experimental tem como objetivo criar as condições necessárias para avaliar a influência da substituição de agregados finos naturais por agregados provenientes de resíduos resultantes da indústria de extração do mármore. Deste modo, pretende-se realizar o maior número possível de ensaios que contribuam para a posterior análise comparativa das diferentes substituições.

Este capítulo inicia com a descrição das várias fases da campanha experimental, fazendo-se referência aos ensaios efetuados em cada uma. Posteriormente, é explicado exhaustivamente o estudo da composição do betão bem como o modo como é feita a substituição dos agregados primários por agregados provenientes de resíduos resultantes da indústria de extração do mármore. Finalmente e em concordância com as normas experimentais, são explicados os procedimentos de forma sucinta, mas com rigor suficiente para se perceber o processo.

#### 3.2. Planeamento da campanha experimental

A campanha experimental foi dividida em 3 fases, que passam a ser descritas.

##### 3.2.1. Primeira fase experimental

A primeira fase desta campanha experimental destina-se à análise e caracterização dos agregados a utilizar na produção dos betões.

Os agregados grossos foram caracterizados com base nos seguintes ensaios:

- análise granulométrica - NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999);
- massa volúmica e absorção de água - NP EN 1097-6 (2003);
- baridade - NP EN 1097-3 (2003);
- desgaste de *Los Angeles* - LNEC E237;
- índice de forma - NP EN 933-4 (2002);
- teor de água total e superficial - NP 956 (1973).

Quanto aos agregados finos, a sua caracterização baseou-se nos seguintes ensaios:

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

##### 3.2.2. Segunda fase experimental

O objetivo da segunda fase experimental foi precaver a inexistência de problemas na fase posterior, fase que conduz aos resultados finais. Para o efeito, foram betonados e vibrados alguns betões de referência com o intuito de obter um ponto de comparação para os trabalhos subsequentes. Em cada um dos casos, foram usadas informações relativas à relação A/C para acertá-la de modo a obter a trabalhabilidade pretendida (abaixamento  $125 \pm 10$  mm). Também foram tidas em consideração outras questões relacionadas com os tempos de vibração para evitar fenómenos de segregação ou exsudação.

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para cada um dos betões de referência produzidos nesta fase, foram betonados 4 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para posterior comparação com os resultados obtidos na terceira fase.

Os ensaios efetuados ao betão, no estado fresco, foram os seguintes:

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

O ensaio efetuado ao betão, no estado endurecido, foi o seguinte:

- resistência à compressão aos 28 dias - NP EN 12390-3 (2011).

### 3.2.3. Terceira fase experimental

A terceira fase compreendeu todos os ensaios e betonagens necessários para se chegar aos objetivos propostos. Cada uma das famílias de betões foi caracterizada, do ponto de vista mecânico, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Para o betão no estado fresco, realizaram-se os seguintes ensaios:

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

Para o betão no estado endurecido, realizaram-se os seguintes ensaios:

- resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias - NP EN 12390-3 (2011);
- resistência à tração por compressão diametral - NP EN 12390-6 (2011);
- módulo de elasticidade aos 28 dias - LNEC E397;
- resistência à abrasão - DIN 52108 (2002).

Na Tabela 3.1, estão sintetizados os ensaios a realizar ao betão endurecido na segunda e terceira fases experimentais.

**Tabela 3.1- Idade, número e dimensões dos provetes a ensaiar na segunda e terceira fases experimentais**

Fase	Ensaio	Idade(dias)	Provetes	Forma	Dimensões (mm)
2ª fase	Resistência à compressão	28	4	Cubo	150
3ª fase	Resistência à compressão	7	3	Cubo	150
		28	5		
		56	3		
	Resistência à tração por compressão	28	3	Cilindro	150*300 ( $\Phi$ *h)
	Módulo de elasticidade	28	2	Cilindro	
Resistência à abrasão	91	6	Prisma	71*71*50 (a*b*h)	

### 3.3. Formulação dos betões

#### 3.3.1. Introdução

O betão é um material composto por uma mistura de cimento, agregados grossos (dimensões superiores a 4 mm) e finos, água e, eventualmente, adjuvantes e adições. A dosagem dos diversos constituintes referidos faz variar a resistência, a durabilidade e o nível de custos de um betão. Deste modo, face à infinidade de composições que procuram responder às diversas exigências de resistência, durabilidade e economia, optou-se por recorrer ao método de Faury para desenvolver os betões, com base no livro "Fabrico e Propriedades do Betão" de A. de Sousa Coutinho.

#### 3.3.2. Betão de referência

Com base na norma NP EN 206-1 (2007), procurou-se obter um betão com uma resistência média à compressão, avaliada em provetes cúbicos, de aproximadamente 44 MPa (C 30/37) e com uma trabalhabilidade definida num intervalo de abaixamento de  $125 \pm 10$  mm (classe de plasticidade S3). Saliente-se que foram preparados três betões de referência, um com areia natural siliciosa, outro com agregados finos de basalto e um terceiro com agregados finos de granito.

O betão de referência deveria apresentar as seguintes características:

- classe de resistência: C30/37;
- classe de consistência: S3 (100 a 150mm);
- classe de exposição: XC3 (moderadamente húmido);
- ligante: CEM I 42,5R da cimenteira de Outão, Setúbal, SECIL;
- tipo de agregados primários: areia de rio (siliciosa), basalto, granito;
- máxima dimensão do agregado: 22.4 mm;
- água de amassadura: potável, da rede de abastecimento pública de Lisboa;
- local de fabrico: laboratório;
- adjuvantes e adições: nenhuns.

##### 3.3.2.1. Máxima dimensão do inerte mais grosso ( $D_{máx}$ )

Com o aumento da máxima dimensão do agregado ( $D_{máx}$ ), aumenta a dificuldade de vibração do betão e o efeito de parede, resultantes do aumento do índice de vazios. Este fenómeno é prejudicial pois leva a um empobrecimento do teor de finos no seu interior.

De modo a estabelecer limites de ordem prática para o efeito de parede de modo a obter betão homogéneo, Faury apresentou a seguinte condição. Caso seja verificada, estão limitadas as consequências do efeito de parede:

$$\frac{R}{D_{máx}} > 0,75 \Leftrightarrow D_{máx} < \frac{4}{3}R \quad \text{Eq 3.1}$$

onde:

- R é o raio médio do molde, dado por:  $= \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante desse volume}}$ ;
- $D_{máx}$  é a máxima dimensão do agregado.

Consultando a Tabela 3.1, verifica-se que os menores moldes utilizados nas betonagens da presente dissertação correspondem a cubos de 100 mm de aresta. Refira-se que, embora os

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

provetes do ensaio da resistência à abrasão sejam de dimensões inferiores, estes foram obtidos pelo corte dos moldes cúbicos descritos. Deste modo:

$$R = \frac{L^3}{6L^2} = \frac{L}{6} = \frac{100}{6} = 16.6 \text{ mm} \quad \text{Eq 3.2}$$

$$\frac{4}{3}D = 22,4 \approx \frac{4}{3} \times 16.6 = 22.2 \text{ mm} \quad \text{Eq 3.3}$$

Para efeitos de comparação com outros estudos realizados nesta área e condicionalismos experimentais, considerou-se um  $D_{\text{máx}}$  de 22,4 mm.

### 3.3.2.2. Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição ( $f_{cm}$ )

Uma vez estabelecida a classe de resistência dos vários betões de referência através de valores característicos (C30/37), é possível estimar o valor médio da resistência à compressão dos provetes padrão.

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda \times S_n \quad \text{Eq 3.4}$$

onde:

- $f_{cm}$  é o valor médio da resistência à compressão (MPa);
- $f_{ck}$  é o valor característico da resistência à compressão (MPa);
- $\lambda$  é um parâmetro que depende do nível de confiança associado ao número de amostras (tende para 1,64);
- $S_n$  é o desvio padrão (MPa); depende da variabilidade prevista para o betão (função do nível de resistência e do nível de controlo de produção) (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2 - Desvio padrão em função das condições de produção do betão, para resistências médias à compressão superiores a 35 MPa (adaptado de Nepomuceno (1999)).**

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

Uma vez que a produção do betão é feita em laboratório, é adequado classificá-la como boa (Tabela 3.2). Deste modo, tem-se que o valor médio da resistência à compressão é dado por:

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

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

### 3.3.2.3. Relação A/C

A resistência à compressão do betão no estado endurecido e a sua trabalhabilidade no estado fresco são estreitamente dependentes da relação A/C. Se, por um lado, é essencial água para a reação de hidratação e para conferir uma trabalhabilidade compatível com a aplicação pretendida, por outro, água em demasia afeta negativamente a resistência do betão em consequência do aumento do volume de vazios.

Apesar de não haver nenhuma relação que se possa aplicar a todos os tipos de betão, é possível desenvolver funções de baixa dispersão, para casos particulares, que relacionem a resistência à compressão com a relação A/C. Estas expressões, uma vez que são desenvolvidas para determinados materiais, podem estender a sua aplicação, dentro de limites razoáveis. Deste modo, na Figura 3.1, são apresentadas as correlações obtidas por Nepomuceno (1999) e pelo American Concrete Institute (ACI) para a resistência média à compressão de betões aos 28 dias em função da relação A/C. Ambas as propostas são referentes a betões com cimento do tipo II 32,5, sem adjuvantes e adições.

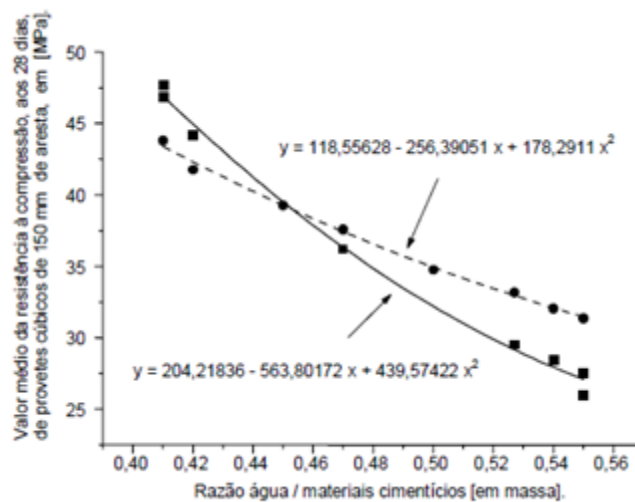


Figura 3.1 - Correlação entre  $f_{cm,28}$  e a relação A/C (adaptado de Nepomuceno (1999))

De modo a obter a resistência média à compressão, aos 28 dias, pretendida, compararam-se os valores da relação A/C propostos por ambas as correlações.

- correlação de Nepomuceno:

$$f_{cm,28} = 44,2 = 204,21836 - 563,80172 \frac{a}{c} + 439,57422 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \Rightarrow \frac{a}{c} \cong 0,43$$

- correlação do ACI:

$$f_{cm,28} = 44,2 = 118,55628 - 256,39051 \frac{a}{c} + 178,2911 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \Rightarrow \frac{a}{c} \cong 0,41$$

Uma vez obtidos estes resultados, optou-se por uma relação A/C de 0,43. Devido à influência da incorporação de agregados diferentes nas propriedades do betão no estado fresco, a relação A/C não será necessariamente igual para todos os betões em estudo nesta dissertação, de modo a manter os mesmos níveis de abaixamento. Neste sentido, para cada betão, será procurado o valor da relação A/C que cumpre os objetivos pretendidos para a trabalhabilidade.

### 3.3.2.4. Volume de vazios ( $V_v$ )

De acordo com o ACI, o volume de vazios de uma amassadura pode ser estimado, unicamente, em função da máxima dimensão dos agregados,  $D_{m\acute{a}x}$  (Tabela 3.3). Deste modo, para uma dimensão máxima do agregado de 22.4 mm, obtém-se, por interpolação linear, um volume de vazios de 17.4 litros por metro cúbico.

**Tabela 3.3 - Volume de vazios em função da máxima dimensão dos agregados (adaptado de Nepomuceno (1999))**

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	$V_v$ (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
9,52	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,1	3
152,4	2
Volume de vazios para $D_{m\acute{a}x}=22,4$	17,4

### 3.3.2.5. Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

O índice de vazios representa a fração volumétrica de material não sólido na amassadura logo após a betonagem, ou seja, contabiliza o volume de água e de vazios. O valor do índice de vazios pode ser obtido através da expressão de Faury, onde a primeira parcela é aplicável a betão simples e a segunda contabiliza o efeito de parede:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad \text{Eq 3.5}$$

onde:

- K e K' são parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de colocação utilizados (Tabela 3.4);
- R é o raio médio do molde que contém o betão, em mm;
- D é a máxima dimensão do agregado, em mm.

Dada a geometria dos agregados, classificaram-se os agregados grossos como britados e os agregados finos como rolados. Esta informação, combinada com a trabalhabilidade pretendida para o betão fresco (classe de abaixamento S3), permite calcular o índice de vazios.

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Tabela 3.4 - Valores dos parâmetros 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 inertes			
		Areia rolada		Areia britada e agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	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	≥0,40	0,004

Deste modo, concluíram-se os seguintes valores para as incógnitas:

- K = 0,37;
- K' = 0,003;
- D = 22,4 mm;
- R = 25 mm (referente aos cubos de 150 mm).

Substituindo na expressão de Faury:

$$I_v = \frac{0,37}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{\frac{25}{22,4} - 0,75} = 0,207 \cong 207 \text{ l/m}^3 \quad \text{Eq 3.6}$$

### 3.3.2.6. Dosagem de água (A)

A água de amassadura tem como objetivo, pressupondo que os agregados estão saturados e com superfície seca, permitir a reação de hidratação, conferir uma determinada trabalhabilidade ao betão fresco e, ainda, humedecer a superfície dos agregados de forma a permitir a sua ligação com a pasta de cimento.

O método de Faury considera que, para uma determinada composição, à fração volumétrica máxima de materiais sólidos corresponde um volume de vazios mínimo, materializado pela dosagem de água e pelo ar ocluído. Neste raciocínio, conhecendo o índice de vazios ( $I_v$ ) e o volume de vazios ( $V_v$ ), a quantidade de água de amassadura (A) para a produção de um metro cúbico de betão é dada pela expressão:

$$A = I_v - V_v \quad \text{Eq 3.7}$$

onde:

- A é a dosagem de água de amassadura ( $\text{l/m}^3$ );
- $I_v$  é o índice de vazios de Faury ( $\text{l/m}^3$ );
- $V_v$  é o volume de vazios ( $\text{l/m}^3$ ).

Sabemos que  $I_v = 207 \text{ l/m}^3$  e que  $V_v = 17,4 \text{ l/m}^3$ . Substituindo na expressão:

$$A = 207 - 17,4 = 189,6 \text{ l/m}^3$$

### 3.3.2.7. Dosagem de cimento (C)

Estimada a relação A/C (em massa) e determinada a quantidade de água de amassadura por metro cúbico de betão (A), a dosagem de cimento resulta da equação:

$$C = \frac{A}{A/C} = \frac{189,6}{0,43} \cong 441 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Eq 3.7}$$

Através da norma NP EN 206-1 (2005), pode verificar-se que a dosagem de cimento utilizada supera a dosagem mínima de cimento de 280 kg/m<sup>3</sup> de betão, imposta pela norma para betão armado com a classe de exposição ambiental adotada, XC3 (moderadamente húmido, sem gelo).

### 3.3.2.8. Volume das partículas de cimento (V<sub>c</sub>)

O volume das partículas de cimento, por metro cúbico de betão, é obtido através da seguinte expressão:

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} \quad \text{Eq 3.8}$$

onde:

- $\delta_c = 3100 \text{ kg/m}^3$  é a massa específica do cimento utilizado na campanha experimental.

O volume das partículas de cimento é então:

$$V_c = \frac{441}{3100} \cong 0,142 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cong 142 \text{ dm}^3/\text{m}^3 \text{ de betão}$$

### 3.3.2.9. Volume do total das partículas sólidas do betão (V<sub>s</sub>)

Conhecido o índice de vazios (I<sub>v</sub>), pôde-se determinar o volume das partículas sólidas (V<sub>s</sub>), volume ocupado pelos agregados e pelo cimento:

$$V_s = 1 - I_v = 1 - 0,207 = 0,793 \text{ m}^3/\text{m}^3 = 793 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

### 3.3.2.10. Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total (C%)

A percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume sólido total pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$C_{\%} = \frac{V_c}{V_s} = \frac{0,142}{0,793} = 17,9\% \quad \text{Eq 3.9}$$

### 3.3.2.11. Curva de referência de Faury e betões de referência

As curvas de referência permitem determinar a composição granulométrica ideal e determinar a melhor relação entre os diferentes componentes sólidos do betão de modo a torná-lo o mais compacto possível. Na presente dissertação, as composições granulométricas dos diferentes betões são aproximados de modo discreto à curva de referência de Faury. Para isso, os agregados sofrem uma decomposição em frações geometricamente definidas para um melhor acerto à curva. As percentagens determinadas pela curva de referência adotada são relativas apenas ao volume sólido ocupado pelas partículas e não ao volume total de betão.



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Uma vez determinada a percentagem de volume de cimento em relação ao volume sólido total, o cálculo das proporções das diferentes frações granulométricas é feito ignorando a presença do cimento. No entanto, numa primeira fase, são apresentados os resultados referentes ao volume sólido total.

A curva de referência de Faury com cimento é definida pelos 3 pontos seguintes:

- Ponto 1:
  - Abcissa: 0,0065 mm
  - Ordenada: 0%
- Ponto 2:
  - Abcissa:  $\frac{D_{máx}}{2} = \frac{22,4}{2} = 11,2 \text{ mm}$
  - Ordenada:  $P_{D/2} = A + 17^5 \sqrt{D_{máx}} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$ ; onde A e B são parâmetros que dependem da natureza dos agregados, meios de colocação e consistência do betão. Por análise da Tabela 3.5 e considerando as características estipuladas do betão em estudo, conclui-se que A = 30 e B = 2.

**Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury (adaptado de Nepomuceno (1999))**

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada			
		Agregado grosso rolado	Agregado britado	Areia britada e agregado grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1.5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1.5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluída	Sem nada	32	34	38	2

Substituindo na equação, obtém-se:

$$P_{D/2} = 30 + 17^5 \sqrt{22,4} + \frac{2}{\frac{25,4}{22,4} - 0,75} \cong 69.1 \% \quad \text{Eq 3.10}$$

- Ponto 3:
  - Abcissa: 22,4 mm
  - 100%

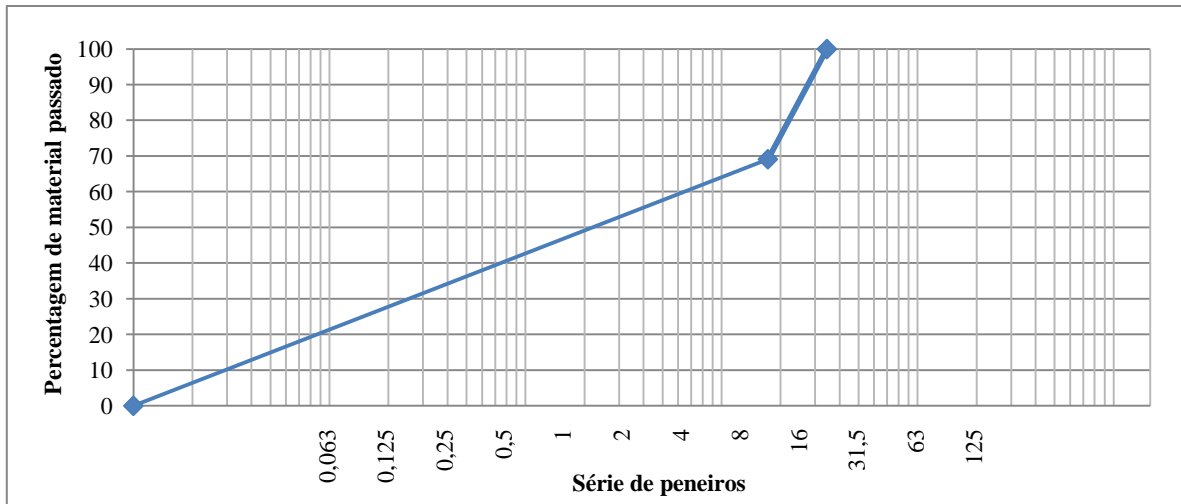


Figura 3.2 - Curva de referência de Faury com cimento

Da mesma forma, a curva de Faury sem cimento é definida pelos seguintes 3 pontos:

- Ponto 1:
  - Abcissa: 0.0065 mm
  - Ordenada:  $100 \frac{0 - C\%}{100 - C\%} = -20,8 \%$
- Ponto 2:
  - Abcissa: 11.7 mm
  - Ordenada:  $100 \frac{69 - C\%}{100 - C\%} = 62,6 \%$
- Ponto 3:
  - Abcissa: 25.4 mm
  - Ordenada: 100%

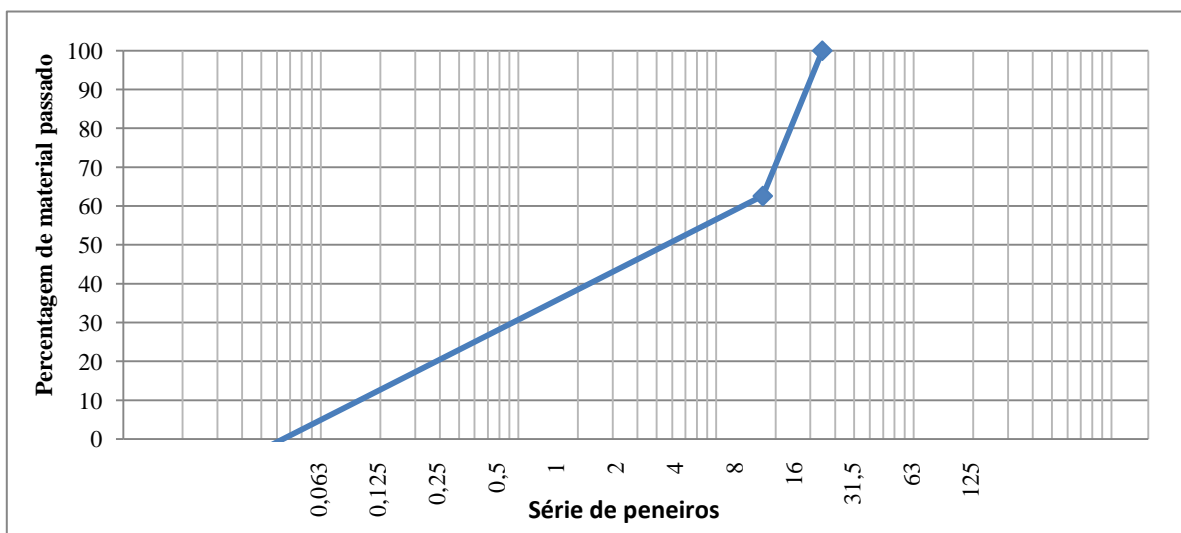


Figura 3.3 - Curva de referência de Faury sem cimento

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

A partir destes três pontos e com as curvas granulométricas, constrói-se um gráfico que possibilita a obtenção gráfica da percentagem de cada um dos tipos de agregados a incorporar (Figura 3.4). Esta construção gráfica faz-se traçando um linha vertical que cruze duas granulometrias adjacentes de tal modo que a área intersectada seja igual para as duas curvas. Seguidamente, traça-se uma linha horizontal que passe no ponto de cruzamento da curva de referência com a linha vertical anterior. Após a realização deste processo para todos os pares de curvas granulométricas adjacentes, a percentagem de cada tipo de agregado a incorporar (relativamente ao volume total de agregados) é dada pela distância relativa entre as linhas horizontais desenhadas.

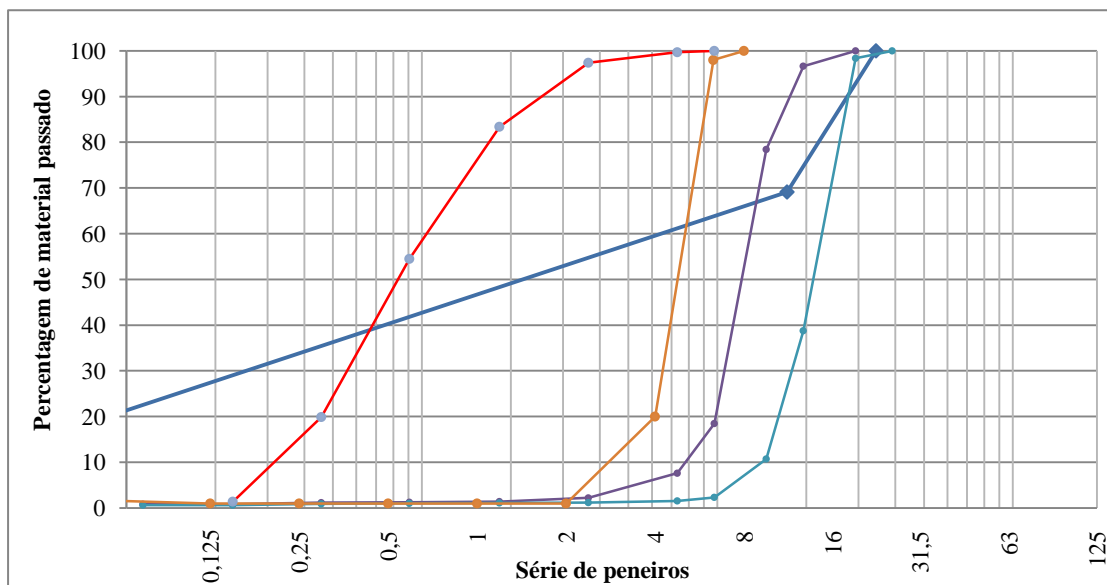


Figura 3.4 - Curva de referência de Faury e curvas granulométricas dos agregados

Assim, as percentagens de cada tipo de agregado por cada tipo de agregado fino são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Distribuição dos agregados por cada tipo de agregado fino, em percentagem

%	Areia de rio	Areia de basalto	Areia de granito	Areia de mármore
Brita 2	32,807	32,807	32,807	32,807
Brita 1	5,672	5,672	5,672	5,672
Bago de arroz	10,271	5,486	3,786	4,017
Finos + cimento	51,250	56,035	57,735	57,176

Esta estimativa da percentagem de cada tipo de agregado, feita graficamente, requer um acerto a *posteriori*, uma vez que o cálculo apenas tem em atenção o andamento das curvas granulométricas nas suas extremidades, não cuidando a evolução no interior das mesmas. Deste modo, as quantidades de cada agregado deverão sofrer um ligeiro acerto para tentar igualar o módulo de finura da curva de referência com o da mistura proposta.

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

Nepomuceno (1999) apresenta o valor do módulo de finura da curva de referência, conhecido o valor de  $a$  em função dos parâmetros  $A$ ,  $B$ ,  $R$  e  $D_{m\acute{a}x}$ .

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} = 32 + \frac{2}{\frac{25}{22,4} - 0,75} = 37,463$$

Os valores do módulo de finura da curva e referência em função de  $a$  são apresentados na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 - Valores do módulo de finura em função dos parâmetros  $D_{m\acute{a}x}$  e  $a$  (Nepomuceno, 1999)**

Máxima dimensão do agregado ( $D_{m\acute{a}x}$ )	a										
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
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

Desta forma, através de interpolação, obteve-se um módulo de finura da curva de referência de Faury igual a 4,33.

Nas Tabelas 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, são apresentados os cálculos efetuados para o acerto do módulo de finura. Saliente-se que o módulo de finura é para o conjunto de partículas sólidas, incluindo o cimento, cujo módulo de finura é nulo. Como tal, o peso a atribuir a cada tipo de agregado na ponderação do módulo de finura é com base no volume total de partículas sólidas e não com base no volume de agregados

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Tabela 3.8 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de rio

Acerto do módulo de finura (areia de rio)					
Agregado	Inicial			Acerto	
	Mfi	Ii%	MFixIi/100	I'i%	MFixI'i/100
Brita 1	6,1	5,672	0,346	12	0,732
Brita 2	6,8	32,807	2,231	35	2,380
Bago de arroz	1,8	10,271	0,183	10	0,180
Areia do rio + cimento	2,4	51,250	1,230	43	1,032
		$\Sigma =$	3,992	$\Sigma =$	4,324

Tabela 3.9 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de basalto

Acerto do módulo de finura (basalto)					
Agregado	Inicial			Acerto	
	Mfi	Ii%	MFixIi/100	I'i%	MFixI'i/100
Brita 1	6,1	5,672	0,346	7	0,427
Brita 2	6,8	32,807	2,231	27	1,836
Bago de arroz	1,8	5,486	0,099	11	0,198
Areia de basalto + cimento	3,4	56,035	1,905	55	1,870
		$\Sigma =$	4,581	$\Sigma =$	4,331

Tabela 3.10 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de mármore

Acerto do módulo de finura (mármore)					
Agregado	Inicial			Acerto	
	Mfi	Ii%	MFixIi/100	I'i%	MFixI'i/100
Brita 1	6,1	5,672	0,346	9	0,549
Brita 2	6,8	32,807	2,231	33	2,244
Bago de arroz	1,8	4,017	0,072	4	0,072
Areia de mármore + cimento	2,7	57,176	1,544	54	1,458
		$\Sigma =$	4,193	$\Sigma =$	4,323

Tabela 3.11 - Correção das quantidades de agregado a incorporar no betão de referência com areia de granito

Acerto do módulo de finura (granito)					
Agregado	Inicial			Acerto	
	Mfi	Ii%	MFixIi/100	I'i%	MFixI'i/100
Brita 1	6,1	5,672	0,346	4	0,244
Brita 2	6,8	32,807	2,231	28	1,904
Bago de arroz	1,8	3,786	0,068	18	0,324
Areia de granito + cimento	3,7	57,735	2,136	50	1,850
		$\Sigma =$	4,781	$\Sigma =$	4,322

Deste modo, a composição dos betões de referência em percentagem relativa à massa total é apresentada na Tabela 3.12.

**Tabela 3.12 - Composição dos betões de referência**

Granulometria		BRB	BRC	BRG
Agregados finos	<0,063	3,68	2,40	3,02
	0,063-0,125	4,62	3,01	3,79
	0,125-0,25	6,43	4,19	5,27
	0,25-0,5	3,18	2,07	2,61
	0,5-1	4,37	2,85	3,58
	1-2	5,18	3,37	4,25
	2-4	4,80	3,13	3,94
	>4	3,12	2,03	2,56
Agregados grossos	Bago arroz	9,55	8,90	16,08
	Brita 1	6,07	10,68	3,57
	Brita 2	23,43	31,15	25,01
Cimento		17,88	18,34	18,41
Água		7,69	7,89	7,92

As composições dos restantes betões são apresentadas no ANEXO A.

### 3.3.3. Betões com agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore

Na presente dissertação, como referido, vai-se proceder à sucessiva substituição dos agregados finos primários (areia de rio, basalto e granito) por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. Deste modo, é necessário esclarecer como se concretizam as substituições pretendidas. O conceito subjacente é minimizar a descontinuidade da curva granulométrica dos agregados, afetando do mesmo modo os intervalos definidos pelos peneiros utilizados. Quer isto dizer que, por exemplo, para substituir uma determinada percentagem de finos, todas as frações granulométricas de dimensão inferior a 4 mm foram afetadas na proporção em que cada uma contribui para a curva de referência. Por exemplo, para determinado betão, se aquela curva exigir da fração 0,25-0,5 o dobro de material que exige da fração 0,125-0,25, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore na primeira também será o dobro (em volume).

De forma a manter sempre o mesmo nível de trabalhabilidade, que previsivelmente será afetada pelo aumento da incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria mármore, recorre-se à relação A/C, ajustada na segunda fase da campanha experimental.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

De forma esquemática (Figura 3.5), as várias substituições definem-se por 4 diferentes níveis de substituição:

- 0% de substituição - BRB, BRC e BRG;
- 20% de substituição - BB/M20, BC/M20 e BG/M20;
- 50% de substituição - BB/M50, BC/M50 e BG/M50;
- 100% de substituição - BRM.

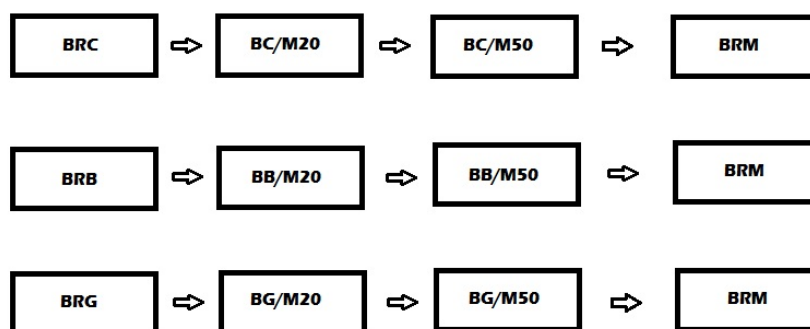


Figura 3.5 - Esquema dos vários níveis de substituição

### 3.4. Ensaios de caracterização dos agregados

Uma vez que as propriedades mecânicas dos betões têm grande dependência das características físicas dos agregados, é de grande importância que estas sejam quantificadas. Deste modo, serão apresentadas de seguida as metodologias regulamentares utilizadas para descrever as várias características dos agregados.

#### 3.4.1. Análise granulométrica

##### 3.4.1.1. Objetivo do ensaio

A análise granulométrica tem por objetivo a descrição estatística da dimensão das partículas que constituem os agregados (areia fina, areia grossa, bago de arroz, brita 1, brita 2). Uma vez que posteriormente todos os materiais serão separados nas diferentes frações granulométricas para ajustamento à curva de referência, a importância deste ensaio resume-se ao conhecimento da curva granulométrica exata de cada agregado.

##### 3.4.1.2. Normas do ensaio

Este ensaio segue a metodologia e princípios presentes na norma europeia / portuguesa NP EN 933-1 (2000) "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração". A esta norma encontra-se associada a NP EN 933-2 (1999) que especifica as dimensões nominais das aberturas, formato da tela de arame e chapas perfuradas dos peneiros de ensaio.

### 3.4.1.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados neste ensaio são os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (Figura 3.9);
- máquina de peneirar (Figura 3.8);
- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a determinar (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Balança



Figura 3.7 - Estufa ventilada



Figura 3.8 - Agitador de peneiros



Figura 3.9 - Série de peneiros

### 3.4.1.4. Amostras

A norma NP EN 933-1 determina massas mínimas para as amostras em função da menor abertura do peneiro através do qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado (máxima dimensão do agregado  $D_{máx}$ ). Após a secagem, o provete deverá possuir massa superior à mínima apresentada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Massa mínima dos provetes de ensaio em função de  $D_{máx}$  (NP EN 933-1)

Máxima dimensão D (mm)	Massa do provete (mínimo) kg
63	40
32	10
16	2.6
8	0.6
$\leq 4$	0.2



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Caso o valor de  $D_{m\acute{a}x}$  não se encontre na Tabela 3.13, a massa mínima do provete de ensaio pode ser interpolada através dos valores de massa presentes no referido quadro.

As amostras são secas em estufa ventilada a  $(110 \pm 5)$  °C até que atinjam massa constante. Por massa constante entende-se a massa cuja variação, medida em pesagens sucessivas intervaladas de, pelo menos, 1 hora, seja inferior a 0,1%. A massa do provete de ensaio é registada como  $M_1$ .

### 3.4.1.5. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio é o seguinte:

- preparar o provete, como descrito anteriormente;
- lavar o provete sobre o peneiro 0.063 mm e recorrer, se necessário, a um peneiro de proteção;
- secar em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante e registar esse valor,  $M_2$ ;
- colocar o provete na coluna de peneiros, devidamente dispostos, com fundo e tampa, e proceder à peneiração;
- retirar os peneiros e certificar-se de que não existe perda de material em nenhum deles;
- o processo de peneiração considera-se concluído quando a massa do material retido não sofre alterações superiores a 1% após 1 min de peneiração;
- pesar a massa do material retido no peneiro de maior dimensão nominal e registar a sua massa,  $R_1$ ; repetir para os restantes peneiros,  $R_2, R_3, \dots, R_n$  e pesar o material retido no fundo, P.

### 3.4.1.6. Resultados

A percentagem de material retida em cada peneiro é dada por:

$$R_{i\%} = 100 \times \frac{R_i}{M_1} \quad \text{Eq 3.11}$$

Onde:

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

Após o calculo individual de cada peneiro, é possível traçar a curva granulométrica do material ensaiado.

A percentagem de finos que passa no peneiro 0.063 mm (%) é traduzida pela seguinte expressão:

$$f = 100 \times \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \quad \text{Eq 3.12}$$

Onde:

- f é a percentagem de finos que passa pelo peneiro 0.063 mm (%);
- $M_1$  é a massa total da amostra (g);
- $M_2$  é a massa da amostra, após lavagem e secagem (g);
- P é a massa de material retido no fundo da coluna de peneiros (g).

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

Este ensaio é considerado inválido quando a soma das massas  $R_i$  e  $P$  difira mais do que 1% da massa  $M_2$ .

Estes resultados permitem ainda calcular o módulo de finura do material entendido como a soma das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro da série normal.

### 3.4.2. Massa volúmica e absorção de água

#### 3.4.2.1. Objetivo do ensaio

A medição dos materiais aquando do ajustamento à curva de referência é feita por pesagem, exigindo-se deste modo, o conhecimento da massa volúmica dos mesmos. Uma vez que a massa volúmica dos agregados contribui decisivamente para a massa volúmica do betão, deve-se caracterizá-los corretamente para prever o compósito.

