

**DESEMPENHO MECÂNICO DE BETÕES ESTRUTURAIS E DE
ENCHIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS LEVES
PROVENIENTES DA TRITURAÇÃO DE PISOS DE BETÃO LEVE**

José Maria Guedes Machado Lemos de Figueiredo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
ENGENHARIA CIVIL

Júri

Presidente: Prof.^a Doutora Ana Paula Teixeira Ferreira Pinto França de Santana

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Calião Lopes de Brito

Orientador: Prof. Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Prof. Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Vogal: Prof. Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Maio de 2013

RESUMO

O consumo de recursos naturais tem vindo a registar um crescimento exponencial, resultante da inevitável evolução socioeconómica observada nos diversos países. No que respeita à protecção e manutenção do meio ambiente, a reciclagem aparenta ser um dos caminhos que promovem tal objectivo. Deste modo, a incorporação de materiais reciclados no sector da construção promove não só a sustentabilidade dos recursos naturais como também a protecção do meio ambiente. Com o objectivo de conseguir a aceitação do respectivo sector, investigações como a presente pretendem compreender e apresentar os desempenhos mecânicos e de durabilidade de betões produzidos com recurso a agregados reciclados, assim como os seus condicionantes.

Actualmente, o conhecimento no domínio dos betões produzidos com agregados leves reciclados é ainda escasso, pelo que a presente investigação tem como principal objectivo o estudo das suas propriedades mecânicas.

No que concerne à campanha experimental da presente investigação, foram utilizados dois tipos de agregados reciclados, nomeadamente RLHD e RLM, provenientes da produção e posterior trituração de um betão leve estrutural e de um betão leve de enchimento, respectivamente. Produziram-se quatro famílias de betões, resultantes da substituição, parcial ou total, dos agregados leves utilizados (Leca HD e Leca M) pelos agregados leves reciclados (RLHD e RLM). As taxas de substituição aplicadas foram de 0, 20, 50 e 100%, tendo gerado 12 misturas de composições distintas. Cada mistura foi ensaiada tanto no estado fresco, onde se avaliou a sua trabalhabilidade e massa volúmica fresca, como no estado endurecido, onde se analisou a sua resistência à compressão, à tracção por compressão diametral, à abrasão e, ainda, o seu módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos permitiram concluir que o aumento da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado contribui para a melhoria das propriedades mecânicas, variando estas com o tipo de agregado leve reciclado incorporado. Não obstante, a substituição pelo RLHD demonstrou, de um modo geral, um melhoramento mais acentuado das propriedades mecânicas, comparativamente à substituição pelo RLM, não comprometendo a utilização deste tipo de agregado reciclado na produção de betões leves estruturais. Embora a incorporação de RLM não seja a mais adequada para a produção de betões estruturais, verificou-se um incremento significativo das propriedades mecânicas para uma taxa de substituição de 20%.

ABSTRACT

Natural resources consumption has had an exponential increase due to the social economic progress observed in several countries. As far as protection and sustainability of the world are concerned, recycling appears to be an appropriate solution for that purpose. Therefore, the incorporation of recycled material in the construction industry promotes both the sustainability of the natural resources and environmental protection. Researches as this one are intended for the construction sector, by presenting the mechanical and durability performances but also their restrictions.

Currently, the knowledge in the domain of lightweight concrete produced with lightweight recycled aggregates is still scarce/limited. Therefore the main purpose of this research is to study its mechanical properties.

Regarding the experimental program of this research, two types of recycled aggregates, RLHD and RLM, were used, resulting from the production and subsequent grinding of structural and non-structural lightweight concrete, respectively. Four families of concrete were produced, resulting from the partial or total replacement of the original lightweight aggregates (Leca HD and Leca M) by the recycled lightweight aggregates (RLHD and RLM). The substitution rates adopted were 0%, 20%, 50% and 100%, comprising 12 concrete mixes. Each mix was tested both in the fresh state, evaluating its workability and fresh bulk density, and in the hardened state, where the compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and abrasion resistance were analysed.

The results allowed concluding that the increase of the substitution rate of lightweight aggregate by recycled lightweight aggregate promotes the improvement of the mechanical performance. Nevertheless, the replacement by the RLHD, generally led to better mechanical properties compared to the replacement by RLM, not compromising the use of this type of recycled aggregate in structural lightweight concrete. However, although the replacement by RLM does not allow the production of structural lightweight concrete, there was a significant increase of the mechanical properties for a substitution rate of 20%.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação, que envolveu os trabalhos de investigação e culminou com a redacção do documento, foi elaborada ao longo de vários meses. Os inúmeros obstáculos e imprevistos que surgiram foram transpostos com o apoio e o incentivo de algumas pessoas, às quais quero expressar o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador científico desta dissertação, expresso o meu mais profundo agradecimento, não só pela dedicação e exigência que prestou a este trabalho, como também pela amizade, compreensão e disponibilidade demonstrados, ensinando-me o verdadeiro sentido da palavra trabalho. Quero ainda agradecer o sentido crítico, ideias e o rigor que trouxe à dissertação, que em muito a enriqueceram. Sem ele, este trabalho não teria terminado.

Ao professor Doutor José Bogas, co-orientador desta dissertação, pela orientação, experiência e apoio prestado, tendo sido incedível na procura incessante do rigor na interpretação dos resultados obtidos, encontrando-se sempre disponível para todos os esclarecimentos necessários. Quero ainda agradecer a amizade e o incentivo que sempre demonstrou, mesmo nos períodos mais críticos.

Às empresas SECIL, Grupo SOARVAMIL, WEBER, por cederem os materiais necessários à realização da campanha experimental.

À empresa OZEC, não só pela compreensão, ajuda e incentivo demonstrado durante toda a dissertação, como também pela cedência de materiais e transportes, necessários para a realização do trabalho de investigação.

Aos meus colegas investigadores do IST, Eng.^{os} Luís Evangelista, Jorge Pontes e Miguel Bravo, pela ajuda prestada e por tornarem o ambiente do laboratório agradável.

Ao meu colega e amigo João Miguel Cabaço, com quem tive o prazer de colaborar nesta investigação, não só pelo apoio e compreensão durante a fase de ensaios, como também pela lealdade e companheirismo demonstrados ao longo desta investigação.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do IST, João Lopes, Fernando Alves e Pedro Costa, pela ajuda no trabalho efectuado e pela amizade.

Aos meus amigos Daniel Moreira, Pedro Gonçalves, Manuel Catarino, Francisco Matias e Jorge Filipe, pela ajuda incalculável na elaboração desta investigação.

Ao Manuel Pinto Coelho, Luís Hintze Ribeiro, Luís Abrantes, Margarida Ferreira, Guilherme Lebre, João Morgado, Francisco Silva Pinto, Gonçalo Bile, Alexandra Silva, Carla Ferreira, João Ferraz, João Pacheco, Leonor Rosa, Paula Simas, Pedro Serrão, Rita Alves, Frederico Baptista, Vera Pontes e aos restantes amigos e colegas de curso, que sempre me apoiaram, acompanharam e contribuíram para o sucesso da minha formação profissional e do meu desenvolvimento pessoal.

Aos meus pais, José Pedro e Isabel, pela entrega e estímulo, pelo apoio, confiança e compreensão revelados ao longo destes meses. Acima de tudo, o meu especial e sentido obrigado por nunca terem deixado de acreditar.

Aos meus irmãos, Pedro, Mariana e Teresa, pelo apoio, motivação e paciência demonstrada ao longo deste período.

À minha Família, em particular à minha avó Mia, tia Nina, tia Lurdes, tia Teresa, tia Leonor, Tio Henrique e finalmente ao meu padrinho Carlos Pintassilgo, por todo o auxílio, preocupação, afecto e apoio incondicional prestados ao longo da minha vida pessoal e, em particular, no meu percurso académico.

Por fim, mas não com menos importância, a todas as pessoas que, de forma directa ou indirecta, acompanharam esta fase da minha vida e contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal. Obrigado pela amizade, pelos conselhos e pela compreensão demonstrada.

ACRÓNIMOS

a/c - relação água / cimento

ABR - agregados de betão reciclado de massa volúmica comum

AL - agregados leves

ALBR - agregados de betão leve reciclado

AN - agregados com massa volúmica normal

BRHD - betão leve de referência (Leca HD)

BHD20RHD - betão de Leca HD com 20% de reciclados de Leca HD

BHD50RHD - betão de Leca HD com 50% de reciclados de Leca HD

BHD20RM - betão de Leca HD com 20% de reciclados de Leca M

BHD50RM - betão de Leca HD com 50% de reciclados de Leca M

BRM - betão leve de referência (Leca M)

BM20RHD - betão de Leca M com 20% de reciclados de Leca HD

BM50RHD - betão de Leca M com 50% de reciclados de Leca HD

BM20RM - betão de Leca M com 20% de reciclados de Leca M

BM50RM - betão de Leca M com 50% de reciclados de Leca M

B100RHD - betão com 100% de reciclados de Leca HD

B100RM - betão com 100% de reciclados de Leca M

RCD - resíduos de construção e demolição

RLM - reciclados de Leca M

RLHD - reciclados de Leca HD

ÍNDICES

Índice geral

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Acrónimos	v
Índice geral	vii
Índice de figuras	xv
Índice de quadros	xix
1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objectivos e metodologia	3
1.3. Metodologia e organização da dissertação	4
2. Estado da arte	7
2.1. Introdução	7
2.2. Propriedades dos agregados leves	7
2.2.1. Características granulométricas	8
2.2.2. Massa volúmica e baridade	10
2.2.3. Absorção	13
2.2.4. Capacidade resistente dos agregados leves	14
2.3. Propriedades dos agregados grossos reciclados	15
2.3.1. Características granulométricas	16
2.3.2. Massa volúmica e baridade	17
2.3.3. Absorção	19
2.3.4. Capacidade resistente dos agregados reciclados	21
2.4. Propriedades do betão com agregados leves	23
2.4.1. Massa volúmica	23
2.4.2. Absorção	25
2.4.3. Resistência à compressão	27
2.4.4. Resistência à tracção	30
2.4.5. Módulo de elasticidade	33
2.4.6. Resistência ao desgaste por abrasão	35

2.5. Propriedades do betão com agregados reciclados	37
2.5.1. Massa volúmica	37
2.5.2. Absorção	39
2.5.3. Resistência à compressão	41
2.5.4. Resistência à tracção	44
2.5.5. Módulo de elasticidade	46
2.5.6. Resistência ao desgaste por abrasão	47
2.6. Conclusões do capítulo	49
3. Campanha experimental	53
3.1. Introdução	53
3.2. Fases da campanha experimental	53
3.2.1. Primeira fase experimental	53
3.2.2. Segunda fase experimental	54
3.2.3. Terceira fase experimental	54
3.2.4. Quarta fase experimental	55
3.3. Análise experimental dos agregados	55
3.3.1. Introdução	55
3.3.2. Análise granulométrica	56
3.3.2.1. Objectivo do ensaio	56
3.3.2.2. Normas de ensaio	56
3.3.2.3. Equipamento necessário	56
3.3.2.4. Amostras	57
3.3.2.5. Procedimento de ensaio	57
3.3.2.6. Resultados	58
3.3.3. Massa volúmica e absorção de água	59
3.3.3.1. Objectivo do ensaio	59
3.3.3.2. Normas de ensaio	59
3.3.3.3. Equipamento necessário	59
3.3.3.4. Amostras	60
3.3.3.5. Procedimento de ensaio	61
3.3.3.6. Resultados	63
3.3.4. Baridade	63
3.3.4.1. Objectivo do ensaio	63
3.3.4.2. Normas de ensaio	63
3.3.4.3. Equipamento necessário	63

3.3.4.4. Amostras	64
3.3.4.5. Procedimento de ensaio	64
3.3.4.6. Resultados	64
3.3.5. Teor em água	65
3.3.5.1. Objectivo do ensaio	65
3.3.5.2. Normas de ensaio	65
3.3.5.3. Equipamento necessário	65
3.3.5.4. Amostras	65
3.3.5.5. Procedimento de ensaio	66
3.3.5.6. Resultados	66
3.3.6. Resistência ao esmagamento	66
3.3.6.1. Objectivo do ensaio	66
3.3.6.2. Normas de ensaio	67
3.3.6.3. Equipamento necessário	67
3.3.6.4. Amostras	67
3.3.6.5. Procedimento de ensaio	67
3.3.6.6. Resultados	68
3.3.7. Índice de forma	68
3.3.7.1. Objectivo do ensaio	68
3.3.7.2. Normas de ensaio	69
3.3.7.3. Equipamento necessário	69
3.3.7.4. Amostras	69
3.3.7.5. Procedimento de ensaio	69
3.3.7.6. Resultados	70
3.3.8. Evolução da absorção de água	70
3.3.8.1. Objectivo do ensaio	70
3.3.8.2. Normas de ensaio	70
3.3.8.3. Equipamento necessário	70
3.3.8.4. Amostras	71
3.3.8.5. Procedimento de ensaio	71
3.3.8.6. Resultados	71
3.4. Produção dos agregados reciclados	72
3.4.1. Betão de origem (BO)	72
3.4.2. Britagem dos agregados	75
3.5. Formulação dos betões	76

3.5.1. Betões de referência	77
3.5.1.1. Máxima dimensão do agregado ($D_{\text{máx}}$)	77
3.5.1.2. Dosagem de cimento (C)	78
3.5.1.3. Volume de vazios (V_v)	78
3.5.1.4. Índice de vazios	79
3.5.1.5. Dosagem de água da amassadura (A) e relação água / cimento (a/c)	80
3.5.1.6. Volume de cimento (V_c)	80
3.5.1.7. Volume das partículas sólidas	80
3.5.1.8. Percentagem do volume de cimento relativamente ao volume sólido total (C%)	82
3.5.1.9. Curva de referência de Faury	82
3.5.2. Betões com agregados leves reciclados	85
3.5.3. Composição dos betões	86
3.6. Produção dos betões	87
3.6.1. Processo	87
3.7. Ensaio dos betões	89
3.7.1. Ensaio no estado fresco	90
3.7.1.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)	90
3.7.1.1.1. Objectivo do ensaio	90
3.7.1.1.2. Normas de ensaio	90
3.7.1.1.3. Equipamento necessário	90
3.7.1.1.4. Amostras	91
3.7.1.1.5. Procedimento de ensaio	91
3.7.1.1.6. Resultados	92
3.7.1.2. Massa volúmica	92
3.7.1.2.1. Objectivo do ensaio	92
3.7.1.2.2. Normas de ensaio	92
3.7.1.2.3. Equipamento necessário	93
3.7.1.2.4. Amostras	93
3.7.1.2.5. Procedimento de ensaio	93
3.7.1.2.6. Resultados	94
3.7.2. Ensaio no estado endurecido	94
3.7.2.1. Resistência à compressão	95
3.7.2.1.1. Objectivo do ensaio	95
3.7.2.1.2. Normas de ensaio	95
3.7.2.1.3. Equipamento necessário	95

3.7.2.1.4. Provetes de ensaio	96
3.7.2.1.5. Procedimento de ensaio	96
3.7.2.1.6. Resultados	96
3.7.2.2. Resistência à tracção por compressão diametral	97
3.7.2.2.1. Objectivo do ensaio	97
3.7.2.2.2. Normas de ensaio	97
3.7.2.2.3. Equipamento necessário	97
3.7.2.2.4. Provetes de ensaio	98
3.7.2.2.5. Procedimento de ensaio	98
3.7.2.2.6. Resultados	99
3.7.2.3. Módulo de elasticidade	99
3.7.2.3.1. Objectivo do ensaio	99
3.7.2.3.2. Normas de ensaio	100
3.7.2.3.3. Equipamento necessário	100
3.7.2.3.4. Provetes de ensaio	100
3.7.2.3.5. Procedimento de ensaio	100
3.7.2.3.6. Resultados	101
3.7.2.4. Resistência à abrasão	102
3.7.2.4.1. Objectivo do ensaio	102
3.7.2.4.2. Normas de ensaio	102
3.7.2.4.3. Equipamento necessário	102
3.7.2.4.4. Provetes de ensaio	102
3.7.2.4.5. Procedimento de ensaio	103
3.7.2.4.6. Resultados	104
4. Resultados da campanha experimental	105
4.1. Introdução	105
4.2. Ensaio dos agregados	105
4.2.1. Análise granulométrica	105
4.2.1.1. Resultados obtidos	105
4.2.1.1.1. Areia fina	105
4.2.1.1.2. Areia grossa	106
4.2.1.1.3. Leca HD	107
4.2.1.1.4. Leca M	108
4.2.1.1.5. RLHD	110
4.2.1.1.6. RLM	111

4.2.1.2. Discussão dos resultados	112
4.2.2. Massa volúmica e absorção de água	112
4.2.2.1. Resultados obtidos	112
4.2.2.2. Discussão dos resultados	114
4.2.3. Baridade	115
4.2.3.1. Resultados obtidos	115
4.2.3.2. Discussão dos resultados	116
4.2.4. Teor em água	116
4.2.4.1. Resultados obtidos	116
4.2.5. Resistência ao esmagamento	117
4.2.5.1. Resultados obtidos	117
4.2.5.2. Discussão dos resultados	117
4.2.6. Índice de forma	118
4.2.6.1. Resultados obtidos	118
4.2.6.2. Discussão dos resultados	118
4.2.7. Evolução da absorção de água	119
4.2.7.1. Resultados obtidos	119
4.2.7.1.1. Agregados não reciclados	119
4.2.7.1.2. Agregados reciclados	120
4.2.7.2. Discussão dos resultados	120
4.3. Ensaio do betão no estado fresco	122
4.3.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)	122
4.3.1.1. Resultados obtidos	122
4.3.1.2. Discussão dos resultados	123
4.3.2. Ensaio de massa volúmica fresca	124
4.3.2.1. Resultados obtidos	124
4.3.2.2. Discussão dos resultados	126
4.4. Ensaio do betão no estado endurecido	127
4.4.1. Resistência à compressão	127
4.4.1.1. Série BHD	127
4.4.1.1.1. Resultados obtidos	127
4.4.1.2. Série BM	136
4.4.1.2.1. Resultados obtidos	136
4.4.2. Resistência à tracção por compressão diametral	142
4.4.2.1. Série BHD	142

4.4.2.1.1. Resultados obtidos	142
4.4.2.2. Série BM	146
4.4.2.2.1. Resultados obtidos	146
4.4.3. Módulo de elasticidade	150
4.4.3.1. Série BHD	150
4.4.3.1.1. Resultados obtidos	150
4.4.3.2. Série BM	154
4.4.3.2.1. Resultados obtidos	154
4.4.4. Resistência à abrasão	157
4.4.4.1. Série BHD	157
4.4.4.1.1. Resultados obtidos	157
4.4.4.2. Série BM	160
4.4.4.2.1. Resultados obtidos	160
5. Conclusões	163
5.1. Considerações gerais	163
5.2. Conclusões gerais	163
5.2.1. Propriedades dos agregados leves reciclados	164
5.2.2. Propriedades do betão no estado fresco	165
5.2.3. Propriedades do betão no estado endurecido	165
5.3. Propostas de desenvolvimento futuro	168
Bibliografia	171
Páginas de internet	181
Normas	182
Anexos	
ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS	A1
ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES	B1
ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	C1
ANEXO D - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA	D1
ANEXO E - BARIDADE	E1
ANEXO F - RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO	F1
ANEXO G - TEOR EM ÁGUA	G1
ANEXO H - ÍNDICE DE FORMA	H1
ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	I1
ANEXO J - MASSA VOLUMICA NO ESTADO ENDURECIDO	J1
ANEXO K - QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS	K1

ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	L1
ANEXO M - RESISTÊNCIA À TRACCAO POR COMPRESSAO DIAMETRAL	M1
ANEXO N - MODULO DE ELASTICIDADE	N1
ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO	O1

Índice de figuras

Figura 2.1 - Classificação dos diversos tipos de agregados leves	10
Figura 2.2 - Agregado reciclado genérico	15
Figura 2.3 - Modelo de distribuição de tensão de compressão no betão convencional e no betão leve	28
Figura 2.4 - Relação entre a resistência à compressão e o teor de cimento ou relação a/c	29
Figura 2.5 - Módulo de elasticidade tangente (E_t) e secante (E_c) no betão	34
Figura 2.6 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão	35
Figura 2.7 - Relação entre a massa volúmica e a percentagem de substituição do agregado	38
Figura 2.8 - Variação de espessura com a taxa de substituição de agregados grossos naturais por agregados grossos cerâmicos	48
Figura 3.1 - Estufa ventilada	57
Figura 3.2 - Agitador de peneiros e respectivos peneiros da série 933-2	57
Figura 3.3 - Pesagem do picnómetro com amostra inserida	62
Figura 3.4 - Partículas de agregado de dimensão entre 0,0063 e 4,0 mm retiradas do picnómetro	62
Figura 3.5 - Indicações presentes na norma NP EN 1097-6 para a determinação do estado saturado com superfície seca	62
Figura 3.6 - Recipiente metálico para o ensaio de esmagamento	67
Figura 3.7 - Cofragem em contraplacado marítimo	72
Figura 3.8 - Cofragem betonada	72
Figura 3.9 - Blocos do betão de origem BOHD	73
Figura 3.10 - Blocos do betão de origem BOM	73
Figura 3.11 - Bloco do betão de origem BOHD	73
Figura 3.12 - Bloco do betão de origem BOM	73
Figura 3.13 - Britadeira	75
Figura 3.14 - Acondicionamento do agregado reciclado RLHD	76
Figura 3.15 - Acondicionamento do agregado reciclado RLM	76
Figura 3.16 - Curva de Faury com e sem cimento	84
Figura 3.17 - Método gráfico de Faury	84
Figura 3.18 - Betoneira de eixo basculante	87
Figura 3.19 - Vibrador de agulha	88
Figura 3.20 - Preparação dos moldes	88
Figura 3.21 - Moldes betonados	88

Figura 3.22 - Camara húmida e respectivos provetes	89
Figura 3.23 - Placa, molde metálico de forma troncocónica, varão de compactação, colher de pedreiro, régua e funil	90
Figura 3.24 - Ensaio de abaixamento	91
Figura 3.25 - Ensaio de abaixamento	92
Figura 3.26 - Formas de abaixamento	92
Figura 3.27 - Recipiente estanque de 10l de capacidade	93
Figura 3.28 - Ensaio da massa volúmica fresca	94
Figura 3.29 - Prensa hidráulica	95
Figura 3.30 - Graus de satisfação relativos à rotura de provetes cúbicos - a) satisfatórias; b) não satisfatórias	97
Figura 3.31 - Posicionador, peça de carga em aço e faixas de cartão prensado	98
Figura 3.32 - Prensa hidráulica	100
Figura 3.33 - Deflectómetros eléctricos	100
Figura 3.34 - Máquina de Böhme	102
Figura 3.35 - Pó abrasivo	102
Figura 3.36 - Distribuição dos pontos de medição	104
Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina	106
Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia grossa	107
Figura 4.3 - Comparação da curva granulométrica da Leca HD do fornecedor com a curva obtida no laboratório	108
Figura 4.4 - Comparação da curva granulométrica da Leca M do fornecedor com a curva obtida no laboratório	109
Figura 4.5 - Curva granulométrica do RLHD	110
Figura 4.6 - Curva granulométrica do RLM	111
Figura 4.7 - Massa volúmica dos agregados	112
Figura 4.8 - Absorção dos agregados após 24 horas	113
Figura 4.9 - Baridade média dos agregados	115
Figura 4.10 - Resistência ao esmagamento dos agregados grossos	117
Figura 4.11 - Evolução da absorção de água nos agregados leves	119
Figura 4.12 - Evolução da absorção de água nos agregados leves reciclados	120
Figura 4.13 - Resultados do abaixamento	123
Figura 4.14 - Variação da massa volúmica fresca em função da taxa de substituição de RLHD	124
Figura 4.15 - Variação da massa volúmica fresca consoante a taxa de substituição de RLM	125
Figura 4.16 - Evolução da resistência à compressão da série BHD	128

Figura 4.17 - Eficiência estrutural aos 28 dias da série BHD	128
Figura 4.18 - Influência da taxa de substituição na resistência à compressão aos 28 dias relativo à série BHD	130
Figura 4.19 - Influência da taxa de substituição na massa volúmica seca da série BHD	130
Figura 4.20 - Influência da massa volúmica seca na resistência à compressão aos 28 dias da série BHD	131
Figura 4.21 - Influência da substituição de RLHD na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BHD	132
Figura 4.22 - Influência da substituição de RLM na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BHD	133
Figura 4.23 - Variação da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRHD, ao longo do tempo	135
Figura 4.24 - Variação da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRM, ao longo do tempo	135
Figura 4.25 - Evolução da resistência à compressão da série BM	136
Figura 4.26 - Eficiência estrutural aos 28 dias da série BM	136
Figura 4.27 - Influência da taxa de substituição na resistência à compressão aos 28 dias relativo à série BM	137
Figura 4.28 - Influência da taxa de substituição na massa volúmica seca da série BM	138
Figura 4.29 - Influência da massa volúmica seca na resistência à compressão aos 28 dias da série BM	138
Figura 4.30 - Influência da substituição de RLM na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BM	139
Figura 4.31 - Influência da substituição de RLHD na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BHD	140
Figura 4.32 - Variação da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRM, ao longo do tempo	141
Figura 4.33 - Variação da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRHD, ao longo do tempo	141
Figura 4.34 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias relativo à série BHD	143
Figura 4.35 - Superfície de ruptura das misturas da série BHD (ruptura pelo agregado em ambas as substituições por RLHD e RLM)	143
Figura 4.36 - Influência da massa volúmica seca na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BHD	144

Figura 4.37 - Resistência à tracção por compressão diametral <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BHD	145
Figura 4.38 - Resistência à tracção por compressão diametral <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BHD tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)	145
Figura 4.39 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias relativo à série BM	147
Figura 4.40 - Superfície de ruptura das misturas da série BM (ruptura pelo agregado em ambas as substituições por RLHD e RLM)	147
Figura 4.41 - Influência da massa volúmica seca na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BM	148
Figura 4.42 - Resistência à tracção por compressão diametral <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BM	149
Figura 4.43 - Resistência à tracção por compressão diametral <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BM tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)	149
Figura 4.44 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado no módulo de elasticidade aos 28 dias relativo à série BHD	151
Figura 4.45 - Influência da massa volúmica seca no módulo de elasticidade aos 28 dias da série BHD	152
Figura 4.46 - Módulo de elasticidade <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BHD	153
Figura 4.47 - Módulo de elasticidade <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BHD tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)	153
Figura 4.48 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado no módulo de elasticidade aos 28 dias relativo à série BM	155
Figura 4.49 - Influência da massa volúmica seca no módulo de elasticidade aos 28 dias da série BM	155
Figura 4.50 - Módulo de elasticidade <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BM	156
Figura 4.51 - Módulo de elasticidade <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias da série BM tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)	156
Figura 4.52 - Desgaste médio aos 91 dias da série BHD	158
Figura 4.53 - Diferença de massas da série BHD	158
Figura 4.54 - Evolução do desgaste segundo a resistência à compressão aos 28 dias da série BHD	159
Figura 4.55 - Desgaste médio aos 91 dias da série BM	160
Figura 4.56 - Diferença de massas da série BM	161
Figura 4.57 - Evolução do desgaste segundo a resistência à compressão aos 28 dias da série BM	161

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Propriedades físicas dos agregados Leca HD e Leca M	7
Quadro 2.2 - Propriedades químicas dos agregados Leca HD e Leca M	8
Quadro 2.3 - Agregados leves para a produção de betões	11
Quadro 2.4 - Resistência ao esmagamento do agregado de Leca	14
Quadro 3.1 - Ensaio a agregados grossos naturais e reciclados	54
Quadro 3.2 - Ensaio a agregados finos	54
Quadro 3.3 - Ensaio ao betão no estado fresco	54
Quadro 3.4 - Ensaio ao betão no estado endurecido	55
Quadro 3.5 - Massa mínima dos provetes de ensaio	57
Quadro 3.6 - Massa mínima dos provetes de ensaio	60
Quadro 3.7 - Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado	64
Quadro 3.8 - Massa mínima dos provetes	69
Quadro 3.9 - Composição dos betões de origem/m ³ betão	74
Quadro 3.10 - Características dos betões de origem	74
Quadro 3.11 - Resultados dos ensaios de compressão do BOM	75
Quadro 3.12 - Resultados dos ensaios de compressão e tracção do BOM	75
Quadro 3.13 - Características dos betões de referência	77
Quadro 3.14 - Volume de vazio em função da máxima dimensão dos agregados	79
Quadro 3.15 - Classificação da trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes	80
Quadro 3.16 - Valores para os parâmetros K e K' em função da natureza dos agregados, meios de colocação em obra e trabalhabilidade	80
Quadro 3.17 - Valores dos parâmetros A e B	83
Quadro 3.18 - Definição das curvas de Faury	83
Quadro 3.19 - Dosagem de cada agregado	85
Quadro 3.20 - Composição dos diversos betões produzidos	86
Quadro 3.21 - Processo de cura conforme ensaio a realizar	89
Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina	106
Quadro 4.2 - Dimensão máxima e módulo de finura da areia fina	106
Quadro 4.3 - Análise granulométrica da areia grossa	107
Quadro 4.4 - Dimensão máxima e módulo de finura da areia grossa	107

Quadro 4.5 - Análise granulométrica da Leca HD	108
Quadro 4.6 - Dimensão máxima e módulo de finura da Leca HD	108
Quadro 4.7 - Análise granulométrica da Leca M	109
Quadro 4.8 - Dimensão máxima e módulo de finura da Leca M	109
Quadro 4.9 - Análise granulométrica do RLHD	110
Quadro 4.10 - Dimensão máxima e módulo de finura do RLHD	110
Quadro 4.11 - Análise granulométrica do RLM	111
Quadro 4.12 - Dimensão máxima e módulo de finura do RLM	111
Quadro 4.13 - Massas volúmicas dos agregados	112
Quadro 4.14 - Absorção dos agregados após 24 horas	113
Quadro 4.15 - Baridade média dos agregados	115
Quadro 4.16 - Resultados médios obtidos para o teor em água dos agregados	116
Quadro 4.17 - Resistência ao esmagamento dos agregados grossos	117
Quadro 4.18 - Índice de forma dos agregados reciclados	118
Quadro 4.19 - Evolução da absorção de água nos agregados leves	119
Quadro 4.20 - Evolução da absorção de água nos agregados reciclados	120
Quadro 4.21 - Resultados do abaixamento e relação a/c segundo cada composição produzida	123
Quadro 4.22 - Massa volúmica fresca de todas as composições produzidas	124
Quadro 4.23 - Massa volúmica fresca e variação de massa aquando da substituição de RLHD	125
Quadro 4.24 - Massa volúmica fresca e variação de massa aquando da substituição de RLM	125
Quadro 4.25 - Resistência média à compressão da série BHD	128
Quadro 4.26 - Percentagem de agregado e argamassa para cada nível de substituição	129
Quadro 4.27 - Resistência à compressão da série BHD relativa aos betões de referência	134
Quadro 4.28 - Resistência média à compressão da série BM	136
Quadro 4.29 - Resistência à compressão da série BM relativa aos betões de referência	141
Quadro 4.30 - Resistência média à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BHD	142
Quadro 4.31 - Resistência média à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BM	146
Quadro 4.32 - Módulo de elasticidade aos 28 dias da série BHD	150
Quadro 4.33 - Módulo de elasticidade aos 28 dias da série BM	154
Quadro 4.34 - Resistência à abrasão aos 91 dias da série BHD	158
Quadro 4.35 - Resistência à abrasão aos 91 dias da série BM	160

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A reciclagem e reaproveitamento de resíduos tem vindo a suscitar cada vez maior interesse dado o aumento do consumo e produção de betão que se tem verificado ao longo do tempo.

Em Portugal, segundo o INE (Instituto Nacional de Estatística), a construção é um dos sectores da actividade económica que gera maiores quantidades de resíduos (16,5%), devido à natureza dos materiais envolvidos. No nosso país, esta situação é idêntica à da generalidade dos demais estados membros da União Europeia em que se estima uma produção anual global de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD).

Não obstante as quantidades de resíduos muito significativas, inerentes ao sector da construção, o fluxo de resíduos acomoda outras características que dificultam a sua gestão, tais como a sua constituição heterogénea com fracções de dimensões variadas e diferentes níveis de perigosidade.

Segundo Zordan (1997), a reutilização dos resíduos provenientes da construção começa a ser considerada como uma boa alternativa às matérias primas tradicionais.

Os resíduos provenientes da actual produção na construção são concebidos, quer para bens de consumo duráveis (edifícios, pontes e estradas), quer não-duráveis (embalagens descartáveis). A produção recorre, a maior parte das vezes, a matérias-primas não-renováveis de origem natural. Porém, segundo John (1999, 2000) e Günther (2000), este modelo apresenta alguns problemas, em razão da escassez de recursos naturais e do maior número de pessoas inseridas na sociedade de consumo.

Paralelamente à intensa industrialização, ao enorme avanço tecnológico, ao crescimento populacional, nomeadamente em centros urbanos, e, ainda, à diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos começaram a representar graves problemas urbanos com uma gestão dispendiosa e complexa.

Uma das soluções encontrada para o crescente aumento da produção de resíduos é a sua reciclagem, solução esta que denota o grande potencial que a construção civil representa, aquando da utilização dos mesmos, dado que a mesma chega a consumir 75% de recursos naturais [John (2000); Levy (2001); Pinto (1999)].

Através de soluções de reutilização / reciclagem de resíduos, conduz-se o sector da construção ao conceito de desenvolvimento sustentável, compreendido aqui como uma acção que procede a alterações na exploração de recursos, no rumo dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas reestruturação / reorganização das instituições. Por outro lado, para a execução deste conceito, não

basta apenas a multidisciplinariedade mas também são necessárias mudanças culturais, educação ambiental e visão sistémica [Brandon (1998); Angulo (1998); John (2000); Zwan (1997)].

Assim, a reciclagem na construção civil traz algumas vantagens, tais como:

- diminuição do consumo de recursos naturais não-renováveis, se substituídos por resíduos reciclados [John (2000)];
- diminuição de áreas necessárias para aterro, pela redução de volume de resíduos pela reciclagem; evidencia-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que caracterizam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos [Pinto (1999)];
- diminuição do consumo de energia aquando do processo de produção; evidencia-se a indústria do cimento, que utiliza resíduos de enorme poder calorífico, como forma de obter a sua matéria-prima (co-incineração) ou recorrendo à escória de alto forno, resíduo com composição semelhante à do cimento [John (2000)];
- diminuição da poluição; por exemplo, para a indústria de cimento, que diminui a emissão de gás carbónico, recorrendo à escória de alto forno em substituição do cimento Portland [John (2000)].

Presentemente, o betão constitui um dos materiais mais empregues na indústria da construção, sendo a sua produção anual estimada em cerca de 1,5 toneladas por habitante, no mundo industrializado. As inúmeras vantagens que o betão apresenta, quer ao nível económico, quer ao nível da versatilidade e comportamento mecânico, justificam a sua actual supremacia face às alternativas.

É usual associar-se o betão a um material pesado e frio, factor este que conduz à crescente necessidade de encontrar soluções que procuram corrigir e potenciar todas as vantagens que o mesmo apresenta. Nesta óptica, o betão com agregados leves (BAL) que se caracteriza por apresentar massas volúmicas inferiores a 2000 kg/m^3 e uma condutibilidade térmica mais baixa do que o betão convencional veio dar resposta a estas exigências. A redução de massa volúmica permite a concepção de estruturas mais ligeiras, constituindo assim uma enorme vantagem.

De forma análoga, Bogas (2011), Silva (2007) e Berntsson, (2003) referem que o betão com agregados leves apresenta outras vantagens, tais como:

- soluções arquitectónicas mais arrojadas;
- menor custo e maior facilidade de transporte, dependendo dos locais de fornecimento;
- melhor isolamento térmico;
- redução do efeito da acção sísmica; aumento da capacidade de dissipação de energia (maior capacidade de deformação);
- melhoria no comportamento ao fogo.

Silva et al. (2004) referem que a utilização de betão com agregados leves face ao betão convencional apresenta um conjunto de características interessantes que conduzem a uma redução de custos, tornando a sua utilização cada vez mais recorrente no sector da construção.

Este tipo de betão (BAL) tem sido alvo de inúmeros estudos que permitem actualmente concluir que é possível alcançar, com o uso de determinados tipos de agregados de argila expandida, betões leves com resistências semelhantes à dos betões convencionais de igual composição.

Em Portugal, o recurso a este tipo de betão com agregados leves ainda não teve a aceitação desejada. Contudo, a pala do pavilhão de Portugal na EXPO 98, uma das obras emblemáticas do país, representa um dos melhores exemplos que o uso deste tipo de betão proporciona.

1.2. Objectivos e metodologia

A presente investigação tem como principais objectivos:

- associar a reciclagem de betão leve com a produção do mesmo;
- contribuir para o desenvolvimento da investigação existente no campo da gestão e reutilização dos RCD's;
- contribuir para o desenvolvimento sustentável do sector da construção;
- analisar o desempenho mecânico dos betões estruturais e de enchimento com incorporação de agregados provenientes da trituração de pisos de betão leve (estrutural e não estrutural).

Com esse intuito, fabricou-se um total de 12 betões com diversas composições, variando entre cada um as taxas de substituição (0, 20, 50 e 100%) de dois tipos de agregado leve (Leca M e Leca HD) por dois tipos de agregados leves reciclados (RLHD e RLM), e posteriormente analisou-se os resultados obtidos em termos de desempenho mecânico.

Os 12 betões designam-se por:

- **BRM** - betão leve de referência (Leca M);
- **BRHD** - betão leve de referência (Leca HD);
- **BHD20RLHD** - betão de Leca HD com 20% de reciclados de Leca HD;
- **BHD50RLHD** - betão de Leca HD com 50% de reciclados de Leca HD;
- **B100RLHD** - betão com 100% de reciclados de Leca HD;
- **BHD20RLM** - betão de Leca HD com 20% de reciclados de Leca M;
- **BHD50RLM** - betão de Leca HD com 50% de reciclados de Leca M;
- **BM20RLM** - betão de Leca M com 20% de reciclados de Leca M;
- **BM50RLM** - betão de Leca M com 50% de reciclados de Leca M;

- **B100RLM** - betão com 100% de reciclados de Leca M;
- **BM20RHD** - betão de Leca M com 20% de reciclados de Leca HD;
- **BM50RHD** - betão de Leca M com 20% de reciclados de Leca HD.

Durante a campanha experimental, foram ensaiados provetes, de forma a determinar o comportamento do betão relativamente às suas principais características mecânicas (resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à abrasão). Por fim, os resultados dos ensaios foram analisados e tiradas as devidas conclusões.

De forma paralela, foi realizada por João Miguel Quilhó Correia Cabaço, do Instituto Superior Técnico, uma outra dissertação que examina o “Desempenho em termos de durabilidade de betões de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve”.

1.3. Metodologia e organização da dissertação

A metodologia adoptada ao longo da presente investigação foi confinada a quatro etapas, de forma a atingir um trabalho claro, completo e organizado. A primeira etapa ocupou-se do tratamento bibliográfico de trabalhos realizados no âmbito da actual dissertação, consistindo na pesquisa, recolha e posterior processamento das referências bibliográficas, quer a nível nacional como também internacional. Esta etapa teve o objectivo de integrar o que já fora analisado de forma a planificar a campanha experimental.

A segunda etapa compreendeu a elaboração de um plano referente, não só à produção das misturas, como também dos ensaios normalizados a executar aos respectivos agregados e betões com eles produzidos. No que concerne ao referido plano, foram nele definidos quais as quantidades de material a encomendar, assim como todos os prazos e equipamentos necessários para a correcta validação dos ensaios a realizar.

A terceira etapa comportou a execução da campanha experimental, que se desenvolveu em três fases. Na primeira, foram caracterizados os agregados utilizados aquando da produção das misturas a ensaiar, segundo os diversos ensaios estipulados na etapa anterior. A segunda fase compreendeu a produção de todas as composições pré-estabelecidas e posterior caracterização dos respectivos betões no estado fresco, segundo os ensaios determinados na etapa anterior. Por fim, a terceira e última fase consistiu na execução dos ensaios mecânicos das diversas composições produzidas.

Finalmente, a discussão e interpretação dos resultados obtidos referentes a todas as composições produzidas foram abordadas numa quarta etapa, procurando-se identificar as principais diferenças de desempenho entre os betões com agregados leves reciclados e os betões de referência.

No que concerne à redacção da presente dissertação, esta encontra-se estruturada conforme os seguintes capítulos:

- **Capítulo 1** - Este capítulo introduz o âmbito da presente investigação, assim como os motivos que impulsionaram a sua elaboração, apresentando de forma paralela o enquadramento da mesma com vista ao desenvolvimento sustentável do sector da construção;
- **Capítulo 2** - Este capítulo remete para o *Estado-da-Arte* do presente tema, consistindo na pesquisa bibliográfica realizada, que compreende uma análise crítica dos resultados obtidos por outros autores, assim como as suas conclusões;
- **Capítulo 3** - Este capítulo ilustra toda a campanha experimental através da descrição pormenorizada de cada ensaio realizado, quer sobre os agregados, quer sobre as misturas. Não obstante, são ainda expostos neste capítulo todos os cálculos referentes à produção das diversas misturas, assim como às condições de cura a aplicar;
- **Capítulo 4** - Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos aquando da realização da campanha experimental, bem como as suas interpretações. Por outro lado, tendo como objetivo uma melhor compreensão e organização dos resultados obtidos, optou-se por dividir o referido capítulo em três partes distintas: a primeira consiste na apresentação e posterior interpretação dos resultados obtidos aquando da caracterização dos agregados empregues na presente investigação; a segunda é referente à caracterização das misturas no estado fresco; a terceira e última corresponde à caracterização mecânica dos betões no seu estado endurecido;
- **Capítulo 5** - Este capítulo apresenta, de forma resumida, as principais conclusões obtidas aquando da análise e interpretação dos resultados registados durante a campanha experimental, realçando o desempenho mecânico das misturas produzidas com recurso aos dois tipos de agregados leves reciclados. Por fim, são propostos alguns temas para futuras investigações, que têm em vista a continuação e a melhor compreensão da incorporação de agregados leves reciclados na produção de betões leves reciclados.

Por último, todas as referências bibliográficas consultadas, assim como todos os anexos referenciados ao longo da dissertação são apresentados no fim desta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Este capítulo tem como objectivo expor os resultados obtidos em investigações anteriores relativamente à inclusão de agregados grossos leves reciclados na produção de betões com agregados leves, no que concerne ao seu desempenho em termos mecânicos. Apesar de existir uma extensa bibliografia acerca da produção de betões com a incorporação de agregados grossos reciclados, o mesmo não sucede com os agregados grossos reciclados provenientes de betão leve. Assim, optou-se por apresentar alguns trabalhos relativos aos agregados leves e reciclados de betão convencional, seguido pelos trabalhos de betão com agregados leves e de betão com agregados reciclados, de forma a compreender qual o desempenho mecânico esperado para o betão leve com agregados leves reciclados.

2.2. Propriedades dos agregados leves

Durante a investigação, foram utilizados agregados de argila expandida nacionais de dois tipos, designados comercialmente por: Leca HD - os agregados que constituem o betão leve estrutural; Leca M - os agregados que compõem o betão leve não estrutural.

As principais características do agregado que influenciam o desempenho do betão no estado fresco e endurecido são, segundo ICAR104 (2004), a forma e textura, granulometria, absorção, mineralogia e composição, resistência mecânica, tamanho máximo do agregado, peso específico ou densidade relativa e resistência ao esmagamento.

Nos Quadros 2.1 e 2.2, encontram-se, respectivamente, as principais características físicas e químicas das partículas de Leca HD e Leca M facultadas pelo fornecedor (WEBER).

Quadro 2.1 - Propriedades físicas dos agregados Leca HD e Leca M

Propriedades físicas	Leca HD	Leca M
<i>Forma da partícula do agregado leve de argila expandida</i>	<i>aproximadamente esférica</i>	<i>aproximadamente esférica</i>
<i>Reacção ao fogo</i>	<i>incombustível Euro Classe A1</i>	<i>incombustível Euro Classe A1</i>
<i>Resistência ao esmagamento</i>	$\geq 5 \text{ MPa}$	$\geq 1,0 \text{ MPa}$
<i>Densidade aparente seca</i>	$610 \text{ kg/m}^3 \pm 15\%$	$330 \text{ kg/m}^3 \pm 15\%$
<i>Densidade da partícula</i>	$1\,080 \text{ kg/m}^3 \pm 150 \text{ kg/m}^3$	$550 \text{ kg/m}^3 \pm 15\%$
<i>Absorção de água após 24h de imersão</i>	$< 20\% \text{ da massa seca}$	$< 34\% \text{ da massa seca}$
<i>Humidade higroscópica</i>	<i>material não higroscópico</i>	<i>material não higroscópico</i>

Quadro 2. 2 - Propriedades químicas dos agregados Leca HD e Leca M

Propriedades químicas	Leca HD	Leca M
Teor de cloretos (Cl)	< 0,1%	< 0,1%
Sulfato solúvel em ácido (SO ₃)	< 0,2%	< 0,4%
Teor de enxofre (S)	< 0,2%	< 0,2%
pH	9-10	9-10

2.2.1. Características granulométricas

À semelhança do que sucede nos agregados de massa volúmica normal, a dimensão das partículas e a sua granulometria são propriedades que influem directamente no desempenho do betão. Segundo Quiroga (2003), a compacidade das partículas está correlacionada com a granulometria das mesmas, influenciando assim a trabalhabilidade, segregação, resistência mecânica e durabilidade do betão.

Quiroga (2003) afirma existir consenso quanto à melhoria da trabalhabilidade aquando da utilização de misturas com uma distribuição uniforme comparativamente a misturas com distribuição mais heterogénea [Golterman (1997); Glavind (1993); Johansen (1989); Johansson (1979)], embora possam ser alcançados maiores *slumps* com uma distribuição heterogénea.

Algumas propriedades do betão no estado endurecido também são afectadas pelas características granulométricas do agregado. Quiroga (2003) refere que misturas com uma distribuição uniforme conduzem a um betão mais denso, com maior compacidade, menor permeabilidade [Golterman (1997); Glavind (1993); Johansen (1989)] e ainda a uma melhoria da resistência à abrasão [Mehta (1993)]. Consequentemente, estas misturas requerem menos pasta, o que origina uma diminuição da deformação e contração aquando da cura [Washa, 1998; Shilstone, 1999]. Finalmente, Aitcin (1998) afirma que, embora um excesso de agregado grosso possa diminuir o período de secagem, esta diminuição levará a uma maior contração do betão que terá como resultado o aumento da quantidade de microfissuras no interior da pasta.

A escassez ou excesso de qualquer dimensão de fracção pode resultar na perda de trabalhabilidade do betão e reduzir a durabilidade do mesmo [Galloway (1994); Shilstone (1990)]. Deve existir uma concordância na utilização de agregados grossos *versus* finos, de forma a produzir betões equilibrados. Por exemplo, o excesso de areia requer uma maior quantidade de cimento, produzindo uma mistura mais aderente, o que acarreta problemas ao nível da bombagem, deficientes acabamentos, aumento de fendas [Shilstone (1999)] e ainda um aumento da permeabilidade [Mindness (1981)]. Por outro lado, uma insuficiente quantidade de areia produz misturas chamadas "bony" o que origina problemas ao nível dos acabamentos [Shilstone (1990); Mindness (1981)].

Ambos os agregados, grossos e finos, devem ser uniformemente classificados. Se o agregado fino apresentar dimensões superiores ao usual, tal resultará num aumento da segregação, exsudação e rugosidade. Já o oposto resulta no acréscimo de água à mistura [Galloway (1994)].

Em testes realizados por Shacklock (1954), citado por Neville (2003), para um dado rácio agregado / cimento e água / cimento, misturas heterogéneas ao nível dos agregados, com maior teor de agregados finos, apresentavam valores de trabalhabilidade superiores comparativamente a misturas homogéneas.

Porém, a ausência de dimensões das fracções conduz a inúmeros problemas ao nível da segregação em misturas de elevadas faixas de trabalhabilidade.

Assim, segundo Özen (2007), é recomendável efetuar uma destriça entre as várias granulometrias dos agregados, principalmente em misturas de baixa trabalhabilidade. Tal destriça irá permitir minimizar os efeitos de segregação da mistura [Mindess et al., (2003)].