Os agregados devem ser aplicados, na mistura, sob a forma saturada e com superfície seca, evitando-se, deste modo, correções na relação A/C. No entanto, devido à incerteza dos agregados se encontrarem nestas condições, é usual quantificar o seu estado de saturação, determinar a sua absorção de água e fazer a correção na relação A/C. A importância desta correção prende-se com a absorção de água dos agregados que motiva uma redução da quantidade de água disponível para a reação de hidratação, que tem como função conferir uma dada trabalhabilidade e humedecer a superfície dos agregados.

#### 3.4.2.2. Normas do ensaio

A metodologia de ensaio seguida é descrita na norma NP EN 1097-6 (2003) "*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*".

#### 3.4.2.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados no ensaio são os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (Figura 3.9);
- máquina de peneirar (Figura 3.8);
- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a determinar (Figura 3.6);
- termómetro graduado (Figura 3.10);
- picnómetro, conforme especificado na norma NP EN 1097-6 (Figura 3.11).



Figura 3.10 - Termómetro



Figura 3.11 - Picnómetro

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

### 3.4.2.4. Amostras

Agregados grossos (dimensão entre 4 e 31,5 mm)

- para obter a amostra, procede-se à lavagem desta sobre os peneiros de dimensão nominal 31,5 e 4 mm de modo a remover as partículas mais finas; qualquer material retido no peneiro de dimensão nominal 31,5 mm é rejeitado.
- a massa do provete deve respeitar os valores apresentados na Tabela 3.14; caso o valor de  $D_{máx}$  não corresponda a nenhum dos indicados na Tabela 3.14, deve-se interpolar a partir dos valores nela especificados; regista-se a massa do provete de ensaio como  $M_0$ .

Tabela 3.14 - Massa dos provetes de ensaio em função de  $D_{máx}$  (NP EN 1097-6)

Máxima dimensão D (mm)	Massa do provete (mínimo) kg
31.5	5
16	2
8	1

Agregados finos (dimensão entre 0.063 e 4 mm)

- para obter a amostra, procede-se à lavagem desta sobre os peneiros de dimensão nominal 4 e 0.063 mm de modo a remover as partículas mais finas; qualquer material retido no peneiro de dimensão nominal 4mm é rejeitado;
- a massa do provete deve ser igual ou superior a 1 kg; regista-se a massa do provete de ensaio como  $M_0$ .

### 3.4.2.5. Procedimentos do ensaio

Agregados grossos (dimensão entre 31,5 e 4 mm):

- preparar o provete de ensaio, como descrito;
- imergir o provete no picnómetro com água a  $22 \pm 3$  °C e eliminar o ar ocluído;
- manter o provete de ensaio à temperatura de  $22 \pm 3$  °C durante  $24 \pm 0,5$  h;
- após o período de imersão, remover o ar ocluído;
- fazer transbordar o picnómetro por adição de água e colocar a tampa sem deixar ar no interior;
- secar o picnómetro por fora e pesar a massa do conjunto como  $M_2$  (picnómetro, provete de ensaio e água);
- registar a temperatura da água;
- remover o agregado da água e deixar escorrer durante alguns minutos;
- encher com água o picnómetro e colocar a tampa como anteriormente;
- secar o picnómetro por fora e pesar a massa do conjunto  $M_3$  (picnómetro e água);
- registar a temperatura da água (a diferença dos valores da temperatura da água dentro do picnómetro durante as pesagens de  $M_2$  e  $M_3$  não deve exceder 2 °C);
- transferir o provete escorrido para cima de panos secos e proceder à secagem da sua superfície;
- espalhar o agregado numa camada monogranular e deixá-lo ao ar, resguardado da luz solar direta ou de qualquer outra fonte de calor, até desaparecerem as partículas visíveis de água mas o agregado ainda apresentar aspeto húmido;
- pesar o provete saturado com superfície seca e registar o valor como  $M_1$ ;

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

- secar o agregado numa estufa a  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante  $M_4$ .

Agregados finos (dimensão entre 4 e 0,063 mm):

- preparar o provete de ensaio, como descrito;
- imergir o provete no picnómetro com água a  $22 \pm 3$  °C e eliminar o ar ocluído;
- manter o provete de ensaio à temperatura de  $22 \pm 3$  °C durante  $24 \pm 0,5$  h;
- após o período de imersão, remover o ar ocluído;
- fazer transbordar o picnómetro por adição de água e colocar a tampa sem deixar ar no interior;
- secar o picnómetro por fora e pesar a massa do conjunto como  $M_2$  (picnómetro, provete de ensaio e água);
- registar a temperatura da água;
- decantar a maior parte da água que cobre o provete e esvaziar o picnómetro sobre um tabuleiro;
- encher com água o picnómetro e colocar a tampa como anteriormente;
- secar o picnómetro por fora e pesar a massa do conjunto  $M_3$  (picnómetro e água);
- registar a temperatura da água (a diferença dos valores da temperatura da água dentro do picnómetro durante as pesagens de  $M_2$  e  $M_3$  não deve exceder 2 °C);
- espalhar o provete molhado numa camada uniforme sobre a base de um tabuleiro e expor o agregado a uma leve corrente de ar morno de modo a evaporar a humidade superficial;
- remexer o provete em intervalos frequentes de modo a assegurar uma secagem homogénea até que não seja visível humidade superficial e as partículas de agregado não adiram umas às outras<sup>1</sup>;
- deixar arrefecer o provete até à temperatura ambiente, remexendo-o durante o processo;
- pesar o provete saturado com superfície seca e registar o valor como  $M_1$ ;
- secar o agregado numa estufa a  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante  $M_4$ .



Figura 3.12 - Molde troncocónico, funil e pilão



Figura 3.13 - Exemplo do processo de verificação da superfície seca

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

<sup>1</sup>Para avaliar se o estado de superfície seca foi atingido, deve-se colocar um molde troncocônico de metal com a maior abertura apoiada sobre o tabuleiro, encher o molde com parte do provete em processo de secagem e utilizar um pilão para apiloar a superfície com 25 pancadas (Figura 3.12). Não se deve encher o restante após o apiloamento e levantar-se cuidadosamente o molde. Se o agregado mantiver a forma, deve-se prosseguir o processo de secagem e repetir o processo descrito até que o cone de agregado se deforme após a desmoldagem (Figura 3.13).

### 3.4.2.6. Resultados

As massas volúmicas das partículas ( $\rho_a$ ,  $\rho_{rd}$  e  $\rho_{ssd}$ ), em quilogramas por decímetro cúbico, são dadas por:

$$\rho_a = \frac{M_4}{\frac{[M_4 - (M_2 - M_3)]}{\rho_w}} \quad \text{Eq 3.13}$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{[M_1 - (M_2 - M_3)]}{\rho_w}} \quad \text{Eq 3.14}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{[M_1 - (M_2 - M_3)]}{\rho_w}} \quad \text{Eq 3.15}$$

A absorção de água (em percentagem da massa seca) após a imersão durante 24 h é calculada de acordo com a expressão:

$$WA_{24} = 100 \times \frac{M_1 - M_4}{M_4} \quad \text{Eq 3.16}$$

Onde:

- $\rho_a$  é a massa volúmica do material impermeável das partículas ( $\text{kg/dm}^3$ );
- $\rho_{rd}$  é a massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg/dm}^3$ );
- $\rho_{ssd}$  é a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\text{kg/dm}^3$ );
- $\rho_w$  é a massa volúmica da água à temperatura da água registada na pesagem de  $M_2$  ( $\text{kg/dm}^3$ );
- $M_1$  é a massa do agregado saturado com superfície seca (g);
- $M_2$  é a massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e água (g);
- $M_3$  é a massa do picnómetro contendo apenas água (g);
- $M_4$  é a massa do provete seco em estufa (g).

### 3.4.3. Massa volúmica aparente

#### 3.4.3.1. Objetivo do ensaio

A massa volúmica aparente, também designada de baridade, é uma propriedade importante dos agregados, especialmente quando as medições para a composição do betão são feitas em volume. Uma vez que, no presente caso, as medições são feitas em peso, esta propriedade perde utilidade. No entanto, não deixa de ser uma das principais características dos agregados e, como tal, deve ser determinada.

### 3.4.3.2. Normas do ensaio

A metodologia de ensaio seguida é apresentada na NP EN 1097-3 (2000) "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios".

### 3.4.3.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a determinar (Figura 3.6);
- contentor cilíndrico estanque em aço inoxidável (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Contentor cilíndrico

### 3.4.3.4. Amostras

Para o presente ensaio, são necessários 3 provetes do agregado a ensaiar. As amostras são secas em estufa ventilada a  $110 \pm 5$  °C até atingirem massa constante, ou seja, massa cuja variação medida em pesagens sucessivas e intervaladas de pelo menos 1 hora seja inferior a 0.1%.

O volume mínimo da amostra em função da máxima dimensão do agregado,  $D_{m\acute{a}x}$  é apresentado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Volume do recipiente de ensaio (massa volúmica aparente)

Dimensão máxima - $D_{m\acute{a}x}$ [mm]	Volume mínimo do recipiente [l]
63	20
32	10
16	5
8	3
$\leq 4$	1

### 3.4.3.5. Procedimentos do ensaio

Os procedimentos de ensaio são os seguintes:

- preparar os provetes de ensaio conforme atrás referido;
- pesar o recipiente vazio e limpo e registar o seu valor  $M_1$ ;
- procurando evitar segregação, encher o recipiente sem compactação;

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

- remover o material excedente e proceder ao nivelamento da superfície com o cuidado de não a compactar;
- pesar o recipiente cheio e registar o valor como  $M_2$ ;
- repetir o procedimento para os restantes 2 provetes de ensaio.

### 3.4.3.6. Resultados

A massa volúmica aparente de cada provete é dada por:

$$\rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad \text{Eq 3.17}$$

sendo deste modo a massa volúmica do agregado dada pela média dos três provetes:

$$\rho_{MWA} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} \quad \text{Eq 3.18}$$

Onde:

- $\rho_{MWA}$  é a massa volúmica aparente do agregado ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );
- $\rho_i$  é a massa volúmica aparente do provete de ensaio  $i$  ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );
- $M_1$  é a massa do recipiente de ensaio (kg);
- $M_2$  é a massa do recipiente e provete (kg);
- $V_r$  é a capacidade do recipiente (l).

### 3.4.4. Desgaste de Los Angeles

#### 3.4.4.1. Objetivo do ensaio

Este ensaio tem como objetivo determinar a perda de massa dos agregados por desgaste. Deste modo, é possível antever a susceptibilidade do agregado à abrasão quando incorporado no betão e desenvolver correlações entre esta propriedade e as tensões de rotura do betão.

#### 3.4.4.2. Normas de ensaio

A metodologia de ensaio seguida está especificada na documentação normativa do LNEC E-237 (1970) "Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles".

#### 3.4.4.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- peneiros da série ASTM (Figura 3.17);
- máquina de peneirar (Figura 3.8);
- balança de precisão com limites de erro de  $\pm 1$  g (Figura 3.6);
- carga abrasiva constituída por esferas de aço, cada uma com massa entre 390 e 445 g (6 a 12 esferas consoante a composição granulométrica do provete de ensaio) (Figura 3.16);



## CAMPANHA EXPERIMENTAL

- máquina de *Los Angeles* (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Máquina de *Los Angeles*



Figura 3.16 - Esferas de aço



Figura 3.17 - Peneiros da série ASTM

### 3.4.4.4. Amostras

A amostra a ensaiar deve ser lavada e seca em estufa a uma temperatura de  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante. Por massa constante entende-se a massa cuja variação, medida em pesagens sucessivas intervaladas de pelo menos 1 hora, seja inferior a 0,1%.

Uma vez atingida a massa constante, deve-se separar a amostra por peneiração nas frações granulométricas especificadas na norma LNEC 237 e formar o provete de ensaio pelo ajuste daquelas frações nas quantidades fixadas pela respetiva norma. O ajuste deve ser feito à composição granulométrica que mais se aproximar à do agregado em questão. Regista-se a massa do provete  $M_1$ .

### 3.4.4.5. Procedimentos do ensaio

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- preparar o provete de ensaio como descrito anteriormente;
- constituir a carga abrasiva correspondente ao provete a ensaiar de acordo com a especificação LNEC E-237;
- introduzir o provete de ensaio e a carga abrasiva na máquina de *Los Angeles*, tendo em atenção distribuir a carga abrasiva pelo comprimento do cilindro da máquina;
- colocar a tampa na abertura e iniciar o funcionamento da máquina; o cilindro deve efetuar, à velocidade de 30 a 33 r.p.m, um número determinado de rotações em função da composição granulométrica do provete em análise;



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

- retirar o material do interior da câmara e peneirar o provete no peneiro de malha 1.68 mm, sobre o qual se deverá utilizar um peneiro de maior abertura para evitar a danificação do primeiro;
- lavar o material sobre o peneiro de malha 1.68 mm;
- secar em estufa a uma temperatura de  $110 \pm 5$  °C até se atingir massa contante;
- pesar o material e registar a sua massa como  $M_2$ .

### 3.4.4.6. Resultados

A perda de desgaste na máquina de *Los Angeles*, em percentagem, é dada por:

$$\frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Eq 3.19}$$

Onde:

- $M_1$  é a massa do provete de ensaio (g);
- $M_2$  é a massa do material retido no peneiro de malha 1.68 mm.

### 3.4.5. Índice de forma

#### 3.4.5.1. Objetivo do ensaio

O índice de forma tem como objetivo caracterizar a geometria das partículas que compõem as frações granulométricas compreendidas entre 4 e 63 mm e assim prever os seus efeitos no betão. No caso de agregados rolados, estes efeitos são a maior compacidade e menor quantidade de água para atingir os mesmos níveis de trabalhabilidade. No caso de agregados britados, são o possível aumento da resistência mecânica.

#### 3.4.5.2. Normas do ensaio

A metodologia seguida neste ensaio está especificada na norma NP EN 933-4 (2002) "*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma*".

#### 3.4.5.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (Figura 3.9);
- máquina de peneirar (Figura 3.8);
- balança de precisão  $\pm 0,1\%$  da massa a determinar (Figura 3.6);
- paquímetro (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Paquímetro

## CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 3.4.5.4. Amostras

A amostra a ensaiar deve ser lavada e seca em estufa a uma temperatura de  $110 \pm 5$  °C até atingir massa constante. Por massa constante, entende-se a massa cuja variação, medida em pesagens sucessivas intervaladas de pelo menos 1 hora, seja inferior a 0.1%.

Utilizar peneiros de ensaio apropriados de modo a assegurar a completa separação de partículas superiores a 4 mm. Deve-se rejeitar todo o material passado no referido peneiro.

A massa mínima da amostra em função da máxima dimensão do agregado,  $D_{\text{máx}}$  é apresentada na Tabela 3.16.

**Tabela 3.16 - Massa mínima dos provetes de ensaio em função de  $D_{\text{máx}}$  (NP EN 933-4)**

Máxima dimensão D (mm)	Massa do provete (mínimo) kg
63	45
32	6
16	1
8	0.1

A massa do provete deve respeitar os valores apresentados na Tabela 3.16. Caso o valor de  $D_{\text{máx}}$  não corresponda a nenhum dos indicados na Tabela 3.16, deve-se interpolar a partir dos valores nela especificados. Deve-se registar a massa do provete de ensaio como  $M_0$ .

### 3.4.5.5. Procedimentos do ensaio

Os procedimentos do ensaio são os seguintes:

- preparar o provete de ensaio de acordo com o descrito anteriormente;
- registar a massa de cada fração granulométrica retida no correspondente peneiro como  $M_{1i}$  e a sua percentagem  $V_{1i}$  relativamente à massa do provete de ensaio  $M_0$ ;
- todas as frações granulométricas que representem menos de 10% de  $M_0$  são desprezadas;
- com o auxílio de um paquímetro, medir a maior (L) e menor (E) dimensão de cada partícula e separar aquelas cuja relação dimensional verifique a condição  $L/E \geq 3$  (classificadas como não-cúbicas);
- registar a massa das partículas não-cúbicas de cada fração granulométrica com  $M_{2i}$ .

### 3.4.5.6. Resultados

O índice de forma SI é calculado através da seguinte expressão:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad \text{Eq 3.20}$$

Onde:

- $\sum M_{2i}$  é a soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas (g);
- $\sum M_{1i}$  é a soma das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas (g).

### 3.5. Ensaio ao betão fresco

Uma vez que é no estado fresco que é definida uma grande parte das características importantes do betão, a campanha experimental contempla a análise da trabalhabilidade e da massa volúmica.

Deste modo, com o intuito de assegurar as mesmas aplicações para todos os betões, o ajuste da relação A/C é feito de acordo com as tendências registadas na bibliografia consultada e com a confirmação de uma fase precedente à definitiva.

#### 3.5.1. Abaixamento (cone de Abrams)

##### 3.5.1.1. Objetivo do ensaio

A quantificação da trabalhabilidade é essencial para identificar betões com aplicações idênticas. Neste sentido, para assegurar que as amassaduras respeitam os limites previamente impostos de abaixamento ( $125 \pm 10$  mm), opta-se por intervir na relação A/C uma vez que é presumível que a crescente incorporação de agregados provenientes dos resíduos da indústria do mármore afete esta propriedade.

##### 3.5.1.2. Normas do ensaio

A metodologia seguida neste ensaio está definida pela norma NP EN 12350-2 (2009) "Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento".

##### 3.5.1.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- molde de metal de forma troncocónica de uma altura de  $300 \pm 2$  mm, um diâmetro máximo de  $200 \pm 2$  mm e um mínimo de  $100 \pm 2$  mm; o material que o constitui deve ser resistente à pasta de cimento e o seu interior deve ser perfeitamente liso, sem rebites ou mossas; deverá dispor de duas pegas junto ao topo e de elementos de fixação ou abas junto à base (Figura 3.19);
- varão de compactação com extremidades arredondadas, com um diâmetro de  $16 \pm 1$  mm e um comprimento de  $600 \pm 5$  mm (Figura 3.20);
- funil que permita ser acoplado ao topo do molde troncocónico (Figura 3.20);
- régua com uma precisão maior ou igual a 5 mm (Figura 3.20);
- placa / superfície não absorvente, rígida e plana (Figura 3.20);
- colher de pedreiro (Figura 3.20);
- pano molhado (Figura 3.20);
- cronómetro.



Figura 3.19 - Molde troncocónico



Figura 3.20 - Utensílios usados no ensaio

#### 3.5.1.4. Amostras

A amostra deve ser constituída por um número de tomas repartidas pelo volume de betão fresco e deverá estar protegida de qualquer contaminação (ganho ou perda de água, variações bruscas de temperatura, oxidação do metal do contentor).

#### 3.5.1.5. Procedimentos do ensaio

O procedimento do ensaio é o seguinte:

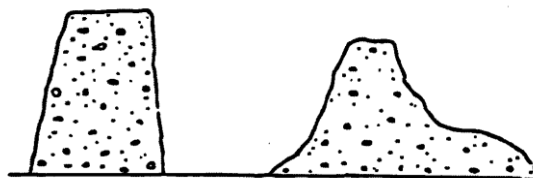
- humedecer o molde troncocónico e a placa / superfície;
- colocar o molde sobre a placa / superfície;
- encher o molde com a amostra recolhida, conforme referido; o enchimento deverá ser faseado por 3 camadas cuja altura, após compactação, deverá ser idêntica ( $1/3$  da altura do molde); a compactação é materializada por 25 pancadas, executadas com o varão de compactação, distribuídas sobre toda a secção transversal da camada mas apenas na sua espessura; no preenchimento da última camada, deverá compensar-se a redução de altura após compactação com uma quantidade suplementar de betão; durante todo o processo de enchimento, deve manter-se o molde fixo contra a placa / superfície com os pés sobre as abas (elementos de fixação);
- após a compactação da camada de topo, rasa-se a superfície de betão através de movimentos de rolamento com o varão de compactação;
- remover o excesso de betão da placa / superfície;
- retirar cuidadosamente o molde levantando-o na vertical; toda a operação de desmoldagem deverá ser executada em 5-10 s através de uma deslocação única e firme, sem transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional;
- a duração máxima da operação, desde o enchimento até à remoção do molde, é de 150 s e deve ser executada sem qualquer interrupção;
- após remoção do molde, regista-se o abaixamento (h)



Figura 3.21 - Leitura do abaixamento

### 3.5.1.6. Resultados

O abaixamento (h) é quantificado pela diferença entre a altura do molde, 300 mm e o ponto mais alto do provete após desmoldagem. O ensaio só é válido se o betão se mantiver substancialmente intacto e simétrico; caso contrário, é necessário repetir o ensaio (Figura 3.22).



(a) Abaixamento verdadeiro

(b) Abaixamento deformado

Figura 3.22 - Formas de abaixamento (NP EN 12350-2 (2002))

## 3.5.2. Massa volúmica

### 3.5.2.1. Objetivo do ensaio

Este ensaio permite determinar a massa volúmica do betão. Esta propriedade influencia a necessidade de compactação do compósito pela sua interferência na trabalhabilidade e é determinante para a quantificação das ações estruturais.

### 3.5.2.2. Normas do ensaio

A metodologia seguida neste ensaio é descrita pela norma NP EN 12350-6 (2009) "Ensaio do betão fresco. Parta 6: Massa volúmica".

### 3.5.2.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- recipiente estanque, de volume conhecido (não inferior a 5 l), de rigidez relativamente elevada, resistente à pasta de cimento, com a face interna lisa e com bordo superior passível de acabamento (Figura 3.25);
- dispositivo de compactação do betão; no presente estudo, utilizou-se uma agulha vibratória (Figura 3.24);
- balança de precisão superior ou igual a  $\pm 0.1\%$  da massa a determinar (Figura 3.23);
- rasoira de aço (Figura 3.25);
- colher de pedreiro (Figura 3.20).



Figura 3.23 - Balança de precisão



Figura 3.24 - Agulha vibratória



Figura 3.25 - Recipiente estanque e rasoira de aço

#### 3.5.2.4. Amostras

A amostra deve ser constituída por um número de tomas repartidas pelo volume de betão fresco e deverá estar protegida de qualquer contaminação (ganho ou perda de água, variações bruscas de temperatura, oxidação do metal do contentor).

#### 3.5.2.5. Procedimentos do ensaio

O procedimento de ensaio é o seguinte:

- pesar o recipiente e registar a sua massa como  $M_1$ ;
- encher o recipiente com a amostra recolhida, conforme descrito; o procedimento deverá ser faseado por 2 camadas e respetiva compactação; o período de compactação deverá ser o adequado e limitado a quaisquer indícios de segregação ou exsudação; caso a compactação seja efetuada com agulha vibratória, assegurar o seu posicionamento vertical e evitar o seu contacto com o recipiente (Figura 3.26);
- após o enchimento do recipiente, proceder ao nivelamento da superfície com o auxílio da colher de pedreiro e da rasoira (Figura 3.26);
- pesar o recipiente com o betão fresco e registar a sua massa como  $M_2$  (Figura 3.27).



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE



Figura 3.26 - Vibração do provete, alisamento da superfície e limpeza do recipiente



Figura 3.27 - Pesagem do recipiente com betão fresco

### 3.5.2.6. Resultados

A massa volúmica ( $D$ ) é dada pela expressão:

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V_R} \quad \text{Eq 3.21}$$

Onde:

- $D$  é a massa volúmica do betão fresco ( $\text{kg/m}^3$ );
- $M_1$  é a massa do recipiente (kg);
- $M_2$  é a massa do recipiente com o provete de betão fresco (kg);
- $V_R$  é o volume do recipiente ( $\text{m}^3$ ).

### 3.6. Ensaio ao betão endurecido

Os ensaios ao betão no estado endurecido têm como objetivo prever o comportamento do betão em condições de serviço, ou seja, dar conhecimento da sua adequação às ações para os quais foram concebidos.

#### 3.6.1. Resistência à compressão

##### 3.6.1.1. Objetivo do ensaio

Este ensaio tem como objetivo determinar a capacidade resistente do betão sob tensão uniforme de compressão. Deste modo, submetem-se os provetes a elevados carregamentos e regista-se o valor máximo.

##### 3.6.1.2. Normas de ensaio

A metodologia seguida neste ensaio é descrita na norma NP EN 12390-3 (2011) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio". A geometria e dimensão dos provetes de ensaio podem ser consultadas na NP EN 12390-1 (2011) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes".

As condições de execução e cura dos provetes de ensaio e os métodos encontram-se especificados na NP EN 12390-2 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica".

##### 3.6.1.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios utilizados neste ensaio são os seguintes:

- prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma NP EN 12390-3 (Figuras 3.28 e 3.29);
- pano de limpeza dos provetes;
- balança com uma precisão igual ou superior a 0,1% da massa a determinar (Figura 3.23).



Figura 3.28 - Controlador da prensa hidráulica de 4 colunas



Figura 3.29 - Prensa hidráulica de 4 colunas



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

### 3.6.1.4. *Provetes de ensaio*

O ensaio é realizado em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e o respetivo período de cura é variável, 7, 28 e 56 dias. O programa de ensaio estipula que, para cada betão, devem ser ensaiados 3 provetes aos 7 dias, 5 aos 28 dias e 3 aos 56 dias.

A 2ª fase da campanha experimental tem como principal objetivo assegurar a trabalhabilidade pretendida para as diferentes amassaduras. No entanto, permitiu também produzir 4 provetes cúbicos para ensaiar à compressão aos 28 dias. Estes provetes permitem a comparação de resultados com os provetes ensaiados na 3ª fase.

Todos os provetes foram mantidos 24 h na zona de betonagem de modo a ganharem resistência suficiente para serem desmoldados e transportados para a câmara de cura.

### 3.6.1.5. *Procedimento do ensaio*

O procedimento de ensaio foi o seguinte:

- retirar o provete do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- pesar e registar a massa do provete como M (este dado não tem contribuição direta para os resultados do ensaio mas é um bom indicador da presença de vazios que justifiquem, eventualmente, resultados anómalos);
- limpar todas as superfícies da máquina de ensaio;
- colocar o provete numa posição centrada, relativamente ao prato inferior da máquina, para evitar qualquer tipo de excentricidade; o plano correspondente à face de acabamento do provete não deverá ser uma superfície de ensaio, isto é, não deverá coincidir com nenhum dos pratos da máquina (Figura 3.31);
- aplicar a carga a uma velocidade constante de 0,2 a 1 MPa/s de forma contínua e sem choques até se atingir a rotura (Figura 3.32) (no presente trabalho, utilizou-se uma velocidade de carregamento de 11.3 kN/s, que corresponde a aproximadamente 0.5 MPa/s) (Figura 3.30);
- registar a carga máxima como F.



Figura 3.30 - Provetes após ensaio de compressão



Figura 3.31 - Posicionamento do provete



Figura 3.32 - Rotura

### 3.6.1.6. Resultados

Após o ensaio, deve-se inspecionar se a rotura de cada provete foi satisfatória (Figura 3.33) ou não satisfatória (Figura 3.34), conforme estipulado na NP EN 12390-3.

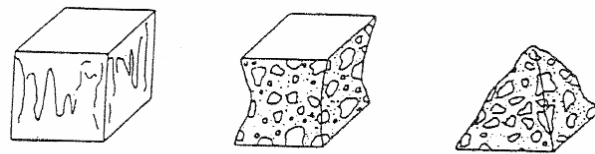


Figura 3.33 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3 (2003))

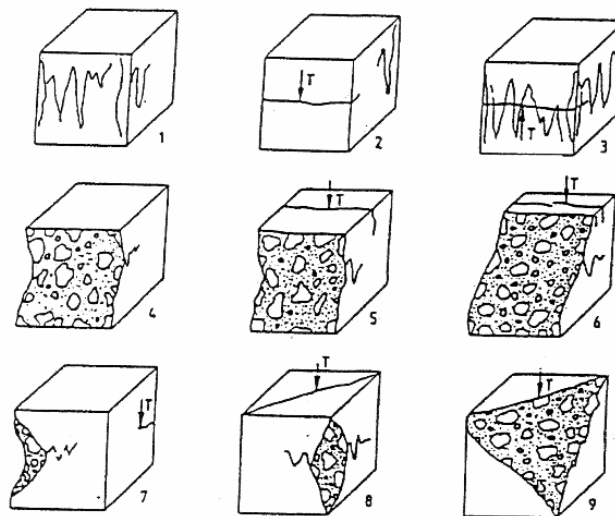


Figura 3.34 - Rotura não satisfatória de provetes cúbicos (NP EN 12390-3 (2003))

A resistência à compressão de cada provete é dada pela expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Eq 3.22}$$

Onde:

- $f_c$  é a resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm<sup>2</sup>);
- F é a carga máxima (N);
- $A_c$  é a área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm<sup>2</sup>).

Para cada idade, a resistência à compressão dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes ensaiados.

### 3.6.2. Resistência à tração por compressão diametral

#### 3.6.2.1. Objetivo do ensaio

A tensão de rotura do betão por tração pode ser obtida por tração pura, flexão simples ou por compressão diametral. Uma vez que a obtenção da tensão de rotura através de tração pura é difícil, esta é obtida através de um dos restantes ensaios. No entanto, estes ensaios levam invariavelmente a resultados desiguais.

Na presente dissertação, optou-se pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Este ensaio consiste em submeter o provete cilíndrico a uma carga de faca, aplicada ao longo da sua geratriz. Este carregamento vai gerar tensões ortogonais ao plano de carga (trações) e, conseqüentemente, dá-se a rotura do provete por tração.

#### 3.6.2.2. Normas de ensaio

A metodologia de ensaio seguida é descrita na NP EN 12390-6 "Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes". A geometria e dimensão dos provetes de ensaio podem ser consultadas na NP EN 12390-1 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes".

As condições de execução e cura dos provetes de ensaio e os métodos encontram-se especificados na NP EN 12390-2 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica".

#### 3.6.2.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma NP EN 12390-4 (Figura 3.29)
- posicionador dos provetes, em aço (opcional) (Figura 3.35);
- peça de carga, em aço (Figura 3.35);
- faixas de cartão prensado, conforme a NP EN 316;
- pano de limpeza dos provetes.



Figura 3.35 - Posicionador e peça de carga

#### 3.6.2.4. *Provetes de ensaio*

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos de geometria definida por 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.36). O período de cura, idêntico para todos os provetes, é de 28 dias.

Todos os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem de modo a ganharem resistência suficiente para serem desmoldados e transportados para a câmara de cura.



Figura 3.36 - Proвете

#### 3.6.2.5. *Procedimentos do ensaio*

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- retirar o provete do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- limpar cuidadosamente todas as superfícies da máquina de ensaio;
- colocar o provete no posicionador e centrá-lo perfeitamente em relação aos pratos para evitar qualquer tipo de excentricidade (Figura 3.37);
- posicionar as faixas de cartão prensado nas geratrizes de basa e de topo e, na segunda geratriz, sobrepor a peça de carga (Figura 3.37);
- aplicar a carga a uma velocidade constante entre 0,04 e 0,06 MPa/s, de forma contínua e sem choques até se atingir a rotura ( no presente trabalho, utilizou-se uma velocidade de carregamento de 3,5 kN/s); deve-se assegurar que os pratos estão dispostos paralelamente em todo o ensaio;
- registar a carga máxima atingida como F (Figura 3.38).



Figura 3.37 - Posicionamento do provete



Figura 3.38 - Rotura

### 3.6.2.6. Resultados

A resistência à tração por compressão diametral de cada provete é dada pela expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad \text{Eq 3.23}$$

Onde:

- $f_{ct}$  é a resistência à tração por compressão diametral (MPa ou N/mm<sup>2</sup>);
- F é a carga máxima (N);
- L é o comprimento da linha de contacto do provete (mm);
- d é a dimensão da secção transversal (mm).

A resistência à tração por compressão diametral dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes respetivos.

### 3.6.3. Módulo de elasticidade

#### 3.6.3.1. Objetivo do ensaio

O módulo de elasticidade é um parâmetro de extrema importância na avaliação de um betão. Caracteriza a curva de extensão-tensão pelo declive da reta no patamar predominantemente elástico. A sua importância deve-se ao facto de exprimir a resposta das estruturas à maioria das ações uma vez que é expectável que o regime permaneça linear.

A reta que estabelece este parâmetro pode também ser definida pela tangente à curva extensão-tensão na origem ou pela secante que passa no mesmo ponto e cruza a referida curva a um nível estipulado de tensão.

Na presente dissertação, calcula-se o módulo de elasticidade secante após um número especificado de ciclos de carga e para um nível de tensão na ordem de 1/3 da resistência média à compressão ( $f_{ctm}$ ).

#### 3.6.3.2. Normas de ensaio

A metodologia de ensaio seguida é descrita na norma LNEC-397 "*Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão*".

#### 3.6.3.3. Aparelhos e utensílios

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- prensa hidráulica (Figura 3.39);
- extensómetros elétricos (tipo PFL 30-11-3LT);
- *data logger* acoplado à prensa hidráulica (permite a interpretação e transmissão dos dados emitidos pelos extensómetros para um PC (Figura 3.39);
- pano de limpeza dos provetes.





Figura 3.39 - Data logger e prensa hidráulica

#### 3.6.3.4. Provetes de ensaio

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos de geometria semelhante à dos usados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 3.36). O tempo de cura é idêntico para todos os provetes e é de 28 dias.

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

#### 3.6.3.5. Procedimentos do ensaio

O procedimento de ensaio é o seguinte:

- retirar o provete do ambiente de cura quando atingida a idade estabelecida;
- retificar ambas as faces de ensaio do provete de modo a torná-lo perfeitamente lisas e paralelas; após retificação, esperar que o provete seque;
- remover excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- colar 2 extensómetros no provete em posições diametralmente opostas;
- limpar as superfícies da máquina de ensaio;
- posicionar o provete evitando qualquer excentricidade de carregamento; recorrer a uma rótula metálica para assegurar a transmissão exclusiva de esforço axial; verificar o correto posicionamento do provete pela diferença registada nos dois extensómetros ( $|\varepsilon_{ext1} - \varepsilon_{ext2}|$ ) que deverá, após cada ciclo de carga, ser inferior a 10% (Figura 3.41);
- aplicar uma tensão inicial de 0,5 a 1 MPa ( $\sigma_i$ ) e aumentá-la de forma contínua, a uma velocidade de  $0.5 \pm 0,1$  MPa/s, até se atingir 1/3 da tensão média de resistência à compressão (Figura 3.40);
- registar as extensões e tensões iniciais e finais;
- efetuar um novo ciclo de carga;
- após cada ciclo, confirmar se a diferença entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos ( $|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$ ) é inferior a  $1 \times 10^{-5}$ ; caso o limite não seja satisfatório, é necessário repetir o ciclo de carga;
- efetuar os ciclos necessários até que o ponto anterior seja verificado ( $|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| < 1 \times 10^{-5}$ ).

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE



Figura 3.40 - Ensaio a decorrer



Figura 3.41 - Posicionamento e preparação do provete

### 3.6.3.6. Resultados

Considerando que a diferença entre as médias das variações de extensão entre dois ciclos consecutivos verifica a expressão:

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left( \frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_i - \left( \frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_{i+1} \right| < 1 \times 10^{-5} \quad \text{Eq 3.24}$$

O módulo de elasticidade em compressão ( $E_c$ ) é dado por:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad \text{Eq 3.25}$$

Onde:

- $E_c$  é o módulo de elasticidade em compressão (GPa);
- $\sigma_{i,n}$  é a tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);
- $\sigma_{f,n}$  é a tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);
- $\varepsilon_{i,n}$  é a extensão correspondente à tensão  $\sigma_{i,n}$ , registada no ciclo n;
- $\varepsilon_{f,n}$  é a extensão correspondente à tensão  $\sigma_{f,n}$ , registada no ciclo n.

### Resistência à abrasão

#### 3.6.3.7. Objetivo do ensaio

Este ensaio tem como objetivo caracterizar a resistência à abrasão do betão por desgaste. A capacidade de um betão para suportar ações que provocam desagregação ou perda de secção é especialmente importante em elementos estruturais em betão à vista uma vez que estes estão permanentemente expostos a erosão contínua, como é o caso de pavimentos ou canais hidráulicos.

#### 3.6.3.8. Normas de ensaio

A metodologia de ensaio seguida encontra-se descrita na norma DIN 52108 "Testing of inorganic non-metallic materials. Wear test with grinding wheel according to Böhme".

### 3.6.3.9. *Aparelhos e utensílios*

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio foram os seguintes:

- máquina de abrasão de Böhme (Figura 3.42);
- pó abrasivo (Figura 3.43);
- estufa ventilada à temperatura de  $110 \pm 5$  °C (Figura 3.7);
- balança com precisão igual ou superior a 0.1 g (Figura 3.6);
- paquímetro (Figura 3.18);
- equipamento de limpeza da máquina de abrasão e provetes (Figura 3.44);
- pano de limpeza.



Figura 3.42 - Máquina de abrasão de Böhme



Figura 3.43 - Pó abrasivo



Figura 3.44 - Equipamento de limpeza

### 3.6.3.10. *Provetes de ensaio*

A geometria dos provetes usados neste ensaio é paralelepípedica, definida por uma base de  $71 \pm 1,5$  mm de aresta e por uma altura, não normalizada, de aproximadamente 50 mm (Figura 3.46). A face de topo deve ser perfeitamente paralela à face de teste para assegurar a correta progressão do ensaio.

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

Uma vez passado o período mínimo de cura prescrito pela norma (91 dias), os provetes ganham a geometria descrita pelo corte de cubos de 150 mm de aresta (Figura 3.45). Seguidamente, são secos em estufa ventilada até atingirem massa constante, ou seja, massa cuja variação medida em pesagens sucessivas e intervaladas de pelo menos 1 hora seja inferior a 0,1%.



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE



**Figura 3.45 - Preparação dos provetes**



**Figura 3.46 - Provetes de ensaio (resistência à abrasão)**

### **3.6.3.11. Procedimentos do ensaio**

O procedimento de ensaio foi o seguinte:

- retirar o provete da estufa quando obtiver as exigências atrás exigidas;
- remover eventuais sujidades do provete;
- pesar e medir altura inicial do provete em 9 pontos, marcados previamente na face de topo (oposta à de teste), conforme a Figura 3.47;
- limpar as superfícies da máquina de abrasão;
- distribuir uniformemente 20 g de pó abrasivo pelo trilho de abrasão;
- posicionar o provete no mecanismo de fixação e aplicar no centro da sua face de topo um carregamento vertical; este procedimento sujeita o provete a uma pressão de contato de  $30 \pm 0,3$  kPa e garante o atrito suficiente entre o mesmo e o conjunto abrasivo (disco e pó);
- iniciar a rotação do disco de Böhme a uma velocidade  $30 \pm 1$  rpm e completar 22 voltas; este processo designa-se por ciclo de teste; o ensaio de resistência à abrasão inclui 16 ciclos de teste (Figura 3.48);
- entre cada ciclo de teste, limpar o provete e o disco de Böhme, rodar o provete  $90^\circ$  em torno do seu eixo vertical (sempre no mesmo sentido) e distribuir novamente 20 g de pó abrasivo no trilho de abrasão;
- por cada rotação de  $360^\circ$  do provete (4 ciclos), pesar e registar a massa do provete;
- acabados os 16 ciclos, limpar o provete e medir a altura dos mesmos 9 pontos.

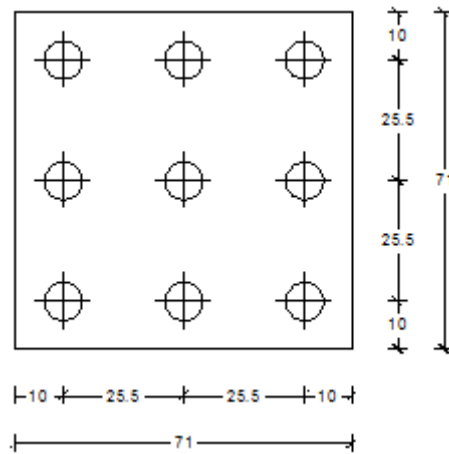


Figura 3.47 - Distribuição dos pontos de medição do desgaste



Figura 3.48 - Decorrer do ensaio

### 3.6.3.12. Resultados

Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão são determinados pela redução da altura/espessura do provete, dada pela expressão:

$$\Delta l = \frac{\sum_{j=1}^n (l_{i,j} - l_{f,j})}{n} \quad \text{Eq 3.26}$$

onde:

- $\Delta l$  é a perda média de espessura (mm);
- $l_{i,j}$  é a espessura inicial do provete, medida no ponto j (mm);
- $l_{f,j}$  é a espessura final do provete, medida no ponto j (mm);
- $n$  é o número de pontos marcados no provete.

## 4. Resultados da campanha experimental

### 4.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios efetuados durante a campanha experimental. Em simultâneo, é realizada uma análise comparativa dos mesmos, de forma a correlacionar o desempenho mecânico do betão com a percentagem de substituição de agregados finos primários por agregados finos secundários.

### 4.2. Ensaios de caracterização dos agregados

Neste subcapítulo, procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios aos agregados, de acordo com o subcapítulo 3.4.

#### 4.2.1. Análise granulométrica

Conforme mencionado no subcapítulo 3.4.1, os resultados que se expõem estão de acordo com a metodologia descrita na norma NP EN 933-1 (2000). Neste sentido, quando aplicável, apresenta-se a curva granulométrica, o módulo de finura e a percentagem de finos (f) para os diferentes materiais.

A importância que esta análise possui na prática corrente perde relevância na metodologia de produção adotada. Esta separou os agregados nas suas diferentes frações granulométricas para posterior ajustamento à curva granulométrica de referência.

No ANEXO B, é possível consultar as curvas granulométricas fornecidas pelos diferentes fabricantes.

Na leitura das tabelas que se seguem, interprete-se  $M_1$  como a massa total da amostra recolhida, após secagem em estufa a  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  até valor constante, e  $M_2$  como a mesma massa após lavagem e igual secagem.

##### 4.2.1.1. Brita 2

A análise granulométrica da brita 2, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Massas  $M_1$  e  $M_2$  relativas à análise granulométrica da brita 2

$M_1$ (g)	5989,2
$M_2$ (g)	5987,8

A Figura 4.1 mostra a curva granulométrica da brita 2. No eixo das abcissas, figura a dimensão das partículas numa escala logarítmica e, no eixo das ordenadas, a percentagem de material passante em cada peneiro.

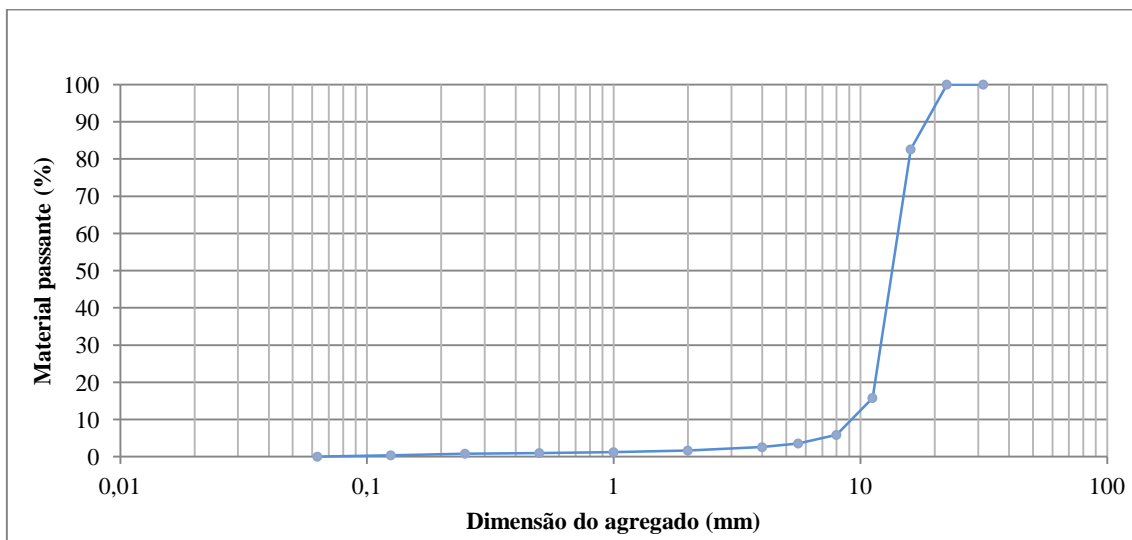
## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

**Tabela 4.2 - Análise granulométrica da brita 2**

Brita 2				
Peneiro	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
			Retida	Passante
(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
22,4	0,00	0,00	0,00	100,00
16	1043,20	17,42	17,42	82,58
11,2	4000,50	66,80	84,21	15,79
8	594,70	9,93	94,14	5,86
5,6	137,20	2,29	96,43	3,57
4	59,40	0,99	97,43	2,57
2	54,90	0,92	98,34	1,66
1	26,00	0,43	98,78	1,22
0,5	13,50	0,23	99,00	1,00
0,25	10,40	0,17	99,18	0,82
0,125	26,50	0,44	99,62	0,38
0,063	21,50	0,36	99,98	0,02
Refugo	1,40	0,02	-	-
Total	5989,20	100,00		

f	0,02
---	------

M.F	9,85
-----	------



**Figura 4.1 - Curva granulométrica da brita 2**

### 4.2.1.2. Brita 1

A análise granulométrica da brita 1, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Tabela 4.3 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da brita 1

M <sub>1</sub> (g)	3130,8
M <sub>2</sub> (g)	3129,2

Tabela 4.4 - Análise granulométrica da brita 1

Brita 1				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
22,4	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	0,00	100,00
11,2	173,7	5,55	5,55	94,45
8	1596,8	51,03	56,58	43,42
5,6	1077,1	34,42	91,00	9,00
4	122,2	3,91	94,91	5,09
2	145,4	4,65	99,55	0,45
1	2,5	0,08	99,63	0,37
0,5	1,8	0,06	99,69	0,31
0,25	0,3	0,01	99,70	0,30
0,125	0,4	0,01	99,71	0,29
0,063	7,4	0,24	99,95	0,05
Refugo	1,6	0,05	-	-
Total	3129,20	100,00		

f	0,05
---	------

M.F	8,46
-----	------

A Figura 4.2 mostra a curva granulométrica da brita 1.

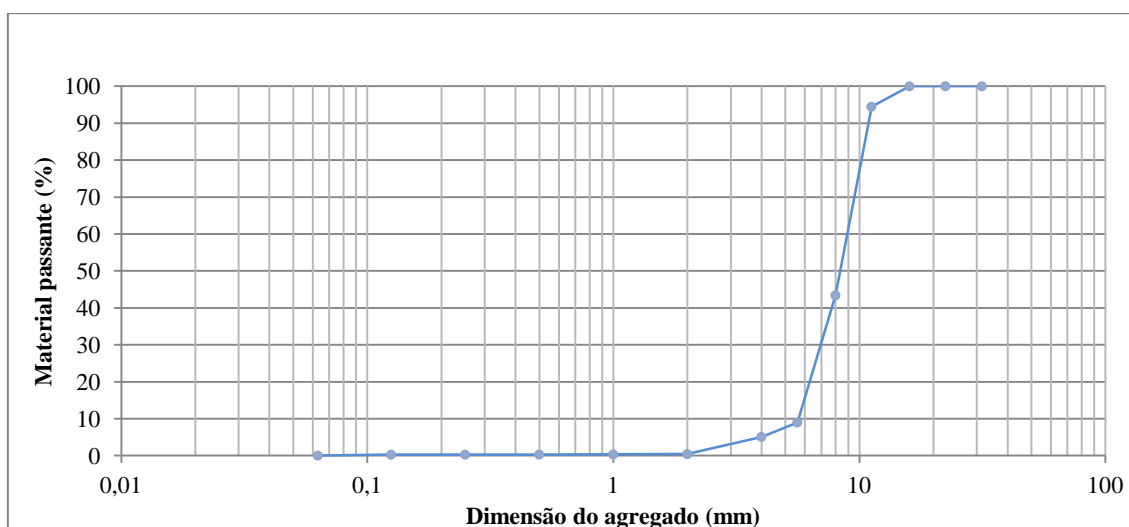


Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 1

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.2.1.3. Bago de arroz

A análise granulométrica do bago de arroz, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6. A Figura 4.3 mostra a curva granulométrica do bago de arroz.

Tabela 4.5 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica do bago de arroz

M <sub>1</sub> (g)	994,3
M <sub>2</sub> (g)	992,5

Tabela 4.6 - Análise granulométrica do bago de arroz

Bago de arroz				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
22,4	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	0,00	100,00
11,2	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0,00	0,00	0,00	100,00
5,6	30,3	3,05	3,05	96,95
4	552,3	55,55	58,59	41,41
2	307,8	30,96	89,55	10,45
1	48,1	4,84	94,39	5,61
0,5	23,2	2,33	96,72	3,28
0,25	11,6	1,17	97,89	2,11
0,125	5,2	0,52	98,41	1,59
0,063	14	1,41	99,82	0,18
Refugo	1,8	0,18	-	-
Total	994,30	100,00		

f	0,18
---	------

M.F	6,38
-----	------

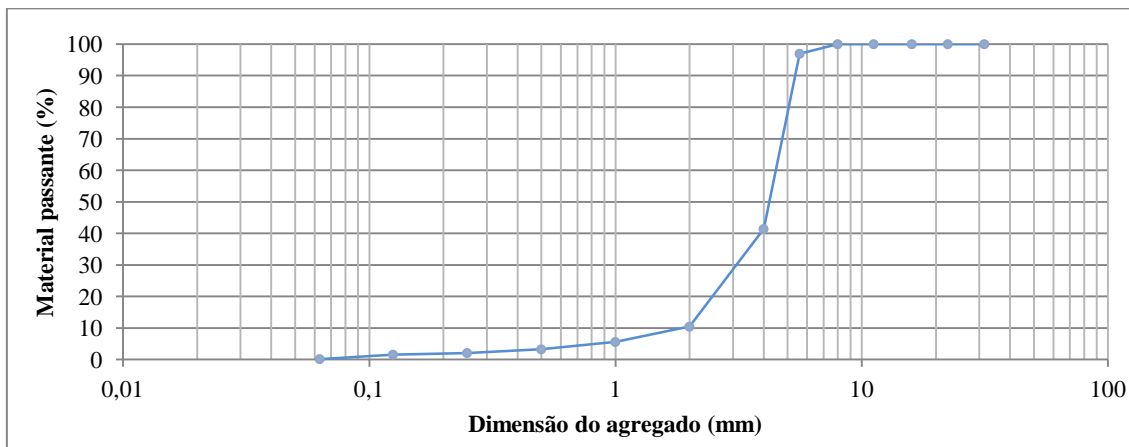


Figura 4.3 - Curva granulométrica do bago de arroz

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

4.2.1.4. *Areia de rio grossa*

A análise granulométrica da areia de rio grossa, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8. A Figura 4.4 mostra a curva granulométrica da areia de rio grossa.

Tabela 4.7 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia grossa

M <sub>1</sub> (g)	1734,6
M <sub>2</sub> (g)	1733,7

Tabela 4.8 - Análise granulométrica da areia grossa

Areia grossa				
Peneiro	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
			Retida	Passante
(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
22,4	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	0,00	100,00
11,2	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0,00	0,00	0,00	100,00
5,6	20	1,15	1,15	98,85
4	42,2	2,43	3,59	96,41
2	392,9	22,65	26,24	73,76
1	841,8	48,53	74,77	25,23
0,5	328	18,91	93,68	6,32
0,25	66,5	3,83	97,51	2,49
0,125	6,2	0,36	97,87	2,13
0,063	36,1	2,08	99,95	0,05
Refugo	0,9	0,05	-	-
Total	1734,60	100,00		

f	0,05
---	------

M.F	4,95
-----	------

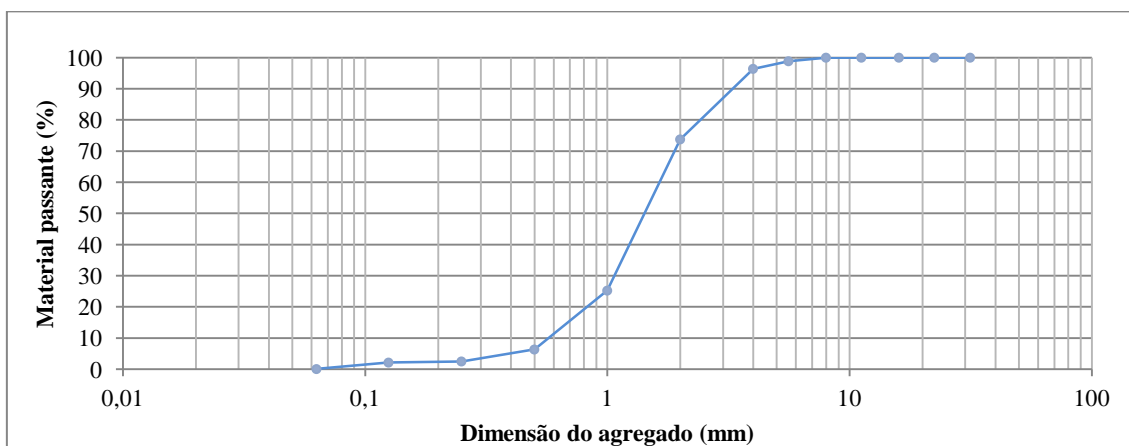


Figura 4.4 - Curva granulométrica da areia grossa

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.2.1.5. Areia de rio fina

A análise granulométrica da areia de rio fina, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

**Tabela 4.9 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia fina**

M <sub>1</sub> (g)	996,8
M <sub>2</sub> (g)	996,6

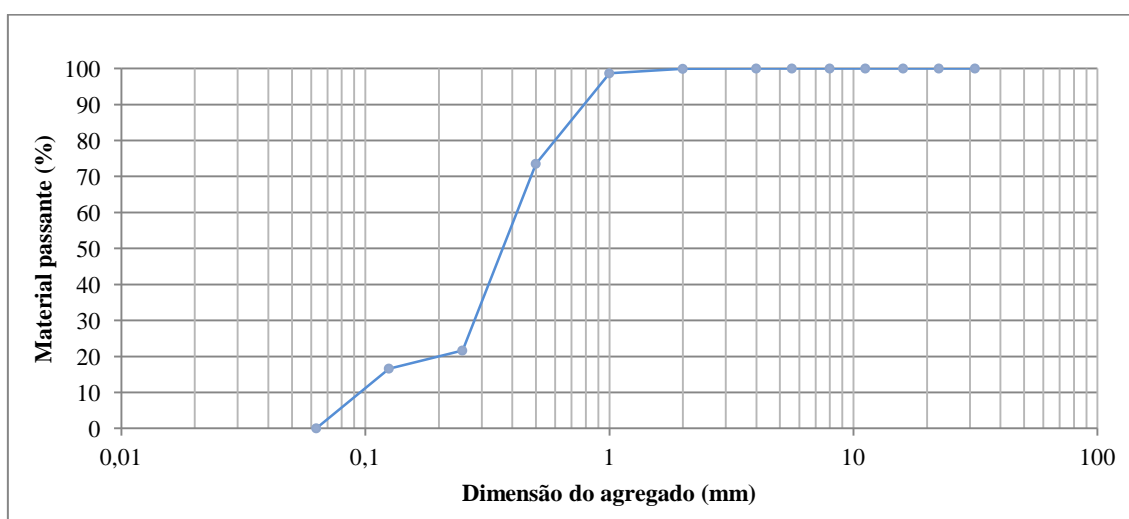
**Tabela 4.10 - Análise granulométrica da areia fina**

Areia fina				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
5,6	0	0,00	0,00	100,00
4	0	0,00	0,00	100,00
2	0,8	0,08	0,08	99,92
1	12,5	1,25	1,33	98,67
0,5	250,6	25,14	26,47	73,53
0,25	517,3	51,90	78,37	21,63
0,125	50	5,02	83,39	16,61
0,063	165,4	16,59	99,98	0,02
Refugo	0,2	0,02	-	-
Total	996,80	100,00		

f	0,02
---	------

M.F	2,90
-----	------

A Figura 4.5 mostra a curva granulométrica da areia de rio fina.



**Figura 4.5 - Curva granulométrica da areia fina**



DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

4.2.1.6. *Areia de basalto*

A análise granulométrica da areia de basalto, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de basalto

M <sub>1</sub> (g)	1000,5
M <sub>2</sub> (g)	1000,2

Tabela 4.12 - Análise granulométrica da areia de basalto

Areia de basalto				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
5,6	0,00	0,00	0,00	100,00
4	1,20	0,12	0,12	99,88
2	322,60	32,25	32,37	67,63
1	261,90	26,18	58,56	41,44
0,5	120,00	12,00	70,56	29,44
0,25	85,50	8,55	79,10	20,90
0,125	98,30	9,83	88,93	11,07
0,063	56,70	5,67	94,60	5,40
Refugo	54,00	5,40	100,00	0,00
Total	1000,20	100,00		

f	5,40
---	------

M.F	4,24
-----	------

A Figura 4.6 mostra a curva granulométrica da areia de basalto.

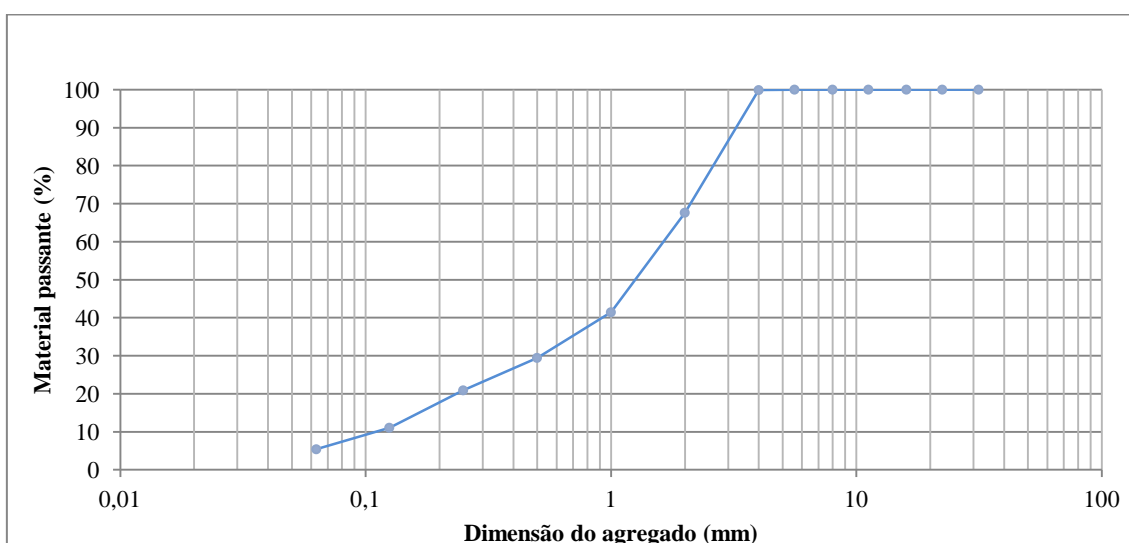


Figura 4.6 - Curva granulométrica da areia de basalto

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.2.1.7. Areia de granito

A análise granulométrica da areia de granito, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14.

**Tabela 4.13 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de granito**

M <sub>1</sub> (g)	1011,9
M <sub>2</sub> (g)	1004,3

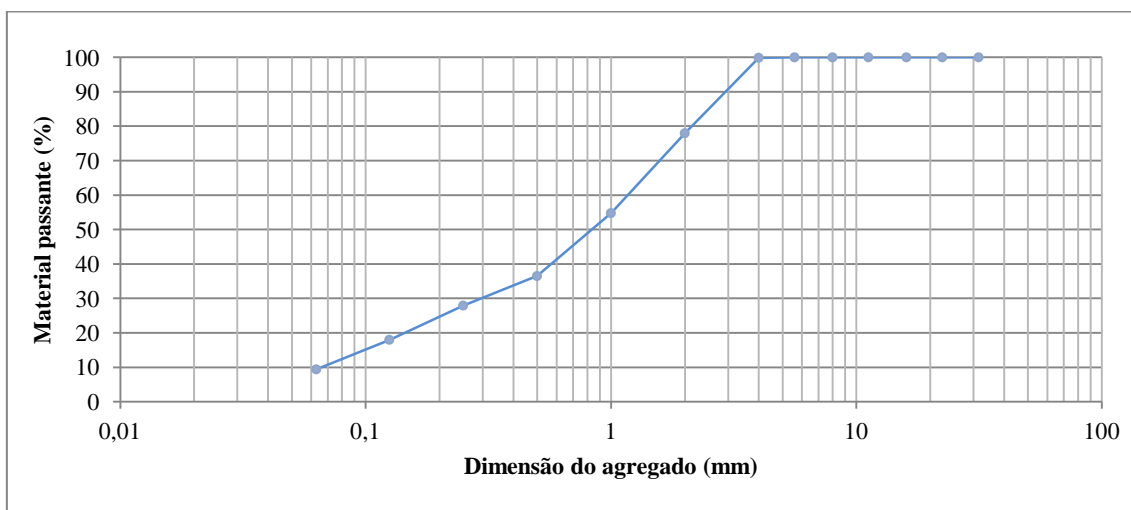
**Tabela 4.14 - Análise granulométrica da areia de granito**

Areia de granito				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
5,6	0,00	0,00	0,00	100,00
4	1,20	0,12	0,12	99,88
2	220,10	21,92	22,04	77,96
1	232,90	23,19	45,23	54,77
0,5	183,50	18,27	63,50	36,50
0,25	86,10	8,57	72,07	27,93
0,125	99,80	9,94	82,01	17,99
0,063	86,20	8,58	90,59	9,41
Refugo	94,50	9,41	100,00	0,00
Total	1004,30	100,00		

f	9,41	M.F	3,76
---	------	-----	------

A Figura 4.7 mostra a curva granulométrica do areia de granito.



**Figura 4.7 - Curva granulométrica da areia de granito**

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

4.2.1.8. *Areia de mármore*

A análise granulométrica da areia de mármore, a sua percentagem de finos (f), o seu módulo de finura (M.F) e a massa inicial e final da amostra são apresentados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15 - Massas M1 e M2 relativas à análise granulométrica da areia de mármore

M <sub>1</sub> (g)	1001,0
M <sub>2</sub> (g)	994,2

Tabela 4.16 - Análise granulométrica da areia de mármore

Areia de mármore				
Peneiro (mm)	Massa retida no peneiro		Massa acumulada	
	(g)	(%)	Retida (%)	Passante (%)
5,6	0,00	0,00	0,00	100,00
4	95,30	9,59	9,59	90,41
2	181,20	18,23	27,81	72,19
1	135,90	13,67	41,48	58,52
0,5	103,20	10,38	51,86	48,14
0,25	68,30	6,87	58,73	41,27
0,125	118,40	11,91	70,64	29,36
0,063	109,30	10,99	81,63	18,37
Refugo	182,60	18,37	100,00	0,00
Total	994,20	100,00		

f	18,37
---	-------

M.F	3,42
-----	------

A Figura 4.8 mostra a curva granulométrica da areia de mármore.

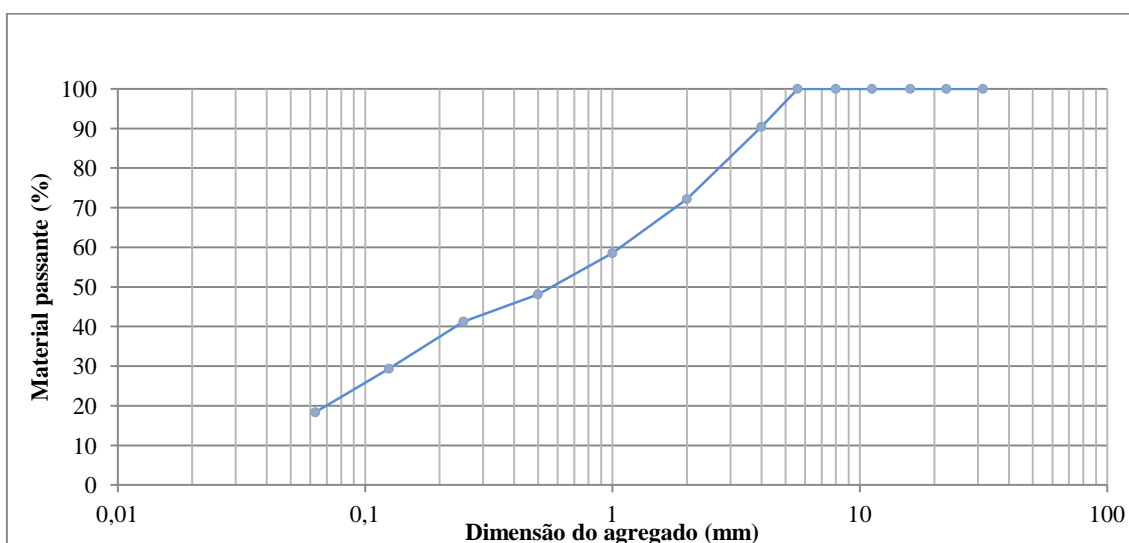


Figura 4.8 - Curva granulométrica da areia de mármore

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

Conforme mencionado no subcapítulo 3.4.2, a determinação da massa volúmica e absorção de água segue a metodologia descrita na norma NP EN 1097-6 (2003). Recorde-se que a mesma preconiza um procedimento distinto para os agregados finos (entre 0.063 e 4 mm) e grossos (entre 4 e 63 mm).

Os dados justificativos dos resultados que são apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.18 (M0, M1, M2, M3 e M4) estão indicados no ANEXO C. Entenda-se  $\rho_a$  como a massa volúmica do material impermeável,  $\rho_{rd}$  como a massa volúmica das partículas secas em estufa,  $\rho_{ssd}$  como a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca e  $WA_{24}$  como a absorção e água após 24 h de imersão.

**Tabela 4.17 - Absorção de água dos agregados**

Absorção de água $WA_{24}$ (%)	
Brita 2	1,50
Brita 1	1,30
Bago de arroz	2,84
Areia grossa	0,75
Areia fina	0,20
Areia de basalto	1,05
Areia de mármore	0,14
Areia de granito	0,59

Analisando a Tabela 4.17, pode-se concluir que os agregados que obtiveram menor absorção de água foram os agregados secundários de mármore (0.14%). Repare-se na diferença entre as absorções de água dos agregados finos, nomeadamente entre a areia de mármore e a areia de basalto.

**Tabela 4.18 - Massas volúmicas dos agregados**

	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 2	2711	2606	2645
Brita 1	2713	2620	2655
Bago de arroz	2678	2489	2559
Areia grossa	2651	2600	2619
Areia fina	2535	2523	2528
Areia de basalto	2906	2820	2850
Areia de mármore	2724	2684	2699
Areia de granito	2504	2467	2482

Os resultados presentes na Tabela 4.18 permitem concluir que a areia que tem maior massa volúmica é a de basalto. A areia de granito e a areia fina de rio têm massas volúmicas mais baixas do que as areias de basalto e de mármore.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Apresenta-se na Tabela 4.19 a comparação do resultado obtido na Tabela 4.17 para a areia de mármore com os obtidos pelos autores estudados no capítulo 2.

**Tabela 4.19 - Comparação dos valores obtidos da absorção de água do mármore**

	Origem do mármore	Absorção de água $WA_{24}$ (%)
Costa da Silva (2012)	Portuguesa	0,14
Costa et al. (1991)	Portuguesa	0,16
Igur et al. (2009)	Turca	0,35
Cardani e Meda (1999)	Italiana	0,13
	Grega	0,37
Yavuz et al. (2005)	Turca	0,08

Através da Tabela 4.19, pode-se verificar que o valor de absorção de água obtido nesta investigação (0,14%) é mais baixo do que a média dos valores recolhidos na bibliografia existente (0,27%). É consensual que os agregados secundários de mármore apresentam absorções de água muito baixas.

### 4.2.3. Massa volúmica aparente

Como é possível confirmar no subcapítulo 3.4.3, a determinação da massa volúmica aparente foi feita de acordo com as prescrições da norma NP EN 1097-3 (2000).

Na Tabela 4.20, mostra-se os resultados da massa volúmica aparente para os agregados. Os dados detalhados que possibilitaram este cálculo são apresentados no ANEXO D.

**Tabela 4.20 - Massas volúmicas aparentes dos agregados**

	Baridade ( $kg/m^3$ )
Brita 2	1363
Brita 1	1356
Bago de arroz	1354
Areia grossa	1542
Areia fina	1526
Areia de basalto	1838
Areia de mármore	1784
Areia de granito	1560

Conclui-se que os resultados da massa volúmica aparente dos agregados finos seguem a mesma tendência observada nos resultados da massa volúmica. A areia de basalto apresenta massa volúmica aparente superior à das restantes areias. A baridade da areia fina de rio é da mesma ordem da apresentada pela areia de granito.

#### 4.2.4. Desgaste de Los Angeles

Em conformidade com o subcapítulo 3.4.4, o ensaio de desgaste de Los Angeles segue a metodologia proposta pela especificação LNEC E-237 (1970). Diga-se que a referida norma é aplicável somente a partículas de agregados de dimensões compreendidas entre 2.38 e 76.1 mm e, portanto, no presente estudo, apenas se determinou a resistência ao desgaste dos agregados grossos.

Os resultados são apresentados na Tabela 4.21 e os dados intermédios podem ser consultados no ANEXO E.

**Tabela 4.21 - Desgaste de Los Angeles**

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

Por análise da Tabela 4.21, pode-se concluir que todos os resultados satisfazem o limite de desgaste máximo especificado pela norma LNEC E-373 (50%), para agregados com aplicação em betões estruturais.

#### 4.2.5. Índice de forma

De forma concordante com o subcapítulo 3.4.5, a determinação do índice de forma segue a metodologia descrita na norma NP EN 933-4 (2002). A mesma preconiza que o âmbito de aplicação está restrito às frações granulométricas compreendidas entre 4 e 63 mm, o que limita a determinação desta grandeza aos agregados grossos.

Na Tabela 4.22, é possível consultar os resultados do ensaio do índice de forma. Os dados parciais que possibilitaram o seu cálculo estão no ANEXO F

**Tabela 4.22 - Índice de forma**

	Si (%)
Brita 2	15,3
Brita 1	16,8
Bago de arroz	18,4

Os valores dos diferentes índices de forma mostram uma geometria semelhante para os vários agregados grossos.

Uma vez que a regulamentação portuguesa não faz qualquer recomendação relativa ao índice de forma, a relevância desta propriedade cinge-se a questões comparativas. No entanto, a título informativo, o regulamento Húngaro estabelece limites no índice de forma em função da classe de resistência pretendida. Assim, para classes de betões entre C8/10 e C16/20, o índice de forma está limitado a 40 e, para betões C20/25 ou de classe superior, a mesma grandeza está limitada a 20.

### 4.3. Ensaio ao betão fresco

Neste subcapítulo, procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios ao betão fresco, de acordo com o subcapítulo 3.5.

#### 4.3.1. Abaixamento (cone de Abrams)

Confirmando o subcapítulo 3.5.1, o ensaio de abaixamento (cone de abrams) segue a metodologia descrita na norma NP EN 12350-2 (2009). Para o mesmo, uma vez que a produção dos betões decorreu integralmente em laboratório, objetivou-se resultados contidos num intervalo mais apertado ( $125 \pm 10$  mm) do que o prescrito pela classe de consistência pretendida (S3 - 100 a 150 mm).

A informação contida na bibliografia relativa a esta matéria, apresentada na sua globalidade no subcapítulo 2.4.2, permitiu desde logo compreender que a trabalhabilidade depende da percentagem de agregados substituídos, da dimensão das partículas e da sua geometria. Para controlar esta variável e respeitar a consistência estabelecida, optou-se apenas por afetar a relação A/C. No entanto, dada a dificuldade de prever resultados apenas com base em estudos de outros investigadores, foi necessário proceder a uma fase experimental com o objetivo principal de determinar aquela relação (2ª fase experimental). O acerto das relações A/C para os betões de referência é apresentado na Tabela 4.23.

**Tabela 4.23 - Abaixamento e relações A/C para as misturas da 2ª fase experimental**

	A/C	h (cm)
BRB	0,55	12,1
BRM	0,54	12,9
BRC	0,49	13,1
BRG	0,53	12,5

Os resultados no ensaio de abaixamento para as misturas da 3ª fase experimental são apresentados na Tabela 4.24.

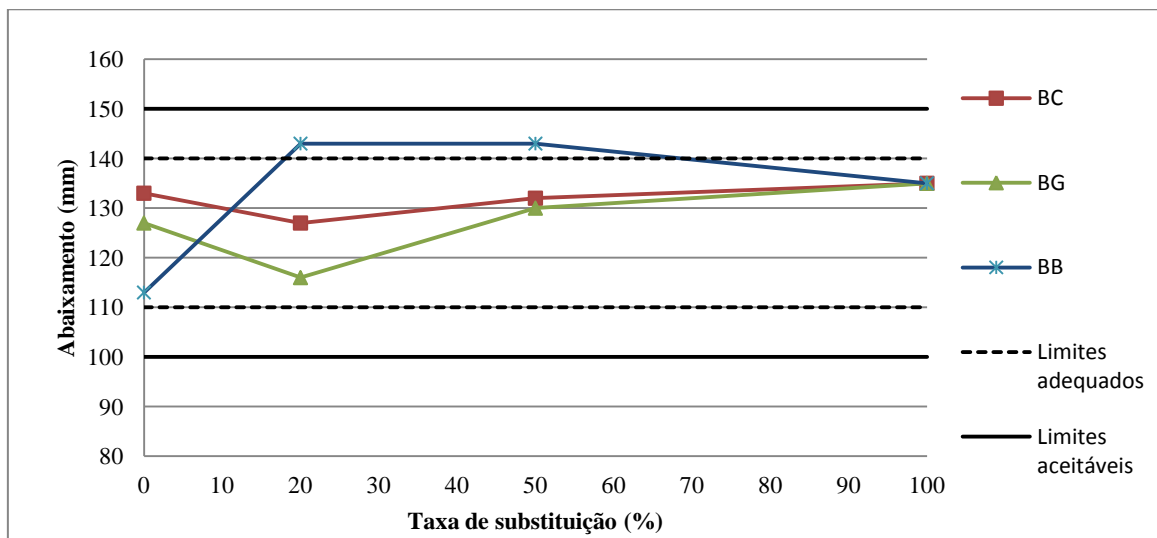
**Tabela 4.24 - Abaixamento e relações A/C para as misturas da 3ª fase experimental**

	A/C	h (cm)
BRB	0,55	11,3
BB/M20	0,55	14,3
BB/M50	0,56	14,3
BRM	0,54	13,5
BRC	0,49	13,3
BC/M20	0,50	12,7
BC/M50	0,50	13,2
BRG	0,54	12,7
BG/M20	0,55	11,6
BG/M50	0,56	13,0

Nas Figuras 4.9 e 4.10, tratam-se apenas os dados relativos à 3ª fase experimental. A Figura 4.9 mostra que os valores de abaixamento (cone de Abrams) não estão rigorosamente contidos no intervalo pretendido. Porém, caso se proceda ao arredondamento dos resultados ao centímetro,

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

verifica-se que o nível de consistência pretendido para todos os betões é atingido (classe de consistência S3).