Contudo, existem diferentes opiniões quanto ao efeito da granulometria na resistência do betão, como refere Özen (2007). Shilstone (1990) e Neville (2003) atestam que tanto as misturas heterogéneas como as homogéneas, ao nível da granulometria do agregado, podem ser utilizadas com o intuito de atingir betões de igual resistência.

Do mesmo modo, de acordo com McIntosh (1957), para um dado rácio agregado / cimento, através do ajuste do teor de agregados finos, é possível alcançar, aproximadamente, o mesmo nível de trabalhabilidade e resistência em misturas heterogéneas bem como em misturas homogéneas, ao nível da granulometria dos agregados. No entanto, Brodda e Weber (1977), novamente citados por Neville (2003), relataram uma ligeira influência negativa ao nível da resistência aquando na presença de uma mistura heterogénea ao nível da granulometria dos agregados.

Segundo Quiroga (2003), uma classificação adequada deve depender da forma e textura dos agregados.

De acordo com o ACI211.2 (1998), uma correcta classificação dos agregados finos e grossos, assim como as proporções utilizadas exercem um efeito importante sobre as propriedades do betão. Uma correcta classificação do agregado deve atender a uma distribuição contínua de dimensões das “partículas”, fornecendo um teor mínimo de vazios e mobilizando uma menor quantidade de pasta de forma a preenchê-los. Desta forma, potencia-se o uso económico do ligante bem como a maximização da resistência e a minimização da retracção.

A distribuição das partículas de um dado agregado segundo as dimensões dessas partículas, define, segundo a NP EN933-1 (2000), a granulometria de um agregado. Esta é quantificada em percentagem de massa que passa uma dada série de peneiros. Contudo, Bogas (2011) refere que, aquando do estudo desta propriedade nos agregados leves, é necessário ter em conta que a avaliação granulométrica dos mesmos deve ser realizada em volume, ao contrário do que sucede nos agregados naturais [ACI213R (2003),

EuroLightConR14 (2000)], uma vez que, para partículas de maior dimensão de agregado leve, corresponde uma pequena fracção em massa e uma maior fracção em volume.

Na ASTM C330 (2004), encontram-se os requisitos a ser cumpridos relativos à granulometria dos AL. Denota-se uma clara imposição quanto à maior percentagem de massa de AL a passar nos peneiros de malha mais fina comparativamente aos AN, definidos na ASTM C33-03 (2003). Esta diferença resulta da ponderação necessária devido à maior massa das partículas de menor dimensão, consentindo distribuições volumétricas equivalentes nos AL e AN (ACI 213R 2003).

2.2.2. Massa volúmica e baridade

A massa volúmica das partículas constitui uma propriedade fundamental na formulação dos BEAL. Esta propriedade das partículas incide directamente na massa volúmica do betão, comprometendo assim a sua resistência e pode incutir alterações significativas do mesmo ao nível da sua composição e utilização. Constituindo uma propriedade essencial aquando da formulação dos BEAL, os agregados são frequentemente classificados, segundo os principais documentos normativos, em função da massa volúmica ou baridade. Assim, as normas europeias EN 13055-1 (2005) e NP EN 206-1 (2007) impõem limites, relativamente a estas propriedades, para os agregados leves. Qualquer agregado que apresente massa volúmica, após secagem em estufa, menor ou igual a 2000 kg/m^3 ou baridade inferior a 1200 kg/m^3 é denominado como leve. Porém, as normas americanas ACI 318 (2009), ACI 213R (2003) e ASTM C330 (2004) definem como limite para a baridade 880 kg/m^3 nos agregados grossos e 1120 kg/m^3 nos agregados finos.

Segundo Bogas (2011), a natureza e os processos de fabrico dos agregados leves têm um impacto significativo na massa volúmica e baridade dos mesmos, podendo ser classificados de acordo com a Figura 2.1. Não obstante, o Quadro 2.3 demonstra que, consoante o tipo de betão, os agregados leves podem ser divididos em duas classes, sendo estas ultra-leves e leves, em função da baridade dos agregados empregues.

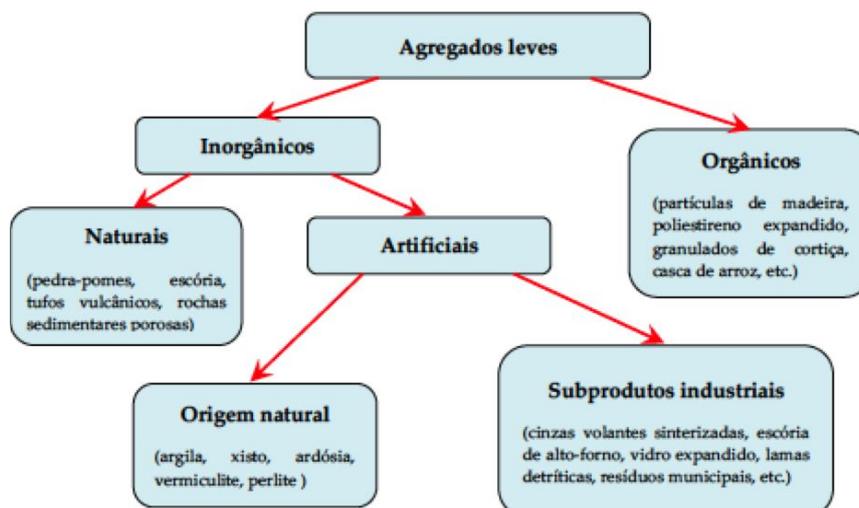


Figura 2.1 - Classificação dos diversos tipos de agregados leves [Bogas (2011)]

Quadro 2.3 - Agregados leves para produção de betões, adaptado de Bogas (2011)

Classificação	Agregados	Baridade média ^a (kg/m ³)	Absorção às 24 h (%)	Aplicação em betão
Ultra-leve Baridade < 300 kg/m ³	<i>Poliestireno expandido</i>	10-40	< 1	<i>Betões de isolamento térmico sem capacidade estrutural</i>
	<i>Vermiculite expandida</i>	60-200	< 100	
	<i>Perlite expandida</i>	30-240	< 100	
	<i>Vidro expandido</i>	150-300	5-15	
	<i>Regranulado negro de cortiça expandida</i>	60-100 ^b	60-100 ^c	
Leve Baridade de areias 300 a 1200 kg/m ³ Baridade de grossos 300 a 950 kg/m ³	<i>Partículas de madeira</i>	320-480	-	<i>Betões de isolamento térmico ou estruturais de baixa resistência</i>
	<i>Diatomite</i>	450-800	elevada	
	<i>Clínquer</i>	720-1040	-	
	<i>Pedra-pomes</i>	500-900	30-40	
	<i>Escória de alto-forno expandida</i>	500-1000	10-25	
	<i>Escória pelitizada</i>	850-950	3-5	
	<i>Argila expandida</i>		5-25	
	<i>Xisto expandido</i>	350-1050	5-15	
	<i>Ardósia expandida</i>		5-15	
	<i>Cinzas volantes sinterizadas</i>	700-1100	15-20	

^a Inclui agregados grossos e finos

^b Refere-se à massa volúmica das partículas (valores nacionais mais usuais)

^c Absorção aparente correspondente a água superficial de molhagem [Karade (2006)]

Assim, de acordo com o Quadro 2.3, dependendo da natureza e do processo de fabrico dos agregados leves, estes podem apresentar uma vasta gama de baridades, embora nem todos sejam apropriados para a produção de betões estruturais. Porém, segundo Chandra e Berntsson (2003), Newman (1993), Coquillat, et al. (1986), EuroLightConR2 (1998) e FIP (1983), esta variabilidade não advém apenas para AL de natureza distinta. Por exemplo, a baridade dos agregados de argila expandida pode variar entre 300 e 800 kg/m³.

Em relação à massa volúmica seca das partículas, segundo o ACI213R (2003), esta é cerca de 1/3 a 2/3 da dos agregados convencionais. Para um dado betão, esta redução pode afectar a sua resistência, o que origina a necessidade de compensar com o aumento da quantidade de cimento, que por sua vez condicionará a massa volúmica desejada para o betão em causa.

Bogas (2011) refere que a massa volúmica do BEAL tende a evoluir de forma proporcional com a sua capacidade resistente. Esta característica é apresentada, segundo FIP (1983) e CEB-FIP (1977), através de curvas que possibilitam estimar e correlacionar a resistência do betão com a massa volúmica dos agregados. Faust (2000) corrobora o mesmo. Porém, Zhang e Gjorv (1991) referem uma diminuta relação entre a massa volúmica e a resistência das partículas, característica que advém da natureza porosa da estrutura e da distribuição dos poros. Os mesmos autores, ao examinarem diferentes fracções de um mesmo agregado de argila expandida, verificam uma relação directa entre o decréscimo da porosidade e o aumento da massa volúmica com o incremento da dimensão das partículas.

Desta forma, a inconsistência na resistência de agregados leves de natureza distinta, mas de igual massa volúmica, pode ser notada com alguma frequência, como conclui FIP (1983). O mesmo atesta um aumento na ordem de 10% da resistência dos agregados produzidos por expansão, onde ocorre a formação de uma película exterior mais densa.

Bogas (2011) constata que a massa volúmica das partículas varia com a fracção granulométrica do agregado, particularmente na Leca, onde as partículas de menor dimensão apresentam uma maior massa volúmica. Inúmeros autores [Hoff (1992), Chandra e Berntsson (2003), ACI213R (2003), FIP (1983), CEB-FIP (1977), Albenque et al. (1986), Coquillat et al. (1986), Fragoulis et al. (2004)] confirmam tal singularidade, que deriva principalmente do processo de fabrico do agregado leve, particularmente nos agregados de argila expandida, onde as partículas, numa fase inicial (anterior à sua introdução no forno), exibem variação ao nível da dimensão, como conclui FIP (1983).

Não obstante a influência da dimensão do agregado na oscilação da massa volúmica, também a percentagem de partículas partidas ou deformadas, como referido por Bogas (2011), representa um factor que deve ser tido em conta aquando do estudo dos AL. Concomitantemente, a inclusão de partículas fraccionadas de maior dimensão com partículas de menor dimensão gera uma combinação de partículas com distintas características microestruturais.

Segundo a NP EN1097-3 (2002), a baridade ou a massa volúmica aparente é definida como a massa por unidade de volume do agregado, contida num recipiente.

Desta forma, a granulometria do agregado, a forma das partículas, o teor em água e a compacidade do agregado (a forma como o agregado se arranja no recipiente) têm uma influência directa no valor da baridade, notando-se uma redução da mesma na presença de agregados de granulometria descontínua, formas alongadas e superfícies rugosas [Coutinho (1988b), EuroLightConR2 (1998), Neville (1995), Mehta e Monteiro (2006) e FIP (1983)]. Já os agregados de forma angular ou redonda, de massa volúmica idêntica, podem apresentar oscilações desta propriedade em cerca de 80 kg/m^3 , como refere o ACI213R (2003), citado por Bogas (2011). De acordo com FIP (1983), a baridade seca equivale, em geral, a cerca de metade da massa volúmica das partículas.

Nos agregados leves, à semelhança do que acontece com a massa volúmica, existe uma tendência de redução desta propriedade à medida que a dimensão do agregado aumenta, ao contrário dos agregados de massa volúmica normal. Na génese desta diminuição, encontra-se o facto de a massa volúmica diminuir com o aumento da dimensão das partículas.

A EN13055-1 (2005) estabelece um limite para este tipo de agregados (AL), onde a baridade não deve ser superior a 1200 kg/m^3 . Porém, a ASTM C330 (2004) faz uma diferenciação ao nível da

dimensão dos agregados leves, onde esta propriedade não deve superar 880 kg/m^3 nos agregados grossos e 1120 kg/m^3 nos agregados finos.

Bogas (2011) refere não existir uma correlação generalizada entre a baridade e a massa volúmica das partículas.

2.2.3. Absorção

A absorção nos agregados, segundo a EN 13055-1 (2005), é determinada em termos da percentagem de massa seca do agregado e representa a quantidade de água que, após um dado período de tempo, a partícula consegue absorver.

Esta propriedade é essencialmente afectada pela porosidade aberta, aumentando com o número e dimensão dos poros (EuroLightConR7 2000), encontrando-se restringida principalmente pela microestrutura do agregado. Assim, segundo inúmeros autores, referidos por Bogas (2011) [Holme Bremner (2000), EuroLightConR2 (1998), FIP (1983), Wasserman e Bentur (1996), Lo et al. (1999), Swamy e Lambert (1981), Hoff (1992) e Chandra e Berntsson (2003)], a porosidade, a conectividade da estrutura porosa, as características superficiais, o teor em água e a percentagem de partículas partidas são factores que influenciam a absorção. Bogas (2011) refere, ainda, o efeito que a elevada porosidade e a absorção dos agregados leves apresentam na amassadura, transporte, colocação e compactação do betão, conduzindo a alterações ao nível das características mecânicas e durabilidade dos betões estruturais leves.

Citando Hoff (1992), Bogas (2011) refere que, ao contrário dos agregados com superfícies porosas, que apresentam elevadas taxas e volumes de absorção, os agregados com películas protectoras ou poros menos interconectados têm menores taxas e volumes de absorção. Tal facto é justificado pela importância que a superfície nas partículas intactas detém na diminuição da absorção, uma vez que, ao ser constituída por uma película compacta de menor porosidade, isso retarda a entrada de água no seu interior.

Porém, e apesar da adversidade ao nível do controlo das misturas, a absorção contribui de forma benéfica, por exemplo, ao nível da qualidade da interface e prolongamento da cura interna [Bogas (1011)]. Também o aumento do teor de água, resultante desta propriedade, demonstrou ter uma influência negativa no aumento da massa volúmica dos BEAL. Bogas (2011) refere ainda não existir uma correlação entre o aumento do teor de água nas partículas e a resistência do betão.

O processo de fabrico dos agregados também apresenta, segundo Sarkar et al. (1992), alterações ao nível desta propriedade. Após terem realizado ensaios de absorção de Leca produzidos na Suécia e de Liapor originárias da Alemanha, estes autores observam que a absorção às 24 h da Leca é inferior à de Liapor, apesar da sua menor massa volúmica.

Bogas (2011) observou um decréscimo acentuado na taxa de absorção com o tempo de imersão, facto este corroborado por Hoff (1992) que refere que a absorção parece estar logaritmicamente relacionada com o tempo. O autor verificou, para o agregado Leca, uma absorção de 53% às 24 h nos primeiros 5 minutos e 67% ao fim de 60 minutos. Bogas (2011), denota ainda que, devido às diferenças observadas na estrutura porosa de partículas de dimensão diferente e pela variação pouco significativa da percentagem das partículas partidas face à fracção granulométrica, na Leca constata-se uma maior propensão para a absorção das partículas de maior dimensão.

2.2.4. Capacidade resistente dos agregados leves

A capacidade dos agregados leves tem influência directa na resistência dos betões estruturais com agregados leves. Porém, não existe actualmente um ensaio normalizado que seja capaz de prever com rigor a sua capacidade resistente.

Apresentando os BEAL um comportamento linear até perto da rotura, e tendo em consideração a compatibilidade elástica entre o agregado e a pasta envolvente, a capacidade resistente pode então, segundo Bogas (2011), ser estimada por modelos compósitos simplificados. Através do conhecimento da proporção dos diferentes constituintes na mistura, da resistência final do betão e dos módulos de elasticidade da pasta e agregados, é possível estimar a capacidade resistente dos agregados. Desta forma, a resistência dos betões pode ser prevista através das resistências estimadas para os agregados.

De acordo com Bogas (2011), os ensaios de resistência ao esmagamento dos agregados de Leca, segundo a EN 13055-1 (2005), apresentam um elevado coeficiente de variação em alguns agregados, confirmando a variabilidade associada a este tipo de ensaios.

Por fim, o estudo refere que, quanto menor for a dimensão da partícula, maior será a sua resistência ao esmagamento, encontrando-se este facto directamente relacionado com a menor porosidade e maior proporção da película externa mais compacta nas partículas de menor dimensão. Diversos autores [Chen et al. (1995), Dreux (1986), CEB-FIP (1977) e Faust (2000)] confirmam a relação entre o aumento da resistência ao esmagamento e a diminuição da dimensão do agregado.

No Quadro 2.4, encontram-se os resultados obtidos por Bogas (2011) relativos à resistência ao esmagamento do agregado Leca segundo a EN13055-1 (2005).

Quadro 2.4 - Resistência ao esmagamento do agregado de Leca [Bogas (2011)]

Agregado	N.º de amostras	σ_{esm} (MPa)	S_{σ} (MPa)	CV_{σ} (%)	ρ_{ps}^a (kg/m ³)	Baridade ^b (kg/m ³)
Leca 4-12	16	6,8	0,94	13,90	1063	613
Fracção de Leca 2-4	3	10,2	0,52	5,11	1275	-
Fracção de Leca 4-8	3	6,9	0,23	3,32	>> 1070	-
Fracção de Leca 8-9,5	3	4,7	0,19	3,97	1027	-
Fracção de Leca 9,5-12,7	3	3,9	0,37	9,61	1008	-

a) - ρ_{ps} - massa volúmica seca; b) - baridade seca

2.3. Propriedades dos agregados grossos reciclados

Actualmente, este tipo de agregados tem sido alvo de inúmeros estudos como forma de compreender as suas propriedades, uma vez que a viabilidade técnica da sua utilização dependerá do total conhecimento do seu comportamento na estrutura do betão.

Os agregados reciclados apresentam características muito próprias que não dependem apenas do material que se encontra na sua génese mas também do processo que sofreram para a sua produção (Figura 2.2).

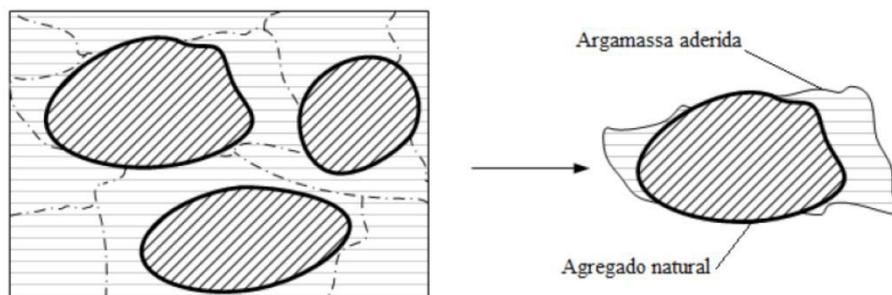


Figura 2. 2 - Agregado reciclado genérico [Pereira (2010)]

Leite (2001), citando Pietersen et al. (1998), define agregado reciclado como um material granular, proveniente de um processo industrial onde materiais inorgânicos utilizados exclusivamente apenas na construção são processados e aplicados novamente na construção.

O EuroLightCon R26 (2000) refere que as propriedades do agregado leve reciclado (ALR) dependem de:

- o tipo de construção que é demolido;
- as propriedades do agregado leve utilizado;
- a quantidade relativa de agregado leve utilizado;
- outros materiais na construção;
- a origem do material a reciclar;
- o tipo de britagem;
- o grau de separação / triagem.

O recurso a este tipo de agregados (agregados reciclados) deve ser alvo de uma criteriosa classificação, como sugere Zordan (2000). Assim, existem inúmeras classificações para este tipo de agregados, podendo estas ser efectuadas com base na sua origem, risco ambiental, com base no teor de impurezas existentes nas partidas de resíduos ou ainda com base no tipo de componentes predominantes no resíduo, como refere Leite (2001).

A necessidade de uma correcta classificação, segundo Zordan (2000), deriva da alta heterogeneidade presente nos resíduos de construção e demolição, dada a vasta gama de materiais que é utilizada no sector da construção.

Segundo o EuroLightCon R26 (2000), o Comité Técnico RILEM tem procurado harmonizar as actuais abordagens europeias para a especificação do betão com agregados reciclados. Desta forma, são considerados os seguintes três tipos de classificação para os agregados reciclados:

- tipo I - principalmente derivados de alvenaria (tijolo);
- tipo II - derivados principalmente de betão;
- tipo III - uma mistura, não inferior a 80% de agregados naturais e não mais de 10% de agregados do tipo I (ou, até 20% de agregados de tipo II).

De acordo com as recomendações do RILEM, o agregado leve reciclado pode ser classificado como um agregado do tipo I. No entanto, a sua utilização na produção de betão encontra-se limitada à classe máxima de cubo força correspondente a C37. Por outro lado, quando o agregado é considerado como sendo um agregado do tipo II (derivados principalmente de betão), não existem limitações na sua utilização para a produção de betão convencional (classe de resistência máxima do cubo equivalente a C60). Porém, para todos os tipos de classificação, são considerados limites máximos quanto às quantidades de material estranho e orgânico.

A norma holandesa é mais rigorosa, fixando a massa volúmica seca máxima admissível para o agregado leve reciclado em 2100 kg/m^3 , referindo ser necessário assegurar que o agregado preenche os requisitos ambientais.

2.3.1. Características granulométricas

Entre as várias características dos agregados utilizados em betões, a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias nocivas presentes nos materiais podem ser consideradas as principais.

Ao comparar a curva granulométrica dos agregados grossos reciclados com a dos agregados grossos convencionais, Zordan (1997) conclui que estas se aproximam. Tal é confirmado posteriormente por Altherman (2002). Porém, segundo Altherman (2002), o facto de se formar uma grande quantidade de material fino origina uma curva granulométrica mais extensa.

O tipo e a granulometria do resíduo, o britador e suas afinações internas influenciam consideravelmente a granulometria final dos agregados reciclados produzidos [Bazuco (1999); Lima (1999) e Banthia e Chan (2000)].

Leite (2001), após ter realizado a análise granulométrica dos agregados grossos reciclados, concluiu que a granulometria dos mesmos apresenta uma curva contínua, o que é um dado bastante positivo, pois possibilita um melhor arranjo entre partículas. Porém, verificou que o agregado grosso reciclado apresentava módulo de finura um pouco menor do que o agregado grosso natural, realçando que a diferença era muito pequena.

Segundo Barra (1996), esta propriedade influencia a trabalhabilidade do betão no estado fresco e constitui um importante parâmetro aquando da dosagem das misturas.

No Reino Unido, o DOE (Department of Environment), referido por Leite (2001), sugere que a dimensão máxima do agregado grosso reciclado utilizado esteja entre 16 e 20 mm com o intuito de preservar a durabilidade dos betões produzidos com este tipo de agregado. Segundo Tavakoli e Soroushian (1996), a dimensão da partícula influencia também a resistência à compressão, dado o aumento de quantidade de pasta presente no agregado.

2.3.2. Massa volúmica e baridade

Conforme menciona Evangelista (2007), Hansen (1992) conclui que tanto a massa volúmica como a baridade dos agregados reciclados de betão são inferiores às dos agregados naturais. Esta conclusão é fundamentada pelo facto de os agregados reciclados de betão conterem na sua constituição argamassa que, por possuir menor massa volúmica do que a rocha, reduz o valor das grandezas em causa. Também Bazuco (1999), conclui que a massa volúmica dos agregados reciclados tende a ser inferior entre 5 e 10% à dos agregados naturais.

De igual forma, todos os estudos referidos [Zordan (1997); Leite (2001); Altherman (2002); Evangelista (2007)] confirmam esta característica relativa aos agregados reciclados de betão.

Porém, a redução destas propriedades não se verifica nos reciclados de agregados leves.

Segundo o levantamento bibliográfico realizado por Hansen (1992) e citado por Leite (2001), a massa volúmica dos agregados grossos reciclados pode oscilar entre 2,12 e 2,70 kg/dm³. Hansen (1992) concluiu que a origem do betão interfere pouco no valor da massa volúmica e que a mesma é geralmente mais baixa do que a dos agregados grossos naturais devido à argamassa antiga aderida às partículas do agregado grosso reciclado de betão.

Hansen e Narud (1983) concluíram, segundo Evangelista (2007), não existir uma relação entre a qualidade do betão original e a massa volúmica dos agregados grossos de betão, obtendo para as fracções entre 4 a 8 mm e 16 a 32 mm os valores de massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca entre 2340 e 2490 kg/m³, respectivamente.