**Figura 4.9 - Resultados do ensaio de abaixamento em função da taxa de substituição (3ª fase experimental)**

A Figura 4.10 demonstra que o aumento da taxa de substituição de agregados finos tem influência na relação água cimento. Observa-se que, com o aumento da taxa de substituição, a relação A/C tende a aumentar na família de betões BC; nas famílias de betões BB e BG a relação A/C mantém-se aproximadamente constante. A tendência lógica seria a relação A/C baixar com agregados caracterizados por absorções de água menores, como é o caso dos agregados de mármore e de areia de rio (subcapítulo 4.2.2). De facto, observa-se que as relações A/C necessárias para garantir a trabalhabilidade pré-definida nos betões da família BC são mais baixas. Esta observação deve-se à baixa absorção de água pelos agregados de areia de rio. No entanto, sendo os agregados de mármore os que apresentaram absorção de água mais baixa, a sua crescente incorporação devia resultar numa diminuição da relação A/C, o que não se verifica. Hebhoub et al. (2011) afirmaram que esta situação poderia ser explicada pela geometria angulosa das partículas de mármore, que leva a aumento do atrito entre os agregados, prejudicando a trabalhabilidade. Corinaldesi et al. (2010) referem que a areia de mármore tem alta superfície específica, que resulta numa maior coesão dos betões, prejudicando a trabalhabilidade. Pereira et al. (2007) concluíram na sua investigação que o elevado índice de forma e textura lisa das partículas de mármore resultam numa mistura de elevada coesão com trabalhabilidade baixa, sendo necessário aumentar a água na amassadura para contrariar o efeito. De um modo geral, a incorporação de agregados secundários de mármore resultou num ligeiro aumento da relação A/C.

Concluiu-se que a trabalhabilidade é afetada pelo aumento da taxa de substituição de agregados, podendo-se afirmar que os resultados obtidos estão de acordo com os restantes estudos. Belachia e Hebhoub (2011), como descrito em 2.3.2, concluíram que, de modo a manter a trabalhabilidade, é necessário aumentar a relação A/C à medida que aumenta a taxa de substituição de agregados. A mesma conclusão foi retirada por Hebhoub et al. (2011) e por Binici et al. (2007).



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

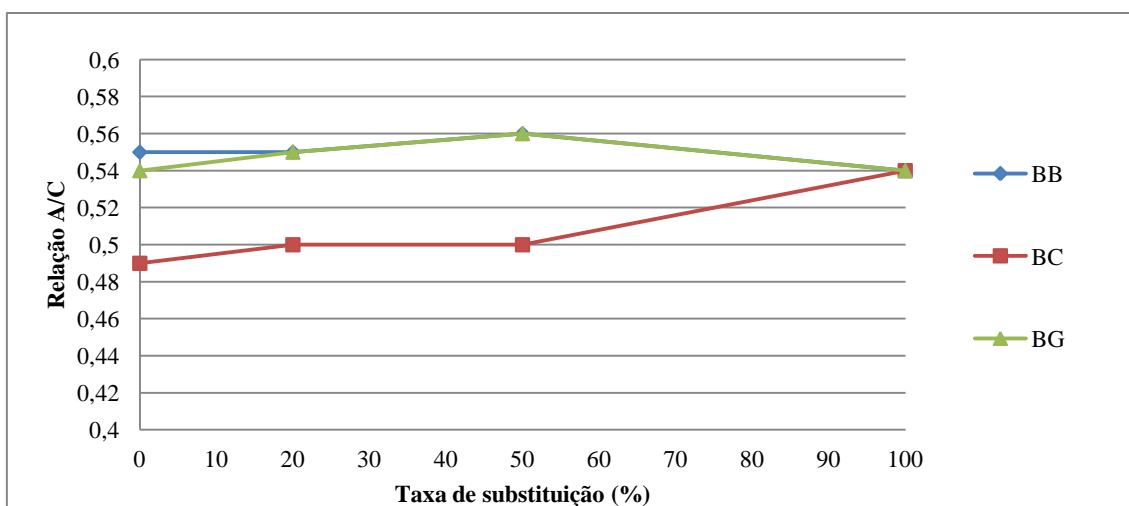


Figura 4.10 - Valores da relação A/C em função da taxa de substituição (3ª fase experimental)

### 4.3.2. Massa volúmica no estado fresco

A determinação da massa volúmica do betão no estado fresco segue a metodologia descrita no subcapítulo 3.5.2 e na norma NP EN 12350-6 (2009).

Na Tabela 4.25, são apresentados os resultados deste ensaio para as misturas da 2ª fase experimental.

Tabela 4.25 - Massa volúmica do betão no estado fresco para a 2ª fase experimental

	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
BRB	2420,2
BRM	2378,6
BRC	2349,4
BRG	2367,6

Na Tabela 4.26, são apresentados os resultados do ensaio de determinação da massa volúmica do betão no estado fresco para a 3ª fase experimental.

Tabela 4.26 - Massa volúmica do betão no estado fresco para a 3ª fase experimental

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

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para a 3ª fase experimental, a percentagem da massa volúmica do betão no estado fresco, relativamente ao betão de referência e em função da taxa de substituição de agregados, é apresentada na Figura 4.11.

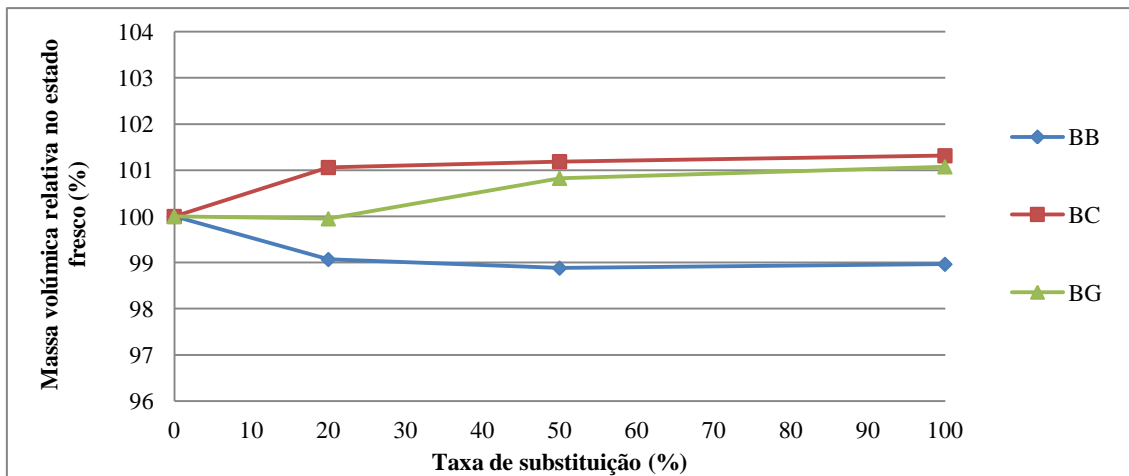


Figura 4.11 - Massa volúmica do betão no estado fresco (3ª fase experimental)

A Figura 4.11 permite confirmar a baixa influência que a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem na massa volúmica do betão no estado fresco. A maior variação, em relação ao betão de referência, observada foi de 1.3%. Atribui-se a razão desta observação ao facto de as massas volúmicas dos agregados primários finos serem próximas das dos agregados secundários.

A análise da Tabela 4.26 permite concluir que a incorporação de agregados secundários de mármore nos betões da família BB resulta num decréscimo da massa volúmica. Esta diminuição é explicada pelos resultados obtidos para a massa volúmica dos agregados (Tabela 4.20). A areia de mármore apresenta massa volúmica inferior à areia de basalto. Deste modo, a sua crescente incorporação faz diminuir a massa volúmica do betão. Esta tendência confirma-se pela análise das duas restantes famílias de betões. Observa-se, a partir da Tabela 4.26, que a massa volúmica dos betões das famílias BC e BG aumenta com a incorporação de agregados secundários de mármore. Através da consulta da Tabela 4.20, conclui-se que a massa volúmica da areia de mármore é superior à das areias de rio fina e granito. Deste modo, a crescente substituição das areias de rio fina e de granito por areia de mármore resulta no aumento da massa volúmica dos betões, contrariamente ao observado nos betões da família BB.

De modo a prever a variação da massa volúmica do betão em função da percentagem de substituição de agregados primários por secundários, aproximaram-se os valores obtidos a uma função polinomial do 2º grau:

$$\frac{\rho}{\rho_{Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.1}$$

Onde:

- $\rho$  é a massa volúmica do betão com substituição de agregados;
- $\rho_{Br}$  é a massa volúmica do betão de referência;
- $X$  é a percentagem de substituição de agregados;
- $q_{p1}$  e  $q_{p2}$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

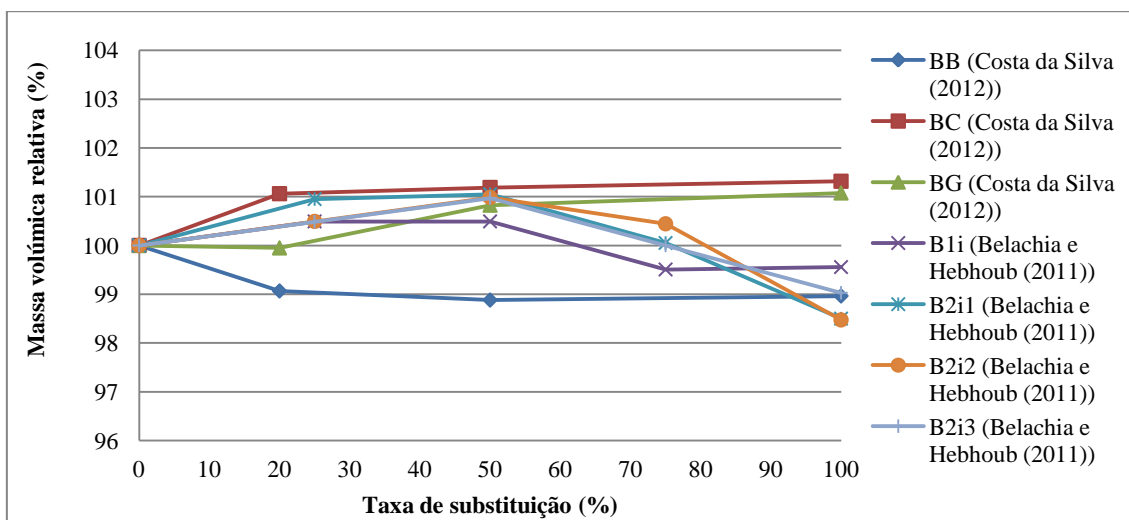
Na Tabela 4.27, explica-se a tendência polinomial da massa volúmica em função da percentagem de substituição (Eq 4.1). Deste modo, são expressos os valores de  $q_{p1}$  e  $q_{p2}$  para todas as famílias e respetivos coeficientes de correlação.

**Tabela 4.27 - Parâmetros e dados estatísticos da Eq 4.1 para os resultados da massa volúmica**

	BB	BC	BG
$q_{p1}$	0,003	-0,0003	-0,00003
$q_{p2}$	-0,0408	0,043	0,0138
$R^2$	0,8996	0,8648	0,8555

A análise da Tabela 4.27 permite afirmar, através dos valores elevados de  $R^2$ , que existe correlação entre os resultados obtidos e a função proposta. Estes valores justificam-se com a proximidade entre os valores da massa volúmica dos agregados finos primários e secundários.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, procede-se à comparação dos resultados deste ensaio com os obtidos por outros investigadores. O tratamento gráfico indica que os resultados deste estudo encontram grande paralelismo nos retirados da bibliografia. De facto, basta fazer referência ao elevado grau de sobreposição para demonstrar que os resultados obtidos nesta dissertação estão de acordo com os restantes trabalhos estudados.



**Figura 4.12 - Comparação de resultados do ensaio de determinação da massa volúmica com Belachia e Hebhou (2011)**

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

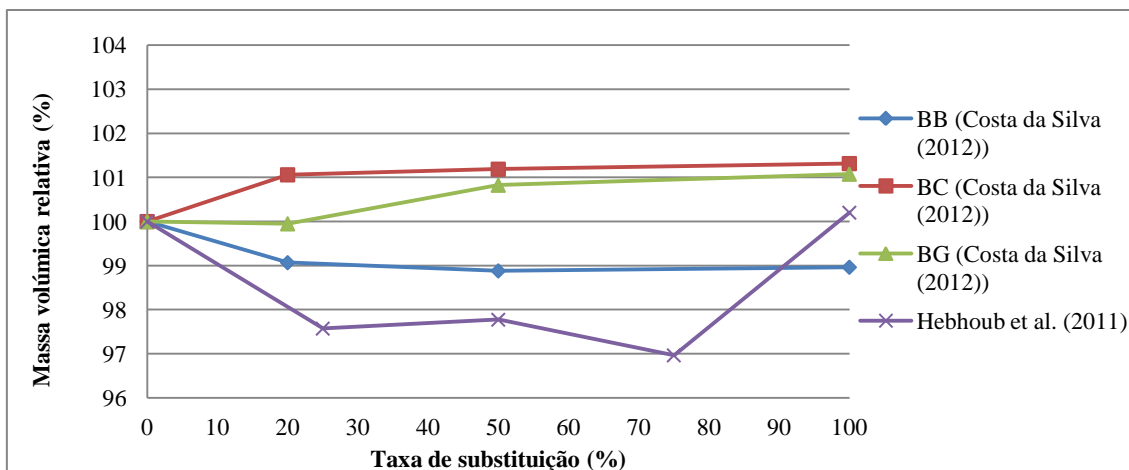


Figura 4.13 - Comparação de resultados do ensaio de determinação da massa volúmica com Hebhoub et al. (2011)

### 4.4. Ensaio ao betão endurecido

Neste subcapítulo, procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios ao betão endurecido, de acordo com o subcapítulo 3.6.

#### 4.4.1. Resistência à compressão

De acordo com o subcapítulo 3.6.1, para determinar a capacidade resistente dos diferentes betões sob tensão uniforme de compressão, seguiu-se a metodologia e princípios descritos na norma NP EN 12390-3 (2011).

Os resultados relativos à 2ª fase experimental são mostrados na Tabela 4.28. Os resultados detalhados encontram-se no ANEXO H.

Tabela 4.28 - Resistência à compressão aos 28 dias (2ª fase experimental)

	$f_{cm,28}$ (MPa)
BRB	50,7
BRM	45,2
BRC	56,1
BRG	49,2

Os resultados exclusivos à 3ª fase experimental, organizados por família, encontram-se apresentados nas Tabelas 4.29, 4.30 e 4.31. Nas mesmas, apresenta-se ainda a resistência média à compressão para as diferentes idades ( $f_{cm,7}$ ,  $f_{cm,28}$  e  $f_{cm,56}$ ), bem como as variações de resistência relativamente ao betão de referência. Para consultar os valores individuais de cada provete, deverá fazer-se uso do ANEXO H

Tabela 4.29 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de basalto (BB) (3ª fase experimental)

	$f_{cm,7}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,28}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,56}$ (MPa)	$\Delta$ (%)
BRB	38,1	-	50,4	-	54,2	-
BB/M20	35,8	-6,1	49,2	-2,5	58,4	7,8
BB/M50	35,6	-6,8	46,7	-7,4	54,6	0,9
BRM	36,8	-3,5	45,3	-10,2	51,4	-5,1

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Tabela 4.30 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de areia de rio (BC) (3ª fase experimental)

	$f_{cm,7}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,28}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,56}$ (MPa)	$\Delta$ (%)
BRC	45,6	-	56,9	-	62,0	-
BC/M20	42,7	-6,3	56,0	-1,5	60,8	-2,0
BC/M50	40,1	-12,0	51,2	-10,1	54,3	-12,3
BRM	36,8	-19,3	45,3	-20,4	51,4	-17,1

Tabela 4.31 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias da família de betões de granito (BG) (3ª fase experimental)

	$f_{cm,7}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,28}$ (MPa)	$\Delta$ (%)	$f_{cm,56}$ (MPa)	$\Delta$ (%)
BRG	39,6	-	49,2	-	51,3	-
BG/M20	38,6	4,1	47,6	-3,2	49,7	-3,0
BG/M50	38,3	5,0	46,2	-6,0	50,7	-1,2
BRM	36,8	7,7	45,3	-7,9	51,4	0,1

Cingindo a análise aos betões de referência, observa-se que a classe de resistência prevista pela formulação (C30/37) é inferior à obtida na realidade (C35/45). A razão para esta discrepância reside na falta de paralelismo entre os pressupostos utilizados na relação de Nepomuceno (1999) e os presentes nesta campanha experimental. Neste sentido, dá-se destaque à menor classe de resistência do cimento, utilizado por aquele investigador (CEM 32,5R), por comparação com o usado neste trabalho (CEM 42,5R).

Para melhor entendimento da influência da percentagem de substituição de agregados na resistência à compressão do betão, procede-se ao tratamento dos resultados através das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

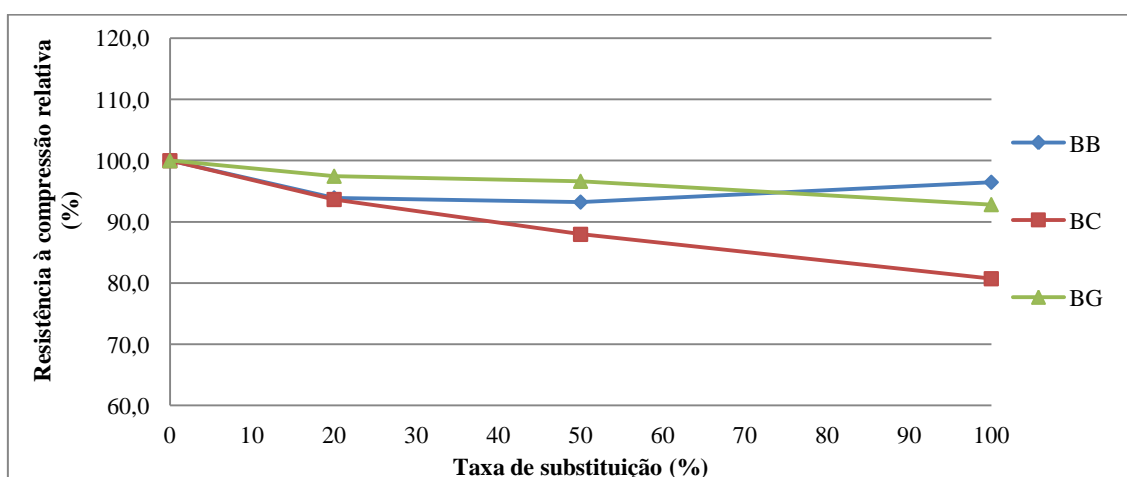
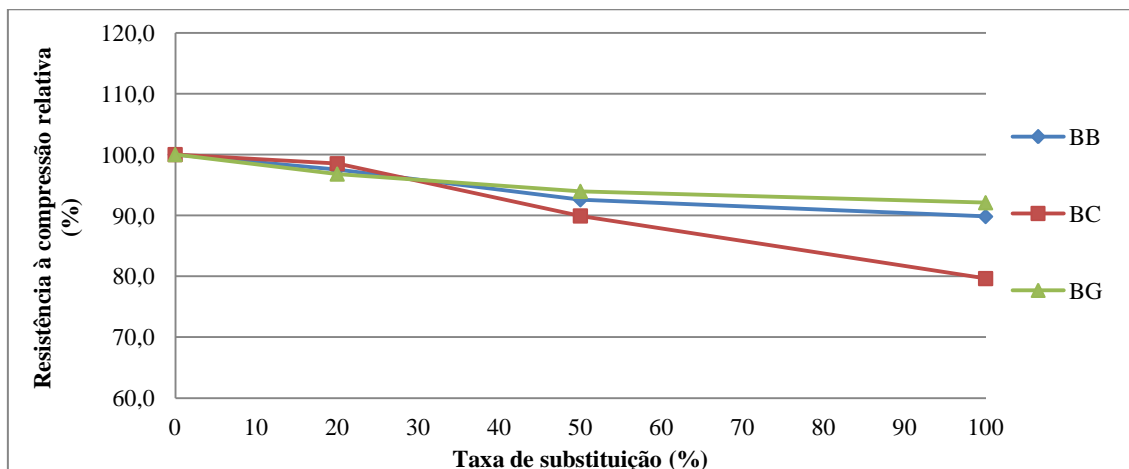


Figura 4.14 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (7 dias)

Analisando a Figura 4.14, pode-se concluir que a incorporação de agregados secundários resulta numa diminuição da resistência à compressão de todas as famílias. A descida mais acentuada

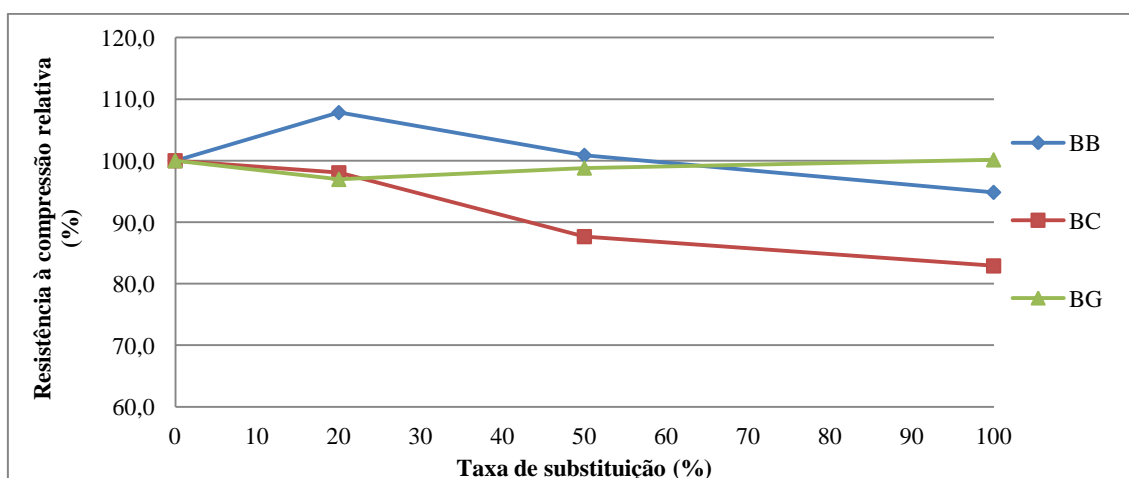
## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

observou-se na família de betões BC, onde houve uma perda de resistência de 19% na taxa de substituição de 100%.



**Figura 4.15 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (28 dias)**

Observando a Figura 4.15, pode-se concluir que os betões seguem a mesma tendência observada aos 7 dias de cura. A família BC volta a ser a que regista uma diminuição de resistência mais acentuada, cerca de 20%. As famílias BB e BG apresentam uma diminuição de resistência da ordem de 10%. Este decréscimo deve-se ao aumento da relação  $a/c$  com a incorporação de agregados secundários de mármore. Como referido, a classe de resistência dos betões produzidos neste estudo é de 44 MPa, testado aos 28 dias sem provetes cúbicos. Os agregados usados nesta investigação têm resistências à compressão superiores a esse valor, deste modo, a rotura do betão vai ocorrer na matriz cimentícia. a adição de água à amassadura (aumento da relação  $a/c$ ), irá aumentar a porosidade da matriz, causando o decréscimo de resistência à compressão observado. Das Figuras 4.14 e 4.15 pode-se concluir que os betões com 100% de substituição apresentam resultados baixos (quando comparados com os restantes betões produzidos neste estudo), especialmente na família BC. Segundo Larrar e Belloc (1997) estes resultados podem ser explicados pela textura lisa da superfície dos agregados secundários de mármore. Esta característica resulta numa fraca adesão e força de ligação entre a matriz de cimento e os agregados.



**Figura 4.16 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (56 dias)**

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

A Figura 4.16 permite concluir que a família de betões BC continua a seguir a tendência observada aos 7 e 28 dias de cura, observando-se um decréscimo de resistência de 18% para a taxa de substituição de agregados de 100%. Nas famílias BB e BG, registaram-se alterações no comportamento face à incorporação de agregados secundários. Na família BG, observou-se uma baixa influência da incorporação de agregados secundários na resistência à compressão, sendo a resistência do betão de referência de granito (BRG) igual à do betão com 100% de agregados finos secundários (BRM). A família de betões BB apresenta uma tendência decrescente a partir da taxa de substituição de 20%; no entanto, o valor do BB/M20 demonstra ser mais elevado do que o valor de resistência à compressão do BRB em cerca de 9%. Observando os resultados registados para este betão nos restantes ensaios efetuados nesta dissertação (Figuras 4.9, 4.11, 4.22, 4.25 e 4.27), não se encontra razão para este valor. Analisando a Figura 4.9, observa-se que, para o BB/M20, se obteve um abaixamento de 143 mm com uma relação A/C de 0.55; de facto, o acerto da relação para se obter um abaixamento ideal de 125 mm iria consistir em retirar água à amassadura, o que por sua vez iria aumentar a resistência. Analisando os resultados detalhados apresentado no ANEXO H, conclui-se que todos os provetes apresentaram resistências altas e que este resultado não foi causado por um provete pouco representativo. Resta atribuir este resultado a um erro laboratorial não identificado ocorrido durante a confeção desta amassadura.

Com o objetivo de prever a resistência à compressão em função da percentagem de substituição, apresenta-se, de seguida, as relações que conduzem aos melhores coeficientes de correlação.

$$\frac{f_c}{f_{c,Br}} = -q_l \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.2}$$

$$\frac{f_c}{f_{c,Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.3}$$

$$\frac{f_c}{f_{c,Br}} = 100 \cdot e^{-q_e \cdot X} \quad \text{Eq 4.4}$$

Onde:

- $f_c$  é a resistência à compressão do betão com substituição de agregados;
- $f_{c,Br}$  é a resistência à compressão do betão de referência;
- $X$  é a percentagem de substituição de agregados;
- $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

Deste modo, as Tabelas 3.32, 3.33 e 3.34 mostram os valores dos parâmetros de ajustamento ( $q_l$ ,  $q_{p1}$  e  $q_{p2}$ ) que conduzem aos melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

**Tabela 4.32 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	0,0629	-0,5630	0,0024	-0,2761	0,8825	0,0006	-0,5680
BC	0,2059	0,9522	0,0011	-0,3063	0,9969	0,0020	0,9688
BG	-0,0857	0,7743	-0,0008	0,1572	0,9231	0,0008	0,7606

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

**Tabela 4.33 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	0,1115	0,9758	0,0007	-0,1752	0,9876	0,0010	0,9378
BC	0,1992	0,9758	-0,0005	-0,1523	0,9833	0,0020	0,9724
BG	0,0896	0,8458	0,0009	-0,1677	0,9984	0,0009	0,8567

**Tabela 4.34 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.2, 4.3 e 4.4 para os resultados de resistência à compressão aos 56 dias**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	0,0243	0,0525	-0,0027	0,2115	0,6361	0,0003	0,0746
BC	0,1834	0,9282	0,0008	-0,2494	0,9475	0,0020	0,9351
BG	0,0083	0,51	0,0009	0,0916	0,4490	0,0001	0,5090

Face aos resultados obtidos (Tabelas 4.32, 4.33 e 4.34), pode-se concluir, com base nos valores quase sempre elevados do coeficiente de correlação, que a equação polinomial é a que melhor correlaciona a variação da resistência à compressão com a taxa de substituição para as várias famílias de betões aos 7 e 28 dias de cura. No entanto, as restantes equações propõem, por vezes, boas aproximações, as funções linear e exponencial demonstraram bons valores para a família BC aos 7 dias e apresentaram bons valores de  $R^2$  para todas as famílias aos 28 dias.

Analisando os resultados presentes nas Tabelas 4.32, 4.33 e 4.34, observa-se que, com exceção das famílias BB e BG aos 56 dias, todos os outros resultados podem ser explicados por funções com coeficientes de correlação aceitáveis. Observando a Figura 4.16, pode-se concluir que; a razão dos baixos valores de  $R^2$  da família BB aos 56 dias é a tendência contrária exibida pelo betão com 20% de taxa de substituição. Esta tendência contrária pode ter tido origem, como já foi discutido, num erro experimental não identificado; a razão dos baixos valores de correlação da família BG aos 56 dias é a tendência quase constante dos valores face a uma pequena variação do BG/M20, cerca de 2%.

Seguidamente, apresenta-se a evolução da resistência à compressão de todas as misturas. A Figura 4.17 é referente à família de betões BB e as Figuras 4.18 e 4.19 à família BC e BG, respetivamente. A observação dessas figuras permite sustentar que a evolução da resistência à compressão de betões com agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore segue um comportamento idêntico à dos betões convencionais, ou seja, para idades jovens, o acréscimo de resistência é substancialmente maior do que para idades posteriores.



DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

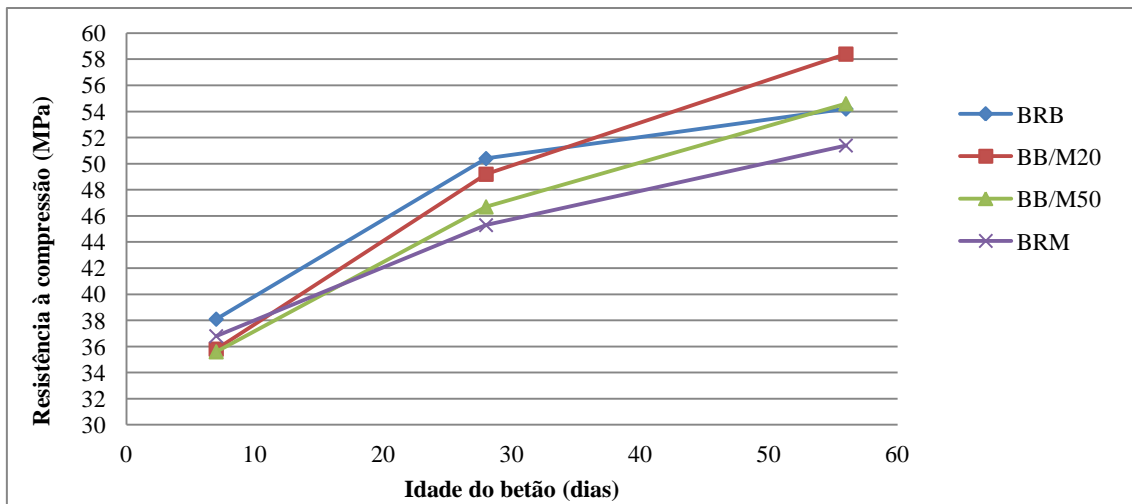


Figura 4.17 - Evolução da resistência à compressão da família BB

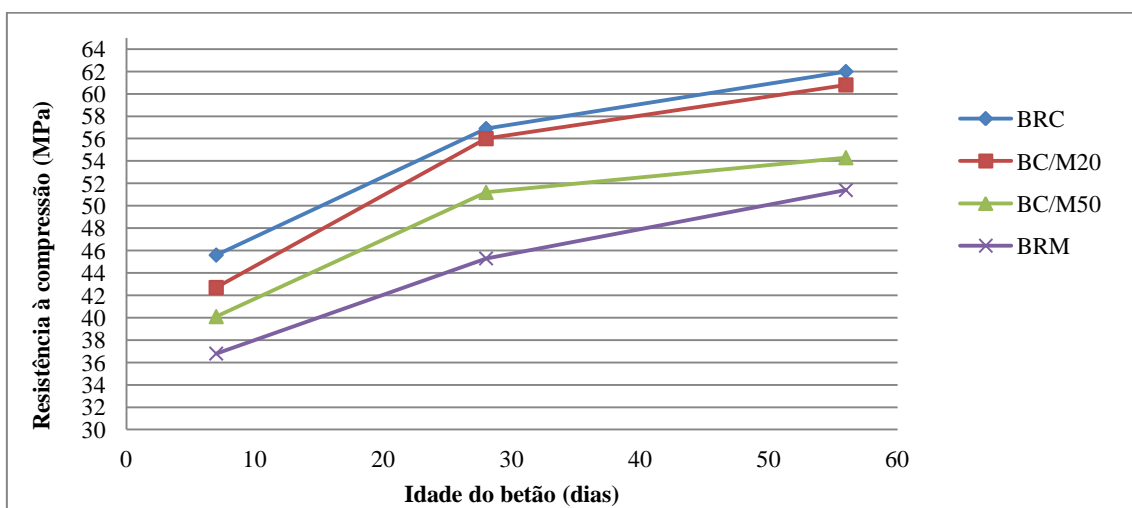


Figura 4.18 - Evolução da resistência à compressão da família BC

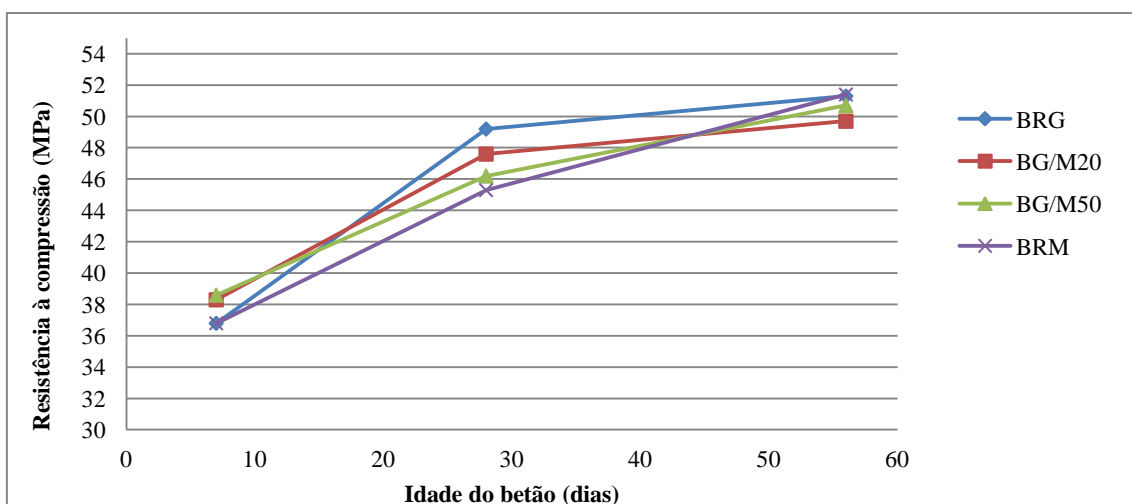


Figura 4.19 - Evolução da resistência à compressão da família BG

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Analisando as Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, pode-se concluir que, de modo geral, a resistência à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição de agregados primários finos por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. No entanto, as conclusões tiradas das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 permitem afirmar que o decréscimo de resistência é pouco significativo. A família de betões BC é a única que apresenta uma diminuição da resistência à compressão considerável. Esta tendência atribui-se a um dos parâmetros que mais influencia a resistência à compressão dos betões, a sua relação A/C. Observando a Tabela 4.24 e a Figura 4.10, concluiu-se que a relação A/C tende a aumentar com a taxa de substituição. Deste modo, chega-se à conclusão que a resistência à compressão diminui com o aumento da relação A/C, uma maior relação A/C implica a inclusão de mais água na amassadura o que vai ter um efeito negativo nas resistências. Esta conclusão foi também apresentada por Belachia e Hebhou (2011) na sua investigação já apresentada no capítulo 2 desta dissertação.

São apresentadas, nas Figuras 4.20 e 4.21, as comparações entre os resultados obtidos e os presentes nas investigações consultadas.