Müeller e Winkler (1998) analisaram as propriedades de inúmeras amostras de betão reciclado provenientes de várias centrais da Alemanha, concluindo existir uma relação entre a massa volúmica e o valor médio da dimensão das partículas, uma vez que, para amostras constituídas por partículas de menores dimensões, obtiveram valores de massa volúmica menores, enquanto que, para amostras constituídas por partículas de maiores dimensões, observaram valores de massa volúmica superiores. Assim, os autores alcançaram valores de massa volúmica a variar entre 2,62 e 2,77 g/cm³, com um valor médio de 2,66 g/cm³. Quanto à baridade, os valores obtidos variavam entre 1,86 e 2,33 g/cm³, com o valor médio de 2,09 g/cm³.

Também Barra e Vasquez (1998) estudaram estas propriedades em agregados grossos reciclados originários de um betão de resistência à compressão aos 28 dias de 31,6 MPa, optando por os dividir em duas classes consoante a dimensão: a primeira fracção correspondia a partículas de dimensões compreendidas entre 12 e 20 mm; uma segunda fracção com partículas de dimensões compreendidas entre 6 e 12 mm. Para ambas as fracções, os autores analisaram as massas volúmicas das partículas secas, das partículas saturadas com superfície seca e do material impermeável, obtendo respectivamente os seguintes valores: 2270, 2427 e 2690 kg/m³ para a primeira fracção; 2238, 2406 e 2689 kg/m³ para a segunda fracção.

Matias e Brito (2005) investigaram os condicionalismos que o processo de trituração impõe relativamente a estas propriedades em dois tipos de agregados grossos reciclados de betão, concluindo não existir uma relação directa entre a baridade e as distintas técnicas de trituração, dado que obtiveram as baridades de 1256 e 1263 kg/m³ para os dois tipos de agregados. Porém, os autores referem reduções apreciáveis relativamente à baridade dos agregados grossos naturais, cujo valor rondava 1425 kg/m³. Também no que diz respeito à massa volúmica, os autores alcançaram valores inferiores para os agregados grossos reciclados comparativamente aos agregados naturais: para os primeiros, obtiveram os valores 2355 e 2452 kg/m³ para as massas volúmicas das partículas secas e das partículas saturadas com superfície seca respectivamente, enquanto que para os segundos esses valores foram 2632 e 2652 kg/m³.

No trabalho desenvolvido por Topçu e Günçan (1995), segundo Leite (2001), foi utilizado um agregado grosso reciclado de betão que apresentou a massa volúmica de 2450 kg/m³ para partículas cuja dimensão variava entre 8 e 31,5 mm.

Carneiro et al. (2000), citados por Leite (2001), aquando do estudo de caracterização do agregado grosso e fino reciclado, obtêm uma massa volúmica dos agregados na ordem de 2590 e 2190 kg/m³, respectivamente. Por outro lado, a baridade foi de 1300 e 1070 kg/m³ para o agregado fino e grosso, respectivamente.

Leite (2001), citando Machado Jr. et al. (1998), admite que o agregado grosso reciclado possa ser considerado como um agregado leve. Porém, esta afirmação contradiz o limite estipulado para a massa volúmica do agregado leve, uma vez que, apesar de menos densos, os agregados reciclados ainda possuem valores de massa volúmica superiores a 2000 kg/m³. Banthia e Chan (2000) sugerem que, em algumas situações, face à menor massa volúmica presente nos agregados reciclados, estes podem ser utilizados como agregados semi-leves.

Leite (2001) atesta a importância de conhecer a massa volúmica e a baridade dos agregados com vista ao correcto estudo de dosagem dos betões e ainda alerta para a relação indirecta entre o teor de substituição do agregado reciclado e a massa volúmica do betão, diminuindo esta com o aumento do teor de substituição do agregado reciclado. Na génese desta redução, encontra-se a

maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado. A autora refere ainda a contribuição muito expressiva da dimensão do agregado para esta redução, diferenciando a significativa contribuição do agregado fino face ao agregado grosso, constatando assim a influência que a dimensão das partículas que constituem o agregado reciclado tem sobre a massa volúmica. Leite (2001) justifica ainda que, quanto maior for a dimensão da partícula, maior será a porosidade que é incorporada na mistura, resultando na diminuição da massa volúmica da mesma.

Evangelista (2007) observa não existirem grandes variações para os valores das massas volúmicas dos diferentes agregados grossos, tendo obtido como variação máxima de 5% entre os resultados atingidos para cada um dos agregados grossos ensaiados.

2.3.3. Absorção

Relativamente à taxa de absorção, existe uma diferença significativa entre os agregados convencionais e os agregados reciclados. Nos primeiros, a taxa de absorção não demonstra ter uma influência significativa. Leite (2001), aquando da utilização de agregados reciclados na produção de betões, afirma que esta taxa de absorção adquire uma importância elevada, dado que este material apresenta valores de absorção muito superiores aos dos agregados naturais correntemente utilizados.

Evangelista (2007) afirma existir consenso quando se afirma que a absorção de água é a característica que mais difere entre os agregados naturais e reciclados, justificando com a presença de argamassa aderida às partículas recicladas, cuja micro-estrutura é mais porosa do que a do material pétreo.

A granulometria do agregado também representa um factor que altera a taxa de absorção. Quando comparados os agregados finos reciclados (AFR) com os agregados grossos reciclados (AGR), estes apresentam uma taxa de absorção inferior. Esta diferença é justificada com a relação directa entre a superfície específica das partículas e a taxa de absorção; de forma análoga, o maior teor de cimento presente no AFR, comparativamente com AGR, acentua a maior taxa de absorção dos AFR.

Citando Barra (1996), Leite (2001) refere que inúmeros factores, como a condição inicial de humidade do agregado, a duração de contacto do material com a água e a ordem pela qual o material entra em contacto com a água (se o agregado entra em contacto primeiro apenas com a água ou com a pasta de cimento), podem ter influência na quantidade de água que o material reciclado pode absorver.

Durante a sua investigação, Leite (2001) teve de determinar a absorção de água dos agregados reciclados, grossos e finos, bem como a evolução temporal desta propriedade. Como confirmado por Hansen (1992), a pré-molhagem dos agregados ajuda a controlar melhor o processo de betonagem. Assim, com o intuito de controlar a duração dos intervalos de pré-molhagem a empregar

nos agregados de forma a atingir a humidade “óptima” nos mesmos, a autora necessitou de medir a evolução da absorção de água dos agregados reciclados com o tempo de imersão dos mesmos.

Leite (2001) constatou que a variação da taxa de absorção para os agregados grossos reciclados é contínua e relativamente linear até atingir o valor máximo, que ocorre após 10 horas de imersão. Porém, o mesmo não sucede na presença de agregados finos reciclados, onde a autora observou um acréscimo inicial brusco nos primeiros 5 minutos, seguido por três patamares onde ocorre a absorção de água do agregado até à sua saturação. O primeiro patamar encontra-se compreendido entre 5 e 25 minutos, situando-se a taxa de absorção em torno de 50% da capacidade dos agregados, o segundo patamar compreendido entre 30 e 120 minutos, elevando a respectiva taxa de absorção para 70%, e finalmente o terceiro patamar situado entre 4 e 24 horas de imersão, onde o agregado atinge a saturação.

Segundo Evangelista (2007) e Hasaba et al. (1981), corroborados por Hansen e Narud (1983), calculam a absorção de água de agregados reciclados de betão, resultando em valores próximos de 7% para os agregados grossos (com partículas de dimensões compreendidas entre 5 e 25 mm) e de 11% para os agregados finos (com partículas de dimensões inferiores a 5 mm).

A proposta de norma Japonesa de incorporação de agregados reciclados em betão (1981), referida por Hansen (1992), restringe os valores máximos de absorção de água dos agregados reciclados grossos e finos a 7 e 13%, de forma a estes poderem ser incorporados na produção de betão.

Segundo Hansen e Marga (1988), as normas tradicionais propostas pela ASTM relativas à determinação de absorção de água são desajustadas aquando da utilização de agregados finos reciclados, originando resultados incoerentes, e em particular no que se refere a análises de partículas saturadas com superfície seca. A justificação encontrada pelos autores prende-se com as propriedades coesivas do material que resulta numa aglomeração excessiva.

No estudo realizado por Barra e Vazquez (1998), segundo Evangelista (2007), estes observaram, para dois tipos de agregados reciclados de betão de dimensões compreendidas entre 12 e 20 mm e 6 e 12 mm, uma absorção de água de 15,6 e 16,8% respectivamente.

Kikuchi et al. (1998) concluíram a existência de uma relação entre a absorção de água e a resistência e teor de argamassa existente nos betões de origem, tendo obtido taxas de absorção de água para os agregados finos reciclados de betão que oscilavam entre 7,3 e 10%, dependendo do betão de origem e do processo de trituração.

Segundo Evangelista (2007), Maultzsch e Mellman (1998) concluem que a taxa de absorção de água dos agregados reciclados que ocorre nos primeiros 10 minutos de imersão varia entre 70 e 95%. Durante o referido estudo, os autores obtiveram taxas máximas de absorção de água situadas entre 4 e 10%, referindo que, na presença de agregados de baixa massa volúmica, as taxas de

absorção de água poderiam ser superiores. Assim, é proposta pelos autores uma expressão (Equação [2.1]) que permite determinar, em função da porosidade dos agregados, a absorção de água. Esta equação é atestada pela óptima correlação obtida entre os seus resultados experimentais ($R^2 = 0,997$).

- $A = 0,0063P^2 + 0,358P$ [2.1]

Após um extenso levantamento estatístico das centrais de reciclagem alemãs, Müller e Winkler (1998) observaram um valor médio de absorção de água dos agregados reciclados de betão de 5,5%, existindo no entanto alguma amplitude entre o valor mínimo e máximo, de 0,6 e 11,8% respectivamente. A este intervalo corresponde um desvio padrão de 3,07% que atesta a enorme dispersão de valores desta propriedade.

Na investigação realizada por Evangelista (2007), este conclui que os agregados finos naturais possuem um baixo valor de absorção de água, corroborando a maioria das publicações sobre a matéria. O autor alerta ainda para o péssimo desempenho dos agregados finos reciclados demonstrado nos ensaios realizados e justifica-o com base na elevada porosidade. Relativamente aos agregados grossos, o autor obteve valores aceitáveis de absorção de água, afirmando estar muito abaixo do valor de referência, demonstrado por Coutinho e Gonçalves (1997), de 5%. Por fim, o autor conclui que todos os agregados naturais exibem baridades muito similares, fazendo uma ressalva quanto ao abaixamento obtido nos agregados finos reciclados, que deriva novamente da natureza porosa que compõe este tipo de agregado.

2.3.4. Capacidade resistente dos agregados reciclados

Todos os materiais que constituem o betão afectam directamente a sua resistência e o seu desempenho final. Desta forma, torna-se imprescindível o correcto estudo dos agregados para a obtenção de uma análise criteriosa das propriedades do betão. Qualquer variação dos materiais constituintes do betão merece um estudo sistemático, aplicando-se portanto também ao agregado reciclado, podendo estes corresponder a 80% de toda a mistura [Leite (2001)].

A resistência mecânica dos agregados reciclados é, por princípio, inferior à dos agregados naturais, uma vez que aqueles contêm argamassa endurecida, cuja ligação ao material pétreo é mais fraca [Bazuco (1999)].

Com excepção dos agregados leves reciclados, esta propriedade não costuma ser decisiva para a caracterização da resistência dos BAR, visto que esta é condicionada fundamentalmente pela resistência da pasta [Brito (2005)].

Hansen (1992) refere que os agregados reciclados de betão cumprem, à partida, os requisitos mínimos apontados pelas normas em vigor, com excepção dos produzidos a partir de betões de muito fraca resistência. O mesmo autor indica que o betão, que se encontra na génese do agregado,

influencia de forma directa a resistência do mesmo. Logo, quanto maior for a resistência do betão original, menor será a relação a/c , originando menor desgaste à abrasão.

Evangelista (2007) refere o estudo realizado por Barra e Vazquez (1998), onde, através do ensaio de desgaste por máquina de Los Angeles, estes autores puderam ensaiar a resistência dos agregados reciclados de betão, tendo obtido um desgaste de 31% para a fracção compreendida entre 12 e 20 mm, e um desgaste de 29,5% para a fracção compreendida entre 6 e 12 mm. Ambas as fracções demonstraram valores muito superiores quando comparadas com os agregados naturais calcários de dimensões similares, ficando a primeira fracção cerca de 25% acima dos agregados naturais, bem como a segunda fracção ao ficar aproximadamente 44% acima dos mesmos agregados naturais.

Na investigação de Evangelista (2007), o autor adoptou os procedimentos da Especificação LNEC E 154 (1964), predecessora da norma NP 1039 (1974), sobre três tipos de agregado grossos. O autor obteve assim resistências ao esmagamento para os agregados grossos naturais, de cerca de 25% no caso de britas 1 e 2 (originárias do mesmo local) e de cerca de 38% para o caso da brita 3. Estes valores são confirmados por Neville (1995) que refere um desgaste médio para os calcários provenientes do Reino Unido de 25%. No entanto, Neville (1995) alerta para a deterioração dos resultados aquando da utilização de fracções de granulometria superior à normalizada. Coutinho e Gonçalves (1997), de acordo com os critérios do REBAP (1967), indicam como limite de resistência ao esmagamento 45%, valor esse que é cumprido na investigação de Evangelista (2007). Por fim, Evangelista (2007) refere que este tipo de ensaio é pouco utilizado (com excepção do Reino Unido), originando uma inexistência de informação relativa à correlação entre a resistência ao esmagamento e a resistência à compressão das rochas originais. No entanto, o autor afirma que os resultados obtidos sugerem que as características mecânicas do agregado utilizado se encontram bem ajustadas para a incorporação destes na produção de betão.

Leite (2001) afirma que o ensaio de perda por abrasão dos agregados constitui um bom indicativo da qualidade do material a ser empregue na produção do betão. Desta forma, é possível, segundo a autora, determinar a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado grosso.

Hansen e Narud (1983), citados por Leite (2001), referem valores de desgaste para agregados reciclados, segundo o ensaio de desgaste Los Angeles, entre 20 e 50% superiores aos dos agregados naturais. Barra (1996) avaliou esta propriedade em agregados grossos reciclados de betão e de material cerâmico, obtendo valores entre 20 e 30% de desgaste por abrasão.

Bazuco (1999) avaliou esta propriedade em agregados reciclados de betão, obtendo valores de desgaste à abrasão para o agregado reciclado seco de 44,5% e para o agregado reciclado saturado de 42,7%. O desgaste sofrido pelo agregado reciclado foi cerca de 60% superior ao do agregado natural.

Também Quebaud (1996) determinou valores de desgaste à abrasão de agregados reciclados de betão, produzidos numa central elétrica localizada em França, na ordem de 31,8%, abaixo do valor máximo estipulado pela norma francesa NF P 18-573 que é de 40%.

2.4. Propriedades do betão com agregados leves

O betão com agregados leves é usualmente utilizado com o intuito de reduzir a acção permanente nas estruturas. Segundo Yasar et al. (2003), a redução da massa das estruturas resulta ainda no melhor comportamento das mesmas à acção sísmica.

Topcu (1997) e Al-Khaiat e Haque (1998) afirmam nos seus estudos as vantagens que o betão com agregados leves pode apresentar, em termos de relação resistência / peso, melhor comportamento aos esforços de tracção, menor coeficiente de expansão térmica e, finalmente, melhor isolamento acústico (sons de percussão) bem como térmico devido ao volume de vazios do agregado leve.

Topcu (1997) relata ainda que da redução do peso de uma construção através da utilização de betão com agregados leves pode resultar uma redução na secção transversal dos pilares, vigas, lajes e fundações, podendo reduzir-se também a armadura.

Ao longo deste capítulo, ir-se-á analisar as principais propriedades mecânicas do betão com agregados leves.

2.4.1. Massa volúmica

A massa volúmica dos constituintes do betão influi directamente na massa volúmica do betão e indirectamente na sua resistência, condicionando portanto a sua composição e utilização. Este facto é justificado pela fracção predominante dos agregados na composição do betão.

Esta propriedade é a principal característica que diferencia os BEAL dos betões convencionais, dependendo essencialmente do volume, absorção, teor em água e tipo de agregados leves utilizados. No entanto, diversos autores [Virlogeux (1986), FIP (1983) e ACI213R (2003)] referem que factores como o teor de cimento e adições, relação a/c, índice de vazios, método de compactação e relação grossos / finos também afectam os valores desta propriedade.

FIP (1983) e Gerritse (1981) aludem ao facto de, nos betões leves, os agregados ocuparem usualmente cerca de 70% do volume total justificando o principal destaque que os mesmos assumem relativamente a esta propriedade.

Conforme refere FIP (1983), a escolha correcta dos agregados aquando da produção do betão pode dar origem a uma redução da massa volúmica do mesmo em cerca de 25 a 40%.

Esta propriedade, segundo EuroLightConR2 (1998), pode ser empregue como um indicador da resistência dos BEAL. Chandra e Berntsson (2003) afirmam que esta propriedade pode ser relacionada com a maioria das propriedades dos BEAL, conforme Bogas (2011) demonstra, ao expor a influência que a relação a/c e a proporção de agregados leves apresentam nesta propriedade, condicionando assim as características mecânicas e de durabilidade dos BEAL.

Bogas (2011) refere que, em geral, a massa volúmica dos BEAL oscila entre 1200 e 2000 kg/m³, situando-se esta, nos betões leves estruturais de moderada a elevada resistência acima de 1600 kg/m³.

O betão, após estar exposto ao meio ambiente, é alvo de uma redução desta propriedade resultante da perda de água que, resulta das condições ambientais e da relação área superficial / volume do elemento [Holm e Bremner (2000), ACI213R (2003) e Virlogeux (1986)]. Virlogeux (1986) alerta ainda para o papel importantíssimo que a quantidade de água e sua variação neste tipo de betões assume, comparativamente com os betões convencionais, aquando do seu endurecimento, dependendo assim das condições de cura.

Coquillat (1986), citado por Bogas (2011), sugere que a conservação dos BEAL em água resulta em absorções de 20 a 40 l/m³, que representa a ordem de grandeza de ar incluído neste tipo de betões. Na génese desta absorção, reside o efeito de estanqueidade promovido pela argamassa, que inviabiliza a penetração de água nos agregados, com maior destaque para baixas razões a/c, conforme explica Virlogeux (1986). Hoff (1992), para pressões hidráulicas equivalentes a 60 m de profundidade, em BEAL de elevada resistência com relação a/c inferior a 0,3 e submetido inicialmente a 14 dias de secagem, obteve aumentos de somente 50 a 65 kg/m³.

Durante a investigação realizada por Bogas (2011), foram produzidos inúmeros betões com diferentes tipos de agregados leves, onde esta propriedade foi determinada segundo as normas NP EN12350-6 (2009) e NP EN12390-7 (2000), para o estado fresco bem como endurecido. O autor obteve reduções médias para a massa volúmica fresca de 21,4 a 26,7%, e 24,6 a 29,7% para a massa volúmica seca, quando comparadas com os agregados naturais. No que diz respeito à Leca, o autor obteve betões com uma massa volúmica seca entre 1500 e 1800 kg/m³, enquadrando-se assim este betão na classe D1,6 a D1,8. Ainda fazendo referência ao agregado de Leca, o autor concluiu que a substituição parcial de agregados finos de massa volúmica normal em BEAL produzidos com este agregado dá origem a reduções de 37,3% na massa volúmica seca. Já a substituição parcial de agregados grossos de massa volúmica normal por agregados leves deu origem a betões mistos com massas volúmicas intermédias, de valores entre 2000 e 2200 kg/m³, característica comum a este tipo de betões usualmente denominados por betões de “massa volúmica modificada”. Bogas (2011) alude ainda à importância que o teor de água inicial dos agregados apresenta na massa volúmica fresca do betão, sendo mais relevante no dimensionamento das estruturas do que a massa volúmica seca. Segundo o autor, esta diferença destaca-se aquando da utilização de agregados mais porosos,

como é exemplo a Leca, onde o teor de água inicial das partículas depois de pré-saturados tende a ser superior. Ainda assim, o autor refere que estas diferenças correspondiam a uma variação média na massa volúmica de apenas 3%.

Segundo o estudo desenvolvido por Rossignolo et al. (2000), os valores mínimo e máximo da massa volúmica obtidos no betão no estado fresco foram de 1717 e 1583 kg/m³, respectivamente. Embora os agregados tenham sido previamente secos em estufa, o betão leve apresentou, em média, uma perda de abaixamento de 26 mm, nas 2 horas que se seguiram após a realização da amassadura. Em média, o teor de ar obtido no betão foi de 2,7%.

2.4.2. Absorção

A absorção é definida pela relação entre a massa de água absorvida e a massa das partículas no estado anidro, representando, no caso dos agregados leves, uma das características mais relevantes no desempenho do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

No seu estudo, Virlogeux (1986) faz alusão à contribuição negativa por parte dos agregados leves relativamente ao controlo da trabalhabilidade nos BEAL, dada a elevada taxa de absorção deste tipo de agregados. Esta característica é suportada por diversos autores [Virlogeux (1986), EuroLightConR12 (2000), Neville (1995), Pankhurts (1993) e Punkki e Gjorv (1995)], que encontram a justificação na absorção, por parte dos agregados leves, da água presente na argamassa, o que por sua vez origina uma alteração da trabalhabilidade, quer por aumento da viscosidade da pasta, quer por redução do seu volume. Segundo Virlogeux, citado por Bogas (2011), existe uma relação entre esta característica e o teor de água inicial nos agregados, dado que quanto menor for o teor, maior será a capacidade de absorção dos agregados conduzindo a uma menor relação a/c. Bogas (2011) refere também o condicionalismo que a distribuição de água no agregado confere à absorção durante a mistura.

Segundo Silva (2007), factores como o valor da porosidade, a distribuição e ligação entre poros, as características da superfície e a água inicialmente contida nos agregados leves condicionam o desenvolvimento da absorção ao longo do tempo bem como a totalidade de água absorvida pelos mesmos (AL).

O autor refere que, apesar de não ser linear, o uso de agregados porosos na composição dos BAL conduz geralmente a um aumento da sua permeabilidade. Porém, na relação porosidade – permeabilidade, é fundamental o tipo de ligação entre poros.

Silva (2007) adverte ainda para o aumento registado da absorção de água dos AL sob pressões elevadas, comparativamente à pressão normal. Tal facto origina que os caudais a ter no bombeamento dos BAL sejam superiores aos dos betões convencionais. Também Larrad (1999), citado por Castro (2007), refere que, aquando da produção da mistura, ao ser introduzido um

agregado poroso, a quantidade de água presente na mesma tende a diminuir, resultando num aumento da tensão de escoamento e da viscosidade. Assim, a absorção de água da amassadura por parte dos agregados evidencia-se durante o período de transporte, aplicação e colocação do betão, podendo originar uma perda significativa ao nível da trabalhabilidade [ACI304R (1991), ACI211.2 (1998) e Virlogeux (1986)]. Porém, de forma a combater este efeito negativo por parte dos agregados porosos, Virlogeux (1986) sugere uma diminuição da absorção com recurso a outros tipos de agregados menos absorventes ou pré-saturados. Já o ACI211.2 (1998) e o FIP (1983) propõem numa fase inicial, para agregados com teores em água inferiores a 10% e detentores de elevadas velocidades de absorção, uma pré-molhagem com recurso a 1/2 a 2/3 da água da amassadura, antes de serem adicionadas à mistura os restantes componentes (areias e cimento). FIP (1983) reforça esta prática, afirmando que, se os agregados que apresentem taxas de absorção superiores a 10% não forem sujeitos a uma pré-molhagem, não será possível assegurar as melhores condições de trabalhabilidade durante a aplicação do betão. Porém, existem outras formas de assegurar as desejáveis condições de trabalhabilidade, como evidencia Virlogeux (1986) no seu estudo. Uma sobredosagem de água aquando da produção da mistura, com o intuito de compensar a elevada taxa de absorção dos agregados, ou mesmo a adição de água uns instantes antes de se proceder à colocação do betão, constituem práticas bem aceites actualmente durante a produção deste tipo de betão. O autor alerta ainda para a importância de remexer o betão antes da sua colocação, no mínimo uma dezena de voltas em velocidade rápida.