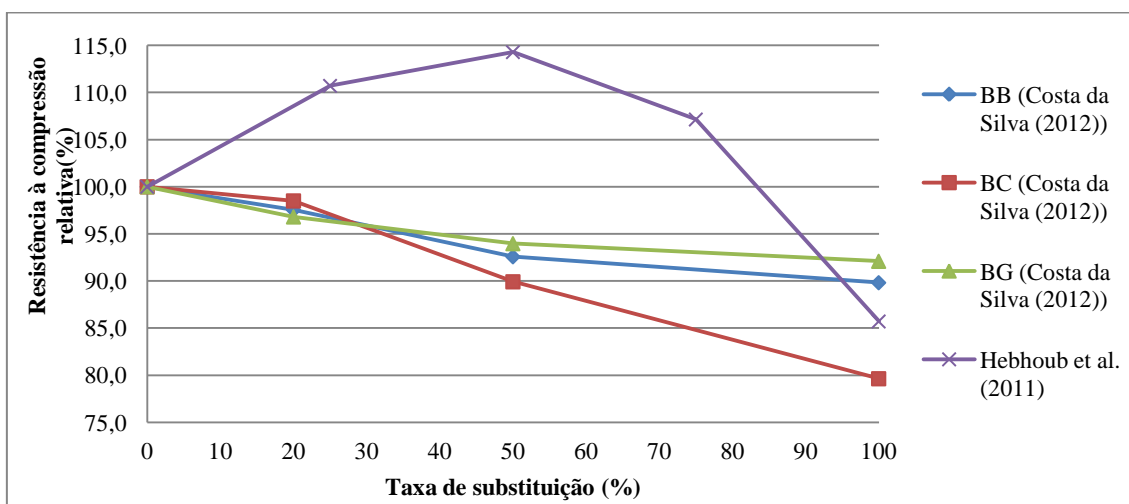


Figura 4.20 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Hebhou et al. (2011)

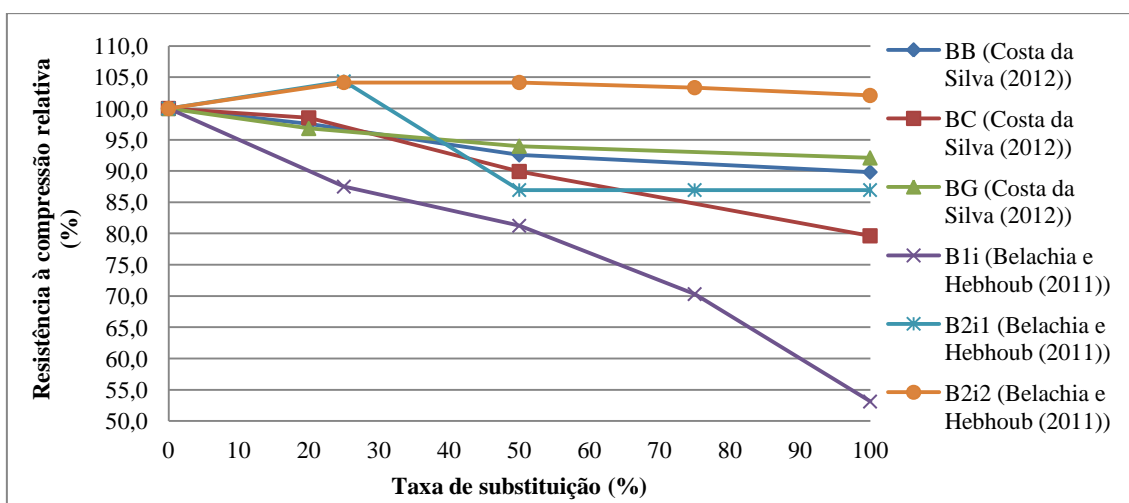


Figura 4.21 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Belachia e Hebhou (2011)

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Examinando as Figuras 4.20 e 4.21 verifica-se maior concordância com os resultados obtidos por Belachia e Hebhouh (2011) do que com os de Hebhouh et al. (2011). Os resultados de Belachia e Hebhouh encontram-se próximos dos obtidos nesta investigação, como é visível pelo grau acentuado de sobreposição. Os resultados obtidos por Hebhouh et al. (2011) são de difícil comparação com os obtidos neste estudo, uma vez que os investigadores optaram por manter constante a relação A/C, sendo a trabalhabilidade função dessa mesma relação. Neste estudo, como referido, a trabalhabilidade estabelecida foi de  $125 \pm 10$  mm (através do ensaio de abaixamento), variando-se para o efeito a relação A/C. No entanto, a análise do trabalho desenvolvido por Hebhouh et al. (2011) demonstra uma grande quebra na trabalhabilidade do betão com o aumento da taxa de substituição de finos, com uma relação A/C de 0.5.

Martins (2012) efetuou uma dissertação em tudo semelhante a esta mas substituindo agregados grossos ao invés de finos. Deste modo, apresenta-se na Figura 4.22 a comparação dos valores de resistência à compressão relativa aos 28 dias da dissertação de Martins (2012) com o presente estudo.

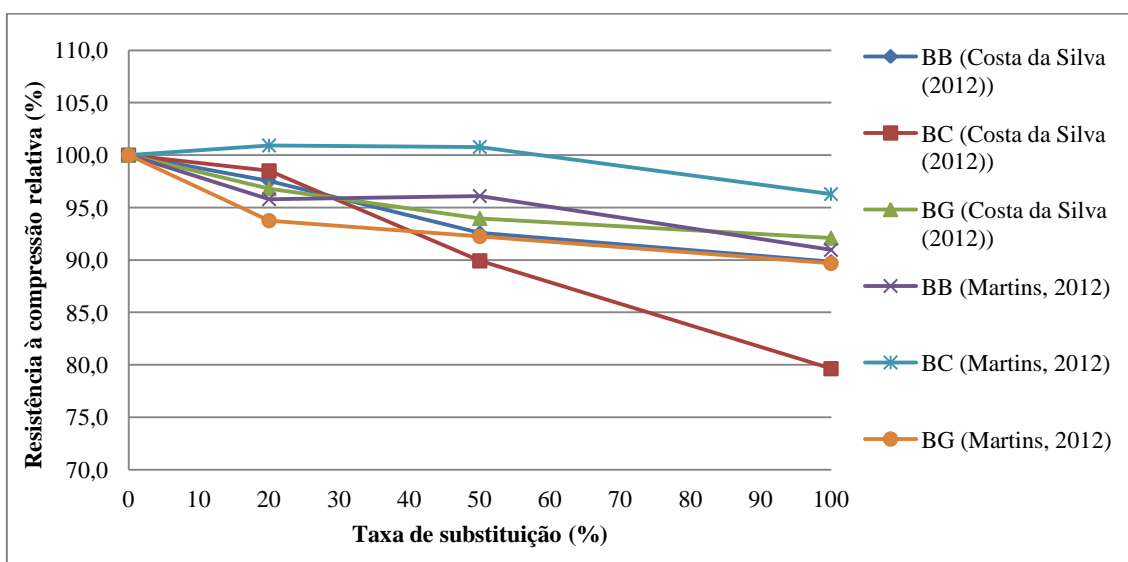


Figura 4.22 - Comparação de resultados do ensaio de compressão aos 28 dias com Martins (2012)

Da análise da Figura 4.22, conclui-se que a substituição de agregados primários grossos por agregados secundários grossos de mármore segue a mesma tendência observada para a substituição de agregados finos. Observa-se que, à exceção da família BC, as famílias apresentam variações de resistência semelhantes para a substituição de grossos e finos.

Examinando os restantes trabalhos estudados, conclui-se que a maioria dos investigadores chegou a conclusões semelhantes às observadas nesta investigação: Aruntas et al. (2010) concluíram que nos seus betões ocorre um decréscimo de resistência à compressão com o aumento da taxa de incorporação de agregados secundários; Corinaldesi et al. (2010) observaram que, para uma taxa de 10% de substituição dos agregados finos primários por agregados secundários de mármore, ocorre um decréscimo ligeiro na resistência à compressão do betão.

**4.4.2. Resistência à tração por compressão diametral**

Para determinar a resistência à tração por compressão diametral, seguiu-se a metodologia descrita no subcapítulo 3.6.2 e na norma NP EN 12390-6 (2011).

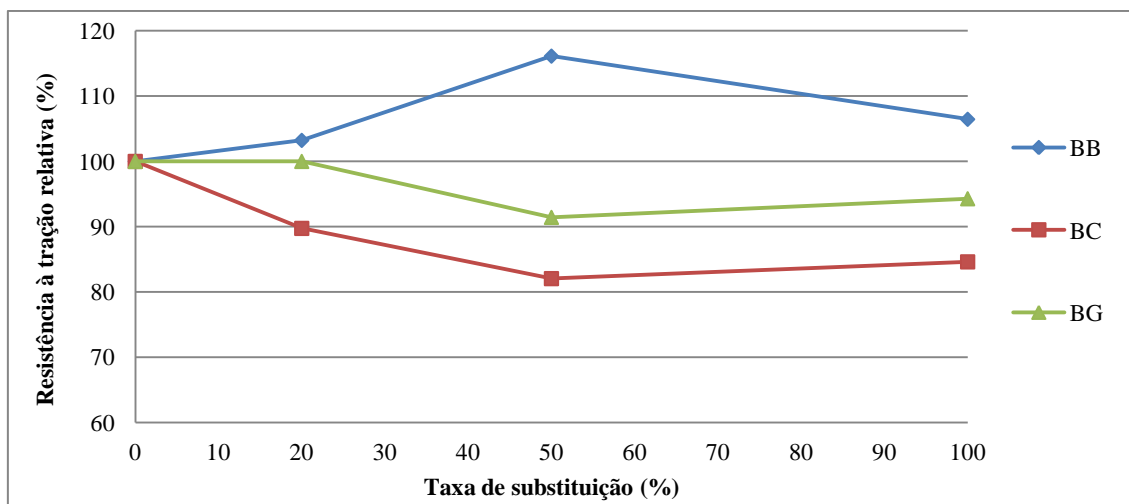
Os resultados respeitantes a este ensaio, realizado apenas na 3ª fase experimental, estão sumarizados na Tabela 4.35. A informação relativa aos valores individuais de cada provete e os respetivos cálculos intermédios encontram-se no ANEXO I. A mesma tabela, para além da resistência à tração por compressão diametral, para todos os betões aos 28 dias, mostra ainda as variações relativas para o betão de referência.

**Tabela 4.35 - Resistência à tração por compressão diametral**

	Percentagem de substituição							
	0		20		50		100	
	fctm,sp,28 (MPa)	$\Delta$ (%)	fctm,sp,28 (MPa)	$\Delta$ (%)	fctm,sp,28 (MPa)	$\Delta$ (%)	fctm,28 (MPa)	$\Delta$ (%)
BB	3,5	-	3,5	1,5	4,0	15,7	3,6	3,6
BC	4,4		3,9	-11,4	3,5	-19,4	3,6	-17,5
BG	3,9		3,9	-0,3	3,5	-9,7	3,6	-7,9

A tensão de rotura à tração dos betões de referência tem de ser conferida pela sua classe de resistência à compressão. Para isso, consulte-se o EC2 e leia-se que, para um C35/45, a resistência média à tração deverá rondar 3.2 MPa. A Tabela 4.35 apresenta valores ligeiramente superiores. No entanto, o mesmo regulamento recomenda que a tensão de rotura à tração ( $f_{ctm}$ ) resulte da multiplicação do valor obtido neste ensaio ( $f_{ctm,sp}$ ) por 0.9. Deste modo, os valores devem ser da ordem de 3,6 MPa para corresponder à classe de resistência designada. Esta discrepância poderá resultar da variabilidade característica deste ensaio associada a um procedimento regulamentar demasiado conservativo.

Para compreender a influência da percentagem de substituição na resistência à tração, apresentam-se os resultados da Tabela 4.35 na Figura 4.23.



**Figura 4.23 - Influência da percentagem de substituição de agregados na perda relativa de resistência à tração para o betão de referência (28 dias)**

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Identicamente à tendência expressa na resistência à compressão aos 28 dias, observa-se nas famílias BC e BG uma redução de desempenho, para qualquer padrão de substituição, com o aumento da taxa de substituição de agregados. As razões que fundamentam este comportamento (o aumento da relação A/C com a taxa de substituição) encontram completo paralelismo nas que justificam a perda de resistência à compressão. No entanto, a família BB apresenta um aumento de resistência, contrariamente à tendência seguida pelas duas restantes famílias e aos resultados observados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cura. Esta tendência é explicada pelo facto de no processo do ensaio a carga ser aplicada segundo um plano, ou seja, a força aplicada pela peça de carga será distribuída por uma secção transversal do provete. Deste modo, devido à geometria lamelar das partículas de basalto, vão formar-se, na referida superfície, zonas mais fracas o que dá origem a uma rotura precoce, por tração, no caso do betão com agregados finos de basalto. Contrariamente, no ensaio de resistência à compressão a força é aplicada e distribuída numa superfície superior e, portanto, afetando um número estatisticamente superior de partículas. Para a resistência à compressão da ordem de grandeza das obtidas nesta dissertação, a superfície de rotura atravessa as partículas; como as partículas de basalto são mais resistentes, a resistência à compressão do betão é maior do que quando são substituídas por partículas de mármore (Figura 4.15). Esta tendência pode ter sido ampliada pela menor força intermolecular entre a pasta cimentícia e os agregados de basalto (ligações de Van der Waals). Tasong et al. (1999) referiram no seu estudo que as reações químicas entre os agregados de basalto e a pasta de cimento resultam num decréscimo da força de ligação. Concluíram também que a resistência à tração da ligação dos agregados de basalto à pasta de cimento é mais fraca que a dos agregados de calcário e de quartzito. Os mesmos autores referem que a decomposição química dos feldspatos e outros materiais na superfície dos agregados de basalto em contacto com a pasta de cimento reduzem a rugosidade da superfície, tornando a resistência da ligação mais fraca. No presente estudo, apenas foi possível efetuar o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. No entanto, devido aos fatores referidos, seria interessante observar os resultados desta propriedade através do ensaio de tração pura.

Para prever a variação de resistência à tração, à semelhança do que foi feito no subcapítulo 4.4.1 para a resistência à compressão, procede-se ao ajustamento dos resultados a funções do tipo linear (Eq 4.5), polinomial (Eq 4.6) e exponencial (Eq 4.7).

$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,Br}} = -q_l \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.5}$$

$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.6}$$

$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,Br}} = 100 \cdot e^{-q_e \cdot X} \quad \text{Eq 4.7}$$

Onde:

- $f_{ct}$  é a resistência à tração do betão com substituição de agregados;
- $f_{ct,Br}$  é a resistência à tração do betão de referência;
- $X$  é a percentagem de substituição de agregados;
- $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Deste modo, são apresentados na Tabela 4.36 os valores dos parâmetros de ajustamento ( $q_l$ ,  $q_{p1}$  e  $q_{p2}$ ) que conduzem aos melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

Tabela 4.36 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.5, 4.6 e 4.7 para os resultados à tração aos 28 dias

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	-0,1175	0,0803	-0,0039	0,4617	0,8073	0,0011	0,0913
BC	0,2047	0,3475	0,0042	-0,5757	0,9986	0,0020	0,3583
BG	0,0775	0,4809	0,0013	-0,1954	0,7064	0,0004	0,4710

À semelhança dos resultados obtidos para a resistência à compressão, a Tabela 4.36 demonstra que, com base nos valores do coeficiente de correlação, a equação polinomial é a única que apresenta valores aceitáveis de correlação para a variação da resistência à tração com a taxa de substituição para as várias famílias de betões. As restantes equações não apresentam uma boa aproximação em nenhum dos casos.

Na Figura 4.24, apresenta-se a resistência relativa à compressão aos 28 dias em função da resistência relativa à tração aos 28 dias, sendo o ponto de coordenadas (100;100) o correspondente aos betões de referência (BRB, BRC e BRG).

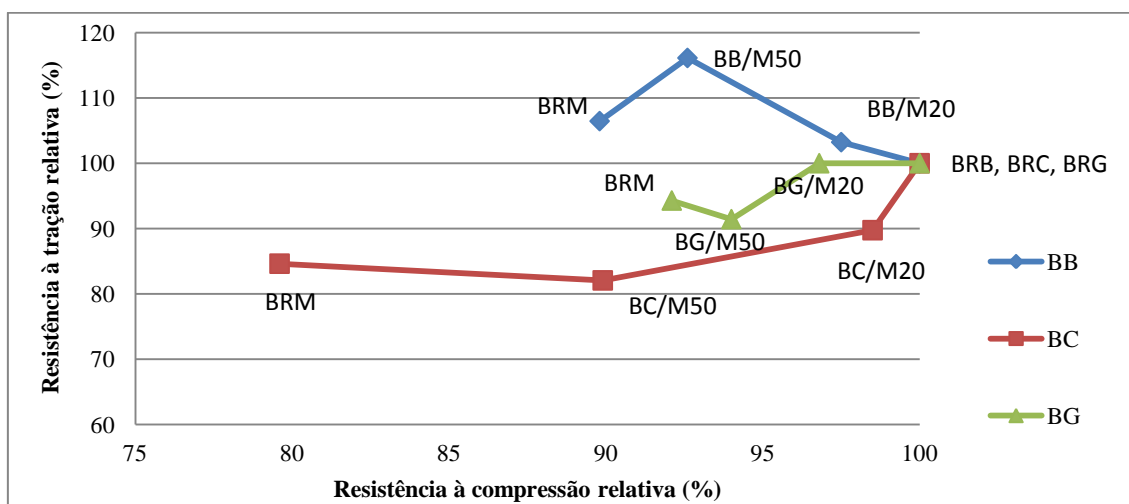


Figura 4.24 - Resistência relativa à compressão aos 28 dias em função da resistência relativa à tração aos 28 dias

A Figura 4.24 demonstra a dependência existente entre os resultados da resistência à compressão e à tração. Analisando a figura, chega-se à conclusão que, nas famílias BC e BG, quando há um decréscimo de resistência à tração, este é aproximadamente acompanhado por um decréscimo de resistência à compressão. A família BB apresenta uma tendência contrária às duas restantes, ou seja, observa-se um aumento de resistência à tração com o decréscimo de resistência à compressão, pelas razões referidas atrás.

Nas Figuras 4.25 e 4.26, em função da percentagem de agregados substituídos, faz-se a comparação da resistência à tração relativa entre este e os estudos efetuados por Martins (2012) e Hebhouh et al. (2011).

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

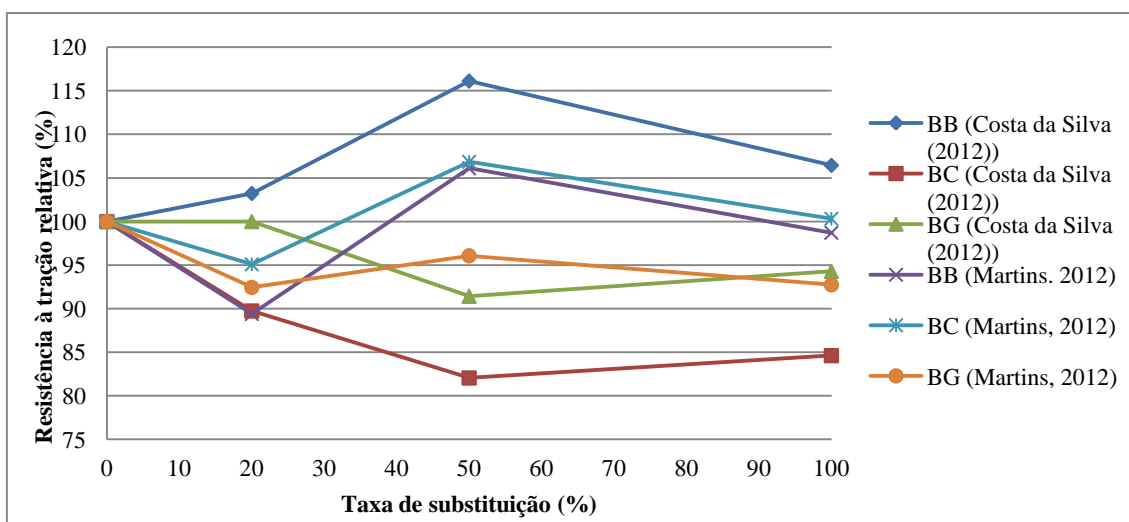


Figura 4.25 - Comparação de resultados do ensaio de tração aos 28 dias com Martins (2012)

A análise da Figura 4.25 permite concluir que a tendência observada nos betões produzidos por Martins (2012) não é a mesma do que nos produzidos nesta dissertação. Como concluído, à exceção da família BB, as famílias estudadas nesta dissertação apresentam um decréscimo da resistência com o aumento da taxa de substituição. No estudo efetuado por Martins (2012), observa-se uma tendência irregular com o aumento da taxa de incorporação de agregados secundários grossos de mármore.

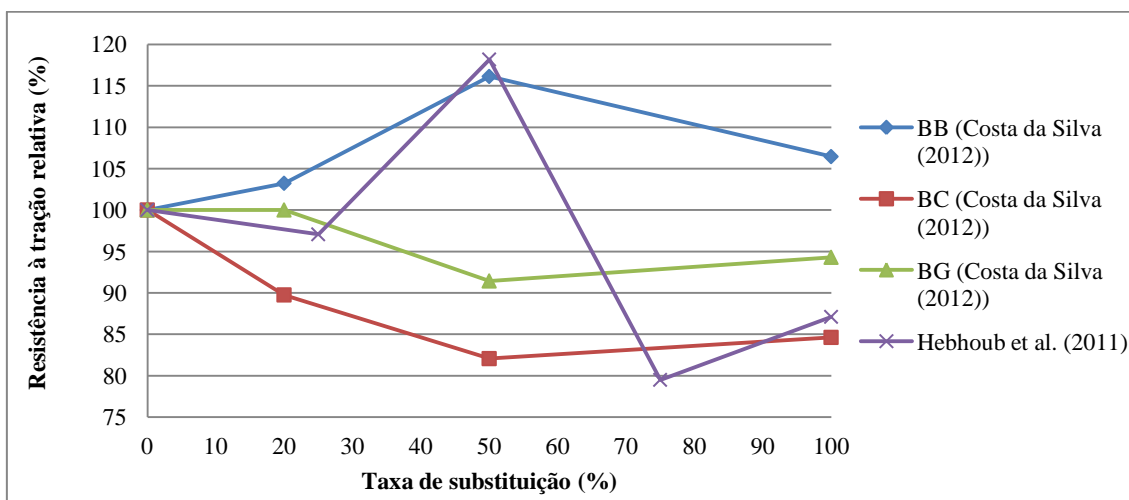


Figura 4.26 - Comparação de resultados do ensaio de tração aos 28 dias com Hebhoub et al. (2011)

A Figura 2.26 demonstra que a comparação de resultados com Hebhoub et al. (2011) não é possível. Os resultados obtidos por este autor apresentam grande variação de resistência e não seguem uma tendência. Belachia e Hebhoub (2011), no seu estudo, concluíram que a resistência à tração baixa com a percentagem de substituição de agregados e aumenta com o decréscimo da relação A/C, conclusões também alcançadas no presente estudo. Aruntas et al. (2010) chegaram a conclusões semelhantes, isto é, a incorporação de agregados finos secundários resulta numa ligeira diminuição da resistência à tração.

**4.4.3. Módulo de elasticidade**

Com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade dos provetes executados, utilizou-se a metodologia e princípios descritos no subcapítulo 3.6.3 e na norma LNEC E-397.

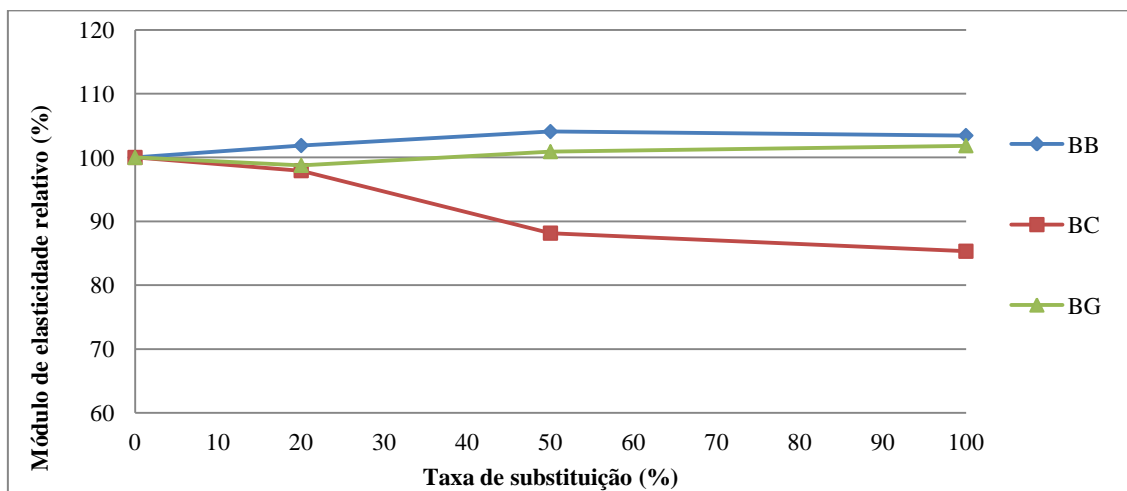
Os resultados respeitantes a este ensaio, realizado apenas na 3ª fase experimental, estão sumarizados na Tabela 4.37. A informação relativa aos valores individuais de cada provete e os respetivos cálculos intermédios encontram-se no ANEXO J. O mesmo quadro, para além do módulo de elasticidade, para todos os provetes aos 28 dias, mostra ainda as variações relativas para o betão de referência.

**Tabela 4.37- Módulo de elasticidade aos 28 dias**

	Percentagem de substituição							
	0		20		50		100	
	$E_{cm,28}$ (GPa)	$\Delta$ (%)	$E_{cm,28}$ (GPa)	$\Delta$ (%)	$E_{cm,28}$ (GPa)	$\Delta$ (%)	$E_{cm,28}$ (GPa)	$\Delta$ (%)
BB	32,0	-	32,6	1,9	33,3	4,1	33,1	3,5
BC	38,8		38,0	-2,1	34,2	-11,8	33,1	-14,6
BG	32,5		32,1	-1,0	32,8	1,2	33,1	2,1

Pela análise da Tabela 4.37, pode-se concluir que os valores do módulo de elasticidade da família de betões BC são mais elevados do que os das restantes famílias. Analisando os resultados da família de betões BC nos ensaios de resistência à compressão e à tração (Tabelas 4.30, 4.31, 4.32 e 4.35), pode-se observar que esta obteve valores mais elevados do que as duas restantes, especialmente nos betões BRC e BC/M20. Como concluído na Tabela 4.17, a areia de rio apresenta uma absorção de água baixa, que contribuiu para relações A/C baixas na família de betões BC (Tabela 4.24). Deste modo, os valores elevados de resistência e módulo de elasticidade obtidos para esta família de betões podem ter sido influenciados pelas baixas relações A/C observadas.

Para melhor entendimento da influência da percentagem de substituição de agregados no módulo de elasticidade do betão, procede-se ao tratamento dos resultados através da Figura 4.27.



**Figura 4.27 - Influência da percentagem de substituição de agregados na redução do módulo de elasticidade para o betão de referência aos 28 dias**



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

A observação da Figura 4.27 mostra que não há alterações significativas nos valores do módulo de elasticidade com o aumento da percentagem de substituição de agregados. As famílias BB e BG demonstram valores praticamente constantes em todas as taxas de substituição. A família BC é a única que regista uma variação (14.5% na taxa de substituição de 100%).

Para prever a variação dos valores do módulo de elasticidade, à semelhança do que foi feito no subcapítulo 4.4.1 e 4.4.2 para a resistência à compressão e à tração, procede-se ao ajustamento dos resultados a funções do tipo linear (Eq 4.8), polinomial (Eq 4.9) e exponencial (Eq 4.10).

$$\frac{E_{cm}}{E_{cm,Br}} = -q_l \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.8}$$

$$\frac{E_{cm}}{E_{cm,Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.9}$$

$$\frac{E_{cm}}{E_{cm,Br}} = 100 \cdot e^{-q_e \cdot X} \quad \text{Eq 4.10}$$

Onde:

- $E_{cm}$  é o valor do módulo de elasticidade do betão com substituição de agregados;
- $E_{cm,Br}$  é o valor do módulo de elasticidade do betão de referência;
- $X$  é a percentagem de substituição de agregados;
- $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

A Tabela 4.38 mostra os valores dos parâmetros de ajustamento ( $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$ ) das equações 4.8, 4.9 e 4.10, que conduzem aos melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

**Tabela 4.38 - Parâmetros e dados estatísticos das Eq 4.8, 4.9 e 4.10 para os resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	-0,0453	0,4562	-0,0009	0,1222	0,993	0,0004	0,4548
BC	0,163	0,8862	0,0011	-0,2565	0,9363	0,0020	0,8925
BG	-0,0160	0,5214	0,0003	-0,0117	0,6532	0,0002	0,516

Os resultados obtidos na Tabela 4.38 demonstram novamente que a função polinomial é a que melhor explica a variação do módulo de elasticidade com o aumento da taxa de substituição. Os baixos valores dos coeficientes da família BG são atribuídos ao facto de o módulo de elasticidade, neste caso, apresentar uma tendência quase constante.

Durante a fase de pesquisa, alguns autores referiram que havia uma forte relação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência a compressão. Deste modo, na Figura 4.28, é apresentada a resistência relativa à compressão aos 28 dias em função do módulo de elasticidade relativo aos 28 dias, sendo o ponto de coordenadas (100;100) o correspondente aos betões de referência (BRB, BRC e BRG).

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

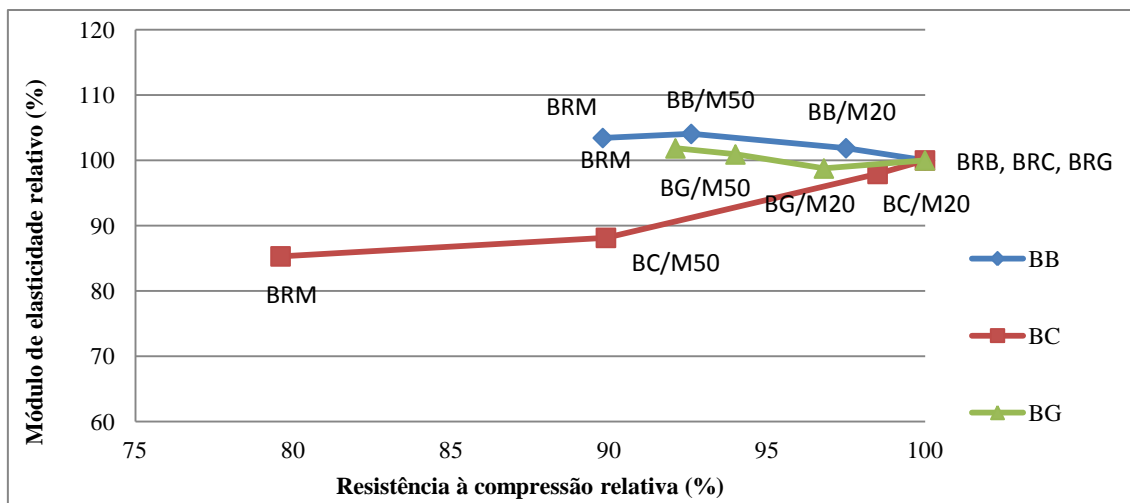


Figura 4.28 - Resistência relativa à compressão aos 28 dias em função do módulo de elasticidade relativo aos 28 dias

Analisando a Figura 4.28, observa-se que o caso em que a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão é mais evidente é a família BC, em que há uma clara descida dos valores do módulo de elasticidade à medida que a resistência à compressão diminui. As famílias de betões BG e BC apresentam uma baixa variação, como já concluído, da resistência à compressão e dos valores do módulo de elasticidade, sendo difícil tirar conclusões destes casos.

Procede-se na Figura 4.29 à comparação dos valores obtidos nesta dissertação com os valores obtidos para o módulo de elasticidade por Martins (2012).

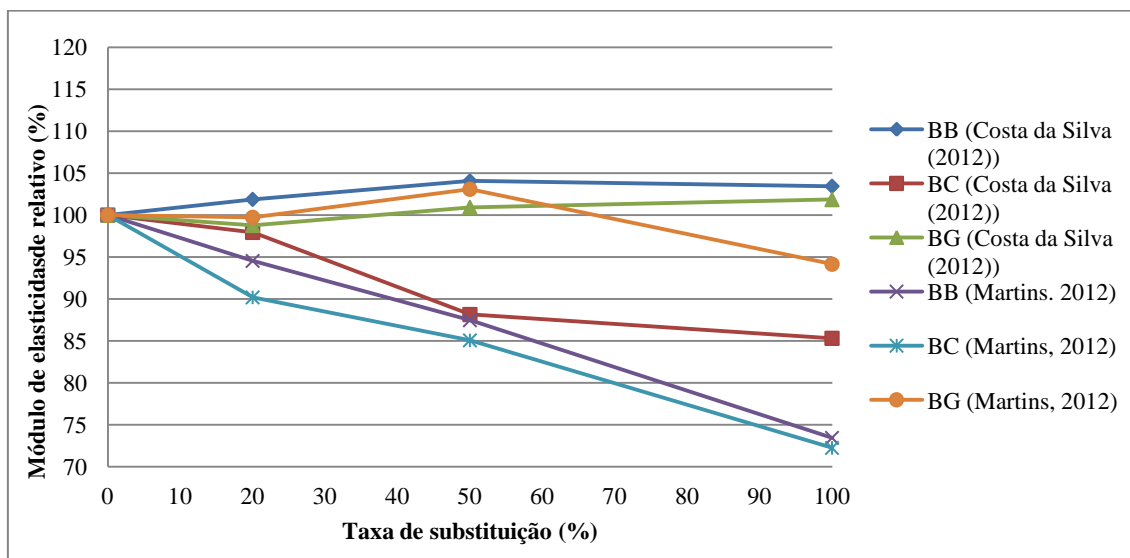


Figura 4.29 - Comparação de resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias com Martins (2012)

Da análise da Figura 4.29, pode-se concluir que a substituição de agregados grossos tem uma influência significativamente superior nos valores do módulo de elasticidade do que a substituição de agregados finos.

Como referido no subcapítulo 2.3.4, o número de estudos que apresenta valores do módulo de elasticidade é muito reduzido.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

### 4.4.4. Resistência à abrasão

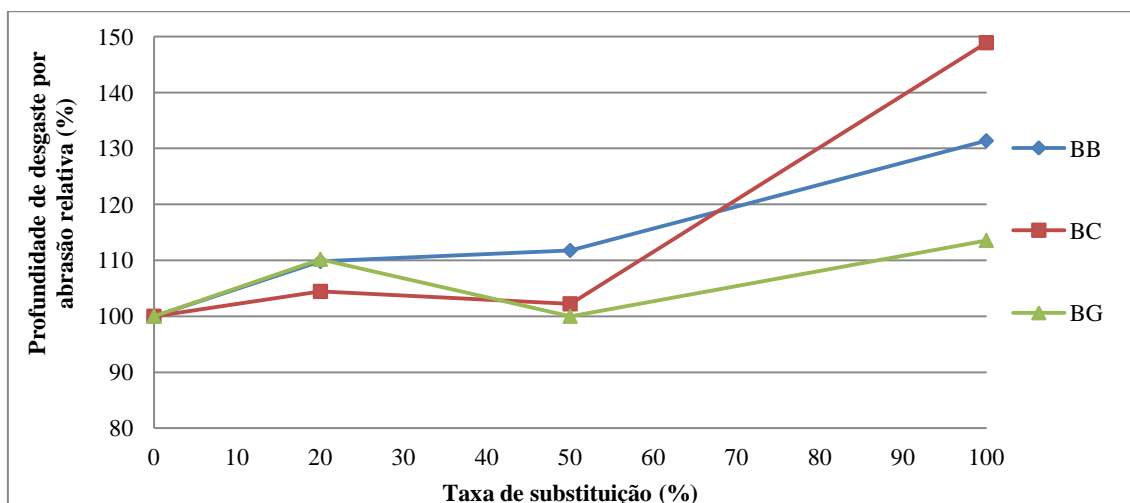
A determinação da resistência ao desgaste por abrasão segue a metodologia e princípios descritos no subcapítulo 3.6.4 e de forma mais detalhada, na norma DIN 52108.

Os resultados referentes à 3.<sup>a</sup> fase experimental, designadamente o desgaste médio registado para cada tipo de betão e a respetiva variação para o betão de referência, estão apresentados na Tabela 4.39. Os resultados são apresentados em detalhe no ANEXO K.

**Tabela 4.39 - Profundidade de desgaste por abrasão, após 91 dias**

	Percentagem de substituição							
	0		20		50		100	
	$\Delta L$ (mm)	$\Delta$ (%)	$\Delta L$ (mm)	$\Delta$ (%)	$\Delta L$ (mm)	$\Delta$ (%)	$\Delta L$ (mm)	$\Delta$ (%)
BB	5,1	-	5,6	10,1	5,7	11,1	6,7	31,9
BC	4,5		4,7	2,5	4,6	1,9	6,7	47,8
BG	5,9		6,5	9,8	5,9	0,2	6,7	13,7

Para melhor entendimento da influência da percentagem de substituição de agregados na resistência à abrasão do betão, procede-se ao tratamento dos resultados através da Figura 4.30.



**Figura 4.30 - Influência da percentagem de substituição de agregados na percentagem da profundidade de desgaste para o betão de referência aos 91 dias**

Segundo a Figura 4.30, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem uma influência negativa na resistência à abrasão. Observou-se em todos os betões uma diminuição da resistência à abrasão, representada pela maior profundidade de desgaste. Para as taxas de substituição de 20 e 50%, os betões apresentaram perdas de resistência de 0.5 a 10%. Os betões incorporando apenas agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore apresentaram um mau comportamento ao desgaste, registando-se uma perda de 50% no caso mais gravoso. As principais causas deste decréscimo são o aumento da relação a/c com a incorporação de agregados secundários de mármore e a elevada razão entre  $D_{máx}$  e a dimensão do provete.

André (2012) na sua dissertação, efetuou o ensaio de desgaste de *Los Angeles* em agregados grossos de calcário, basalto, granito e mármore. Na Tabela 4.40, são apresentados os resultados obtidos.

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

**Tabela 4.40 - Desgaste de Los Angeles (André, 2012)**

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

Da análise da Tabela 4.40 pode-se concluir que o mármore é o agregado ensaiado mais sensível ao desgaste. Os resultados presentes na Figura 4.30 demonstram que a crescente incorporação de agregados secundários de mármore resulta numa diminuição da resistência à abrasão. Deste modo, uma possível causa secundária para o decréscimo é o comportamento do mármore face ao desgaste relativamente aos restantes agregados principais, a sua incorporação no betão em substituição dos agregados principais resulta numa diminuição da resistência à abrasão.