De acordo com Bogas (2011), a retenção da trabalhabilidade não depende apenas da absorção dos agregados, mas também da forma como esta ocorre. Os agregados provenientes de cinzas, como apresentam elevadas velocidades de absorção, irão encontrar-se no final da amassadura em equilíbrio, resultando numa ligeira redução de água efectiva e consequente perda de trabalhabilidade no período subsequente. Por outro lado, para agregados que apresentam uma película exterior densa, o processo de absorção já é mais demorado, dando origem a uma perda mais significativa da trabalhabilidade e conduzindo a maiores variações da relação a/c efectiva durante a aplicação do betão, conforme expõe o EuroLightConR2 (1998).

O estudo desenvolvido por Couquillat (1986) analisou as perdas de trabalhabilidade de betões produzidos com agregados leves pré-saturados de média e elevada porosidade, tendo concluído que as diferenças desta propriedade eram igualmente baixas. Porém, o autor observou que, aquando da introdução de agregados secos, esta propriedade era fortemente afectada, evidenciando uma perda muito significativa nos agregados de maior porosidade.

Também a temperatura constitui, segundo Bogas (2011), um factor a ter em conta durante a produção dos BEAL, uma vez que influencia a trabalhabilidade dos mesmos. Este factor, segundo o autor, tende a aumentar a taxa de absorção dos agregados. Couquillat (1986) concluiu que, para

incrementos de temperatura de 20 e 30 °C, a absorção dos agregados, independentemente de estes se encontrarem pré-saturados, também aumenta, afectando assim a trabalhabilidade do betão. Por outro lado, o ACI304R (1991) adverte que, em situações de temperaturas entre 10 e 30 °C, a influência deste factor sobre a absorção dos agregados é pouco significativa.

Por fim, outro factor, evidenciado por Bogas (2011), que influencia a absorção dos agregados e consequente trabalhabilidade do betão, é a geometria das partículas. Quando a área superficial do agregado ou o atrito entre as partículas aumenta, o resultado traduz-se numa mistura mais áspera, que por sua vez origina maior número de partículas partidas dando origem a uma redução de trabalhabilidade. Segundo Virlogeux (1986) e EuroLightConR2 (1998), o aumento de partículas partidas favorece, principalmente em agregados de argila expandida com películas exteriores compactas, a absorção e consequente perda de trabalhabilidade do betão. FIP (1983) indica a necessidade de uma adição extra de água em cerca de 5 a 15%, em misturas onde o índice de partículas partidas seja elevado. Também os autores Holm e Bremner (2000) referem que o uso de partículas partidas na mistura potencia o aumento da segregação, uma vez que modificam a granulometria e tornam difícil a previsão da absorção de água.

2.4.3. Resistência à compressão

A resistência constitui uma das principais características do betão, podendo o seu valor depender de inúmeros factores, tais como a rigidez, permeabilidade e durabilidade, contribuindo assim de uma forma global para a qualidade do mesmo.

Segundo diversos autores [Chandra e Berntsson (2003), Mehta e Monteiro (2006) e Bertolini et al. (2004)], a génese do betão abrange inúmeros materiais de dimensões muito variadas, desde os agregados grossos até às partículas de cimento não hidratadas e vazios que contêm desde o ar retido durante a amassadura até aos poros de gel na pasta de cimento. O betão pode ser interpretado, segundo Bogas (2011), como um material bifásico constituído por agregados grossos circundados por uma matriz de argamassa onde se encontram os restantes materiais, designadamente materiais finos, adjuvantes, ligantes, água e vazios. Esta definição de betão é suportada por vários autores que defendem modelos bifásicos ou trifásicos para a caracterização do comportamento dos mesmos [Smeplass (1992), Gerritse (1981), CEB-FIP (1977), FIP (1983), Faust (2000b) e Bogas (2011)].

Smeplass (1992), citado por Bogas (2011), afirma que a caracterização do betão deve ser realizada em duas fases distintas, sendo a primeira definida pela matriz ou pasta (fase plástica) e a segunda pelos agregados (fase rígida). No entanto, este modelo bifásico é desajustado aquando da utilização de um agregado grosso leve e uma areia de massa volúmica normal.

O EuroLightConR2 (1998) e os autores Bremner e Holm (1986) indicam que durante o endurecimento do betão, de um ponto de vista macro-estrutural, este tende para um material de

maior homogeneidade onde ocorre uma diminuição da incompatibilidade elástica entre as duas fases.

Já Monteiro (1991) defende um modelo trifásico relativamente à caracterização do betão, tendo em consideração a zona de interface. O aparecimento inicial de fendilhação localizada devido uma acção externa relativamente baixa tem origem na concentração de tensões na superfície do agregado. Assim que as tensões aumentam, inicia-se uma propagação da microfendilhação ao longo da zona de interface para a pasta, desviando-se do comportamento linear a curva que define a relação entre tensão e deformação. Numa escala intermédia, segundo Bogas (2011), a enorme diferença de resistência e rigidez entre as três fases conduz à classificação dos betões convencionais como material heterogéneo. No entanto, o mesmo autor refere que a zona de interface nos BEAL tende a ser de melhor qualidade, reflectindo-se nas propriedades mecânicas, modo de rotura, ductilidade, permeabilidade e durabilidade do betão. Desta forma, os autores Vaysburd (1992), Chen et al. (1995) e Videla e López (2000) afirmam que esta propriedade nos BEAL se encontra melhor caracterizada através de um modelo bifásico, dada a maior compatibilidade elástica e a melhor qualidade da zona de interface agregado-matriz, comparativamente aos BAN.

A principal limitação do betão quanto à resistência à compressão é, segundo Jastrzebski (1959), a relação a/c e o grau de consolidação do betão.

Chen et al. (1995), citados por Bogas (2011), referem que, ao contrário do que sucede nos betões com agregados naturais, a determinação da resistência à compressão é efectuada através da capacidade resistente da argamassa e do agregado, sendo a distribuição de tensões entre estas duas fases definida pelas suas características elásticas (Figura 2.3).

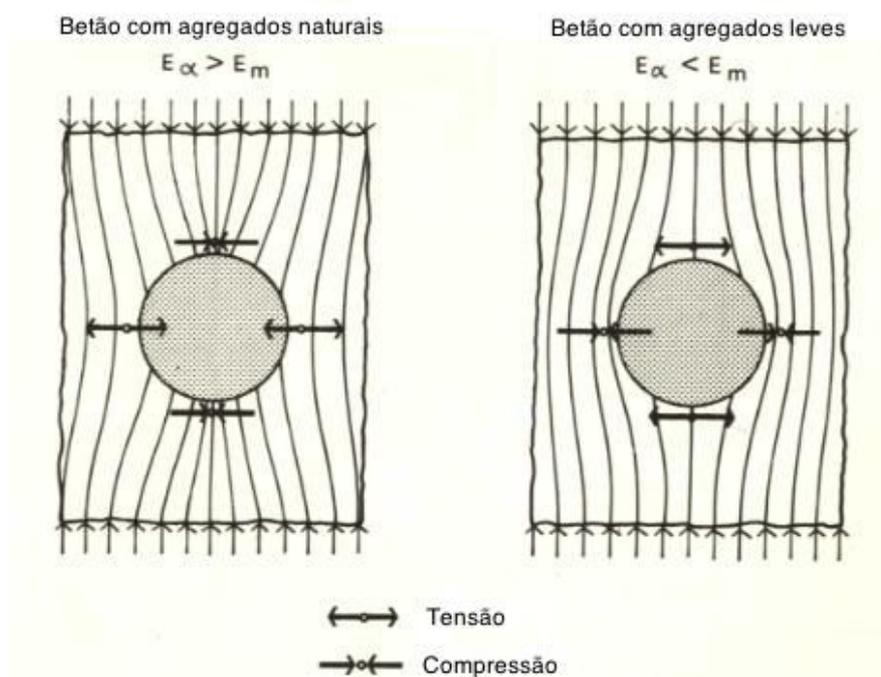


Figura 2. 3 - Modelo de distribuição de tensão de compressão no betão convencional e no betão leve [FIP (1983)]

Durante a sua investigação, Bogas (2011) obteve valores de resistência à compressão aos 28 dias para BEAL com o agregado Arlita na ordem de 65 MPa enquanto que, para BEAL com os agregados Leca e Argex, os valores dificilmente superavam 50 e 30 MPa, respectivamente. O autor também observa reduções médias na resistência à compressão, após a substituição de agregados grossos de massa volúmica normal por agregados leves, de 15, 36 e 59%, respectivamente para os betões com Arlita, Leca e Argex. Estas reduções corroboram a elevada influência que o agregado leve assume na resistência à compressão, sendo possível obter betões com comportamentos bastante distintos mantendo inalterada a dosagem dos restantes constituintes. Esta influência negativa na resistência à compressão aumenta nos agregados de menor massa volúmica ou pior qualidade. O autor denota ainda que a influência que os agregados demonstram na resistência à compressão assume tanto maior importância quanto mais elevada for a resistência da argamassa que envolve o agregado e maior for a idade do ensaio, observando percentagens de resistência superiores em betões com argamassas mais fracas. Assim, Bogas (2011) conclui que a diminuição da compacidade da argamassa, que se traduz na relação a/c, aumenta de forma não linear com o aumento da resistência do betão. Ao aumentar a dosagem de cimento e mantendo constante a quantidade de água utilizada, o autor observou que o aumento notado na resistência dos BEAL era inferior face aos BAN, destacando que, quanto maior for o nível de resistência e menor a qualidade do agregado, menor será o aumento notado (Figura 2.4).

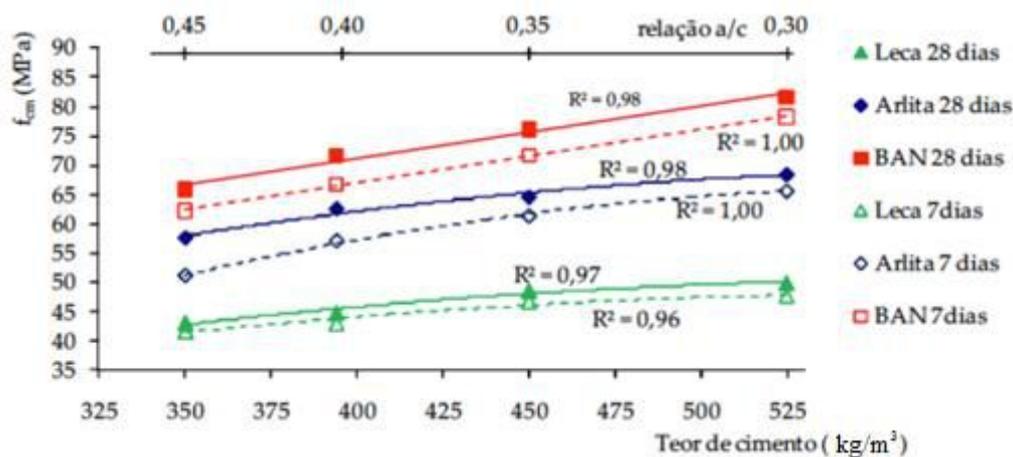


Figura 2.4 - Relação entre a resistência à compressão e o teor de cimento ou relação a/c [Bogas (2011)]

Por fim, o autor afirma que os efeitos de um aumento da dosagem do agregado dependem intrinsecamente do tipo de agregado e nível de resistência considerado. Nos BEAL usualmente utilizados, onde a capacidade resistente dos agregados é inferior à da argamassa, ao aumentar o volume de agregado utilizado na mistura, denota-se um decréscimo de resistência da mesma. Este decréscimo, segundo o autor, será tanto menor quanto melhor for a qualidade do agregado introduzido. Não obstante, Bogas (2011) refere que não só a quantidade de agregado utilizado como

também o nível de resistência e da “resistência limite” influem na resistência dos BEAL. O autor faz alusão à introdução de Arlita no betão, onde betões com resistência inferior a cerca de 60 MPa, comportam-se de forma similar aos BAN, traduzindo assim a pequena influência da dosagem de agregado na resistência do betão.

No estudo de Rossignolo et al. (2003), ao analisar-se as propriedades mecânicas de um betão leve produzido com recurso a cinco tipos de agregados leves de origem brasileira, obteve-se valores de resistência à compressão mais baixos do que as do betão de massa volúmica normal. Porém, o betão leve demonstrou uma elevada eficiência estrutural, traduzida pela relação resistência / massa volúmica.

Pelisser et al. (2011) estudaram as características de resistência mecânica de um betão leve (produzido com baixo teor de cimento e utilizando como agregado, a borracha proveniente da reciclagem de pneus) e registaram uma redução da resistência à compressão superior a 50%, para uma taxa de substituição de 20 a 40% do agregado reciclado. Assim, para as referidas taxas de substituição de agregado reciclado, os autores verificaram a necessidade de reduzir a relação a/c de forma a obter um nível de resistência à compressão similar à do betão de referência. Os autores referem ainda que o impacto económico resultante da adição de metacaulino é justificado pelo aumento da resistência à compressão e o isolamento térmico melhorado, tendo concluído que a utilização de borracha de pneu e metacaulino em argamassa ou betão leve contribui para a redução do consumo de matérias-primas, a reciclagem de material e a produção de materiais de construção com uma melhor eficiência térmica.

2.4.4. Resistência à tracção

A resistência à tracção, seja por tracção pura, flexão ou compressão diametral, depende da textura do agregado e da sua tensão de rotura à tracção. Bogas (2011) alude a propriedades que podem estar relacionadas com a resistência à tracção do betão, tais como a resistência ao corte, a aderência e o controlo de fendilhação. Também FIP (1983) e Newman (1993) indicam que esta propriedade se encontra intrinsecamente relacionada com a resistência do betão à compressão. Diversos autores [Cánovàs (2004), fib1 (1999), Neville (1995) e Mehta e Monteiro (2006)] sugerem que factores como a natureza, forma e dimensão dos agregados, a idade do betão e a relação a/l condicionam esta propriedade, conforme Bogas (2011) cita.

Esta resistência aumenta com a dosagem de cimento, mantendo constante a dosagem de água [Coutinho (1988)]. Segundo Bogas (2011), esta propriedade aumenta com a utilização de agregados de menor dimensão e formas irregulares bem como com a redução da relação a/l.

O mesmo autor refere que a resistência à tracção do betão depende da resistência à tracção do agregado, da matriz que o envolve e ainda da ligação entre estes dois elementos. Faust (2000),

referido por Bogas (2011), menciona que a resistência à tracção por compressão diametral nos betões estruturais com agregados leves, após simulação numérica, pode alcançar no limite a menor resistência à tracção dos seus constituintes. Desta forma, o autor comprova a importância inequívoca que os agregados têm na resistência à tracção, sendo este ensaio um bom indicador da sua capacidade. Comparativamente com os betões convencionais, os BEAL cuja superfície de rotura atravessa os agregados de menor capacidade resistente, tendem a ser menos resistentes.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), também a qualidade da zona de transição agregado-pasta representa um factor a ter em conta no estudo desta propriedade, tal como no estudo da resistência à compressão do betão. Esta característica é analisada por Dreux e Festa (2002) em betões produzidos com recurso a agregados calcários ou siliciosos, obtendo reduções desta propriedade na ordem de 15% em betões constituídos por este último agregado.

Newman (1993), citado por Bogas (2011), refere que as principais diferenças do comportamento dos BEAL à tracção face aos BAN estão relacionadas com o modo de rotura e o teor em água no betão. O facto de a linha de rotura atravessar os agregados em lugar de os contornar conduz a maiores relações entre o módulo de rotura e a resistência à compressão devido à ligação agregado-pasta, originando um comportamento semelhante ao dos betões convencionais com agregados britados. Por outro lado, apresentando os BEAL um teor em água superior ao dos BAN, dada a absorção dos seus agregados, em situações de secagem esta propriedade conduz a gradientes de humidade mais elevados, sendo responsável por maiores reduções na resistência à tracção.

Já EuroLightConR32 (2000) indica que, para uma mesma resistência à compressão, a resistência à tracção pode oscilar entre uma vasta gama de valores, dependendo assim essencialmente da forma e textura superficial do agregado utilizado. No estudo desenvolvido por Giaccio et al. (1992), os resultados obtidos indicam uma maior influência da aderência agregado-pasta na resistência à tracção, uma vez que, para diversos tipos de agregados analisados (basalto, granito e calcário), o autor observou uma maior intervenção deste factor na análise da resistência à tracção comparativamente à resistência à compressão.

Porém, conforme indicam diversos autores [Montoya et al. (1991), fib1 (1999), FIP (1983), Dreux e Festa (2002), ACI213R (2003), Cánovàs (2004) e Virgoleux (1986)], citados por Bogas (2011), de forma análoga ao estudo da resistência à compressão, a determinação desta propriedade depende do método de ensaio utilizado.

No estudo desenvolvido por Lydon e Balendran (1980), os autores estudaram a resistência à tracção em BEAL produzidos com recurso a agregados constituídos por cinzas e cinzas + clínquer, tendo observado reduções de 20 e 30% respectivamente na tracção uniaxial comparativamente a BAN de igual composição.

Holm e Bremner (2000), citados por Bogas (2011), concluíram que a semelhança na resistência à tracção e rigidez dos constituintes, agregado e pasta, para níveis de tensão na ordem de 20 a 35 MPa, minimizava a concentração de tensões bem como o desenvolvimento de microfendilhação. Se, por um lado, a resistência à tracção é comandada pela capacidade da zona de interface, capacidade essa superior nos BEAL face aos BAN, já a deformação pós-elástica que resulta de valores de tensão superiores providencia aos BAN melhor comportamento à tracção, uma vez que após a rotura da matriz os agregados naturais permanecem intactos ao invés do que se sucede nos BEAL.

Bayasi e Zhou (1993) reportam um melhor comportamento dos agregados leves face aos naturais no que diz respeito à propagação de fendas, uma vez que estes (AL) actuam como barreira à propagação das mesmas, contribuindo assim para o aumento da resistência à flexão.

No estudo desenvolvido por Bogas (2011), o autor obteve resistências à tracção por compressão diametral entre 1,17 e 3,21 MPa para condições de cura segundo o referido na ASTM C496 (2004), e 2,6 a 3,7 MPa em betões curados continuamente em água. Apenas em betões com areias leves ou cinzas volantes, curados ao ar, o autor verificou o não cumprimento do valor mínimo estabelecido na ASTM C330 (2004) de 2 MPa. O autor refere, de forma análoga ao observado na resistência à compressão, os melhores resultados obtidos em betões com agregados leves de maior massa volúmica (Arlita). No entanto, o autor refere que essa diferença é moderada e resulta da resistência limite à tracção ocorrer mais cedo.

Ao comparar a resistência à tracção por compressão diametral nos BAN, para composições semelhantes e condições de cura de acordo com a ASTM C496 (2004), Bogas (2011) observou uma redução, aquando da substituição dos agregados grossos por Arlita, Leca e Argex, em cerca de 17, 19 e 35% respectivamente. Ao serem curados continuamente em água, as reduções observadas pelo autor para os BEAL acentuaram-se passando a ser de 24, 29 e 47%, respectivamente para os agregados Arlita, Leca e Argex. O autor conclui assim que, para betões de igual composição, os BAN demonstram maior capacidade resistente à tracção comparativamente aos BEAL, sendo mais acentuada esta diferença no módulo de rotura do que na compressão diametral. Também as condições de cura aparentaram, no referido estudo, ter influência sobre a resistência à tracção nos BEAL, confirmando a maior limitação pelos agregados de pior qualidade, após observar uma maior evolução na resistência à tracção dos 7 para os 28 dias nos BEAL com agregados de maior massa volúmica e continuamente curados em água. Por último, Bogas (2011) alude à redução da resistência à tracção com o aumento da relação a/c, referindo no entanto ser menor do que a observada na resistência à compressão.

Também no estudo de Rossignolo et al. (2003), onde se analisaram as propriedades mecânicas de um betão leve produzido com recurso a cinco tipos de agregados leves de origem brasileira, os

resultados de resistência à tracção de flexão e compressão diametral variaram entre 3,1 e 5,3 MPa e entre 2,7 e 4,0 MPa, respectivamente. No entanto, os autores referem a menor relação de resistência à tracção / compressão observada no betão leve comparativamente ao betão de massa volúmica normal.

2.4.5. Módulo de elasticidade

De acordo com vários autores [fib1 (1999), EN1992-1-1 (2004), Newman (1993), FIP (1983), Pauw (1960) e Virlogeux (1986)], citados por Bogas (2011), o módulo de elasticidade depende fundamentalmente da proporção e rigidez dos seus constituintes, nomeadamente a pasta de cimento e agregados. Também outros factores, como a idade do betão, granulometria e textura dos agregados, processos de cura e condições de ensaio, humidade do betão e forma dos espécimes, têm influência nesta propriedade, como reportam os autores Cánovàs (2004), Neville (1995), Iravani (1996) e EuroLightConR35 (2000).

O módulo de elasticidade, ou “módulo de Young”, encontra-se intrinsecamente relacionado com as propriedades dos materiais, dependendo assim da composição química, da microestrutura e da porosidade dos mesmos. Esta propriedade pode ser calculada através da razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material. Segundo Bogas (2011), na determinação do módulo de elasticidade podem surgir diferentes definições, dependendo assim das considerações estabelecidas. A definição mais frequente, conforme demonstram os autores Cánovàs (2004), Virlogeux (1986) e CEB-FIP (1990), é o módulo de elasticidade tangente na origem (E_t) e o módulo de elasticidade secante (E_c), indicados na Figura 2.5. O primeiro (E_t) é obtido através da derivada da curva tensão-extensão num dado ponto, assumindo valores diferentes consoante a carga aplicada. No entanto, segundo Neville (1995), este módulo apenas deve ser aplicado para o troço linear inicial da curva tensão-extensão ou apenas à origem, no caso da inexistência desse troço. O módulo de elasticidade secante é determinado através de uma recta que une a origem com um ponto da curva correspondente a uma dada fracção da carga de rotura. Este módulo de elasticidade é um bom indicador das características relativas à rigidez média do betão. Cánovàs (2004) e Fouré (1986) consideram que se pode adoptar para betões convencionais, na ausência de outros valores, um módulo de elasticidade secante igual a cerca de 90 a 100% do módulo tangente na origem. Porém, conforme Bogas (2011) expõe, esta relação varia consoante o tipo de agregado utilizado e o nível de resistência do betão, estando mais próxima da unidade, no caso dos BEAL. Virgoleux (1986) observou que esta relação era cerca de 95% do módulo tangente em BEAL produzidos com recurso ao agregado de argila expandida.

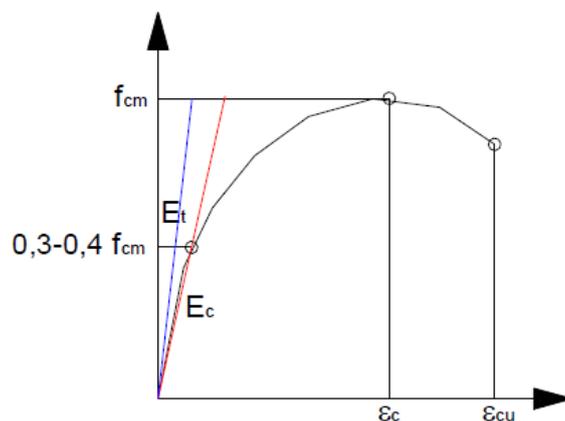


Figura 2. 5 - Módulo de elasticidade tangente (E_t) e secante (E_c) no betão

Hobbs (1971), citado por Turatsinze (2008), defende que o módulo de elasticidade de um betão está directamente relacionado com o módulo de elasticidade dos seus agregados e com a sua volumetria na mistura.

Aquando da caracterização dos BEAL, esta propriedade constitui um dos aspectos mais relevantes dado o seu reduzido valor face aos BAN. Na génese desta diferença está a menor rigidez que os agregados leves apresentam comparativamente aos agregados naturais, com valores geralmente inferiores a 15 GPa, face a 30 a 100 GPa, respectivamente. Segundo Newman (1993), também os maiores volumes de pasta associados aos BEAL contribuem para esta redução do módulo de elasticidade comparativamente aos BAN de igual resistência.

Diversos autores [Newman (1993), ACI213R (2003), EuroLightConR19 (2000) e Chandra e Berntsson (2003)], citados por Bogas (2011), referem que a menor rigidez presente nos BEAL resulta num aumento de deformação nos elementos estruturais para um dado carregamento. Por outro lado, a menor carga permanente nos elementos estruturais conferida pelos BEAL atenua de certa forma este aumento da deformação [Newman (1993)].

Segundo a investigação realizada por Bogas (2011), o módulo de elasticidade nos BEAL variou entre 21,1 e 28,6 GPa para resistências à compressão entre 30 e 62 MPa. Estes resultados, quando comparados com os betões convencionais de igual composição, correspondem a reduções de 40 a 56% no módulo de elasticidade.

O autor refere ainda que a elevada redução observada no módulo de elasticidade dos BEAL, aquando da substituição de agregados de massa volúmica normal por agregados leves, constitui uma das principais preocupações na aplicação deste tipo de betões.

Segundo o estudo de Rossignolo et al. (2003), ao se analisar as propriedades mecânicas de um betão leve produzido com recurso a cinco tipos de agregados leves de origem brasileira, obteve-se valores de módulo de elasticidade a variar entre 12,0 e 15,2 GPa, demonstrando ser muito inferior ao registado no betão de massa volúmica normal. Na Figura 2.6, encontra-se a correlação entre o

módulo de elasticidade e a resistência à compressão aos 7 dias de idade, demonstrando que, para os tipos de agregados investigados e gama de forças ensaiadas, o módulo de elasticidade não aumentou com o aumento da resistência à compressão. Uma relação similar para um betão de massa volúmica normal (NWC) com recurso a um agregado constituído por basalto também se encontra incluída no gráfico.

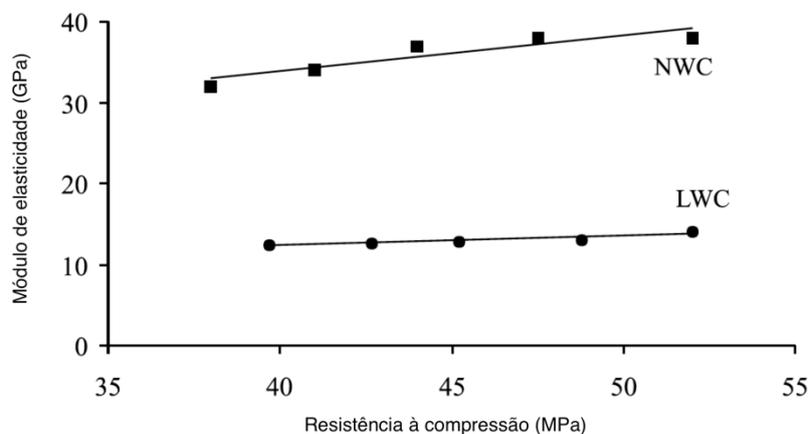


Figura 2. 6 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão [Rossignolo et al. (2003)]

O módulo de elasticidade observado pelos autores demonstrou ser muito inferior no betão leve face ao betão de massa volúmica normal, para o mesmo nível de carga. A deformação obtida a 80% da carga máxima para o betão leve foi superior à observada para o betão de massa volúmica normal, para um mesmo nível de força de compressão, demonstrando a alta capacidade de deformação do betão leve analisado. Para os betões leves analisados, os autores destacam a linearidade ascendente presente na relação tensão-deformação até 80% da tensão máxima de rotura.

2.4.6. Resistência ao desgaste por abrasão

O ensaio de resistência ao desgaste por abrasão caracteriza os betões na sua capacidade de suportar acções que provoquem desagregação ou perda de secção (Alves, 2007).

Poder-se-ia pensar que o betão produzido com recurso a agregados leves não apresenta uma resistência à abrasão adequada, dada a própria resistência demonstrada pelos agregados leves face aos naturais. No entanto, segundo o estudo desenvolvido por Chandra e Berntsson (2002), isso não é constatado, uma vez que a abrasão do betão não só não depende dos agregados leves, como também da resistência da matriz e da ligação entre os agregados e a pasta de cimento. Nos BEAL, a elevada resistência da argamassa compensa o valor baixo da resistência do agregado e, por outro lado, a ligação entre a argamassa e a pasta de cimento é muito superior comparativamente aos BAN. Os autores referem ainda que a ligação dos agregados leves à pasta não ocorre apenas ao nível da superfície, mas também ocorre uma penetração da pasta na superfície dos mesmos. Para além disto,

a superfície de alguns tipos de agregados leves pode ser reactiva, dando origem a uma reacção pozolânica entre o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento Portland e a sílica reactiva. Esta reacção cria um vínculo entre o agregado e pasta ainda mais forte.

Os ensaios realizados por estes autores foram executados em cubos com 28 dias de idade, cuja resistência média à compressão foi de 32,5 MPa. Os ensaios foram executados segundo a norma Sueca SS 1372 41, onde o aparelho utilizado diferia da mencionada norma ao nível da carga empregue em cada uma das rodas, tendo sido utilizado 330 N, ao invés de 130 N, bem como o número de rotações por minuto que foi de 67 em vez de 60. Os prismas produzidos para o ensaio tinham como dimensões 1,1 x 1,1 x 0,25 m.

Os resultados obtidos para o betão com agregados naturais demonstrou uma profundidade média de abrasão de 1,9 mm após 800 rotações e 2,6 mm após 1600 rotações. Para o betão com agregados leves, a profundidade média de desgaste após cerca de 800 a rotação foi de 1,3 mm e, após 1600 rotações, foi de 1,7 mm. Este resultado permitiu aos autores concluir, ao contrário do que seria expectável, que o betão com agregados leves apresenta um comportamento à abrasão superior comparativamente ao betão convencional. Na génese deste resultado, encontra-se a elevada força de adesão entre o agregado e a pasta de cimento, que chega a ser duas vezes superior à do betão convencional, dado o maior teor de cimento (3%) e a menor relação a/c presente no betão leve comparativamente ao betão convencional, 0,4 face a 0,74, respectivamente.

À semelhança do concluído por Chandra e Berntsson (2002), FIP (1983) afirma que a resistência à abrasão do betão depende da dureza e resistência da pasta de cimento endurecido e do agregado, bem como da ligação entre ambos.

Não obstante a constituição rígida dos agregados leves, a sua resistência à abrasão é baixa e pode ser menor do que a da pasta de cimento endurecida. A resistência à abrasão do betão leve é, por conseguinte, menor do que a do betão normal, dado que, após o desgaste da camada de superfície, a consequente exposição do agregado leve ao desgaste conduz à redução da resistência à abrasão do betão leve. FIP (1983) refere que ensaios de resistência à abrasão, realizados segundo a norma Alemã DIN 52108, revelaram que o desgaste devido à abrasão foi cinco vezes superior, no caso dos betões leves contendo argilas expandidas e xistos, com forças de compressão variando entre 25 e 55 N/mm², ao da areia comum e brita.

FIP (1983) refere ainda a aplicabilidade do betão leve, produzido com recurso a agregados leves de cinzas sintetizadas de combustível pulverizado, em parques de estacionamento, onde o desgaste devido à abrasão registado ao fim de 9 anos demonstrou ser satisfatório.

2.5. Propriedades do betão com agregados reciclados

Para além das vantagens económicas e ecológicas, segundo Ciocchio (2011), o reaproveitamento de betão também garante benefícios ao nível técnico, podendo-se substituir até 25% dos agregados convencionais por reciclados sem que existam alterações das propriedades mecânicas. Porém, Levy (2001) refere que esta taxa de substituição apenas é válida até a 20%, sem que sejam afectadas as propriedades técnicas do betão reciclado.

Segundo Zordan (1997), a reciclagem promove uma diversificação e aumento da oferta de materiais para a construção, podendo ainda resultar numa redução dos custos. John (1996) refere que a reciclagem pode apresentar benefícios ao nível social, promovendo políticas de cuidado habitacional, através da adopção de medidas de incentivo à criação de habitações de baixa renda, com recurso a produtos reciclados de desempenho comprovado. Assim, a reciclagem dos resíduos de construção civil demonstra, segundo o autor, o poder de combinar a preservação do meio ambiente com o aperfeiçoamento de políticas sociais.

Ao longo deste capítulo, ir-se-á analisar as principais propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados.

2.5.1. Massa volúmica

Em 2001, Leite refere que a massa volúmica do betão reciclado fresco comparativamente com a do betão convencional tende a ser menor, uma vez que a massa volúmica apresentada pelo agregado reciclado é menor e este confere ao betão uma quantidade maior de vazios, dada a maior porosidade dos agregados reciclados. Levy (2001) comprova que pode haver uma redução de 5 a 10% na massa volúmica do betão reciclado em relação ao convencional, devido ao teor total de ar que é incorporado por parte dos agregados reciclados em BAR.

Devenny e Khalaf (1999), citados por Leite (2001), concluíram existir uma relação entre esta propriedade e a resistência à compressão, uma vez que o aumento da massa volúmica nos betões produzidos conduziu a valores superiores de resistência à compressão nos mesmos. Os autores observaram reduções desta propriedade de 13 a 15% nos betões produzidos com recurso ao agregado fino reciclado proveniente de tijolos cerâmicos, face aos betões de referência.

A relação a/c também constitui um factor que influencia a massa volúmica, dado que a mesma tende a diminuir com o aumento da relação a/c .

Citando Latterza e Machado Jr. (1999), a autora [Leite (2001)] refere que esta característica leva a que o BAR se situe no limite entre o betão leve e o convencional ou, segundo Bazuco (1999), também mencionado por Leite (2001), possa ser caracterizado como intermédio entre o betão leve e o betão convencional. A autora alude ainda à contribuição significativa que a composição dos agregados dão a esta propriedade no betão reciclado.

No estudo sobre a influência de agregados finos reciclados na produção de betão, Evangelista (2007), embora não tenha registado uma diferença tão acentuada entre as massas volúmicas de betões reciclados e betões convencionais, também obteve valores inferiores à medida que ia aumentando a taxa de agregados reciclados, atestando que a massa volúmica tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de agregados reciclados.

Latterza (1998) observou uma redução desta propriedade, comparativamente aos betões convencionais, de 9 e 4%, para betões produzidos na sua totalidade com recurso a agregados reciclados de dimensões com 19 e 9,5 mm de diâmetro máximo, respectivamente.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam, no seu estudo, que a massa volúmica do betão no estado fresco se encontra intrinsecamente relacionada com diversas características do agregado, como a massa volúmica, porosidade, textura, forma e tamanho.

Em betões produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD), Leite (2001) conclui que, por ordem crescente, os teores de substituição de agregado fino reciclado, as relações a/c e os teores de substituição de agregado grosso reciclado afectam de forma significativa o valor da massa volúmica. A Figura 2.7 demonstra a relação entre a percentagem de substituição de agregado reciclado e as variáveis AGR e AFR, registada pela autora.

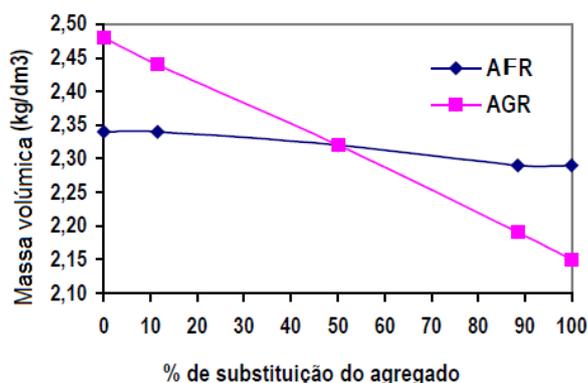


Figura 2. 7 - Relação entre a massa volúmica e a percentagem de substituição do agregado [Leite (2001)]

A autora observou, relativamente ao betão de referência, uma redução de até 16% da massa volúmica do betão com 100% de agregado reciclado, concluindo assim uma tendência de redução desta propriedade consoante o aumento da substituição do agregado natural por reciclado. Leite (2001) destaca ainda que, quanto maior for o teor de substituição do agregado e a relação a/c empregue, maior será a redução observada.

Também Valadares (2009), ao analisar o desempenho mecânico de betões estruturais com recurso ao agregado de borracha proveniente de pneus usados, concluiu existir uma relação entre a massa volúmica do betão no estado fresco e o volume de granulado incorporado, diminuindo esta com o respectivo aumento de volume do granulado. A justificação desta relação é, segundo o autor, a diferença clara de massa volúmica entre os agregados minerais e a borracha.

O autor, ao fixar a taxa de incorporação de borracha, observou no betão em estado fresco uma evidente redução da massa volúmica, mais acentuada para substituições materializadas nos finos. Desta forma, e devido às características muito próprias do agregado utilizado, o autor concluiu que a substituição de finos gerava maiores teores de ar na mistura, resultando assim em menores valores de massa volúmica. Não obstante, Valadares (2009) ainda constatou que a dimensão do granulado de borracha influenciava a massa volúmica fresca do betão.

Segundo o estudo indicado em ISSN 1983-4195 (2011), onde foi analisada esta propriedade em betões produzidos com agregados alternativos, tais como lodo proveniente de uma estação de tratamento de água, areia superficial e escória de aciaria, os autores concluíram que, comparativamente com o betão de controlo de massa volúmica de $2230,37 \text{ kg/m}^3$, a massa volúmica dos betões decresceu com a adição sucessiva do agregado fino composto por lodo. Por outro lado, os autores observaram um aumento desta propriedade ao incorporar no betão o agregado grosso composto por escória. No entanto, ao manterem constante a quantidade de agregado grosso (composto por escória e gnaisse) e fazendo variar as quantidades de agregado fino composto por lodo, esta propriedade decresceu com o sucessivo aumento do agregado fino. Por fim, ao utilizarem apenas o agregado grosso composto por escória, os autores observaram maiores valores de massa volúmica, justificando este aumento com base na maior massa volúmica do respectivo agregado grosso.

O trabalho desenvolvido em EuroLightCon R26 (2000) consistiu na análise de algumas propriedades mecânicas de betão leve reciclado. Dada a elevada percentagem de finos resultante da trituração de betão leve, o referido estudo utilizou um agregado reciclado constituído por alvenaria e betão, proveniente de uma central de reciclagem. Ao analisar a massa volúmica do betão leve reciclado ($a/c = 0,51$), o trabalho supracitado obteve o valor de 2185 e 2182 kg/m^3 para os 7 e 28 dias de idade.

2.5.2. Absorção

O estudo da absorção permite analisar de forma indirecta a permeabilidade dos betões aos agentes agressivos, tais como os cloretos e sulfatos. Esta propriedade adquire uma importância relevante, no que diz respeito à durabilidade e comportamento das estruturas.

Existem dois tipos de absorção a ter em conta aquando da caracterização do betão; a absorção por imersão avaliada através de ensaios por imersão, que medem a porosidade aberta, e a absorção por capilaridade avaliada por ensaios de capilaridade, que medem a absorção capilar do betão, decorrente do diferencial de pressão existente entre a superfície livre do líquido à face do betão e a superfície livre dos líquidos nos capilares do mesmo [Coutinho e Gonçalves (1997)].

Levy (2001) sugere que a monitorização da absorção de água tem como intuito avaliar a presença de poros permeáveis na estrutura do betão e, estando o índice de vazios intrinsecamente

relacionado com os poros existentes, é possível prever a durabilidade do betão através do conhecimento dos agentes agressivos que se propagarão através do interior da massa do mesmo. O conhecimento da estrutura de poros permite, segundo o autor, prever o tempo de contacto dos agentes agressivos com a armadura, iniciando assim o processo de corrosão.

Wirquin et al. (2000), após a realização de um ensaio de absorção de água por capilaridade em betões produzidos com recurso a agregados reciclados, concluíram que o processo de absorção de água neste tipo de betões era similar ao observado nos betões de agregados naturais.

No entanto, devido à natureza constituinte dos agregados reciclados, esta propriedade tende a ser superior nos betões reciclados, comparativamente aos betões com agregados naturais. O diâmetro superior dos poros maiores bem como a proporção do volume dos capilares de menor diâmetro dos agregados reciclados propiciam, conforme expõe o autor, a maior vulnerabilidade destes à penetração dos agentes agressivos.

Levy (2001) alude à enorme influência que a relação *a/c* apresenta nesta propriedade, assim como, mas com menor relevância, a cura. Porém, o autor refere que a cura prolongada em água favorece a hidratação e colmatação gradual da porosidade final presente nos betões com agregados reciclados.

Os resultados observados pelo autor aquando do estudo desta propriedade levaram-no a concluir que o tipo de agregado utilizado demonstrou ter maior relevância do que a relação *a/c* adoptada.

Ao avaliar esta propriedade, em betões com agregados finos reciclados, através de ensaios por imersão, Evangelista (2007) conclui que esta cresce linearmente com o aumento da incorporação de agregados finos reciclados, alcançando um valor máximo 45% superior ao obtido para o betão de referência. O autor justifica o resultado com o aumento da porosidade aberta da estrutura, devido ao facto de ter introduzido na pasta um material mais poroso, o que conduziu a uma maior capacidade de conter líquidos. Relativamente aos resultados obtidos por capilaridade, Evangelista (2007) considerou os resultados como inconclusivos, em função da disparidade de resultados que obteve durante a campanha experimental. Porém, o autor refere que, para este tipo de ensaio, as dimensões e forma como se produzem os provetes a ensaiar afectam, de forma significativa, os resultados.

O estudo desenvolvido por Nassar e Soroushian (2011), onde foi realizado o estudo das propriedades mecânicas e durabilidade de betão produzido com recurso a agregados reciclados constituídos por vidro moído em substituição parcial do cimento, afirma que esta propriedade, bem como a porosidade, constituem importantes indicadores da durabilidade do betão no estado endurecido, justificando que a sua redução, a longo prazo, possa apresentar melhorias significativas ao nível do desempenho e vida útil do betão em ambientes de serviços agressivos. A diminuição da

porosidade, segundo os autores, também beneficia a resistência à compressão e à flexão do betão, comprovando existir uma relação inversa entre a porosidade e a força de sólidos.

A absorção de água do betão observada pelos autores demonstrou uma redução significativa aquando da introdução de resíduos de vidro moído como substituição parcial para o cimento, em ambas as misturas realizadas com alta e baixa relação a/c. Por outro lado, o uso de agregados reciclados de vidro moído como substituição parcial do cimento também resultou na redução do volume de vazios no betão, conforme expõem os autores na sua análise estatística, que demonstrou o efeito significativo que os respectivos agregados apresentam na redução da absorção de água e do volume de vazios. Os autores referem que a determinação do teor de vazios no betão teve em consideração o volume de ambos os poros, contínuos e descontínuos, uma vez que, ao contrário dos poros contínuos, a presença de poros descontínuos em pasta de cimento hidratado não aparenta ser prejudicial para a absorção de água e, assim, a durabilidade do betão. Tais poros, no entanto, resultam na redução da resistência do betão.

Assim, os autores concluíram que o uso de agregados reciclados de vidro moído como substituição parcial do cimento supera as limitações que o agregado reciclado convencional apresenta (maior absorção de água e fraca adesão à argamassa). Também a utilização de finos do agregado reciclado de vidro em detrimento parcial do cimento no betão origina uma reacção pozolânica, que resulta numa melhor microestrutura do betão reciclado através da melhoria da qualidade da argamassa remanescente ligada à superfície de agregado reciclado, que posteriormente serve de interface entre o agregado reciclado e a nova argamassa. Desta forma, os autores concluem que o uso de agregados de vidro moído como substituição parcial do cimento em betões com agregados reciclados apresenta melhorias consideráveis nas propriedades relativas à durabilidade, tais como permeabilidade aos cloretos e resistência ao gelo-degelo por meio da melhoria das características do sistema de poros e do efeito de preenchimento de partículas de vidro.

2.5.3. Resistência à compressão

Hansen (1992) cita vários investigadores que apresentaram valores de resistência à compressão de betões com agregados grossos reciclados inferiores em cerca de 5 a 20% relativamente aos valores de resistência dos betões de referência.

No Japão, segundo Bazuco (1999), citado por Leite (2001), a taxa de redução das resistências de betões reciclados varia entre 14 e 32%.

Citando Kasai e Fujii (1989), a mesma autora refere que a resistência à compressão de betões com agregados reciclados de betão depende da relação água / cimento e da resistência do betão original.

No mesmo estudo, Leite (2001) cita Tavakoli e Soroushian (1996) que concluem que a fraca aderência entre a argamassa antiga e o agregado original, quando se pretende obter betões com resistência à compressão superior àquela do betão que deu origem ao agregado reciclado, pode levar à redução da resistência à compressão do betão reciclado quando comparado com o betão de referência, mantendo a mesma relação água / cimento. Por outro lado, quando a resistência do betão de origem do agregado reciclado é maior do que a do novo betão de referência, o desempenho mecânico do betão reciclado é superior.

Evangelista (2007) refere que a resistência à compressão constitui uma das propriedades que mais tem sido estudada pelos diversos investigadores. Hansen e Marga (1988), após a produção de três betões reciclados com recurso a agregados reciclados provenientes, também eles de três betões de diferentes níveis de resistência, nomeadamente, alta, média e baixa resistência, aferiu que esta propriedade, comparativamente aos BAN, tende a diminuir, em média, cerca de 8 e 60% após a introdução dos agregados reciclados (grossos e finos).

Segundo Lovato et al. (2012), ao analisarem as propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), concluíram que o aumento do teor de agregado reciclado (finos e grossos) tende a reduzir a resistência do betão. As maiores resistências à compressão indicadas no estudo corresponderam a betões sem agregados reciclados.

Quando foram adicionados à mistura de betão 100% de agregados finos reciclados (AFR) e agregados grossos reciclados (AGR), a redução da resistência à compressão observada foi de 18 e 24%, respectivamente. Esta redução é atestada pelos resultados obtidos nas investigações desenvolvidas por Cabral (2007), Hansen (1992) e Rahal (2007). De acordo com Rahal (2007), betões com 100% de AGR demonstraram uma redução na resistência à compressão entre 9% e 45%. Neste sentido, também Cabral (2007) demonstra que os agregados grossos reciclados são responsáveis pela maior redução desta propriedade. Na génese desta redução, encontra-se a forma do agregado cerâmico, que apresenta uma aparência mais angular e não permite a correcta disposição dos grãos, o que por sua vez origina um aumento dos vazios no betão, conforme Khalaf (2004) expõe. Outro factor a ter em conta é a menor resistência que o agregado cerâmico apresenta face a outro tipo de agregados reciclados.

Desta forma, os autores concluíram que a influência demonstrada pelos AGR sobre a resistência à compressão se encontrava intrinsecamente ligada à sua composição, dado o seu maior teor de cerâmica, argamassa de cimento e pedras.

O estudo demonstra uma relação inversa entre a resistência à compressão e a relação a/c. Ao aumentarem a percentagem de agregado reciclado, aumentou a necessidade de adicionar mais água

ao betão, resultando no aumento do rácio a/c, que por sua vez originou uma redução da resistência à compressão.

Para um betão composto por 50% de AFR, 50% AGR e relação a/c de 0,6, os autores consideraram os resultados satisfatórios, chegando a obter até cerca de 25 MPa de resistência à compressão. Porém, utilizando apenas AFR, os resultados obtidos também demonstraram ser aceitáveis.

Finalmente, os autores concluíram que o aumento de agregados reciclados (grossos e finos), de um ponto de vista geral, tende a diminuir as propriedades mecânicas do material.

Barra e Vazquez (1998) afirmam existir uma relação entre a quantidade de cimento e a percentagem de agregado grosso reciclado de forma a atingir um certo nível de resistência. Para produzir um betão reciclado de 45 MPa de resistência à compressão, os autores concluíram ser necessário utilizar mais 7,2% de cimento face a um betão convencional. Porém, ao aumentar o nível da respectiva resistência para 57,5 MPa, os autores verificaram ser necessário aumentar a dosagem de cimento em 17,3%. Assim, os autores concluíram existir uma relação directa entre esta diferença e a classe de resistência pretendida.

Na investigação realizada por Khatib (2005), em betões produzidos através da substituição dos agregados finos naturais por agregados finos reciclados, originários da trituração de betão com agregados naturais, com taxas de substituição de 25, 50, 75 e 100% relativamente ao seu peso, o autor estudou a resistência à compressão às idades de 1, 7, 28 e 90 dias. Ao aumentar a taxa de substituição de agregados naturais por reciclados, o autor concluiu existir uma crescente diminuição da respectiva resistência. Porém, nos provetes ensaiados aos 28 dias de idade, o autor referiu existir um aumento da resistência à compressão, atribuindo a responsabilidade deste aumento à hidratação do cimento incorporado nas partículas recicladas.