Observa-se, na Figura 4.30, que o betão BG/M50 não segue a tendência dos restantes, ou seja, há uma melhoria do BG/M20 para este. Este aumento de resistência não seria expectável uma vez que os agregados secundários têm pior comportamento ao desgaste do que os agregados primários de granito. Deste modo, procedeu-se à análise dos resultados detalhados do BG/M50 apresentados no ANEXO K. Desta análise, foi possível concluir que um dos provetes ensaiados apresenta um valor mais baixo do que os restantes e, caso não se considere este valor, a profundidade de desgaste aumenta. O valor erróneo de resistência deste provete pode ter sido causado por um erro laboratorial não identificado bem como por uma deficiente leitura no decorrer do ensaio. Observa-se uma tendência semelhante no BC/M50. Para este betão, foi também consultado o ANEXO K e concluiu-se que também havia um provete com um valor significativamente mais baixo do que os restantes dois. À semelhança do BG/M50, se se retirar este provete, o BC/M50 apresenta valores expectáveis de resistência à abrasão.

Numa tentativa de prever a variação dos valores da resistência à abrasão, à semelhança do que foi feito nos subcapítulos 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3 para a resistência à compressão e à tração e o módulo de elasticidade, procede-se ao ajustamento dos resultados a funções do tipo linear (Eq 4.11), polinomial (Eq 4.12) e exponencial (Eq 4.13).

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = -q_l \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.11}$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.12}$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = 100 \cdot e^{-q_e \cdot X} \quad \text{Eq 4.13}$$

Onde:

- $\Delta L$  é a profundidade de desgaste do betão com substituição de agregados;
- $\Delta L_{Br}$  é a profundidade de desgaste do betão de referência;
- $X$  é a percentagem de substituição de agregados;
- $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

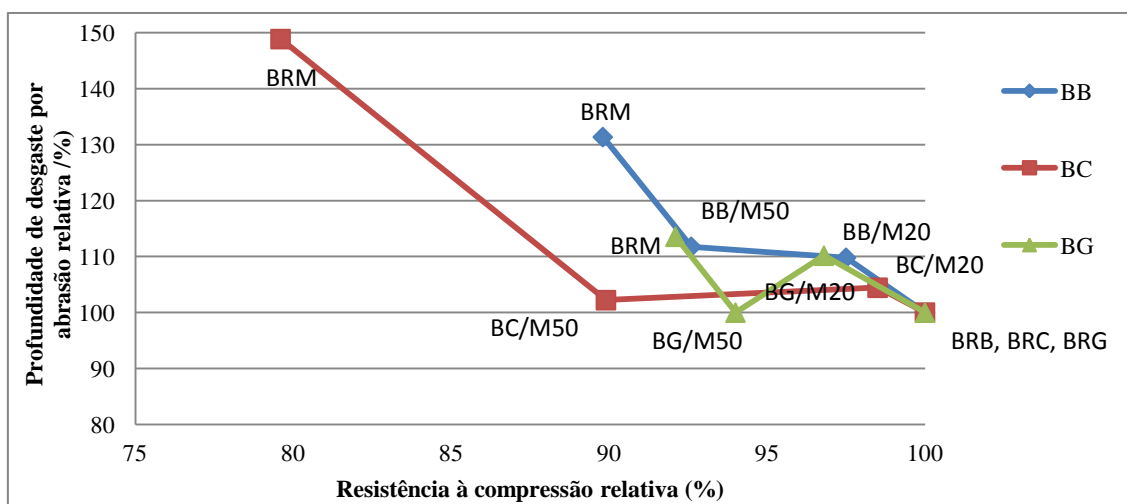
A Tabela 4.41 mostra os valores dos parâmetros de ajustamento ( $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$ ) das equações 4.11, 4.12 e 4.13, que conduzem aos melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

**Tabela 4.41 - Parâmetros e dados estatísticos das equações 4.11, 4.12 e 4.13 para os resultados da profundidade de desgaste por abrasão após 91 dias.**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	-0,3040	0,9486	0,0004	0,2705	0,9506	0,0027	0,9446
BC	-0,3945	0,7521	0,0071	-0,2327	0,9662	0,0032	0,7615
BG	-0,1209	0,3257	0,0004	0,0864	0,3333	0,0011	0,3152

Os resultados apresentados na Tabela 4.41 permitem afirmar que, nas famílias BB e BC, a função polinomial consiste numa boa aproximação para a variação da resistência à abrasão, tendo como base os valores de correlação. Observa-se que os resultados obtidos para a família BG foram inconclusivos e que não foi possível estabelecer uma função que permitisse prever a variação da resistência à abrasão desta família de betões.

À semelhança dos valores do módulo de elasticidade, a resistência à abrasão é, por vezes, relacionada com a resistência à compressão. Deste modo, apresenta-se na Figura 4.31 a resistência à compressão relativa aos 28 dias em função da profundidade de desgaste por abrasão relativa aos 91 dias, sendo o ponto de coordenadas (100;100) o correspondente aos betões de referência (BRB, BRC e BRG).



**Figura 4.31 - Resistência à compressão relativa aos 28 dias em função da profundidade de desgaste por abrasão relativa aos 91 dias**

Através da Figura 4.31, pode-se concluir que há ligação entre os resultados da resistência à abrasão e resistência à compressão. A observação da Figura 4.31 permite concluir que, à medida que a resistência à compressão decresce com a taxa de substituição de agregados, a resistência à abrasão também diminui. Esta tendência encontra apenas duas exceções, no BG/M50 e no BC/M50. Estes casos foram discutidos na Figura 4.30 e estes resultados devem-se a dois provetes que apresentam maus valores, resultantes de erros na campanha experimental.

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Pelo facto de se ter observado uma relação interessante entre a resistência à abrasão e a resistência à compressão, procede-se na Tabela 4.42 ao ajustamento dos resultados da Figura 4.31a funções do tipo linear (Eq 4.14), polinomial (Eq 4.15) e exponencial (Eq 4.16).

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = -q_l \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.14}$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = q_{p1} \cdot X^2 + q_{p2} \cdot X + 100 \quad \text{Eq 4.15}$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{Br}} = 100 \cdot e^{-q_e \cdot X} \quad \text{Eq 4.16}$$

Onde:

- $\Delta L$  é a profundidade de desgaste do betão com substituição de agregados;
- $\Delta L_{Br}$  é a profundidade de desgaste do betão de referência;
- $X$  é a percentagem da resistência à compressão para o betão de referência;
- $q_l$ ,  $q_{p1}$ ,  $q_{p2}$  e  $q_e$  são coeficientes que dependem do tipo de agregado.

**Tabela 4.42 - Parâmetros e dados estatísticos das equações 4.14, 4.15 e 4.16 para os resultados da profundidade de desgaste por abrasão após 91 dias.**

	Função linear		Função polinomial			Função exponencial	
	$q_l$	$R^2$	$q_{p1}$	$q_{p2}$	$R^2$	$q_e$	$R^2$
BB	2,5846	0,8259	0,2449	-49,073	0,8722	0,0220	0,8401
BC	2,201	0,7796	0,215	-40,843	0,9833	0,0180	0,7798
BG	1,0752	0,2805	0,0423	-9,205	0,2827	0,0100	0,2754

Da análise da Tabela 4.42, conclui-se que qualquer das funções representa a tendência da família BB, a função polinomial consiste numa boa aproximação para a variação da família BC e que não foi possível encontrar uma função que se ajustasse de forma aceitável à tendência seguida pela família BG. O facto de não se ter encontrado uma função para prever o comportamento da família de betões BG nas Figuras 4.30 e 4.31, pode ser explicado pelo tamanho reduzido da amostra ensaiada.

No ensaio de resistência à abrasão, os provetes são submetidos a 4 séries de 88 rotações no disco metálico. Entre cada uma destas séries, foi registada a massa do provete de modo a ser comparada com a inicial. Deste modo, apresenta-se nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 a perda de massa relativa à massa inicial em função do número de rotações do disco para as várias famílias de betões.

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

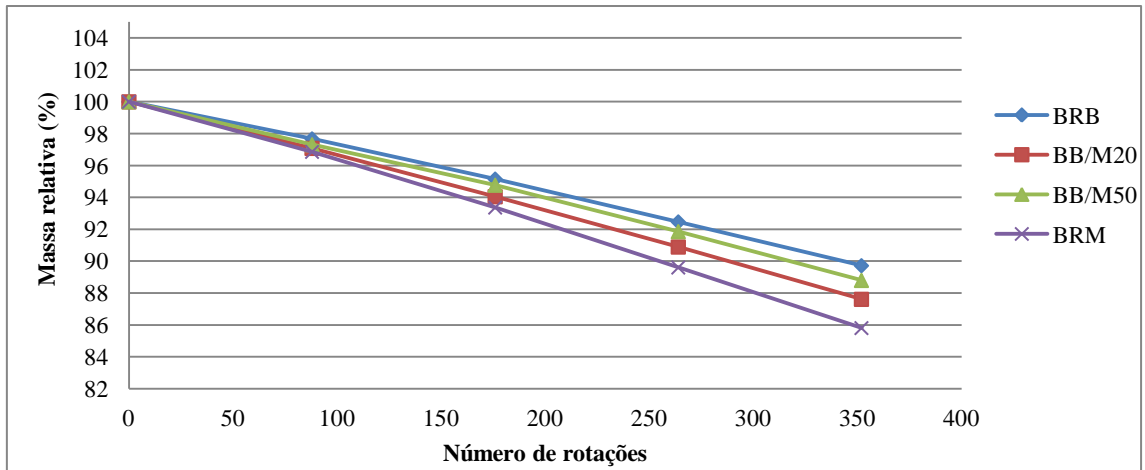


Figura 4.32 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BB aos 91 dias

A análise das Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 vem confirmar a conclusão referida, isto é, que a taxa de substituição de agregados prejudica a resistência à abrasão. Se se observar as figuras, facilmente se conclui que os betões que mais perdem massa com o número de ciclos são os com uma taxa de substituição de 100%, ou seja, o BRM. A apresentação destas figuras vem confirmar as conclusões já alcançadas.

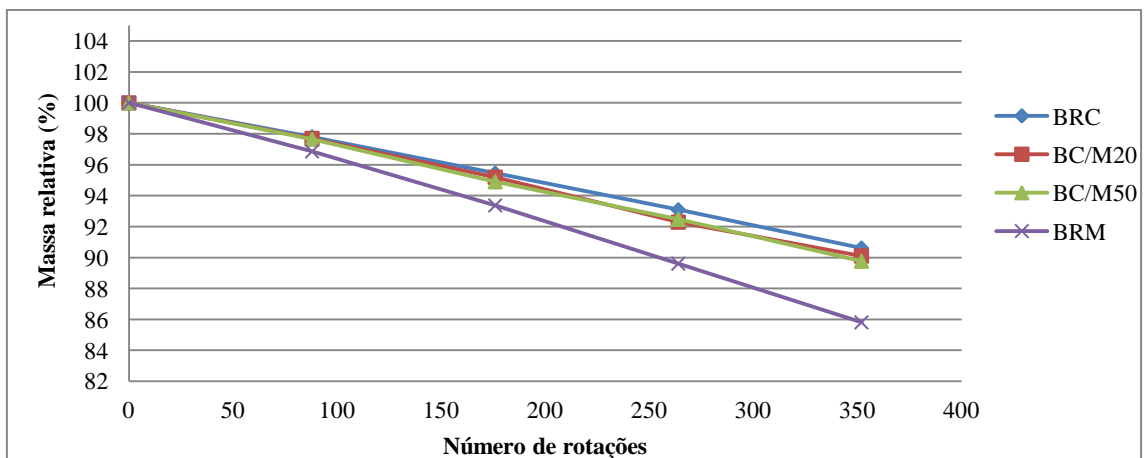


Figura 4.33 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BC aos 91 dias

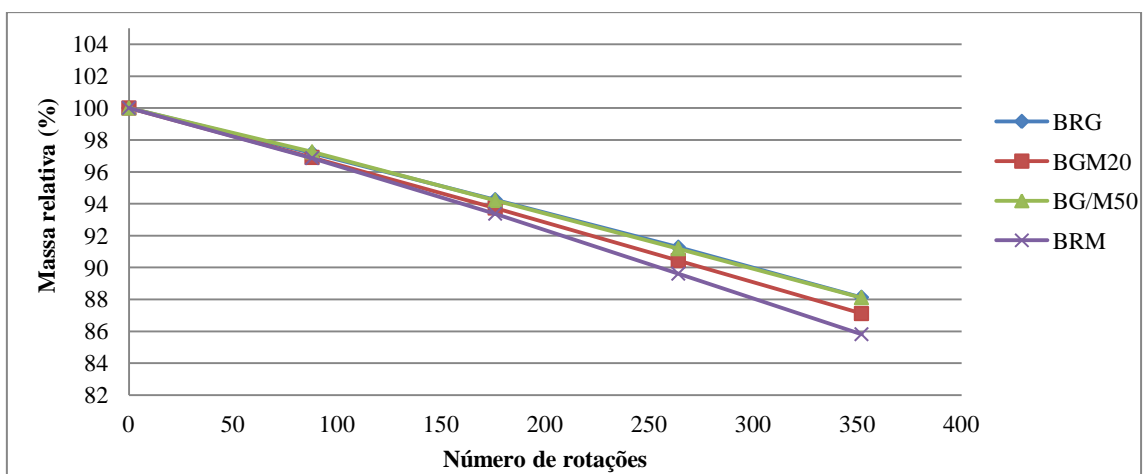


Figura 4.34 - Influência do número de rotações na percentagem da massa da família BG aos 91 dias

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Na Figura 4.35, é apresentada a comparação entre os resultados obtidos para a resistência à abrasão nesta dissertação e os valores obtidos por Martins (2012). Pode-se concluir que os betões com a incorporação de agregados secundários de mármore apresentam pior comportamento em ambos os casos de substituição (finos e grossos).

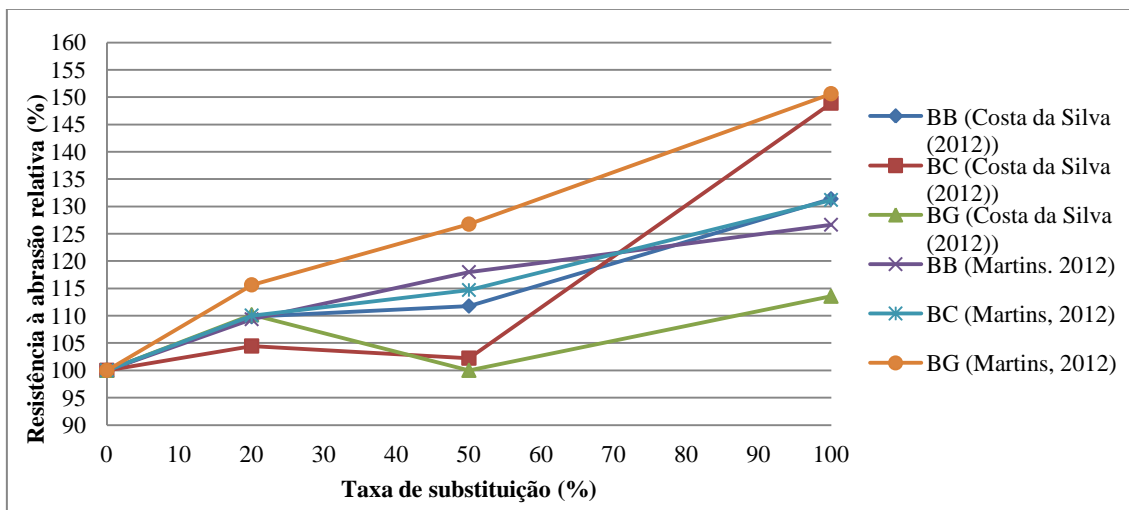


Figura 4.35 - Comparação de resultados da resistência à abrasão aos 91 dias com Martins (2012)

As conclusões alcançadas neste estudo foram também atingidas por Binici et al. (2008), ou seja, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem uma influência negativa na resistência à abrasão.

### 4.5. Conclusões

O desenvolvimento da campanha experimental permite dispor de uma série de resultados que caracterizam tanto os agregados, primários e secundários, como os betões no estado fresco e endurecido. Deste modo, pretende-se ir ao encontro dos objetivos deste estudo e avaliar a influência da percentagem de substituição e averiguar a interferência da incorporação dos agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore.

#### 4.5.1. Propriedades dos agregados

Concluiu-se neste estudo que os agregados finos primários e os agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore têm propriedades com valores da mesma ordem de grandeza. Observou-se que a massa volúmica dos agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore é ligeiramente mais baixa do que a do areia de basalto e superior à do areia de granito e da areia de rio. Chegou-se à mesma conclusão para a massa volúmica aparente.

Relativamente à absorção de água após 24 h de imersão, observou-se que os agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore registaram o valor mais baixo dos agregados usados nesta investigação.

#### 4.5.2. Propriedades dos betões no estado fresco

O estudo da bibliografia disponível permitiu prever, em traços gerais, o comportamento da trabalhabilidade do betão com incorporação de agregados secundários finos provenientes da indústria do mármore em função da relação A/C. A conclusão alcançada pelos vários autores estudados e comprovada pelos resultados deste estudo foi que a inclusão destes agregados no betão tem uma influência negativa na trabalhabilidade. Conclui-se que, de modo a manter a



## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

trabalhabilidade, é necessário aumentar a relação A/C à medida que a taxa de substituição de agregados aumenta.

No que se refere à massa volúmica do betão no estado fresco, concluiu-se que a inclusão de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore não altera significativamente esta propriedade, devendo-se ao facto de as massas volúmicas dos agregados primários e secundários terem um valor próximo.

### 4.5.3. Propriedades dos betões no estado endurecido

O presente estudo demonstra que a utilização de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no betão resulta, de um modo geral, num ligeiro decréscimo das suas propriedades mecânicas.

Cingindo a apreciação à resistência à compressão, concluiu-se que existe uma redução de desempenho com o aumento da taxa de substituição de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. No entanto, o decréscimo de desempenho observado nos betões não foi considerável e não põe em causa o uso destes agregados no betão.

No que respeita à resistência à tração por compressão diametral, os resultados não demonstram a mesma regularidade do caso anterior, o que se atribui à sensibilidade do ensaio a eventuais imperfeições na matriz cimentícia. Estes ensaios permitiram observar que, nas famílias BC e BG, há um ligeiro decréscimo da tensão de rotura à tração com o aumento da percentagem de substituição e que a família BB apresenta um comportamento contrário às restantes devido principalmente à geometria das partículas de areia de basalto.

O ensaio do módulo de elasticidade revelou baixa dependência da incorporação de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. Observou-se alguma dependência entre os resultados obtidos para a resistência à compressão e os valores do módulo de elasticidade.

O ensaio de resistência à abrasão demonstrou que o betão com incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore diminui essa resistência. Este ensaio demonstrou ter uma forte correlação com os valores de resistência à compressão.

Com o objetivo de fazer uma análise comparativa da redução das diferentes propriedades, para todos os betões, em função da percentagem de substituição, apresentam-se as Figuras 4.36, 4.37 e 4.38.

A análise das Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 permite concluir que, de todas as propriedades, o módulo de elasticidade é a que menos varia com a inclusão de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore, que a diminuição da resistência à compressão é acompanhada pelo aumento da profundidade de desgaste e que, à exceção da família BB, a resistência à tração acompanha a tendência seguida pela resistência à compressão.

## RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

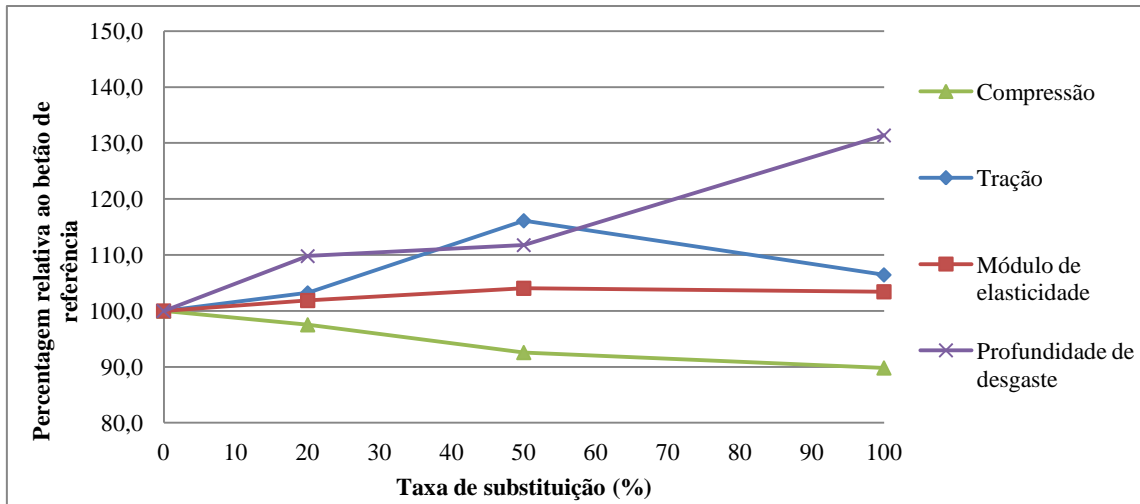


Figura 4.36 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BB

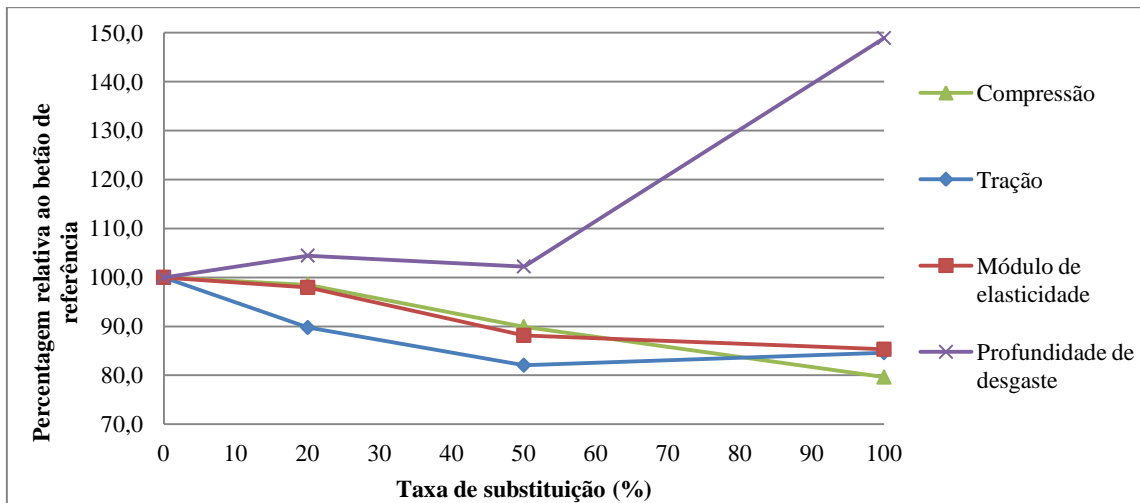


Figura 4.37 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BC

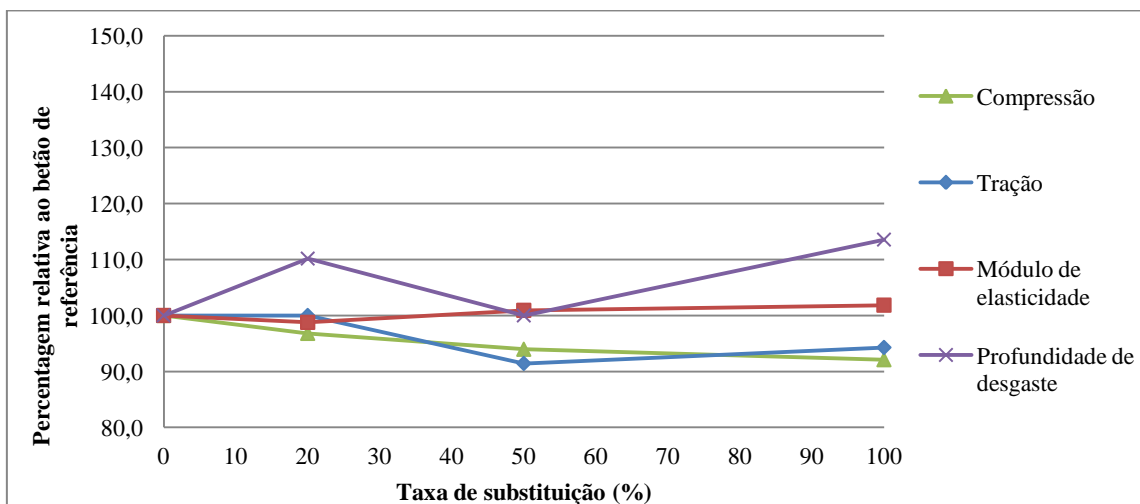


Figura 4.38 - Comparação das diferentes propriedades em função da taxa de substituição da família BG

## 5. Conclusão e desenvolvimentos futuros

### 5.1. Considerações finais

A legislação sucessivamente mais apertada tem reflexo na crescente consciencialização das populações para os problemas do desenvolvimento sustentável. Têm-se gerado pressões nas mais diversas indústrias para que haja, por um lado, responsabilização pela utilização de processos de fabrico poluentes e, por outro, compensações pelo tratamento de produtos em fim de vida (Valadares, 2009). Neste enquadramento, surge a temática desta dissertação que pretende dar utilidade às escombrelas de mármore resultantes da indústria de pedra ornamental.

A dimensão da indústria da construção, pelo volume de recursos envolvidos e pela variabilidade de aplicações disponíveis, possui grade potencial de absorção de resíduos. Já são conhecidas aplicações bem sucedidas na indústria da construção, como são exemplo os pavimentos rodoviários, barragens e túneis. No entanto, pretende-se alargar ainda mais o campo de aplicação, neste caso usando agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore em betão.

Para que seja possível agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore em betão, é fundamental compreender as suas propriedades do ponto de vista mecânico e de durabilidade. O conhecimento destas características permitirá tecer conclusões acerca da sua adequabilidade a aplicações correntes e perceber quais as limitações.

A presente dissertação objetivou perceber a influência do volume de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no desempenho mecânico do betão.

### 5.2. Conclusões gerais

A consulta da bibliografia disponível mostrou que já existe algum conhecimento desta matéria. Todavia, a existência de várias observações não consensuais, motivou o desenvolvimento da presente dissertação. Esta ambiciona contribuir para o conhecimento do uso de agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no betão.

No que respeita à consistência, concluiu-se que o aumento da percentagem de agregados secundários afeta negativamente a trabalhabilidade. Esta conclusão parece ser consensual para todos os autores estudados. No presente estudo, de modo a manter a trabalhabilidade dentro dos limites estabelecidos (classe de consistência S3), fez-se variar a relação A/C. Observou-se que a relação A/C tem tendência a aumentar com a taxa de incorporação de agregados secundários de mármore e que esta propriedade tem uma grande influência na resistência do betão no estado endurecido.

A massa volúmica do betão no estado fresco não apresenta uma variação significativa com a inclusão de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. No entanto, a variação observada respeita a ordem de grandeza das massas volúmicas dos agregados finos usados nas composições.

## CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na resistência à compressão, concluiu-se que: de um modo geral, há um decréscimo na resistência dos betões à medida que a percentagem de substituição de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore aumenta; a diminuição de resistência mais acentuada foi observada na família de betões BC, devendo-se este resultado ao baixo valor da relação A/C do betão de referência de areia de rio (BRC) em comparação com o valor da relação para a taxa de substituição de agregados de 100% (BRM); conseguiram-se bons valores de correlação para a variação da resistência à compressão em função da percentagem de substituição; a resistência à compressão das várias famílias de betões apresenta uma tendência semelhante aos betões convencionais no que respeita à evolução da resistência à compressão em função dos dias de cura; examinando os trabalhos estudados, conclui-se que a maioria dos investigadores chegou a conclusões semelhantes às observadas nesta investigação.

No que respeita à resistência à tração por compressão diametral, observou-se uma ligeira descida na resistência com o aumento da percentagem de substituição de agregados nas famílias BC e BG. Concluiu-se que a família BB apresenta uma tendência contrária às restantes, resultados que se atribuem principalmente à geometria das partículas de areia de basalto e à sua pior ligação intermolecular com a pasta de cimento. Na tentativa de aproximar a variação da resistência à tração em função da percentagem de substituição de agregados, conseguiram-se bons valores de correlação para a função polinomial. Observou-se a dependência entre a resistência à compressão e à tração, que foi especialmente evidente na família de betões BC.

O módulo de elasticidade foi a propriedade dos betões analisados que demonstrou menor dependência da incorporação de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. Observou-se que, no caso da família BC, onde houve uma maior variação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, é possível estabelecer uma relação entre as duas características. Devido à baixa variação das duas restantes famílias, não foi possível tirar nenhuma conclusão relacionada com a relação entre os valores do módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

A partir dos resultados da resistência à abrasão, concluiu-se que: a resistência à abrasão diminui com a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore; a maior perda de resistência registada foi de 50%, para o caso da taxa de substituição de 100% na família BC; a principal razão para a diminuição da resistência à abrasão é o decréscimo da relação a/c. Uma possível razão secundária que pode ter contribuído é a diferença da resistência ao desgaste dos agregados primários para os agregados secundários; à exceção da família BG, conseguiram-se bons valores de  $R^2$  para a função polinomial relacionando a profundidade de desgaste com a percentagem de substituição de agregados; há uma relação interessante entre a resistência à abrasão e à compressão, como foi observado nos valores de correlação resultantes das funções de aproximação apresentadas; a perda de massa é mais rápida para os betões com taxas de substituição de 100%.

Apresenta-se agora nas, Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, a variação percentual entre os resultados obtidos para os betões de referência e os betões com as várias taxas de substituição de agregados, para cada um dos ensaios efetuados nesta dissertação. Apresenta-se também a média da variação de resistência de cada família de betões na respetiva taxa de substituição.

DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

Tabela 5.1 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 20% para os ensaios efetuados

	Variação percentual entre o betão de referência e a taxa de 20%		
	BB	BC	BG
Massa volúmica (%)	↓ -0,95	↑ 1,07	→ -0,05
Resistência à compressão aos 7 dias (%)	↓ -6,07	↓ -6,34	↓ -2,54
Resistência à compressão aos 28 dias (%)	↓ -2,47	↓ -1,50	↓ -3,20
Resistência à compressão aos 56 dias (%)	↑ 7,82	↓ -1,96	↓ -3,04
Resistência à tração por compressão diametral (%)	↑ 3,23	↓ -10,26	→ 0,00
Módulo de elasticidade (%)	↑ 1,88	↓ -2,06	↓ -1,23
Resistência à abrasão (%)	↓ -9,80	↓ -4,44	↓ -10,17
Média da variação das propriedades mecânicas (%)	↓ -0,90	↓ -4,43	↓ -3,36

Tabela 5.2 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 50% para os ensaios efetuados

	Variação percentual entre o betão de referência e a taxa de 50%		
	BB	BC	BG
Massa volúmica (%)	↓ -1,13	↑ 1,18	↑ 0,83
Resistência à compressão aos 7 dias (%)	↓ -6,76	↓ -12,03	↓ -3,36
Resistência à compressão aos 28 dias (%)	↓ -7,42	↓ -10,08	↓ -6,03
Resistência à compressão aos 56 dias (%)	↑ 0,88	↓ -12,34	↓ -1,19
Resistência à tração por compressão diametral (%)	↑ 16,13	↓ -17,95	↓ -8,57
Módulo de elasticidade (%)	↑ 4,06	↓ -11,86	↑ 0,92
Resistência à abrasão (%)	↓ -11,76	↓ -2,22	→ 0,00
Média da variação das propriedades mecânicas (%)	↓ -0,81	↓ -11,08	↓ -3,04

Tabela 5.3 - Variação percentual entre o resultado obtido para o betão de referência e o betão com taxa de substituição de agregados de 100% para os ensaios efetuados

	Variação percentual entre o betão de referência e a taxa de 100%		
	BB	BC	BG
Massa volúmica (%)	↓ -1,03	↑ 1,32	↑ 1,10
Resistência à compressão aos 7 dias (%)	↓ -3,52	↓ -19,28	↓ -7,18
Resistência à compressão aos 28 dias (%)	↓ -10,18	↓ -20,36	↓ -7,90
Resistência à compressão aos 56 dias (%)	↓ -5,14	↓ -17,09	↑ 0,14
Resistência à tração por compressão diametral (%)	↑ 6,45	↓ -15,38	↓ -5,71
Módulo de elasticidade (%)	↑ 3,44	↓ -14,69	↑ 1,85
Resistência à abrasão (%)	↓ -31,37	↓ -48,89	↓ -13,56
Média da variação das propriedades mecânicas (%)	↓ -6,72	↓ -22,62	↓ -5,40

## CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Da análise das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, pode-se concluir que a média das resistências das famílias de betões BB e BG tem um ligeiro decréscimo com o aumento da taxa de substituição de agregados. Como era expectável, a média das resistências da família BC é a que apresenta a diminuição mais acentuada. A Figura 5.1 vêm reforçar as tendências concluídas ao longo desta dissertação, demonstrando que, à medida que a taxa de substituição de agregados aumenta, as propriedades mecânicas dos betões vão diminuindo.

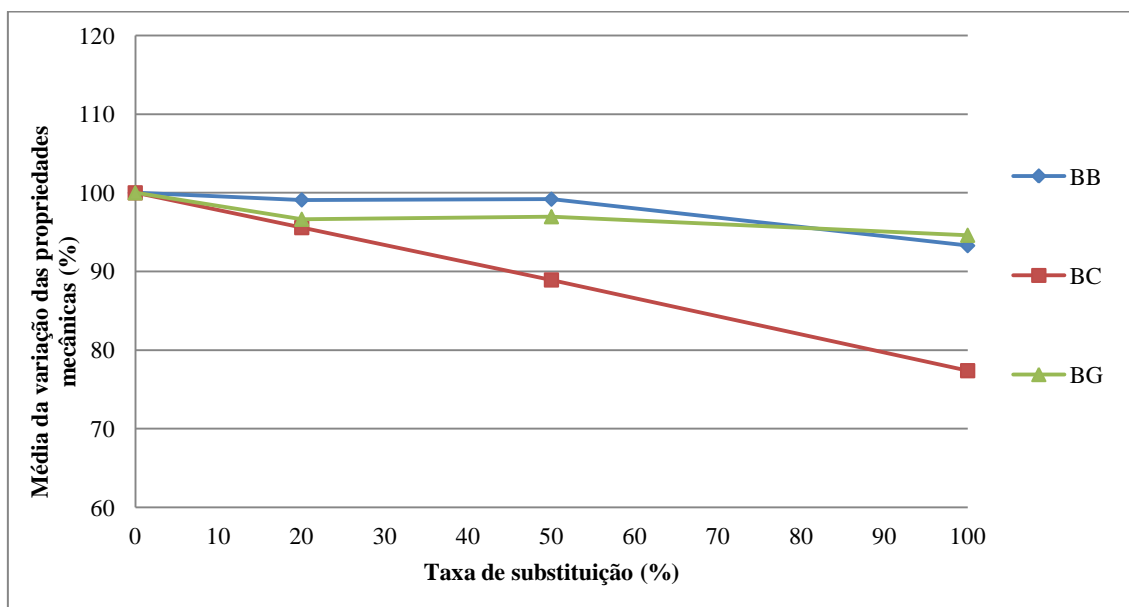


Figura 5.1 - Resistência média relativa em função da taxa de substituição

De um modo geral, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no betão apresentou resultados satisfatórios. Observou-se um decréscimo ligeiro nas propriedades mecânicas do betão, nomeadamente para as taxas de substituição mais elevadas. Os resultados obtidos neste estudo, de um modo geral, encontraram paralelismo com os obtidos pelos investigadores estudados, o que vem reforçar as conclusões por eles retiradas. Conclui-se que a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore não compromete as características mecânicas e que portanto podem ser usados como agregados finos em betões estruturais. Contudo, de modo a obter perdas de resistência de, no máximo 17%, aconselha-se a usar percentagens de substituição até 50%.

### 5.3. Propostas de desenvolvimento futuro

A realização da presente dissertação permitiu aprofundar o conhecimento das propriedades mecânicas de betões com agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. Deste modo, espera-se ter contribuído para encurtar a diferença temporal entre a investigação deste assunto e sua utilização concreta em soluções correntes.

Porém, subsistem questões que impõem avaliação. Neste sentido, julga-se oportuno desenvolver, futuramente, os seguintes temas:

- estudar o comportamento térmico e acústico de betões incorporando agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore;

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

- analisar os betões incorporando agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore do ponto de vista dos estados limite de serviço e estados limite últimos de elementos estruturais (lajes, vigas, pilares);
- caracterizar os betões incorporando agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore do ponto de vista da fadiga, resistência ao impacto e ações gelo-degelo;
- analisar o comportamento de betões incorporando agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore submetidos a ações dinâmicas;
- avaliar a resistência à abrasão sob ações de fluidos;
- executar uma análise económica dos impactes que o uso de agregados produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore em betão teria;
- analisar o uso combinado de agregados grossos e finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no betão.
- efetuar um estudo semelhante usando superplastificantes nas composições.

## CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS



## Bibliografia

### • LIVROS / TEXTOS / DISSERTAÇÕES

**AITCIN, P.C., MEHTA, P.K.** (1990) - *Effect of coarse aggregate characteristics on the mechanical of high strength concrete*. ACI Materials Journal, Volume 87, Issue 2, pp. 103-107.

**AKBULUT, H., GURER, C.** (2007) - *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*. Building and Environment, Volume 42, Issue 5, pp. 1921-1930.

**AMPARANO, F.E., XI, Y., ROH, Y.** (2000) - *Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 67, Issue 1, pp. 65-84.

**ARUNTAS, H.Y., GURU, M., DAYI, 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.

**BAKEN, A.K., GAUTNEB, H., SVEISTRUP, 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.

**BELACHIA, M., HEBHOUB, H.** (2011) - *Use of the marble wastes in the hydraulic concrete*. 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium, Elazig, Turkey.

**BELAIDI, A.S.E., AZZOUZ, L., KADRI, E., KENAI, S.** (2012) - *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting*. Construction and Building Materials, Volume 31, pp. 251-257.

**BESHR, H., ALMUSALLAMA, A.A., MASLEHUDDIN, M.** (2003) - *Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete*. Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 2, pp. 97-103.

**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.

**CARDANI, G., MEDA, A.** (1999) - *Flexural strength and notch sensivity in natural building stones: Carrara and Dionysos*. Construction and Building Materials, Volume 13, Issue 7, pp. 393-403.

**CETIN, A.** (1997) - *Assement of industrial wastes in asphalt concrete pavement mixtures*. Department of Civil Engineering, Natural Science Institute, Anadolu University, Turkey.

**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.

## BIBLIOGRAFIA

**COSTA, C., PINELO, A. e RODRIGUES, J.D.** (1991) - *Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz, Borba e Vila Viçosa*. relatório 246/91 - NPR/GERO, LNEC.

**LARRARD F., BELLOC A.**, (1997) - *Influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete*. ACI Materials Journal, Volume 94, Issue 5, pp. 417-426.

**ERGUN, A.** (2011) - *Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 2, pp. 806-812.

**EVANGELISTA, L.** (2007) - *Betões executados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**EVANGELISTA, L., BRITO, J.** (2007) - *Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 5, pp. 397-401.

**FENG, N.Q., JI, X.H., ZHUANG, Q.F., DING, J.T.** (1995) - *Effect of concrete materials on fracture performance*. Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp. 169-177.

**FRAGOULIS, D., STAMATAKIS, M.G., PAPAGEORGIOU, D., CHANIOTAKIS, E.** (2005) - *The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures*. Cement and Concrete Composites, Volume 27, Issue 2, pp. 806-812.

**GENCEL, O., OZEL, C., KOKSAL, F., ERDOGMUS, E., MARTÍNEZ-BARRERA, G., BROSTOW, W.** (2011) - *Properties of concrete paving blocks made with waste marble*. Journal of Cleaner Production, Volume 21, Issue 1, pp. 62-70.

**GIACCIO, G., ZERBINO, R.** (1996) - *Failure mechanism of concrete, combined effects of coarse aggregates and strength level*. Advanced Cement Based Materials, Volume 7, Issue 2, pp. 41-48.

**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.

**IGUR, I., DIMIRDAG, S., YAVUZ, H.** (2010) - *Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates*. Materials Characterization, Volume 61, Issue 1, pp. 90-96.

**KARSAHIN, M., TERZI, S.** (2007) - *Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete*. Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 3, pp. 616-620.

**KAZI, A., AL-MANSOUR, A.L.** (1980) - *Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates*. Engineering Geology, Volume 15, Issues 3-4, pp. 195-203.

**KHATIB, J.M.** (2005) - *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 4, pp. 763-769.

**KILIÇ, A., ATIS, C.D., TEYMEN, A., KARAHAN, O., OZCAN, F., BILIM, C., OZDEMIR, M.** (2008) - *The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete*. Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 4, pp. 290-296.

**KOCA, M.Y., OZDEN, G., YAVUZ, A.B., KINCAL, C., ONARGAN, T., KUCUK, K.** (2006) - *Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns*. International Journal of Rock mechanics & Mining Sciences, Volume 43, Issue 4, pp. 520-530.

**LADEIRA, F.L.** (1977) - *Mármoreos*. Bol. Minas, D.G.M.S.G, Vol. 14, nº4, pp. 195-199

**MARTINS, P.** (2012) - *Desempenho em termos mecânicos de betões com incorporação de agregados grossos provenientes de resíduos da indústria do mármore*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**MIDHA S., PASPALIARIS I.** (2003) – *A review of stone processing industry in five EU regions*. OSNET Editions, volume 6.

**OZTURAN, T., CECEN, 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.

**PEREIRA C.G., CASTRO-GOMES J., OLIVEIRA J.P.,** (2007) *Influência da dimensão dos agregados grosso, mineralogia e água na permeabilidade do betão estrutural*, Construction and Building Material, Volume 21, Issue 3, pp. 616-620;

**RIBEIRO, T.** (2011) – *Valorização de escombros da indústria extrativa de mármore no Alentejo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

**SABOYA F., XAVIER G.C., ALEXANDRE J.** (2007) - *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.

**SILVA, M.** (2010) - *Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa.

**SOUSA COUTINHO, A.** (2006) - *Fabrico e propriedades do betão*. LNEC

**SOUZA, L. R., RIBEIRO, R.C.C., CARRISO, R.C.C., SILVA, L.P., PACHECO, E.B.A.V. e VISCONTE, L.L.Y.** (2009) - *Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica*. Série Tecnologia Ambiental, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro.

**YAVUZ, A.B., TURK, N., KOCA, M.Y.** (2005) - *Material properties of the Menderes Massif Marbles from SW Turkey*. Engineering Geology, Volume 82, Issue 2, pp. 91-106.

**VAN STRAATEN, P., AGROGEOLOGY** (2007) - *The use of rocks for crops*. University of Guelph.

## BIBLIOGRAFIA

**VALADARES, F.** (2009) - *Desempenho mecânico de betões com granulado de borracha proveniente de pneus usados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**TABSH, S.W., ABDELFAH, A.S.** (2009) - *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, pp. 1163-1167.

**TASONG W.A., LYNSDALE C.J., CRIPPS J.C.,** (1999) - *Aggregate-cement paste interface. Part I. Influence of aggregate geochemistry*. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 7, pp. 1019-1025.

**TERZI S., KARSAHIN 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.

**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.

**ZORLUER** (2003) - *Stabilization of soils by waste marble dust*. 4<sup>th</sup> National Marble Symposium, Afyonkarahisar, pp. 297-305.

- **NORMAS / ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIOS**

**Eurocode 2** (2004) - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.

**DIN 52108** (2002) - Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme. DIN, 2002.

**LNEC E 237** (1970) - Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles. LNEC, Lisboa, 1971.

**LNEC E 397** (1993) - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, Lisboa, 1993.

**NP 956** (1973) - Inertes para argamassas e betões: Determinação dos teores em água total e em água superficial. IPQ, Lisboa, 1973.

**NP EN 206-1** (2005) - Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ, Lisboa, 2005.

**NP EN 933-1** (2000) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração. IPQ, Lisboa, 2000.

## DESEMPENHO EM TERMOS MECÂNICOS DE BETÕES COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS FINOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO MÁRMORE

**NP EN 933-2** (1999) - Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. IPQ, Lisboa, 1999.

**NP EN 933-4** (2002) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma. IPQ, Lisboa, 2002.

**NP EN 1097-3** (2003) - Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios. IPQ, Lisboa, 2003.

**NP EN 1097-6** (2003) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ, Lisboa, 2003.

**NP EN 12350-1** (2009) - Ensaio do betão fresco: Amostragem. IPQ, Lisboa, 2002.

**NP EN 12350-2** (2009) - Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento. IPQ, Lisboa, 2002.

**NP EN 12350-6** (2009) - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica. IPQ, Lisboa, 2002.

**NP EN 12390-3** (2009) - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ, Lisboa, 2003.

**NP EN 12390-6** (2011) - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. IPQ, Lisboa, 2004.

## BIBLIOGRAFIA

# **ANEXO A**

## **COMPOSIÇÃO DOS BETÕES**





# **ANEXO B**

## **ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS NATURAIS**

Brita 2

Brita 1

Bago de arroz

Areia de rio grossa

Areia de rio fina

Areia de basalto

Areia de granito

Areia de mármore



**ANEXO C**  
**MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE**  
**ÁGUA**



**ANEXO D**  
MASSA VOLÚMICA APARENTE



**ANEXO E**  
**DESGASTE DE LOS ANGELES**





**ANEXO F**  
**ÍNDICE DE FORMA**



# **ANEXO G**

## **ABAIXAMENTO E MASSA VOLÚMICA DO BETÃO NO ESTADO FRESCO**



**ANEXO H**  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



**ANEXO I**  
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR  
COMPRESSÃO DIAMETRAL





# **ANEXO J**

## **MÓDULO DE ELASTICIDADE**



**ANEXO K**  
**RESISTÊNCIA À ABRASÃO**



## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BRB			
Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
< 0,063	0,063	90,72	6,35
0,063	0,125	113,78	7,96
0,125	0,25	158,37	11,09
0,25	0,5	78,42	5,49
0,5	1	107,63	7,53
1	2	127,62	8,93
2	4	118,39	8,29
> 4		76,88	5,38
Bago de arroz		235,21	16,46
Brita 1		149,68	10,48
Brita 2		577,33	40,41
Cimento		440,68	30,85
Água		242,43	16,97

BB/M20				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
Basalto	< 0,063	0,063	72,57	5,08
	0,063	0,125	91,03	6,37
	0,125	0,25	126,70	8,87
	0,25	0,5	62,73	4,39
	0,5	1	86,10	6,03
	1	2	102,10	7,15
	2	4	94,72	6,63
	> 4		61,50	4,31
Mármore	< 0,063	0,063	17,02	1,19
	0,063	0,125	21,34	1,49
	0,125	0,25	29,71	2,08
	0,25	0,5	14,71	1,03
	0,5	1	20,19	1,41
	1	2	23,94	1,68
	2	4	22,21	1,55
	> 4		14,42	1,01
Bago de arroz		235,21	16,46	
Brita 1		149,68	10,48	
Brita 2		577,33	40,41	
Cimento		440,68	30,85	
Água		242,43	16,97	

## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BB/M50				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
	Basalto	< 0,063	0,063	439,31
0,063		0,125	121,55	8,51
0,125		0,25	152,46	10,67
0,25		0,5	212,20	14,85
0,5		1	105,07	7,35
1		2	144,22	10,10
2		4	171,00	11,97
> 4		158,64	11,10	
Mármore	< 0,063	0,063	412,04	28,84
	0,063	0,125	114,01	7,98
	0,125	0,25	142,99	10,01
	0,25	0,5	199,03	13,93
	0,5	1	98,55	6,90
	1	2	135,26	9,47
	2	4	160,38	11,23
	> 4		148,79	10,42
	Bago de arroz		235,21	16,46
	Brita 1		149,68	10,48
	Brita 2		577,33	40,41
	Cimento		440,68	30,85
	Água		246,71	17,27

BRM				
Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão	
< 0,063	0,063	69,01	4,83	
0,063	0,125	106,18	7,43	
0,125	0,25	147,70	10,34	
0,25	0,5	73,50	5,14	
0,5	1	100,29	7,02	
1	2	117,96	8,26	
2	4	109,68	7,68	
> 4		71,81	5,03	
Bago de arroz		85,53	5,99	
Brita 1		192,44	13,47	
Brita 2		705,63	49,39	
Cimento		440,68	30,85	
Água		237,97	16,658	

## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BRC			
Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
< 0,063	0,063	57,64	4,03
0,063	0,125	72,29	5,06
0,125	0,25	100,62	7,04
0,25	0,5	49,82	3,49
0,5	1	68,38	4,79
1	2	81,08	5,68
2	4	75,22	5,27
> 4		48,84	3,42
Bago de arroz		213,83	14,97
Brita 1		256,59	17,96
Brita 2		748,39	52,39
Cimento		440,68	30,85
Água		216,57	15,16

BC/M20				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
Areia de rio	< 0,063	0,063	46,11	3,23
	0,063	0,125	57,83	4,05
	0,125	0,25	80,50	5,63
	0,25	0,5	39,86	2,79
	0,5	1	54,71	3,83
	1	2	64,86	4,54
	2	4	60,18	4,21
	> 4		39,08	2,74
Mármore	< 0,063	0,063	11,63	0,81
	0,063	0,125	14,59	1,02
	0,125	0,25	20,30	1,42
	0,25	0,5	10,05	0,70
	0,5	1	13,80	0,97
	1	2	16,36	1,15
	2	4	15,18	1,06
	> 4		9,86	0,69
Bago de arroz			213,83	14,97
Brita 1			256,59	17,96
Brita 2			748,39	52,39
Cimento			440,68	30,85
Água			220,34	15,42

## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BC/M50				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
Areia de rio	< 0,063	0,063	28,82	2,02
	0,063	0,125	36,14	2,53
	0,125	0,25	50,31	3,52
	0,25	0,5	24,91	1,74
	0,5	1	34,19	2,39
	1	2	40,54	2,84
	2	4	37,61	2,63
	> 4		24,42	1,71
Mármore	< 0,063	0,063	29,07	2,04
	0,063	0,125	36,47	2,55
	0,125	0,25	50,76	3,55
	0,25	0,5	25,13	1,76
	0,5	1	34,50	2,41
	1	2	40,90	2,86
	2	4	37,94	2,66
	> 4		24,64	1,72
Bago de arroz			213,83	14,97
Brita 1			256,59	17,96
Brita 2			748,39	52,39
Cimento			440,68	30,85
Água			220,34	15,42

BRG			
Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
< 0,063	0,063	72,29	5,06
0,063	0,125	90,67	6,35
0,125	0,25	126,20	8,83
0,25	0,5	62,49	4,37
0,5	1	85,77	6,00
1	2	101,69	7,12
2	4	94,34	6,60
> 4		61,26	4,29
Bago de arroz		384,89	26,94
Brita 1		85,53	5,99
Brita 2		598,71	41,91
Cimento		440,68	30,85
Água		237,97	16,66



## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BG/M20				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
Granito	< 0,063	0,063	57,83	4,05
	0,063	0,125	72,53	5,08
	0,125	0,25	100,96	7,07
	0,25	0,5	49,99	3,50
	0,5	1	68,61	4,80
	1	2	81,35	5,69
	2	4	75,47	5,28
	> 4		49,01	3,43
Mármore	< 0,063	0,063	14,77	1,03
	0,063	0,125	18,53	1,30
	0,125	0,25	25,79	1,81
	0,25	0,5	12,77	0,89
	0,5	1	17,53	1,23
	1	2	20,78	1,45
	2	4	19,28	1,35
	> 4		12,52	0,88
	Bago de arroz		384,89	26,94
	Brita 1		85,53	5,99
	Brita 2		598,71	41,91
	Cimento		440,68	30,85
	Água		242,37	16,97

BG/M50				
	Granulometria		kg/m <sup>3</sup>	kg/70 l betão
Granito	< 0,063	0,063	36,14	2,53
	0,063	0,125	45,33	3,17
	0,125	0,25	63,10	4,42
	0,25	0,5	31,24	2,19
	0,5	1	42,88	3,00
	1	2	50,85	3,56
	2	4	47,17	3,30
	> 4		30,63	2,14
Mármore	< 0,063	0,063	36,93	2,59
	0,063	0,125	46,32	3,24
	0,125	0,25	64,47	4,51
	0,25	0,5	31,92	2,23
	0,5	1	43,82	3,07
	1	2	51,95	3,64
	2	4	48,20	3,37
	> 4		31,30	2,19
	Bago de arroz		384,89	26,94
	Brita 1		85,53	5,99

## ANEXO A - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

	Brita 2	598,71	41,91
	Cimento	440,68	30,85
	Água	246,79	17,28

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 n.º3: 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
Categoria Granulométrica		G <sub>c</sub> 85/20	G <sub>c</sub> 85/20
Peneiro Intermédio		NA	NA

Granulometria Típica			
Série base + Série 2	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior
Peneiro <sup>a)</sup> (mm)			
63,0	100		
40,0	100	100	100
31,5	100	98	100
20,0	96	85	100
16,0	53		
14,0	26		
12,5	12	0	20
10,0	2		
8,0	1		
6,3	1	0	5
4,0	1		
2,0	1		
1,0	1		
0,500	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,5	0,0	1,5

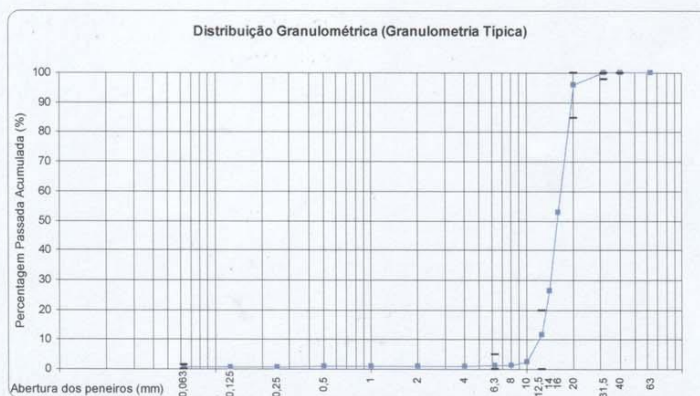
Outras Características do produto		EN 12620	EN 13043
Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,70 ; 2,71]	
Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,68 ; 2,69]	
Massa Volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		[2,66 ; 2,68]	
Absorção de água (%)		WA <sub>24</sub> 0,6%	WA <sub>24</sub> 1
Teor de finos		f <sub>1,5</sub>	f <sub>2</sub>
Índice de Achatamento		FI <sub>15</sub>	
Índice de Forma		SI <sub>15</sub>	
Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>		LA <sub>30</sub>	
Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>		M <sub>DE</sub> 20	
Retração por secagem <sup>b)</sup>		≤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

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)

10-03-2011

Data: 30/05/2011

Aprovado por:  
(Director Produção)

Pág. 1/1

*Handwritten signature and date: 30.5.11*

ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

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 Cavallo nº3: Zambujal - Sesimbra
Ano Marcação CE:	2005
Descrição Petrográfica:	Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior

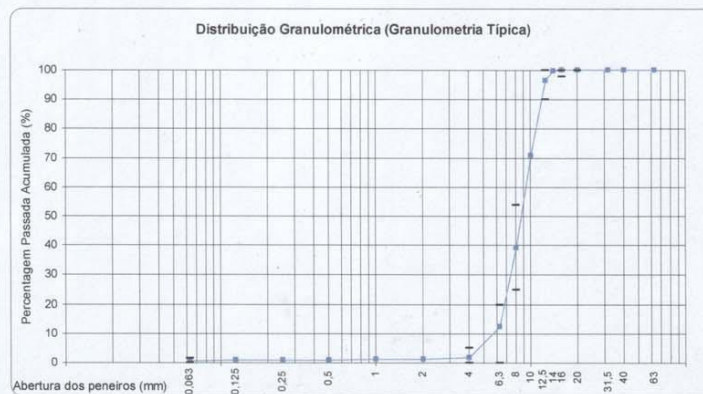
Distribuição Granulométrica		EN 12620	EN13043	Outras Características do produto		EN 12620	EN 13043
Categoria Granulométrica		G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 90/20	Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,69 ; 2,71]		
Peneiro Intermédio		NA	G <sub>25/15</sub>	Massa 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>	MD <sub>E</sub> 20		
14,0	100			Retração por secagem <sup>b)</sup>	≤0,030%WS	NA	
12,5	96	90	100	Percentagem de partículas esmagadas	NA	C <sub>100/0</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>LPC</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 Data: 30/05/2011  
(RTCP) FG.02.26 (07)

10-03-2011


Aprovado por:  
(Director Produção)

Pág.1/1

*Paulina*  
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

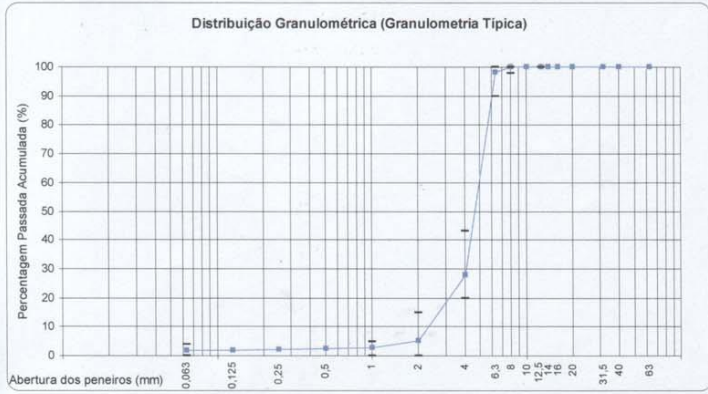
Designação comercial:	<b>Agregado 2/6 (Bago de Arroz)</b>
Dimensão nominal (d/D):	2/6 mm
Origem:	Pedreira Ribeira de Cavallo nº3: Zambujal - Sesimbra
Ano Marcação CE:	2005
Descrição Petrográfica:	Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior

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> 90/15	Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,71 ; 2,72]	
Peneiro Intermediário	NA	G <sub>20/15</sub>	Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,69 ; 2,70]	
Série base + Série 2	<b>Granulometria Típica</b>		Massa Volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )	[2,68 ; 2,69]	
Peneiro <sup>a)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior		
63,0	100				
40,0	100				
31,5	100				
20,0	100				
16,0	100				
14,0	100				
12,5	100	100	100		
10,0	100				
8,0	100	98	100		
6,3	98	90	100		
4,0	28	20	43		
2,0	5	0	15		
1,0	3	0	5		
0,500	2				
0,250	2				
0,125	2				
0,063	1,8	0,0	4,0		

Absorção de água (%)	WA <sub>24</sub> 0,5%	WA <sub>24</sub> 1	Teor de Carbonatos <sup>b)</sup>	≥42%CO <sub>2</sub>	NA
Teor de finos	f <sub>4</sub>	f <sub>4</sub>	Teor de Cloretos <sup>b)</sup>	≤0,001%Cl	NA
Índice de Achatamento	FI <sub>35</sub>	FI <sub>35</sub>	Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>b)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	NA
Índice de Forma	SI <sub>40</sub>	SI <sub>50</sub>	Enxofre Total <sup>b)</sup>	≤1%S	NA
Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>	LA <sub>30</sub>		Baridade (Mg/m <sup>3</sup> )	[1,31 ; 1,34]	
Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>	M <sub>FE</sub> 20				
Retração por secagem <sup>b)</sup>	≤0,030%WS	NA			
Percentagem 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			

<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: (Director Produção)

*[Signature]*  
30.5.11

Pág. 1/1

Areia de rio grossa



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

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

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

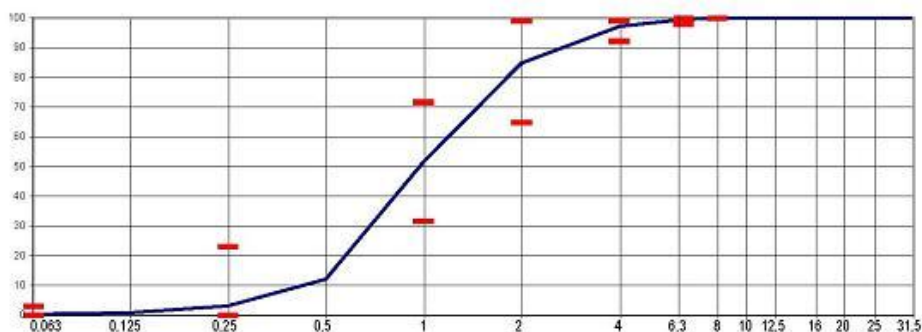
Controlo da produção

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

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/4	
Granulometria	G-85	G <sub>90</sub> -G <sub>T0</sub> -20
Massa Volúmica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m <sup>3</sup>	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>02</sub>	
Enxofre total	0,07%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade alcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

NA- Não aplicável DND-Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

Areia de rio fina



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto:  Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>

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

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

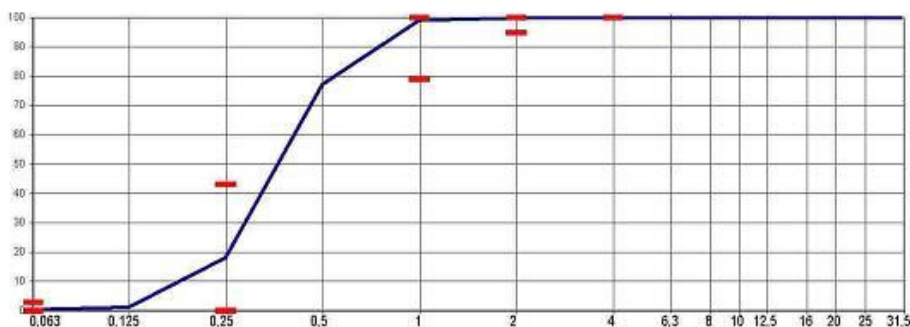
Outras características

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

NA-Não aplicável DND- Desempenho não determinado

Controlo da produção

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



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  
08



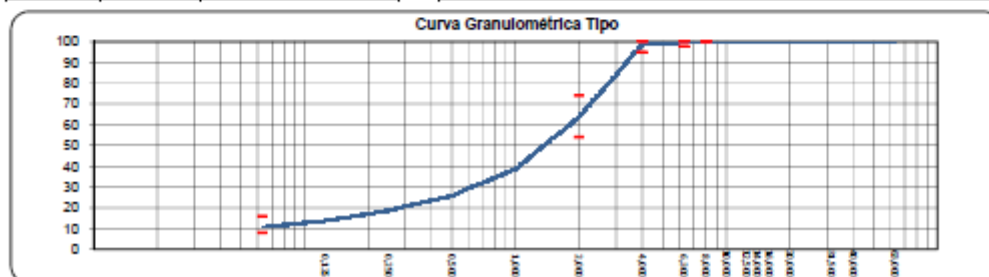
1592

Rev.05

## Ficha Técnica de Produto

**Produto:** Pó Basalto RM (0/4 mm) **Centro de Produção:** Rio Maior  
**Norma de Produto:** NP EN 13043:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Características	NP EN 13043
				Certificado CE	1592-CPD-0609
63,000	100			Dimensão (d/D)	0/4 mm
40,000	100			Granulometria	G <sub>x</sub> 90
31,500	100			Tolerância da Granulometria Típica	GTc10
20,000	100			Teor de Finos	NA
16,000	100			Qualidade dos Finos	MB <sub>10</sub>
14,000	100			Índice de Achatamento	NA
12,500	100			Índice de Forma	NA
10,000	100			Coefficiente de Los Angeles	NA
8,000	100	100	100	Coefficiente de micro-Deval	NA
6,300	100	98	100	Coefficiente de Polimento Acelerado	NA
4,000	99	95	100	Massa Volúmica	
2,000	64	54	74	material impermeável	2,92 Mg/m <sup>3</sup>
1,000	39			partículas secas em estufa	2,88 Mg/m <sup>3</sup>
0,500	26			partículas saturadas	2,88 Mg/m <sup>3</sup>
0,250	19			Absorção de Água	0,7 %
0,125	14			Baridade	1,68 Mg/m <sup>3</sup>
0,063	11,1	8,1	15,9	Porcentagem 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 Húmus	NA
				Teor de Ácido Fúlvico	NA
				Contaminantes Leves	NA
				Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
				Aumento do tempo de presa	NA
				Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
				Retração por secagem	NA
				Observações:	
				NA - Não aplicável	



Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO) Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO) Emitido: 23-05-2011



ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

Areia 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		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,05</sub>	G <sub>p,05</sub>		G <sub>p,05</sub>		
Tolerância da granulometria	C						
Módulo de finura da areia (%)	VD						
Limpeza							
Teor em partículas finas	C						
Teor em finos (%)	C	f <sub>10</sub>	f <sub>10</sub>	4	f <sub>10</sub>		
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>1000</sub>		C <sub>600</sub>		
Angulosidade do agregado	C						
Resistência à fragmentação (L4)	C						
Resistência ao esmagamento	C						
Resistência ao polimento acelerado	C						
Resistência à abrasão	C						
Resistência ao desgaste (M <sub>30</sub> )	C						
Resistência à compressão	C						
Massa volúmica das partículas	VD	2,71	2,71	2,71	2,71		
Absorção de água (%)	VD	WA <sub>34,0,7</sub>	WA <sub>34,0,7</sub>	WA <sub>34,0,7</sub>	WA <sub>34,0,7</sub>		
Resistência ao gelo/degele	C	F 1	F 1	F 1	F 1		
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	-0,046	-0,046	-0,046	-0,046		
Reacção alcalo-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						

EN 12620

Aprovado:(original assinado)	Emitido:	na data / /
------------------------------	----------	-------------

Des. - Designação; C - categoria; VL - Valor Límite; VD - Valor Declinado;

AGG - Agregado de granulometria estensa; SBa - Sub-balastro; Ba - Balastro; B - Base; SB - Sub-base; 2A - 2ª A; 2B - 2ª B; DD - Desgaste dinâmico; T - Triturado; N - Natural; L - Lavado

ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

Areia de granito



Folha de Rosto

C. Industrial  
Benafessim

Amostra  
A0089-11

Página  
1/1

Data  
25-Jul-11

Ensaios Laboratoriais  
Controlo de Produção - Marcação CE

INFORMAÇÕES GERAIS

Designação no stock: AG 0/4 Data de amostragem: 25-07-2011  
Localização da colheita: Q.TAPETE Hora de amostragem: 9:00:00  
Condições meteorológicas: SOL

ENSAIOS A REALIZAR

Ensaios a realizar	Código	Ensaio	Boletim	Data de ensaio
<input checked="" type="checkbox"/>	051	Análise Granulométrica. Método de 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 firos. Ensaio do Equivalente de Areia NP EN 933-8:2002		25-Jul-11
<input checked="" type="checkbox"/>	056	Determinação do teor de firos. 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 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 13450:2008 (Secção 6.7)/AC:2010		
<input type="checkbox"/>	062	Elementos prejudiciais (Balastro) 1099 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 volumica 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 firos	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 firos (% <0.075 mm)	-						
Módulo de finura	FM						
Categoria Forma	LT						
Categoria Resistência Rotura	CS						
Massa Volumica Partículas	(Mg/m <sup>3</sup> )						
Conformidade do produto* (SIMNÃO)							

\* No caso de não conformidade do produto justificar o motivo no campo de observações  
Observações:

LABC-100.7

Responsável pela amostragem

Responsável do centro de produção

Areia de granito



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 da amostra após lavagem,  $M_2$  (0,001 kg) = **1,323**

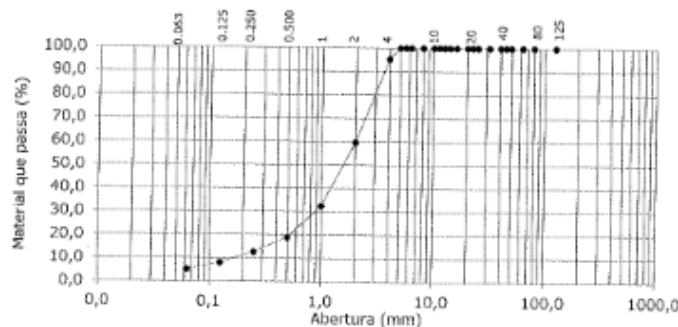
Peneiro abertura (mm)	Retidos		$N_i = \frac{R_i}{M_1} \times 100$ (0,1%)	$N'_i = 100 - N_i$ (0,1%)
	$R_i$ (0,1g)	$R_i$ (0,001kg)		
125				100,0
80				100,0
63				100,0
50				100,0
45				100,0
40				100,0
31,5				100,0
25				100,0
22,4				100,0
20				100,0
16				100,0
14				100,0
12,5				100,0
11,2				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	Q					
Categoria do teor de finos	f					
Módulo de finura	FM	3,7				

Resíduo no fundo, P = 30,5 **0,031**

Passados no peneiro 63  $\mu\text{m}$ , f (0,1 %) = **5,1**



Observações:

Ensaiou

Aprovado

M. Bravo

P. Coimbra

LAB 2013

ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

Areia de mármore



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO

CTP.VVI.0/4.05



0866

MOTA-ENGINHARIA 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 13 139	EN 13 242	EN 13 383-1	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,05</sub>	G <sub>A,05</sub>		G <sub>p,05</sub>		
Tolerância da granulometria	C						
Módulo de finura da areia (%)	VD						
Limpeza							
Teor em partículas finas	C						
Teor em finos (%)	C	f <sub>10</sub>	f <sub>10</sub>	4	f <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						
Percentagem de partículas britadas	C		C <sub>1000</sub>		C <sub>900</sub>		
Angulosidade do agregado	C						
Resistência à fragmentação (L4)	C						
Resistência ao esmagamento	C						
Resistência ao polimento acelerado	C						
Resistência à abrasão	C						
Resistência ao desgaste (M <sub>20</sub> )	C						
Resistência à compressão	C						
Massa volúmica 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/degele	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 alcali-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						

Aprovado:(original assinado)

Emitido: na data / /

Des. - Designação; C - categoria; VL - Valor Limite; VD - Valor Declarado;

AGC - Agregado de granulometria estreita; S0a - Sub-base; Sa - Base; B - Base; S0 - Sub-base; 2A - 2ª A; 2B - 2ª B; DD - Desgaste drenante; T - Triturado; N - Natural; L - Lavado

ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

Areia de mármore



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 peneiração NP EN 933-1:2009; 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 1997-6:2008		
<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) LOS, LAB, C		
<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 8)		
<input type="checkbox"/>	---	Determinação da resistência à compressão NP EN 1926:2006		

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 (% <0.075 mm)	-						
Módulo de finura	FM						
Categoria Forma	LT						
Categoria Resistência Rotina	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

M. Bravo

P. Correio

LABC 100.7

# ANEXO B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS

## Areia de mármore



### BOLETIM DE ENSAIO

C. Industrial V. Viçosa    Amostra A0104-11    Boletim    Página 1/1    Data 12-Set-11

Análise Granulométrica. Método de peneiração  
NP EN 933-1:2000; EN 933-1:1997/A1:2005

Massa inicial da amostra,  $M_i$  (0,001 kg) = **0,368**

Massa da amostra após lavagem,  $M_f$  (0,001 kg) = **0,327**

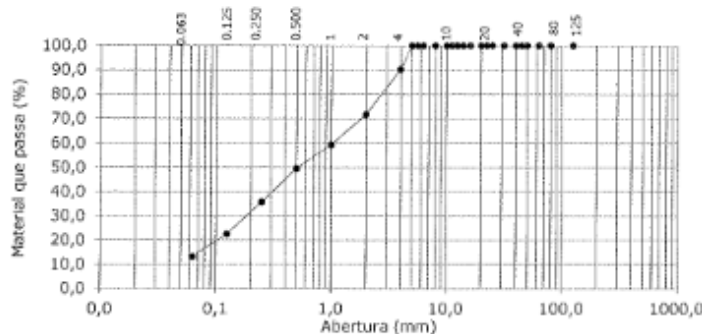
Peneiro abertura (mm)	Retidos		$N_i = \frac{R_i}{M_i} \times 100$ (0,1%)	Passados Acumulados $N_i' = 100 - N_i$ (0,1%)
	$R_i$ (0,1g)	$R_i$ (0,001kg)		
125				100,0
80				100,0
63				100,0
50				100,0
45				100,0
40				100,0
31,5				100,0
25				100,0
22,4				100,0
20				100,0
16				100,0
14				100,0
12,5				100,0
11,2				100,0
10				100,0
8				100,0
6,3				100,0
5,6				100,0
5				100,0
4	35,9	0,036	9,8	90,2
2	68,5	0,069	18,6	71,6
1	45,5	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

		12520	13139	13643	13242	13460
Dimensão máxima (mm)	D					
Dimensão mínima (mm)	d					
Porcentagem que passa, em massa	2D					
	1,4D					
	d/2					
Categoria granulométrica	G					
Categoria do teor de finos	f					
Módulo de finura	FM	2,7				

Resíduo no fundo, P = **7,8**    **0,008**

Passados no peneiro 63 µm, f (0,1 %) = **13,2**



Observações:

Ensaiou

Aprovado

M. Bravo

P. Oliveira

UAG.0216

## ANEXO C - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

	M <sub>0</sub> (g)	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	M <sub>4</sub> (g)
Brita 2	653,4	3256,4	5105,6	3080,5	3208,4
Brita 1	425,2	1748,0	2764,7	1675,2	1725,5
Bago de arroz	425,2	1002,3	2285,9	1675,2	974,6
Areia grossa	425,2	1034,6	2314,8	1675,2	1026,9
Areia fina	425,2	1014,3	2288,2	1675,2	1012,3
Areia de basalto	425,2	922,2	2274,8	1676,2	912,6
Areia de mármore	425,2	859,8	2217,4	1676,2	858,6
Areia de granito	425,2	919,1	2225,0	1676,2	913,7

	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)
Brita 2	2711,40	2605,70	2644,68	1,50
Brita 1	2713,05	2620,35	2654,52	1,30
Bago de arroz	2678,21	2488,76	2559,50	2,84
Areia grossa	2651,43	2599,75	2619,24	0,75
Areia fina	2535,19	2522,55	2527,54	0,20
Areia de basalto	2906,37	2820,15	2849,81	1,05
Areia de mármore	2723,57	2684,24	2698,68	0,14
Areia de granito	2503,97	2467,46	2482,04	0,59

$\rho_a$  - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm<sup>3</sup>);

$\rho_{rd}$  - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm<sup>3</sup>);

$\rho_{ssd}$  - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm<sup>3</sup>);

$\rho_w$  - massa volúmica da água à temperatura da água registada na pesagem  $M_2$  (kg/dm<sup>3</sup>);

WA<sub>24</sub> - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

M<sub>1</sub> - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M<sub>2</sub> - massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e água (g);

M<sub>3</sub> - massa do picnómetro contendo apenas água (g); e

M<sub>4</sub> - massa do provete seco em estufa (g).