Os resultados obtidos por Evangelista (2007) levaram-no a afirmar que a incorporação de agregados reciclados finos no betão não resulta obrigatoriamente num aumento ou diminuição da sua resistência à compressão. O autor justifica que as variações que obteve (máxima de 7,6%) não evidenciam existir uma relação entre a taxa de incorporação de AFR e a resistência à compressão, podendo estas apenas resultar do trabalho experimental realizado, que é sempre susceptível a variações. Porém, o autor indica dois factores que podem ter contribuído para uma melhoria do desempenho da resistência à compressão do betão com AFR. A contribuição da presença de cimento no agregado reciclado, onde parte do mesmo se encontra não hidratado, ao ser incorporado à mistura, aumenta a quantidade do mesmo (sendo este aumento tanto maior, quanto maior for a taxa de incorporação de AFR) e compensa a menor resistência que a estrutura do betão apresenta devido ao aumento da porosidade. Também, a maior porosidade que este tipo de agregados exhibe favorece a ligação agregado-pasta. O autor destaca ainda a ligeira contribuição do tempo de

saturação ao nível da resistência, concluindo que maiores tempos de pré-saturação resultam em menores valores de resistência. Porém, o autor indica não serem conclusivos os resultados quanto à variação da resistência à compressão dos AFR, alertando para a necessidade de um estudo mais aprofundado. Por fim, Evangelista (2007) afirma existir uma relação linear aproximada entre a resistência à compressão e a massa volúmica do betão.

A investigação realizada em EuroLightCon R26 (2000) (mencionada em 2.5.1.) refere valores de resistência à compressão do betão leve reciclado de 29,9 N/mm² e 44,0N/mm², para os 7 e 28 dias de idade.

2.5.4. Resistência à tracção

A resistência à tracção desempenha um papel fundamental no comportamento das estruturas quanto aos estados limite de utilização, principalmente no que diz respeito à fendilhação e, de forma indirecta, à deformação.

Segundo o estudo de Evangelista (2007), os resultados conhecidos acerca da resistência à tracção apresentam uma variabilidade considerável. Tal facto é justificado por Hansen (1992), explicando tal heterogeneidade com a possível diferença de qualidade dos agregados reciclados utilizados.

Machado Jr. et al. (1998) e Bazuco (1999) afirmam que a utilização de agregado grosso reciclado na resistência à tracção de betões não representa nenhuma alteração desta propriedade. Os autores mencionam ainda que betões com material reciclado obedecem às mesmas relações teóricas entre resistência à tracção e resistência à compressão do que betões convencionais de igual classe. Porém, Bazuco (1999) salienta que, quando se utiliza também o agregado fino reciclado, a resistência à tracção apresenta uma diminuição na ordem de 10 a 20%.

No estudo de Leite (2001), esta refere que, em estudos realizados por Ravindrarajah e Tam, citados por Hansen (1992), foram utilizados betões com agregados grossos de betão reciclado que demonstraram possuir valores idênticos de resistência à compressão e tracção quando comparados com betões constituídos por agregados naturais. Porém, um outro estudo realizado por Bairagi et al., citado por Bazuco (1999), refere valores de resistência à tracção ligeiramente inferiores para betões com agregado grosso reciclado, comparativamente com betões convencionais.

Lovato et al. (2012), ao analisarem as propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), afirmam existir, de forma análoga à resistência à compressão, uma relação indirecta entre a dosagem de agregado grosso reciclado e a resistência à tracção do betão, diminuindo esta conforme se aumenta a taxa de incorporação.

Para um betão constituído por 100% AFR, os autores observaram um decréscimo da resistência à tracção de 18%, aumentando esta redução para 26% quando apenas foram utilizados AGR. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), na resistência à tracção, a propagação das fissuras ocorre de forma transversal à tensão aplicada, sendo a rotura atingida pela união das mesmas. Segundo os autores, a origem da redução desta propriedade no BAR reside na menor resistência que o agregado reciclado apresenta, comparativamente ao agregado natural, onde as fissuras tendem a propagar-se também nos agregados, resultando numa redução da resistência à tracção. Os autores realçam ainda não ter obtido uma relação desta propriedade com o rácio a/c.

Vários autores [Mukai et al. (1978), B.C.S.J. (1978), Ravindrarajah e Tam (1985) e Geradu e Hendriks (1985)], citados por Hansen (1992), sugerem que a substituição da totalidade dos agregados (grossos e finos) resulta numa redução até cerca de 20% da resistência à tracção. Karaa (1986), citado por Evangelista (2007), observou em betões constituídos apenas por agregados reciclados reduções de 26% na resistência à tracção por flexão e de 35% na resistência à tracção por compressão diametral. Porém, Coquillat (1982) não obteve diferenças de resistência à tracção entre betões convencionais e betões compostos apenas por agregados reciclados. Em ambos os casos, tanto os agregados finos, como os grossos foram substituídos. Também no que concerne à relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão, os autores apresentam resultados díspares; Karaa (1986) afirma que a escolha do agregado (natural ou reciclado) afecta directamente esta relação, enquanto que B.C.S.J. (1985) refere que o rácio se mantém inalterado com a inclusão de agregados reciclados.

Merlet e Pimienta (1993) obtiveram, para betões com uma taxa de substituição de 50% de agregados finos reciclados, uma redução da resistência à tracção entre 11 e 38%, face a betões convencionais de composição semelhante, estando esta variação relacionada com a existência de plastificantes ou o pré humedecimento dos agregados.

Ao analisar a resistência à tracção por flexão aos 28 dias de idade, em betões com agregados grossos reciclados (AGR), cuja composição compreendia mais de 90% de betão e argamassa, com taxas de substituição de 30, 50, 70 e 100%, Olorunsogo (1999) observou valores de 7,8 MPa, para o betão de referência e de 7,8, 7,3, 6,3 e 7,8 MPa para os betões com as respectivas taxas de substituição de AGN por AGR, respectivamente. Os resultados obtidos conduziram o autor a concluir a não existência de uma tendência de variação da resistência à tracção por flexão. Porém, o autor afirma que as resistências obtidas para os betões com agregados reciclados eram equiparáveis às do betão de referência.

Leite (2001) comprova existir um aumento de 16 e 14% da resistência à tracção por flexão e por compressão diametral, respectivamente, ao substituir na totalidade AFN por AFR. Para amassaduras com relações a/c menores (até 0,47), a autora atesta existir uma redução da resistência

com o aumento da incorporação de agregados reciclados. Porém, quando a relação a/c é superior, a adição de agregados reciclados resulta no crescimento da resistência, que chegou a atingir 32%. Desta forma, para um determinado rácio a/c, Leite (2001) concluiu existir uma relação entre a resistência à tracção e a taxa de substituição dos agregados naturais por reciclados.

Evangelista (2007) corrobora esta afirmação com os dados que obteve, onde observou uma clara tendência de superioridade desta propriedade nas argamassas face aos betões ensaiados. O autor destaca os resultados obtidos para os betões com substituição integral, concluindo que a ligação entre a pasta e os agregados grossos tem um papel crucial no mecanismo de rotura por tracção.

Evangelista (2007) concluiu que a adição de agregados finos reciclados afecta a resistência à tracção, chegando a obter uma redução de 23%, comparativamente ao betão de referência. O autor atribui esta redução à menor ligação existente entre a pasta e os agregados grossos, que resulta do aumento de porosidade da pasta.

2.5.5. Módulo de elasticidade

Citando Hansen (1992), Evangelista (2007) refere que todos os estudos realizados até ao momento apontam, de forma consensual, para uma diminuição do módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados, quer finos, quer grossos, em grande medida devido ao facto de as partículas conterem argamassa, com módulo de elasticidade inferior ao dos agregados naturais. Reportando ainda ao mesmo estudo [Evangelista (2007)], referem-se alguns trabalhos [Frondistou-Yannas (1977); Wesche e Schulz (1982); Gerardu e Hendriks (1985); Kakizaki et al. (1988)] que, ao compararem o módulo de elasticidade de betões com agregados naturais com a de betões com agregados reciclados, chegaram a diminuições desta propriedade entre 15 e 40%. Tais resultados são confirmados pela Building Contractors Society of Japan (1978), que obteve reduções entre 25% e 40% para betões com uma taxa de substituição de agregados reciclados de 100%.

Porém, Leite (2001) obteve uma variação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de agregados finos reciclados contrária à dos restantes estudos efectuados, apontando para um aumento desta propriedade para maiores taxas, quando a substituição de agregados grossos naturais por reciclados é inferior a 50%.

Segundo Coutinho e Gonçalves (1997), o módulo de elasticidade varia essencialmente com a porosidade dos agregados e da pasta. A justificação desta variação reside na influência que a porosidade assume na deformabilidade dos agregados bem como da pasta, que por sua vez contribui para a deformabilidade do conjunto. Sendo os betões com agregados reciclados mais porosos e, conseqüentemente, mais deformáveis, comparativamente aos betões com agregados naturais, é expectável que o conjunto apresente maiores deformações para o mesmo nível de tensão.

Ravindrarajah et al. (1987) referem existir, em betões constituídos por agregados reciclados, independentemente da dimensão do agregado (grosso ou fino) utilizado, um crescimento do módulo de elasticidade com a redução da resistência à compressão.

Schulz (1988) conclui a existência de uma relação linear entre o módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados e a massa volúmica dos mesmos.

Merlet e Pimienta (1993), ao analisar esta propriedade em betões com agregados finos reciclados, observaram reduções entre 12 e 35%, face a um betão convencional.

Khatib (2005), ao investigar o módulo de elasticidade dinâmico em betões produzidos com diferentes taxas de substituição de agregados finos naturais e agregados finos reciclados, verificou uma perda desta propriedade em função do aumento da taxa de substituição de agregados reciclados, independentemente da idade ensaiada. Para as idades de 1 dia e 90 dias, o autor observou um decréscimo de 25,5% e 16,4%, respectivamente, do módulo de elasticidade para um betão constituído apenas por agregados finos reciclados, comparativamente ao betão de referência.

De igual modo, Evangelista (2007) demonstrou existir uma diminuição do módulo de elasticidade através do aumento da taxa de substituição dos AFN por AFR, chegando a obter uma redução desta propriedade de 20% no betão constituído apenas por agregados finos reciclados, face ao betão de referência. Por fim, o autor estabelece uma lei de variação do módulo de elasticidade com a massa volúmica e com a resistência à compressão, afirmando ter obtido um coeficiente de correlação bastante satisfatório.

Ao analisar o módulo de elasticidade em betões estruturais com recurso ao agregado de borracha proveniente de pneus usados, Valadares (2009) afirma existir uma relação indirecta entre esta propriedade e a taxa de substituição de agregado reciclado. O autor refere ainda que, no cerne desta redução se encontra a sensibilidade que esta propriedade apresenta face à rigidez dos agregados. Porém, o autor obteve algumas variações aquando do estudo desta propriedade, apontando como principal causa não só a compacidade das misturas, como também a dimensão do granulado.

2.5.6. Resistência ao desgaste por abrasão

A resistência ao desgaste por abrasão é de fundamental importância para elementos cuja superfície desprotegida esteja sujeita a acções de erosão contínua, quer por acção humana (tráfego pedestre, circulação automóvel, entre outros), quer por acção dos elementos (canais hidráulicos, comportas, entre outros).

Evangelista (2007) refere o estudo realizado por Olorunsogo (1999) que investigou a resistência ao desgaste de betões com agregados reciclados, com taxas de substituição de 30, 50, 70 e 100%, comparando-os com os valores obtidos para um betão de referência. Os resultados são

pouco conclusivos, tendo-se obtido um maior desgaste, relativamente ao betão de referência, para os betões com 30% e 100% de substituição (respectivamente 2,26 e 2,25 mm *versus* 1,85 mm para o betão de referência) e um menor desgaste para as restantes composições (1,60 e 1,61 mm para os betões com taxas de substituição de 50 e 70%). Não foi possível estabelecer uma lei de variação da resistência ao desgaste com a taxa de substituição. Porém, o autor não deixou de salientar que os valores obtidos lhe pareciam bastante satisfatórios, evidenciando um desempenho dos BAR equiparável ao dos BAN.

Também Matias (2005), citado pelo mesmo autor [Evangelista (2007)], estudou esta propriedade para duas composições de betões com agregados reciclados e obteve uma menor redução de espessura quando utilizou agregados reciclados de betão em vez de agregados naturais pétreos, tendo obtido uma menor perda de espessura em cerca de 24 e 28% respectivamente, justificando estes resultados com a melhor ligação entre os agregados reciclados e a argamassa.

Ao alterar a taxa de substituição dos agregados grossos naturais por reciclados cerâmicos de barro encarnado, Pereira (2002) analisou esta propriedade, segundo a norma alemã DIN 52108, para as diversas composições do betão, observando existir uma relação inversa entre a variação da espessura e a taxa de substituição, conforme demonstra a Figura 2.8. A autora afirma que a justificação desta relação se prende com a eficiência da ligação entre a argamassa e os agregados cerâmicos, resultante da sua maior porosidade, que consente uma melhor penetração da pasta cimentícia no seu interior.

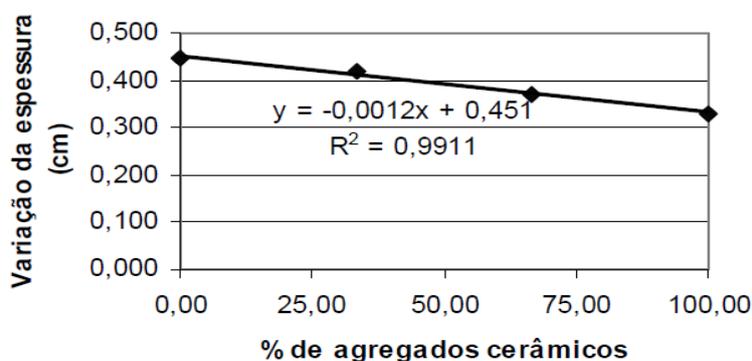


Figura 2. 8 - Variação de espessura com a taxa de substituição de agregados grossos naturais por agregados grossos cerâmicos [Pereira (2002)]

Evangelista (2007) observou, para um betão com 30% de substituição de agregados finos reciclados, um crescimento de 6,7% da redução da espessura face ao betão de referência. Porém, no betão com uma taxa de substituição de 100%, a redução de espessura demonstrou um acréscimo de 20%, revelando ser mais resistente à abrasão do que o betão de referência. O autor concluiu existir uma tendência de diminuição da variação da espessura consoante o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados. De forma análoga a Pereira (2002), o autor refere que a origem desta relação resulta da melhor ligação que a pasta de cimento apresenta com os AFR, face

aos AFN, dada a maior porosidade dos AFR. Por fim, o autor justifica que, apesar da melhoria das ligações entre a pasta e os agregados, a menor resistência à abrasão obtida para o betão com uma taxa de substituição de 30%, comparativamente ao betão de referência, deriva do facto de esta característica não ser suficiente para, no global, superar o desgaste à abrasão, realçando ainda que a variação observada foi apenas de 7%, o que em investigação se pode considerar aceitável.

2.6. Conclusões do capítulo

No que concerne à produção de betão reciclado convencional, quase todas as investigações analisadas na presente dissertação concordam, de forma global, quanto à redução do desempenho mecânico de betões quando neles se incorporam agregados reciclados. No entanto, e dadas as características do betão leve, a utilização de agregados leves reciclados na produção de betão leve reciclado parece promover o desempenho mecânico do betão leve reciclado, apresentando-se de seguida o que se considera ser expectável quanto aos resultados a obter na presente investigação.

Agregados leves reciclados (RLHD e RLM)

- Massa volúmica e baridade:

É expectável obter-se um aumento da massa volúmica dos agregados leves reciclados (RLHD e RLM) face aos agregados leves de origem (Leca HD e Leca M), uma vez que estes são constituídos não só pela fracção de agregados leves de origem, como também por uma fracção de argamassa ou pasta. Também é previsível observar-se um aumento da baridade nos agregados leves reciclados, comparativamente aos seus homólogos. Este aumento deve-se à inclusão de argamassa / pasta nos agregados leves. No entanto, uma vez que esta propriedade é afectada pela forma e compacidade do agregado, não é certo que o possível aumento seja muito significativo, dada a previsível menor esfericidade dos agregados leves reciclados;

- Absorção:

É expectável registar-se um aumento desta propriedade nos agregados leves reciclados uma vez que, à semelhança dos agregados reciclados convencionais, a argamassa / pasta aderida em torno do agregado leve de origem irá desencadear um aumento da porosidade, conduzindo assim a um previsível aumento da absorção. Adicionalmente, prevê-se que o processo de trituração dos agregados leves resulte num aumento das partículas partidas, expondo o interior destes, que, conforme 2.2.3., é de natureza muito porosa;

- Capacidade resistente:

É expectável obter-se, ao contrário dos agregados reciclados convencionais, um incremento desta propriedade em ambos os agregados leves reciclados. Esta melhoria

deve-se à fraca resistência do agregado leve de origem e ao envolvimento de argamassa / pasta em torno do mesmo, que irá conferir um aumento da sua rigidez.

Betões leves com agregados reciclados

Conforme enunciado em 1.2., foi fabricado um total de 12 betões com diversas composições, variando entre cada um as taxas de substituição (0, 20, 50 e 100%) de dois tipos de agregado leve (Leca HD e Leca M) por dois tipos de agregados leve reciclados (RLHD e RLM). Desta forma, e com o intuito de simplificar a sua identificação, foram considerados quatro séries de betão correspondentes aos agregados de origem, assim como aos agregados leves reciclados: série BHDRHD - agregado leve de origem Leca HD e agregado leve reciclado RLHD; BHDRM - agregado leve de origem Leca HD e agregado leve reciclado RLM; BMRM - agregado leve de origem Leca M e agregado leve reciclado RLM; BMRHD - agregado leve de origem Leca M e agregado leve reciclado RLHD.

- Resistência à compressão:

Dependendo a resistência à compressão essencialmente da rigidez e porosidade, é expectável, à excepção da série BHDRM, um aumento desta propriedade nos betões leves com agregados reciclados. A origem deste aumento resulta fundamentalmente do aumento percentual de argamassa / pasta que a substituição de agregado leve por agregado leve reciclado confere à mistura e à reduzida resistência à compressão característica dos betões leves. Por outro lado, a evolução da resistência à compressão da série BHDRM irá depender principalmente da diferença da capacidade resistente entre o agregado leve reciclado RLM e o agregado leve de origem Leca HD. É ainda de referir que, embora seja expectável um aumento da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado, é impreterível analisar a eficiência estrutural de cada mistura, uma vez que com o aumento da taxa de substituição irá existir um aumento da massa volúmica das misturas;

- Resistência à tracção por compressão diametral:

À semelhança do esperado para a resistência à compressão, também para a resistência à tracção por compressão diametral é expectável, à excepção da série BHDRM, um aumento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado. Conforme referido em 2.4.4., a resistência à tracção por compressão diametral depende essencialmente da textura do agregado, da sua tensão de rotura à tracção e da qualidade da zona de transição agregado-pasta. Deste modo, e prevendo-se um aumento da rigidez dos agregados leves reciclados proveniente da argamassa / pasta aderida em torno do agregado leve de origem, é previsível que o ensaio

da resistência à tracção por compressão diametral revele um incremento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado. Não obstante, para a série BHDRM, é novamente difícil prever uma tendência, dado o desconhecimento da capacidade resistente do agregado leve reciclado RLM. Segundo o fabricante, a capacidade resistente do agregado leve de origem de função não estrutural Leca M é muito reduzida, pelo que é feita esta salvaguarda quanto à evolução da resistência à tracção por compressão diametral da série BHDRM;

- Módulo de elasticidade:

O módulo de elasticidade depende fundamentalmente da proporção e rigidez dos seus constituintes, nomeadamente a pasta de cimento e os agregados (2.4.5.). Assim, é novamente previsível registar um incremento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado. Porém, à semelhança da resistência à tracção por compressão diametral, é difícil prever a diferença da rigidez do agregado leve de origem de função estrutural Leca HD e do agregado leve reciclado RLM (dada o reduzido valor da capacidade resistente da Leca M, facultado pelo fornecedor). Assim, torna-se algo arriscado prever uma tendência do módulo de elasticidade para a série BHDRM;

- Resistência ao desgaste por abrasão:

Se bem que pouco estudada, prevê-se que a resistência ao desgaste seja beneficiada com a inclusão de agregados leves reciclados. Conforme descrito em 2.4.6., a resistência à abrasão depende tanto dos próprios agregados leves como da resistência da matriz e da ligação entre os agregados e a pasta de cimento. Resultando o aumento da taxa de substituição num aumento percentual da argamassa / pasta da mistura, será expectável observar-se uma melhoria desta propriedade com o aumento da taxa de substituição.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O trabalho experimental teve o propósito de caracterizar o desempenho mecânico de betões estruturais com incorporação de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve. Dada a sua complexidade, a experimentação foi operacionalizada em quatro fases.

No que concerne à caracterização dos elementos constituintes do betão, a campanha experimental restringiu-se apenas à análise dos agregados utilizados, nomeadamente leves e reciclados, de ambas as dimensões, grossos e finos. As características físicas e mecânicas do cimento foram fornecidas pelo fabricante, com base em ensaios de conformidade (ANEXO A).

A par da descrição dos ensaios realizados, os cálculos relativos à formulação dos betões produzidos durante a campanha experimental são incluídos neste capítulo, aludindo às particularidades associadas à utilização de agregados leves reciclados.

Este capítulo pretende expor a organização da campanha experimental, assim como os ensaios realizados em cada uma das fases em que esta se desdobra. Além da referência de cada norma utilizada, incluem-se descrições pormenorizadas dos procedimentos experimentais, algumas destas com adaptações, dada a natureza específica dos agregados e betões estudados.

3.2. Fases da campanha experimental

3.2.1. Primeira fase experimental

Esta primeira fase tem como intuito a formulação dos betões a partir do número e dimensões dos provetes a serem ensaiados, calculando assim a quantidade de todos os materiais necessários para a campanha experimental.

Os agregados leves utilizados (Leca HD e Leca M) foram cedidos pela empresa Weber, os agregados finos naturais (areia fina e grossa) pela empresa Soarvamil e o cimento pela empresa Secil (cimento Portland CEM II - A/L 42,5 R, de acordo com a NP EN 197-1). No ANEXO A, apresentam-se as fichas técnicas dos agregados utilizados bem como do cimento, ambas facultadas pelos fornecedores.

Para o cálculo de quantidades, foi tomada como referência a curva granulométrica da Leca HD. Assim, foi posteriormente feita uma ponderação para saber quanto material iria ser necessário para se atingir a mesma granulometria da Leca HD, tanto para os reciclados como para a Leca M. Todos os volumes a betonar foram multiplicados pelos seguintes coeficientes de segurança: 1,2 que representa as eventuais perdas de material durante o processo de betonagem e 1,5 que representa uma quantidade excedente utilizada para eventuais repetições de ensaios ou betonagens. No ANEXO B, apresentam-se os cálculos e quantidades necessárias.

Assim, após a determinação das quantidades dos materiais necessários para a realização da campanha experimental, procedeu-se à respectiva encomenda sendo posteriormente armazenados em contentores de grande porte, de forma a evitar a contaminação ou saturação dos mesmos.

3.2.2. Segunda fase experimental

Após obter todos os materiais necessários para o desenvolvimento da campanha experimental, foi efectuada uma análise de todos os agregados a incorporar nos provetes de betão a ensaiar durante esta fase. De igual modo, ao longo desta fase, foram produzidos os betões de origem, com recurso aos agregados leves, nomeadamente a Leca HD e a Leca M. De seguida, deu-se início à produção dos agregados reciclados através da trituração dos betões de origem, sendo posteriormente caracterizados, de forma similar ao realizado para os agregados leves. Os ensaios realizados durante esta fase são resumidos nos Quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3. 1 - Ensaios a agregados grossos naturais e reciclados

Ensaio	Normas
Análise granulométrica	NP EN933-1 (2000)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN1097-6 (2002)
Baridade	NP EN1097-3 (2000)
Resistência ao esmagamento	EN 13055-1 (2002)
Teor em água	NP EN 1097-5 (2002)
Índice de forma	NP EN933-4 (2002)

Quadro 3. 2 - Ensaios a agregados finos

Ensaio	Normas
Análise granulométrica	NP EN933-1 (2000) / NP EN933-2 (1999)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN1097-6 (2002)

3.2.3. Terceira fase experimental

Esta fase envolveu a betonagem de todos os provetes a serem ensaiados na fase seguinte, bem como os ensaios a realizar no betão fresco, indicados no Quadro 3.3.