## ANEXO C - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA



## ANEXO D - MASSA VOLÚMICA APARENTE

	Brita 2			Brita 1			Bago de arroz			Areia de rio grossa		
$V_R$ (dm <sup>3</sup> )	10			10			10			10		
$M_1$ (g)	8610			8610			8610			8610		
$M_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	1355,0	1369,0	1364,0	1346,0	1364,0	1357,0	1345,0	1360,0	1356,0	1549,0	1538,0	1540,0
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	1363			1356			1354			1542		
	Areia de rio fina			Areia de basalto			Areia de granito			Areia de mármore		
$V_R$ (dm <sup>3</sup> )	3			3			3			3		
$M_1$ (g)	1866			1866			1866			1866		
$M_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	1514,0	1534,0	1529,0	1832,5	1826,9	1853,2	1555,8	1557,3	1566,8	1771,3	1787,4	1792,7
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	1526			1838			1560			1784		

$V_R$  - volume do recipiente de ensaio (dm<sup>3</sup>);

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

$M_2$  - baridade de cada provete de ensaio (kg/m<sup>3</sup>).

## ANEXO D - MASSA VOLÚMICA APARENTE

## ANEXO E - DESGASTE DE LOS ANGELES

	n	Massa M1 (g)	Massa M2 (g)	$\Delta$ LA (%)
Bago de arroz	6	5000,3	3877,733	22,45
Brita 1	8	5000,4	3727,798	25,45
Brita 2	11	5001,3	3674,955	26,52

$n$  - número de esferas de aço que constituem a carga abrasiva;

$M_1$  - massa do provete de ensaio (g);

$M_2$  - massa do material retido no peneiro 1.68 mm (n.º 12) (g);

$\Delta$  LA - perda por desgaste na máquina de Los Angeles (%).

## ANEXO E - DESGASTE DE LOS ANGELES

## ANEXO F - ÍNDICE DE FORMA

BRITA 2			
Malha [mm]	$M_{1i}$	$V_i$	$M_{2i}$
[mm]	[g]	[%]	[g]
31,50	0,00	0,00	-
22,40	603,20	15,08	52,40
16,00	1692,10	42,31	144,50
11,20	1589,60	39,74	379,60
8,00	100,90	2,52	-
5,60	9,20	0,23	-
4,00	4,60	0,12	-

$M_0$ (g)	3999,60	$S_i$	15
-----------	---------	-------	----

BRITA 1			
Malha [mm]	$M_{1i}$	$V_i$	$M_{2i}$
[mm]	[g]	[%]	[g]
31,50	0,00	0,00	-
22,40	0,00	0,00	-
16,00	0,00	0,00	-
11,20	89,40	11,79	14,50
8,00	319,40	42,13	52,00
5,60	307,50	40,56	55,00
4,00	41,80	5,51	-

$M_0$ (g)	758,10	$S_i$	17
-----------	--------	-------	----

BAGO DE ARROZ			
Malha [mm]	$M_{1i}$	$V_i$	$M_{2i}$
[mm]	[g]	[%]	[g]
31,50	0,00	0,00	-
22,40	0,00	0,00	-
16,00	0,00	0,00	-
11,20	0,00	0,00	-
8,00	0,60	0,54	-
5,60	27,50	24,71	6,50
4,00	83,20	74,75	13,20

$M_0$ (g)	111,30	$S_i$	18
-----------	--------	-------	----

$M_0$  - massa do provete de ensaio (g);

$M_{1i}$  - massa das partículas do provete para cada uma das fracções granulométricas (g);

$M_{2i}$  - massa das partículas do provete para cada uma das fracções granulométricas de forma não-cúbica (g);

$V_i$  - percentagem da massa  $M_{1i}$  relativamente à massa  $M_0$  do provete de ensaio (%).

## ANEXO F - ÍNDICE DE FORMA

## ANEXO G - ABAIXAMENTO E MASSA VOLÚMICA DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

### 2ª fase experimental

Percentagem de substituição						
0			100			
	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )
BB	0,55	12,1	2420,2	0,54	12,8	2378,6
BC	0,49	13,1	2349,4			
BG	0,53	12,5	2367,6			

### 3ª fase experimental

Percentagem de substituição												
0			20			50			100			
	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )	A/C	h (mm)	D (kg/m <sup>3</sup> )
BB	0,55	11,3	2412,5	0,55	14,3	2389,5	0,56	14,3	2385,2	0,54	13,5	2387,6
BC	0,49	13,3	2356,4	0,5	12,7	2381,7	0,5	13,2	2384,2			
BG	0,54	12,7	2361,6	0,55	11,6	2360,4	0,56	13	2381,1			

A/C - relação água / cimento;

*h* - abaixamento da amostra de betão (mm);

*D* - massa volúmica do betão no estado fresco (kg/m<sup>3</sup>).

## ANEXO G - ABAIXAMENTO E MASSA VOLÚMICA DO BETÃO NO ESTADO FRESCO



## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

### 2º fase experimental - 28 dias

	1	2	3	Média
BRB	1153	1120	1147	1140 (kN)
	51,2	49,8	51,0	50,7 (MPa)

	1	2	3	Média
BRM	1005	1031	1015	1017 (kN)
	44,7	45,8	45,1	45,2 (MPa)

	1	2	3	Média
BRC	1278	1252	1260	1263,2
	56,8	55,6	56,0	56,1

	1	2	3	Média
BRG	1117	1107	1098	1107
	49,6	49,2	48,8	49,2

### 3º fase experimental - 7 dias

	1	2	3	Média
BRB	8349	8346	8310	8335 (g)
	873,0	852,8	846,0	857,3 (kN)
	38,8	37,9	37,6	38,1 (MPa)

	1	2	3	Média
BB/M20	8130	8023	8119	8090,7 (g)
	805,5	801,0	807,8	804,8 (kN)
	35,8	35,6	35,9	35,8 (MPa)

	1	2	3	Média
BB/M50	8050	8042	8020	8037,3 (g)
	814,5	810,0	774,0	799,5 (kN)
	36,2	36	34,4	35,6 (MPa)

## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

	1	2	3	Média
BRM	8068	7961	8032	8020,3 (g)
	812,3	839,3	832,5	828 (kN)
	36,1	37,3	37	36,8 (MPa)

	1	2	3	Média
BRC	8210	8136	8170	8172,0 (g)
	1010,3	1062,0	1005,8	1026 (kN)
	44,9	47,2	44,7	45,6 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M20	8143,4	8154,4	8122	8139,9 (g)
	949,5	972,0	963,0	961,5 (kN)
	42,2	43,2	42,8	42,7 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M50	8183	7973	8051	8069 (g)
	922,5	933,8	850,5	902,3 (kN)
	41	41,5	37,8	40,1 (MPa)

	1	2	3	Média
BRG	8012	7990	7995	7999 (g)
	870,8	904,5	900,0	891,8 (kN)
	38,7	40,2	40	39,6 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M20	8009,8	7986,2	7976,1	7990,7 (g)
	839,3	891,0	879,8	870,0 (kN)
	37,3	39,6	39,1	38,6 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M50	7997,6	7982,1	8049,7	8009,8 (g)
	875,3	855,0	855,0	861,8 (kN)
	38,9	38	38	38,3 (MPa)

## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

3ª fase experimental - 28 dias

	1	2	3	4	5	Média
BRB	8091	8410	8457	8215	8250	8284,6 (g)
	945,0	1134,0	1136,3	1147,5	1120,5	1134,6 (kN)
	42,0	50,4	50,5	51,0	49,8	50,4 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BB/M20	8053,8	8181,5	8202,4	8147,6	8088,1	8134,7 (g)
	1167,8	1053,0	1098,0	1116,0	1102,5	1107,5 (kN)
	51,9	46,8	48,8	49,6	49,0	49,2 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BB/M50	8213	8052	8258	8121	8001	8129 (g)
	1075,5	1028,3	1050,8	1048,5	1100,3	1060,7 (kN)
	47,8	45,7	46,7	46,6	48,9	46,7 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BRM	8117,9	8050,1	8124	8019,7	8016,6	8065,7 (g)
	940,5	1023,8	1003,5	1012,5	1037,3	1003,5 (kN)
	41,8	45,5	44,6	45	46,1	45,3 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BRC	8140	8179	8164,9	8202,8	8113,5	8160,0 (g)
	1298,3	1269,0	1275,8	1278,0	1280,3	1280,3 (kN)
	57,7	56,4	56,7	56,8	56,9	56,9 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BC/M20	8113,6	8252,8	8184,7	8212	8175,6	8187,7 (g)
	1217,3	1230,8	1323,0	1296,0	1239,8	1264,4 (kN)
	54,1	54,7	58,8	57,6	55,1	56,0 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
BC/M50	8146,1	8089,8	8057,8	8119,9	8052,9	8093,3 (g)
	1194,8	1073,3	1174,5	1125,0	1188,0	1151,1 (kN)
	53,1	47,7	52,2	50,0	52,8	51,2 (MPa)

## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

	1	2	3	4	5	Média
<b>BRG</b>	8063,1	7986	8015,4	8019,7	7919,1	8000,7 (g)
	1129,5	1059,8	1125,0	1163,3	1059,8	1107,5 (kN)
	50,2	47,1	50	51,7	47,1	49,2 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
<b>BG/M20</b>	8121,1	8026,3	7995,3	8121,5	8152,4	8083,3 (g)
	1100,3	1066,5	1089,0	1023,8	1073,3	1070,6 (kN)
	48,9	47,4	48,4	45,5	47,7	47,6 (MPa)

	1	2	3	4	5	Média
<b>BG/M50</b>	8060,5	8030,8	8051,7	8044,7	8043,2	8046,2 (g)
	1048,5	1023,8	1064,3	1030,5	1035,0	1040,4 (kN)
	46,6	45,5	47,3	45,8	46,0	46,2 (MPa)

### 3ª fase experimental - 56 dias

	1	2	3	Média
<b>BRB</b>	8365,3	8492,1	8314,1	8390,5 (g)
	1248,8	1197,0	1208,3	1218,0 (kN)
	55,5	53,2	53,7	54,2 (MPa)

	1	2	3	Média
<b>BB/M20</b>	8146,2	8161,7	8149,3	8152,4 (g)
	1314,0	1327,5	1302,8	1314,8 (kN)
	58,4	59	57,9	58,4 (MPa)

	1	2	3	Média
<b>BB/M50</b>	8145,8	8169	8184,8	8166,5 (g)
	1176,8	1251,0	1260,0	1229,3 (kN)
	52,3	55,6	56	54,6 (MPa)

	1	2	3	Média
<b>BRM</b>	8053,1	8003,7	8070,1	8042,3 (g)
	1122,8	1156,5	1188,0	1155,8 (kN)
	49,9	51,4	52,8	51,4 (MPa)

## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

	1	2	3	Média
BRC	8135,3	8185,4	8194,1	8171,6 (g)
	1325,3	1354,5	1503,0	1394,3 (kN)
	58,9	60,2	66,8	62,0 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M20	8031,2	8092,8	8084,3	8069,4 (g)
	1388,3	1293,8	1413,0	1365 (kN)
	61,7	57,5	62,8	60,8 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M50	8211,3	8109,7	8115	8145,3 (g)
	1307,3	1197,0	1161,0	1221,8 (kN)
	58,1	53,2	51,6	54,3 (MPa)

	1	2	3	Média
BRG	7957,6	7933,6	8014,1	7968,4 (g)
	1134,0	1147,5	1181,3	1154,3 (kN)
	50,4	51	52,5	51,3 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M20	8039,9	7995,9	8072,2	8036,0 (g)
	1134,0	1089,0	1156,5	1126,5 (kN)
	50,4	48,4	51,4	49,7 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M50	8031,4	8151,7	8169,4	8117,5 (g)
	1176,8	1143,0	1102,5	1140,8 (kN)
	52,3	50,8	49,0	50,7 (MPa)

## ANEXO H - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

ANEXO I - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

3ª fase experimental - 28 dias

	1	2	3	Média
BRB	12987,0	12985,0	12992,0	12988,0 (g)
	233,3	233,3	275,7	247,4 (kN)
	3,3	3,3	3,9	3,5 (MPa)

	1	2	3	Média
BB/M20	12865,7	12820,3	12879,1	12855,0 (g)
	247,4	233,3	261,5	247,4 (kN)
	3,5	3,3	3,7	3,5 (MPa)

	1	2	3	Média
BB/M50	12830,0	12867,0	12884,0	12860,3 (g)
	282,7	285,3	284,4	284,1 (kN)
	4,0	4,0	4,0	4,0 (MPa)

	1	2	3	Média
BRM	12733,0	12751,0	12711,1	12731,7 (g)
	254,5	253,0	257,5	255,0 (kN)
	3,6	3,6	3,6	3,6 (MPa)

	1	2	3	Média
BRC	12882,4	12830,0	12979,1	12897,2 (g)
	295,9	296,9	332,2	308,3 (kN)
	4,2	4,2	4,7	4,4 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M20	12739,0	12820,3	12924,6	12827,9 (g)
	254,5	282,7	282,7	273,3 (kN)
	3,6	4,0	4,0	3,9 (MPa)

	1	2	3	Média
BC/M50	12738,5	12808,8	12881,2	12809,5 (g)
	240,3	233,3	275,7	249,8 (kN)
	3,4	3,3	3,9	3,5 (MPa)

ANEXO I - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

	1	2	3	Média
BRG	12503,2	12497,4	12534,0	12511,53 (g)
	303,4	268,3	259,9	177,2 (kN)
	4,3	3,8	3,7	3,9 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M20	12606,9	12647,2	12679,6	12644,6 (g)
	282,7	275,7	272,3	276,9 (kN)
	4,0	3,9	3,9	3,9 (MPa)

	1	2	3	Média
BG/M50	12619,9	12661,7	12627,7	12636,4 (g)
	254,5	252,5	247,4	252,1 (kN)
	3,6	3,6	3,5	3,5 (MPa)



ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BRB	1º provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
		f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	11,90								
			Extensómetro 1		Extensómetro 2						
			f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)	
		Extensões		Extensões							
		Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
		1	37,20	382,98	18,97	349,42	4,43	338,12		32,24	33,24
		2	62,74	395,38	0,73	337,02	1,10	334,47	Fim	32,59	
		3	74,41	400,49	8,02	318,78	4,70	318,42	16,05	34,24	
		4	76,60	405,59	12,40	326,81	4,43	321,70	Fim	33,89	
	2º Provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
		f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	12,78								
			Extensómetro 1		Extensómetro 2						
			f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)	
		Extensões		Extensões							
		Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
		1	26,99	423,83	29,18	408,51	4,41	388,09		30,34	30,77
		2	36,47	425,29	45,96	415,81	4,88	379,33	Fim	31,04	
		3	37,20	425,23	49,60	422,37	3,93	380,40	Fim	30,95	
4		36,47	429,67	52,04	425,29	5,07	383,22	Fim	30,73		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BB/M20	1º provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00									
		f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	12,80									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
			1	28,45	408,51	26,99	410,70	0,96	381,88		30,89	31,67
			2	37,20	418,72	38,66	419,45	0,19	381,16	Fim	30,95	
			3	51,06	414,35	56,17	417,26	0,60	362,19	18,97	32,57	
		4	45,96	412,89	52,04	416,53	0,66	365,71	Fim	32,26		
		2º Provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
			f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	12,80								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
			Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
			1	28,45	408,51	26,99	410,70	0,96	381,88		30,89	31,67
		2	37,20	418,72	38,66	419,45	0,19	381,16	Fim	30,95		
		3	51,06	414,35	56,17	417,26	0,60	362,19	18,97	32,57		
		4	45,96	412,89	52,04	416,53	0,66	365,71	Fim	32,26		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BB/M50	1° provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
		$f_{cm}/3$ (MPa)	12,49									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	28,45	385,17	26,99	381,52	0,61	355,62		32,30	32,88
			2	32,83	388,81	54,71	388,81	6,15	345,05	10,58	33,29	
			3	27,72	388,09	59,82	396,84	6,48	348,69	Fim	32,94	
		4	24,07	385,17	63,47	398,54	7,21	348,09	Fim	32,99		
		2° Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00								
			$f_{cm}/3$ (MPa)	12,49								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	28,45	366,93	24,07	369,85	2,16	342,13		33,57	33,74
			2	32,10	364,74	26,99	371,31	3,51	338,48	Fim	33,93	
			3	28,45	365,47	30,64	375,68	2,38	341,03	Fim	33,68	
		4	30,64	364,74	32,83	378,60	3,49	339,94	Fim	33,79		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BRM	1º provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00									
		f <sub>cm/3</sub> (MPa)	11,90									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm/3</sub> (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm/3</sub> (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
			1	37,20	382,98	18,97	349,42	4,43	338,12		32,24	33,24
			2	62,74	395,38	0,73	337,02	1,10	334,47	Fim	32,59	
			3	74,41	400,49	8,02	318,78	4,70	318,42	16,05	34,24	
		4	76,60	405,59	12,40	326,81	4,43	321,70	Fim	33,89		
		2º Provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
			f <sub>cm/3</sub> (MPa)	11,90								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm/3</sub> (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm/3</sub> (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
			Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
			1	33,56	375,68	21,88	352,34	3,41	336,29		32,42	33,00
		2	35,02	373,50	37,93	353,07	6,90	326,81	Fim	33,36		
		3	28,45	369,85	37,20	355,26	6,84	329,73	Fim	33,06		
		4	24,80	366,93	41,58	356,72	7,89	328,63	Fim	33,17		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BRC	1º provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00										
		$f_{cm}/3$ (MPa)	14,15										
			Extensómetro 1			Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)			
			Extensões		Extensões								
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$			
			1	25,53	366,93	22,61	374,22	2,99	346,50		37,95	38,46	
			2	28,45	369,12	31,37	371,31	0,21	340,30	Fim	38,64		
			3	29,91	374,22	30,64	372,77	0,64	343,22	Fim	38,31		
		4	32,83	370,58	31,37	369,12	0,00	337,75	Fim	38,93			
		2º Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
			$f_{cm}/3$ (MPa)	14,15									
				Extensómetro 1			Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
				Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$			
			1	24,07	370,58	21,88	355,99	3,58	340,30		38,64	39,08	
		2	37,20	385,90	26,99	350,15	7,32	335,93	Fim	39,15			
		3	43,04	391,73	23,34	347,23	7,11	336,29	Fim	39,10			
		4	50,33	394,65	21,88	344,32	6,36	333,37	Fim	39,45			

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BC/M20	1° provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
		$f_{cm}/3$ (MPa)	14,15									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	17,51	343,59	28,45	386,63	9,84	342,13		38,44	
			2	25,53	344,32	40,85	389,54	9,38	333,74	Fim	39,40	
			3	25,53	345,78	40,85	391,73	9,57	335,56	Fim	39,19	
		4	26,26	347,96	42,31	393,92	9,30	336,66	Fim	39,06		
										39,02		
		2° Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00								
			$f_{cm}/3$ (MPa)	14,15								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
				Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	
				1	20,43	377,87	27,72	386,63	0,41	358,18		36,71
				2	28,45	389,54	32,83	382,98	3,03	355,62	Fim	36,98
			3	29,18	390,27	32,10	378,60	4,04	353,80	Fim	37,17	
		4	28,45	396,84	29,18	375,68	5,94	357,45	Fim	36,79		
										36,91		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BC/M50	1º provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
		$f_{cm}/3$ (MPa)	13,73									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	26,26	388,81	26,26	382,98	1,61	359,64		35,41	35,71
			2	38,66	394,65	30,64	385,17	0,41	355,26	Fim	35,84	
			3	40,85	399,76	28,45	385,17	0,61	357,81	Fim	35,59	
		4	48,15	399,76	27,72	383,71	1,24	353,80	Fim	35,99		
		2º Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00								
			$f_{cm}/3$ (MPa)	13,73								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	23,34	415,81	27,72	425,29	1,30	395,02		32,23	32,68
		2	36,47	420,18	31,37	424,56	2,47	388,45	Fim	32,78		
		3	41,58	424,56	34,29	424,56	1,90	386,63	Fim	32,93		
		4	40,85	426,02	32,83	424,56	1,70	388,45	Fim	32,78		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BRG	1º provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
		f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	10,70								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2					
		f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)		
		Extensões		Extensões							
		Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
		1	29,91	356,72	29,91	370,58	4,24	333,74		32,08	32,21
		2	45,23	374,95	32,10	366,93	1,55	332,28	Fim	32,20	
		3	57,63	382,25	29,91	364,01	2,92	329,36	Fim	32,46	
		4	62,01	391,00	21,16	358,91	2,66	333,37	Fim	32,11	
BRG	2º Provete	f <sub>c0</sub> (MPa)	1,00								
		f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	10,70								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2					
		f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> /3 (MPa)	Δ Extensómetros	Extensão média	Δ entre ciclos	EC (GPa)		
		Extensões		Extensões							
		Ciclos	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>	%	% 10 <sup>-6</sup>	% 10 <sup>-6</sup>		
		1	19,53	346,50	32,10	375,68	5,08	335,28		31,94	32,70
		2	27,72	353,07	50,33	369,85	1,79	322,43	12,85106383	33,09	
		3	27,72	354,53	50,33	372,04	1,56	324,26	Fim	32,93	
		4	26,99	355,99	51,79	373,50	2,22	325,35	Fim	32,82	



ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BG/M20	1º provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
		$f_{cm}/3$ (MPa)	12,73									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	21,88	392,46	33,56	414,35	2,76	375,68		31,23	
			2	39,39	401,95	40,85	408,51	1,41	365,11	10,58	32,13	
			3	40,12	407,78	36,47	410,70	1,79	370,94	Fim	31,63	
		4	47,42	409,24	39,39	407,05	1,61	364,74	Fim	32,17		
										31,79		
		2º Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00								
			$f_{cm}/3$ (MPa)	12,73								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
		1	39,39	396,84	33,56	396,11	1,43	360,00		32,59		
		2	43,04	404,86	32,83	401,95	2,02	365,47	Fim	32,10		
		3	48,15	407,05	35,02	398,30	1,22	361,09	Fim	32,49		
		4	50,33	408,51	35,74	399,03	1,43	360,73	Fim	32,52		
										32,43		

ANEXO J - MÓDULO DE ELASTICIDADE

BG/M50	1° provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00									
		$f_{cm}/3$ (MPa)	12,34									
			Extensómetro 1		Extensómetro 2							
			$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)		
			Extensões		Extensões							
			Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$		
			1	22,61	375,68	18,24	360,36	3,10	347,60		32,61	
			2	41,58	391,00	34,29	357,45	7,52	336,29	11,31	33,71	
			3	46,69	396,11	35,74	357,45	7,93	335,56	Fim	33,78	
		4	49,60	399,76	35,02	357,45	7,92	336,29	Fim	33,71		
										33,45		
		2° Provete	$f_{c0}$ (MPa)	1,00								
			$f_{cm}/3$ (MPa)	12,34								
				Extensómetro 1		Extensómetro 2						
				$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{cm}/3$ (MPa)	$\Delta$ Extensómetros	Extensão média	$\Delta$ entre ciclos	EC (GPa)	
				Extensões		Extensões						
				Ciclos	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	%	% $10^{-6}$	% $10^{-6}$	
				1	24,07	380,06	29,18	386,63	0,41	356,72		31,78
				2	42,31	391,49	34,29	385,17	0,49	350,03	Fim	32,39
			3	48,88	397,57	33,56	385,17	0,84	350,15	Fim	32,37	
		4	53,98	403,40	33,56	385,90	0,84	350,88	Fim	32,31		
										32,21		

**ANEXO K - RESISTÊNCIA À ABRASÃO**

BRB										
1º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	47,69	47,89	48,26	47,46	48,05	48,14	47,26	47,41	47,56	
Medições finais	42,8	42,71	42,58	42,7	42,75	42,69	42,98	42,95	42,91	
Diferença	4,89	5,18	5,68	4,76	5,3	5,45	4,28	4,46	4,65	Média 4,96
Massa inicial =	544,4	M1 =	532,1	M2 =	518,7	M3 =	503,4	M Final =	489	
2º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,07	48,79	48,59	48,33	49,04	48,77	46,16	47,64	48,37	
Medições finais	43,63	43,78	43,2	43,36	43,46	43,63	40,77	42,62	43,48	
Diferença	5,44	5,01	5,39	4,97	5,58	5,14	5,39	5,02	4,89	Média 5,20
Massa inicial =	541,4	M1 =	528,6	M2 =	514,3	M3 =	499,8	M Final =	484,6	
3º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,67	49,44	51,63	48,85	50,01	49,56	49,29	48,55	49,56	
Medições finais	45,16	45,22	46,63	43,84	44,98	44,29	43,38	42,95	44,08	
Diferença	4,51	4,22	5,00	5,01	5,03	5,27	5,91	5,60	5,48	Média 5,11
Massa inicial =	560,4	M1 =	547,2	M2 =	533,4	M3 =	519,0	M Final =	503,4	

BB/M20										
1º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,69	49,59	49,19	49,51	49,63	49,87	48,92	49,37	49,44	
Medições finais	43,82	43,64	43,73	43,8	43,95	43,84	43,64	44	43,72	
Diferença	5,87	5,95	5,46	5,71	5,68	6,03	5,28	5,37	5,72	Média 5,67
Massa inicial =	556,4	M1 =	542,2	M2 =	526,5	M3 =	510,4	M Final =	493,2	
2º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,83	48,77	48,95	48,96	49,02	49,42	49,3	49,26	49,35	
Medições finais	43,64	43,5	43,74	43,39	43,59	43,5	43,35	43,34	43,54	
Diferença	5,19	5,27	5,21	5,57	5,43	5,92	5,95	5,92	5,81	Média 5,56
Massa inicial =	566,2	M1 =	550,9	M2 =	534,7	M3 =	518,3	M Final =	501,5	
3º Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	46,19	45,9	45,72	45,85	46,02	45,98	45,92	45,94	45,99	
Medições finais	40,53	40,39	40,44	40,22	40,52	40,14	40,27	40,27	40,02	
Diferença	5,66	5,51	5,28	5,63	5,5	5,84	5,65	5,67	5,97	Média 5,59
Massa inicial =	462,4	M1 =	446,2	M2 =	430,4	M3 =	413,4	M Final =	395,9	

## ANEXO K - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BB/M50										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,01	49,04	49,36	48,77	49,02	49,20	48,20	48,03	47,87	
Medições finais	42,87	43,12	43,09	43,16	43,03	43,24	42,85	43,13	43,16	
Diferença	6,14	5,92	6,27	5,61	5,99	5,96	5,35	4,90	4,71	Média
Massa inicial =	551,2	M1 =	533,7	M2 =	521,8	M3 =	506,1	M Final =	489,3	5,76
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,86	50,21	50,23	49,76	50,35	50,24	49,69	49,92	50,03	
Medições finais	44,46	44,54	44,48	44,61	44,58	44,59	44,49	44,57	44,49	
Diferença	5,40	5,67	5,75	5,15	5,77	5,65	5,20	5,35	5,54	Média
Massa inicial =	570,0	M1 =	556,1	M2 =	541,0	M3 =	524,9	M Final =	508,5	5,49
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,91	49,21	49,20	49,35	49,27	49,00	49,39	49,11	49,16	
Medições finais	43,33	43,47	43,50	43,40	43,56	43,42	43,28	43,40	43,36	
Diferença	5,58	5,74	5,70	5,95	5,71	5,58	6,11	5,71	5,80	Média
Massa inicial =	552,3	M1 =	538,7	M2 =	523,2	M3 =	506,3	M Final =	488,3	5,76

BRM										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	46,50	46,44	45,91	46,53	46,38	46,02	46,82	46,46	46,16	
Medições finais	40,30	40,10	40,21	40,59	40,36	39,97	40,06	40,15	16,00	
Diferença	6,20	6,34	5,70	5,94	6,02	6,05	6,76	6,31	30,16	Média
Massa inicial	530,2	M1	515,2	M2	498,2	M3	479,5	M Final	460,4	6,17
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,46	49,3	49,36	49,45	49,79	49,35	49,32	49,46	49,41	
Medições finais	42,16	42,27	42,31	42,4	42,43	42,51	41,87	42,07	42,32	
Diferença	7,3	7,03	7,05	7,05	7,36	6,84	7,45	7,39	7,09	Média
Massa inicial =	542,1	M1 =	523,6	M2 =	504,2	M3 =	483,2	M Final =	462,2	7,18
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	45,39	45,37	45,26	45,73	45,89	46,00	46,53	45,79	45,73	
Medições finais	38,84	39,26	39,36	38,72	38,93	39,01	38,64	38,76	39,02	
Diferença	6,55	6,11	5,90	7,01	6,96	6,99	7,89	7,03	6,71	Média
Massa inicial =	515,1	M1 =	498,7	M2 =	479,7	M3 =	459,7	M Final =	439,5	6,81

ANEXO K - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BRC										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	46,58	46,14	45,86	45,92	46,14	45,34	45,57	46,05	45,59	
Medições finais	41,33	41,69	41,39	41,21	41,52	41,47	40,93	41,11	41,23	
Diferença	5,25	4,45	4,47	4,71	4,62	3,87	4,64	4,94	4,36	Média
Massa inicial =	528,4	M1 =	517,1	M2 =	503,9	M3 =	491,4	M Final =	477,4	4,62
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	45,37	45,29	44,97	45,32	45,33	45,20	45,55	45,74	45,51	
Medições finais	40,62	40,74	40,85	40,55	40,98	40,87	40,32	40,51	40,52	
Diferença	4,75	4,55	4,12	4,77	4,35	4,33	5,23	5,23	4,99	Média
Massa inicial =	519,5	M1 =	507,3	M2 =	494,2	M3 =	480,3	M Final =	466,8	4,67
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	50,33	50,34	49,93	50,47	50,51	50,30	50,28	50,30	50,30	
Medições finais	46,05	45,90	45,91	46,08	46,01	45,92	45,94	45,85	45,78	
Diferença	4,28	4,44	4,02	4,39	4,50	4,38	4,34	4,45	4,52	Média
Massa inicial =	577,9	M1 =	565,7	M2 =	554,1	M3 =	542,1	M Final =	529,5	4,35

BC/M20										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	47,91	48,92	48,40	48,61	48,75	48,61	48,86	48,60	48,77	
Medições finais	44,25	44,34	44,33	44,04	44,39	44,05	43,70	43,75	43,69	
Diferença	3,66	4,58	4,07	4,57	4,36	4,56	5,16	4,85	5,08	Média
Massa inicial =	555,6	M1 =	544,3	M2 =	531,5	M3 =	511,2	M Final =	503,6	4,48
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	45,50	45,84	46,20	45,27	45,82	46,23	45,21	45,18	45,45	
Medições finais	41,13	41,07	41,14	40,98	41,09	40,98	40,50	40,93	40,81	
Diferença	4,37	4,77	5,06	4,29	4,73	5,25	4,71	4,25	4,64	Média
Massa inicial =	521,8	M1 =	508,4	M2 =	494,7	M3 =	481,5	M Final =	467,8	4,68
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,10	47,71	47,87	47,48	47,69	47,25	46,69	46,57	46,53	
Medições finais	42,49	42,68	42,85	42,58	42,64	42,63	42,52	42,44	42,43	
Diferença	5,61	5,03	5,02	4,90	5,05	4,62	4,17	4,13	4,10	Média
Massa inicial =	537,6	M1 =	525,2	M2 =	511,3	M3 =	497,7	M Final =	483,9	4,82

**ANEXO K - RESISTÊNCIA À ABRASÃO**

BC/M50										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	46,83	46,43	46,45	47,23	47,11	46,80	47,61	47,10	46,72	
Medições finais	42,32	42,36	42,68	42,09	42,39	42,29	41,93	42,01	42,07	
Diferença	4,51	4,07	3,77	5,14	4,72	4,51	5,68	5,09	4,65	Média
Massa inicial =	528,9	M1 =	518,0	M2 =	504,6	M3 =	491,3	M Final =	476,2	4,69
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	45,94	46,21	46,52	46,05	46,48	46,20	45,54	45,72	45,93	
Medições finais	42,13	42,10	42,23	42,03	42,20	42,24	41,10	41,96	42,02	
Diferença	3,81	4,11	4,29	4,02	4,28	3,96	4,44	3,76	3,91	Média
Massa inicial =	540,6	M1 =	526,8	M2 =	512,0	M3 =	496,8	M Final =	482,2	4,08
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,87	50,32	50,24	50,09	50,33	49,76	49,73	49,30	49,28	
Medições finais	44,69	45,02	45,04	44,64	44,93	45,05	44,60	44,63	44,76	
Diferença	5,18	5,30	5,20	5,45	5,40	4,71	5,13	4,67	4,52	Média
Massa inicial =	561,4	M1 =	547,8	M2 =	530,9	M3 =	520,0	M Final =	505,6	5,13

BRG										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	47,45	47,48	47,52	47,47	47,63	47,43	47,20	47,55	47,49	
Medições finais	41,46	41,44	41,51	41,53	41,67	41,81	41,55	41,43	41,41	
Diferença	5,99	6,04	6,01	5,94	5,96	5,62	5,65	6,12	6,08	Média
Massa inicial =	524,0	M1 =	508,2	M2 =	491,7	M3 =	475,8	M Final =	459,9	5,92
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,68	49,72	49,87	49,97	50,07	49,95	49,47	50,08	50,37	
Medições finais	44,15	43,98	43,95	44,07	44,31	43,89	44,01	43,91	44,06	
Diferença	5,53	5,74	5,92	5,90	5,76	6,06	5,46	6,17	6,31	Média
Massa inicial =	546,4	M1 =	531,9	M2 =	516,5	M3 =	500,0	M Final =	482,7	5,82
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	51,17	51,31	51,34	51,21	51,48	51,74	51,19	51,52	51,25	
Medições finais	45,37	45,32	45,48	45,42	45,46	45,61	45,20	45,17	45,20	
Diferença	5,80	5,99	5,86	5,79	6,02	6,13	5,99	6,35	6,05	Média
Massa inicial =	561,5	M1 =	545,9	M2 =	529,9	M3 =	513,7	M Final =	495,6	5,99

ANEXO K - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BG/M20										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,77	48,92	48,96	48,93	49,01	49,00	48,70	49,19	49,27	
Medições finais	42,63	42,57	42,80	42,83	42,77	42,92	42,65	42,58	42,68	
Diferença	6,14	6,35	6,16	6,10	6,24	6,08	6,05	6,61	6,59	Média
Massa inicial =	547,8	M1 =	531,2	M2 =	514,5	M3 =	496,0	M Final =	477,9	6,22
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	50,45	50,33	50,01	50,51	50,94	50,43	50,81	50,79	50,68	
Medições finais	43,73	43,77	43,89	43,54	43,80	43,95	43,40	43,41	43,68	
Diferença	6,72	6,56	6,12	6,97	7,14	6,48	7,41	7,38	7,00	Média
Massa inicial =	563,4	M1 =	545,0	M2 =	525,8	M3 =	507,4	M Final =	488,3	6,85
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,79	50,33	50,44	50,05	50,79	50,05	50,19	49,98	49,95	
Medições finais	43,90	43,85	43,89	43,78	43,78	43,99	43,63	43,68	43,62	
Diferença	5,89	6,48	6,55	6,27	7,01	6,06	6,56	6,30	6,33	Média
Massa inicial =	565,6	M1 =	548,6	M2 =	531,3	M3 =	512,9	M Final =	494,4	6,39

BG/M50										
1° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,17	48,64	48,70	48,40	48,72	48,71	48,43	48,72	48,62	
Medições finais	41,88	41,82	41,87	41,99	42,01	41,99	42,00	41,92	42,01	
Diferença	6,29	6,82	6,83	6,41	6,71	6,72	6,43	6,80	6,61	Média
Massa inicial =	512,1	M1 =	494,8	M2 =	477,6	M3 =	460,6	M Final =	442,7	6,63
2° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	49,93	50,14	50,24	50,08	50,23	50,16	50,15	50,16	50,13	
Medições finais	44,70	44,71	44,82	44,61	45,00	44,82	44,42	44,46	44,70	
Diferença	5,23	5,43	5,42	5,47	5,23	5,34	5,73	5,70	5,43	Média
Massa inicial =	566,0	M1 =	552,8	M2 =	537,1	M3 =	521,6	M Final =	505,9	5,44
3° Provete										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Medições iniciais	48,34	48,45	47,95	48,08	48,34	48,00	47,73	47,68	47,57	
Medições finais	42,31	42,38	42,57	42,33	42,54	42,52	42,21	42,23	42,44	
Diferença	6,03	6,07	5,38	5,75	5,80	5,48	5,52	5,45	5,13	Média
Massa inicial =	515,7	M1 =	502,6	M2 =	487,1	M3 =	471,5	M Final =	456,3	5,69