Quadro 3. 3 - Ensaios ao betão no estado fresco

Ensaio	Normas
Abaixamento	NP EN12350-2
Massa volúmica	NP EN12350-6

Com o intuito de avaliar e comparar as características mecânicas em estudo, os betões foram produzidos com idêntica trabalhabilidade, correspondente a uma classe de abaixamento S3 (100 a 150 mm avaliados através do ensaio de abaixamento), segundo a norma NP EN 206-1 (2007). Porém, a elevada amplitude (50 mm) permitida pela classe S3 (NP EN 206-1 (2007)), suscita a

produção de betões de características muito díspares, pelo que se restringiu o intervalo de trabalhabilidade, para os betões produzidos, em 125 ± 10 mm. Também a quantidade de cimento foi fixa em 350 kg/m^3 , de forma a evidenciar, apenas, a influência conferida pelos agregados utilizados, no desempenho mecânico dos betões produzidos.

3.2.4. Quarta fase experimental

Na última fase da campanha experimental, foi ensaiado o desempenho mecânico dos betões produzidos durante a terceira fase. No Quadro 3.4, são resumidos os ensaios e as normas pelas quais os betões no estado endurecido foram testados.

Quadro 3. 4 - Ensaios ao betão no estado endurecido

Ensaio	Idade (dias)	N.º de provetes	Normas
Resistência à compressão	7	3	NP EN 12390-3
	28	5	
	90	3	
Resistência à tracção por compressão diametral	28	3	NP EN 12390-6
Módulo de elasticidade	28	2	LNEC E 397
Resistência ao desgaste por abrasão	91	3	Norma Alemã DIN 52108 (2002)

3.3. Análise experimental dos agregados

3.3.1. Introdução

Sendo o betão constituído por cerca de 70% de agregados, torna-se fulcral o conhecimento do seu comportamento (forma e dimensão das partículas). Para além da sua geometria, a resistência, a porosidade e as características químicas e mineralógicas têm uma influência directa no comportamento do betão.

Desta forma, independentemente da origem dos agregados (pétreos ou artificiais), existem diversos ensaios que devem ser realizados dependendo das características que se pretendam avaliar nos agregados, tais como:

- propriedades geométricas;
- propriedades físicas;
- propriedades químicas.

No que concerne às propriedades geométricas, estas devem ser classificadas segundo a forma das partículas e a sua distribuição granulométrica. Em termos de propriedades físicas e mecânicas, deve ser analisada, entre outras, a absorção, a massa volúmica, a resistência mecânica, a resistência do gelo-degelo, o módulo de elasticidade e as propriedades térmicas. Finalmente, a determinação das propriedades químicas dos agregados, nomeadamente o teor de cloretos, reacções álcalis-sílica, reacções com os sulfatos, entre outras.

Segundo Coutinho e Gonçalves (1997), para a correcta formulação de um betão, devem ser conhecidas as seguintes propriedades dos agregados:

- massa volúmica;
- porosidade e absorção;
- teor de humidade;
- baridade e volume de vazios.

A presente investigação integrou ainda o ensaio de resistência ao esmagamento dos agregados grossos, dada a sua relevância ao nível da resistência mecânica, ainda que de forma indirecta.

3.3.2. Análise granulométrica

3.3.2.1. Objectivo do ensaio

A granulometria tem uma significativa influência nas propriedades do betão, no que diz respeito à sua compacidade e trabalhabilidade. Assim, a análise granulométrica permite uma quantificação percentual das diferentes dimensões e correspondentes fracções das partículas constituintes de cada um dos tipos de agregados a utilizar (areia grossa e fina, agregados leves e agregados leves reciclados), desempenhando assim um papel fundamental na formulação e maximização da compacidade do betão a produzir.

3.3.2.2. Normas de ensaio

Tendo em conta o especificado na EN12620, foi adoptada a metodologia de ensaio especificada nas normas NP EN 933-1 (2000) - "*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*" e NP EN 933-2 (1999), onde se encontram definidas as malhas dos peneiros referentes à série principal a utilizar na análise granulométrica.

3.3.2.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (1999);
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C (Figura 3.1);
- agitador de peneiros (Figura 3.2).



Figura 3.1 - Estufa ventilada



Figura 3.2 - Agitador de peneiros e peneiros da série 933-2

3.3.2.4. Amostras

A norma NP EN 933-1 (2000) quantifica a massa mínima de amostra a utilizar no ensaio, em função da máxima dimensão do agregado (Quadro 3.5). A máxima dimensão do agregado, $D_{m\acute{a}x}$, foi definida, de acordo com o especificado na EN 12620.

Para valores de $D_{m\acute{a}x}$ intermédios dos indicados no Quadro 3.5, a norma refere que a massa mínima da amostra de ensaio pode ser determinada pela interpolação dos valores indicados.

Quadro 3.5 - Massa mínima dos provetes de ensaio [NP EN 933-1 (2000)]

Dimensão máxima dos agregados (mm)	Massa mínima dos provetes (kg)
63	40,0
32	10,0
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Posteriormente, as amostras são secas em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingir uma variação inferior a 0,1% (medidas em pesagens sucessivas com pelo menos 1 hora de intervalo), ou seja, quando estas atingem massa constante. A massa do provete para ensaio é mencionada como M_1 .

3.3.2.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo o indicado na norma NP EN 933-1 (2000), consistindo em três fases:

1. Lavagem:

- colocar o provete de ensaio num recipiente e adicionar água suficiente até este se encontrar submerso;
- agitar o provete de ensaio com vigor de forma a se obter a separação completa e suspensão dos finos;
- molhar ambos os lados de um peneiro de abertura 0,063 mm, colocando de seguida um peneiro de protecção (1 e 2 mm) por cima;
- colocar os peneiros de forma a que a suspensão que os atravessa possa ser retirada ou, se necessário, recolhida num recipiente adequado;
- esvaziar o provete de ensaio no peneiro superior; de seguida, lavar até que a água que atravessa o peneiro 0,063 mm seja límpida;
- secar o material retido no peneiro 0,063 mm em estufa ventilada a 110 ± 5 °C, até se alcançar massa constante; deixar arrefecer, pesar e registar o valor (M_2).

2. Peneiração:

- colocar o material lavado e seco na coluna de peneiros; a coluna de peneiros é constituída por um certo número de peneiros (de abertura de malha definidos segundo a NP EN 12620 e a NP EN 933-1 (2000)) encaixados, e dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com fundo e tampa;
- agitar a coluna de peneiros, manual ou mecanicamente;
- transferir todo o material que passa através de cada peneiro para o peneiro seguinte da coluna antes de continuar a peneiração com esse peneiro; a mesma norma refere que se pode considerar a peneiração completa quando a massa do material retido não se altera mais de 1,0% durante 1 minuto de peneiração.

3. Pesagem:

- pesar o material retido no peneiro de maior abertura de malha e registar a sua massa como R_1 ;
- repetir os pontos anteriores para os restantes peneiros e registar a massa das diferentes fracções como R_2 ; R_3 ; ..., R_n ;
- pesar o material retido no fundo (resíduo) e registar a sua massa como P.

3.3.2.6. Resultados

A percentagem retida em cada peneiro é calculada através da seguinte expressão:

$$\bullet R_i \% = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad [3.1]$$

onde,

$R_{i\%}$ - percentagem de material retido no peneiro i (%);

R_i - massa retida no peneiro i (g);

M_1 - massa total da amostra seca (g).

Caso a soma das massas R_i e P difira mais do que 1% da massa registada M_2 , a norma NP EN 933-1 (2000) considera o ensaio inválido.

A curva granulométrica de um dado agregado advém da união dos pontos constituídos pelas malhas da série de peneiros utilizada (abscissas) e pela percentagem de material passado acumulado (ordenadas).

A percentagem de finos que passa no peneiro 0,063 mm é calculada segundo a expressão:

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

onde,

f - percentagem de finos que passa pelo peneiro 0,063 mm (%);

M_1 - massa total da amostra seca (g);

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

P - massa de resíduo (g).

3.3.3. Massa volúmica e absorção de água

3.3.3.1. Objectivo do ensaio

Aquando da produção do betão, torna-se mais simples dosear os materiais em peso do que volume. Desta forma, é necessário determinar a massa volúmica dos agregados.

Devido à absorção dos agregados, será necessário recorrer a correcções da quantidade de água a incluir nas misturas. Esta correcção é obtida através do conhecimento prévio do teor em água (abordado no capítulo 3.3.5) presente nos agregados aquando da sua utilização.

Concomitantemente, a absorção de água dos agregados pode implicar alterações na relação a/c, com consequências ao nível da trabalhabilidade.

3.3.3.2. Normas do ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 1097-6 (2002) - *“Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”*.

3.3.3.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2, com as seguintes aberturas de malha: 0,063; 4; 31,5; 63 (mm);
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- picnómetro de volume adequado à dimensão da amostra (segundo a norma 1097-6 (2002));
- máquina de peneirar;
- termómetro;
- papel absorvente;
- molde metálico (forma troncocónica);
- tabuleiro de pouca profundidade;
- secador de cabelo;
- funil;
- pilão metálico;
- cronómetro.

3.3.3.4. Amostras

a) Partículas de agregado de dimensão entre 4,0 e 31,5 mm

Segundo a norma NP EN 1097-6 (2002), procede-se à lavagem da amostra com recurso aos peneiros de abertura de malhas de 4,0 e 31,5 mm. Qualquer partícula retida no peneiro 31,5 mm é rejeitada, bem como todas as partículas que passem o peneiro 4,0 mm. Posteriormente, confere-se se a massa do provete de ensaio é superior ao indicado no Quadro 3.6. Caso o valor da massa do provete de ensaio seja inferior ao indicado no respectivo quadro, o ensaio é anulado. À semelhança do que sucede na análise granulométrica, qualquer valor que não se encontre no referido quadro pode ser interpolado com os valores apresentados.

Por fim, regista-se o valor da massa do provete de ensaio como M_0 .

Quadro 3.6 - Massa mínima dos provetes de ensaio [método do picnómetro - NP EN 1097-6 (2002)]

Dimensão máxima dos agregados (mm)	Massa mínima dos provetes (kg)
31,5	5,0
16	2,0
8	1,0

b) Partículas de agregado de dimensão entre 0,063 e 4,0 mm

Segundo a norma NP EN 1097-6 (2002), deve ser recolhida uma amostra com massa mínima de 1 kg. De seguida, com o intuito de remover as partículas mais finas, lava-se a referida amostra sobre os peneiros de abertura de malha de 4,0 e 0,063 mm, rejeitando todas as partículas retidas no peneiro de abertura de malha 4,0 mm, assim como as que passam no peneiro de abertura de malha de 0,063 mm.

Regista-se o valor da massa do provete de ensaio como M_0 .

3.3.3.5. Procedimentos de ensaio

O procedimento foi executado segundo o indicado na norma NP EN 1097-6 (2002):

a) Partículas de agregado de dimensão entre 4,0 e 31,5 mm

- preparar o provete de ensaio conforme referido em 3.3.3.4.a);
- imergir o provete preparado no picnómetro com água a 22 ± 3 °C;
- agitar o picnómetro de forma a remover o ar incluído;
- manter o provete de ensaio à temperatura de 22 ± 3 °C durante $24 \pm 0,5$ h;
- agitar novamente o picnómetro de forma a remover o ar incluído;
- transbordar o picnómetro por adição de água e colocar a tampa, não permitindo a entrada de ar;
- secar o exterior do picnómetro;
- pesar a massa do conjunto (picnómetro, amostra e água) como M_2 (Figura 3.3);
- remover a amostra da água e deixar escorrer durante alguns instantes;
- encher novamente o picnómetro com água e colocar a tampa;
- secar o exterior do picnómetro;
- registar a massa do conjunto (picnómetro e água) como M_3 ;
- transferir o provete escorrido sobre o papel absorvente;
- secar a superfície das partículas;
- registar a massa do agregado de superfície seca como M_1 ;
- colocar o agregado em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingir massa constante, registando posteriormente o valor da sua massa como M_4 .

b) Partículas de agregado de dimensão entre 0,063 e 4,0 mm

- preparar o provete de ensaio conforme referido em 3.3.3.4.b);
- imergir o provete preparado no picnómetro com água;
- agitar o picnómetro de forma a remover o ar incluído;
- agitar novamente o picnómetro de forma a remover o ar incluído;
- secar o exterior do picnómetro;
- pesar a massa do conjunto (picnómetro, amostra e água) como M_2 ;
- decantar e esvaziar o picnómetro sobre um tabuleiro (Figura 3.4);
- encher novamente o picnómetro com água e colocar a tampa;
- secar o exterior do picnómetro;
- registar a massa do conjunto (picnómetro e água) como M_3 ;
- espalhar o provete numa camada uniforme;
- secar a humidade superficial das partículas com um secador de cabelo;

- encher o molde troncocónico;
- apiloar com um pilão a superfície com 25 pancadas;
- levantar o molde delicadamente;
- repetir o processo de secagem e ensaio do cone até que o agregado se deforme após desmoldagem;
- avaliar a deformação do provete de acordo com o indicado na Figura 3.5 e, apenas quando se atingir o estado de saturação com superfície seca do agregado, registar a massa do agregado de superfície seca como M_1 ;
- colocar o agregado em estufa ventilada a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir massa constante, registando posteriormente o valor da sua massa como M_4 .



Figura 3.3 - Pesagem do picnómetro com amostra inserida



Figura 3.4 - Partículas de agregado de dimensão entre 0,063 e 4,0 mm retiradas do picnómetro

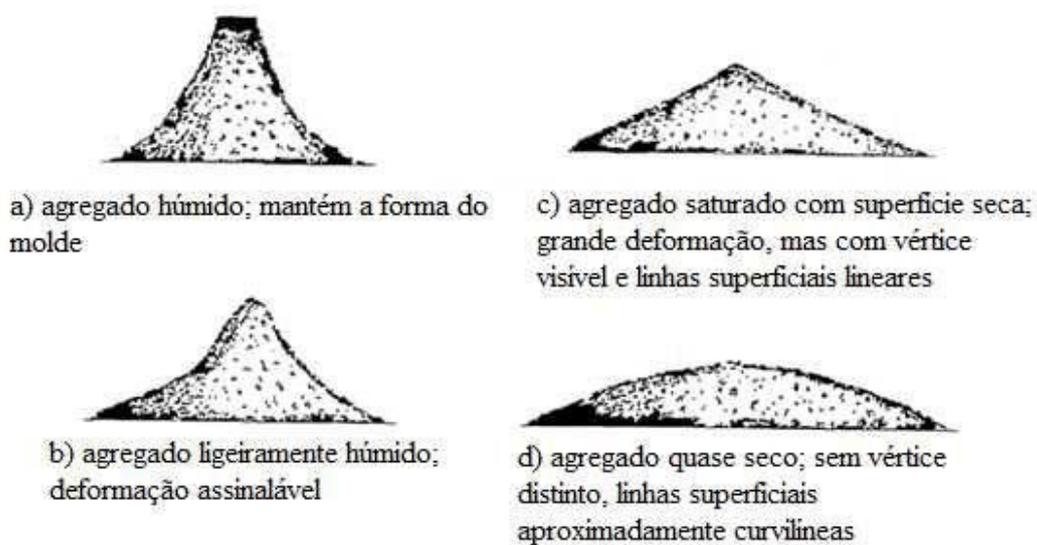


Figura 3.5 - Indicações presentes na norma NP EN 1097-6 para a determinação do estado saturado com superfície seca em agregados finos

3.3.3.6. Resultados

O cálculo das massas volúmicas (ρ_a , ρ_{rd} , ρ_{ssd}), em kg/m^3 , foi realizado através das seguintes expressões:

$$\bullet \quad \rho_a = \frac{M_4}{\frac{M_4 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [3.3]$$

$$\bullet \quad \rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [3.4]$$

$$\bullet \quad \rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [3.5]$$

$$\bullet \quad WA_{24} = \frac{(M_1 - M_4) \times 100}{M_4} \quad [3.6]$$

onde,

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m^3);

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m^3);

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m^3);

ρ_w - massa volúmica da água (kg/m^3);

WA_{24} - Absorção de água após 24 h de imersão (% de massa seca);

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

M_2 - massa do conjunto (picnómetro, água e amostra) (g);

M_3 - massa do picnómetro cheio de água (g);

M_4 - massa do provete de ensaio após secagem em estufa (g).

3.3.4. Baridade

3.3.4.1. Objectivo do ensaio

A baridade, ou massa volúmica aparente, representa a massa por unidade de volume aparente de uma dado agregado, ou seja, é o volume de agregado compreendendo o volume de vazios entre as partículas. Assim, a determinação desta propriedade constitui um parâmetro importante da formulação do betão, uma vez que é impossível dispor os agregados sem que subsistam vazios entre as partículas.

3.3.4.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma 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”.

3.3.4.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- recipiente cilíndrico estanque em metal inoxidável, de volume variável em função da máxima dimensão dos agregados a ensaiar (Quadro 3.7);
- régua;
- colher.

3.3.4.4. Amostras

A norma NP EN 1097-3 (2000) refere que são necessárias três amostras de cada agregado para a realização do ensaio. Cada amostra tem de ser previamente seca em estufa a 110 ± 5 °C até atingir massa constante, devendo a mesma encontrar-se compreendida entre 120 e 150% da massa necessária para encher o recipiente de ensaio. O volume mínimo do recipiente de ensaio encontra-se estipulado segundo o Quadro 3.7, sendo este dimensionado em função da máxima dimensão do agregado. De forma análoga aos anteriores ensaios, caso o valor da máxima dimensão do agregado não se encontre no respectivo quadro, o valor da capacidade do recipiente deve ser interpolado.

Quadro 3.7 - Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado [NP EN 1097-3 (2000)]

Dimensão máxima do agregado (mm)	Capacidade (l)
Até 4	1,0
Até 16,0	5,0
Até 31,5	10,0
Até 63	20,0

3.3.4.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo o indicado na norma NP EN 1097-3 (2000):

- preparar as amostras para o ensaio conforme o descrito em 3.3.4.4.;
- pesar o recipiente vazio e limpo e registar a sua massa como M_1 ;
- encher o recipiente, com auxílio de uma colher e sem que ocorra nenhum tipo de compactação, até transbordar;
- remover o excedente, com recurso a uma régua, nivelando a superfície sem que ocorra nenhum tipo de compactação;
- registar o valor da massa do conjunto (recipiente e provete) como M_2 ;
- repetir o procedimento para os restantes provetes.

3.3.4.6. Resultados

O cálculo da massa volúmica de cada provete foi realizado através da seguinte expressão:

$$\bullet \rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad [3.7]$$

O valor da massa volúmica aparente de cada agregado resulta da média das massas volúmicas dos três provetes:

$$\bullet \quad \rho_{MVA} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} \quad [3.8]$$

onde,

ρ_i - massa volúmica do provete de ensaio i (kg/dm^3);

ρ_{MVA} - massa volúmica aparente do agregado (kg/dm^3);

M_1 - massa do recipiente de ensaio (kg);

M_2 - massa do conjunto (recipiente e provete) (kg);

V_r - volume do recipiente de ensaio (dm^3).

3.3.5. Teor em água

3.3.5.1. Objectivo do ensaio

A elevada capacidade de absorção presente nos agregados leves e reciclados enfatiza a necessidade de uma correcta avaliação desta propriedade nos mesmos, a fim de saber, à data da execução das betonagens, a quantidade de água total necessária a introduzir na mistura, sem que se altere a relação a/c efectiva.

3.3.5.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 1097-5 (2002) - *“Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada”*.

3.3.5.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- colher;
- recipiente com capacidade suficiente para conter o provete.

3.3.5.4. Amostras

A massa mínima da amostra (em kg) é determinada em função do valor da abertura da malha do peneiro de maior abertura (D , em milímetros):

- $D \geq 1,0$ mm, a massa mínima deve ser $0,2 D$;
- $D < 1,0$ mm, a massa mínima deve ser $0,2$ kg.

3.3.5.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo a norma NP EN 1097-5 (2002):

- colocar o provete no recipiente, com auxílio de uma colher, tarando a balança;
- pesar e registar o valor da massa do provete como M_1 ;
- colocar o conjunto em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até se atingir massa constante;
- pesar e registar novamente o valor da massa constante do provete como M_2 .

3.3.5.6. Resultados

O cálculo do teor de humidade de cada amostra de agregado foi realizado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad W_i = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad [3.9]$$

onde,

W_i - teor de humidade de cada amostra por agregado (%);

M_1 - massa do provete de ensaio (g);

M_2 - massa constante do provete (g);

O valor final do teor de humidade de cada agregado, resulta da média das respectivas amostras, conforme a equação:

$$\bullet \quad W_i = \frac{\sum W_i}{2} \quad [3.10]$$

3.3.6. Resistência ao esmagamento

3.3.6.1. Objectivo do ensaio

O ensaio da resistência ao esmagamento de um determinado agregado consiste numa avaliação indirecta da capacidade resistente do agregado. Recorre-se a este ensaio quando não é possível determinar, de forma directa, o valor da capacidade resistente da rocha originária. A avaliação deste ensaio é realizada com base na fragmentação manifestada pelos agregados após o seu esmagamento, segundo uma força e velocidade de aplicação definida pela norma adoptada. Posteriormente, segundo correlações empíricas conhecidas, este ensaio permite estimar o valor da capacidade resistente da rocha e apreciar a aplicabilidade do agregado aquando da produção do betão. Porém, este ensaio depende igualmente da granulometria do agregado, e com tal, o mesmo não traduz apenas a capacidade resistente do agregado.

3.3.6.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 13055-1 (2002) - Anexo A - “Agregados leves. - Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção”.

3.3.6.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- prensa;
- mesa de vibração;
- colher;
- dispositivo metálico de acordo com a NP EN 13055-1 (2002) (Figura 3.6).



Figura 3. 6 - Recipiente metálico para o ensaio de esmagamento [NP EN 13055-1 (2002)]

3.3.6.4. Amostras

Segundo a norma NP EN 13055-1 (2002), o ensaio deve ser realizado em três provetes de agregado, tendo o cuidado de previamente remover das amostras as partículas de maior e menor dimensão.

3.3.6.5. Procedimento de ensaio

A norma NP EN 13055-1 (2002) estabelece dois procedimentos de ensaio em função da baridade e dimensão do agregado leve:

- a) Agregados de dimensão entre 4,0 e 22 mm, e baridades superiores a 150 kg/m³**
- posicionar o recipiente metálico sobre a mesa de vibração e, com recurso a uma colher, proceder ao seu enchimento com agregado, tendo o cuidado de evitar a sua segregação;
 - proceder à vibração do recipiente cilíndrico durante 3 a 60 segundos;
 - registar o tempo de vibração e, em seguida, voltar a colocar agregado de forma a garantir o total preenchimento do recipiente;
 - proceder, novamente, à vibração do recipiente durante 3 a 60 segundos;

- registrar o tempo de vibração e regularizar a superfície da amostra de agregado;
- posicionar o êmbolo em contacto com a amostra de agregado, ajustando a distância para 20 mm entre o bordo do recipiente e o anel metálico;
- posicionar o conjunto na prensa e proceder à aplicação de força de forma a garantir que o êmbolo realiza o percurso de 20 mm em aproximadamente 100 segundos;
- registrar o valor da força.

b) Agregados com baridades inferiores, ou iguais, a 150 kg/m³

- posicionar o recipiente metálico sobre a mesa de vibração e, com recurso a uma colher, proceder ao seu enchimento com agregado, tendo o cuidado de evitar a sua segregação;
- proceder à vibração do recipiente cilíndrico durante 3 segundos;
- voltar a colocar o agregado de forma a garantir o total preenchimento do recipiente;
- proceder, novamente, à vibração do recipiente durante 3 segundos;
- regularizar a superfície da amostra de agregado;
- posicionar o êmbolo em contacto com a amostra de agregado, ajustando a distância para 50 mm entre o bordo do recipiente e o anel metálico;
- posicionar o conjunto na prensa e proceder à aplicação de força de forma a garantir que o êmbolo realiza o percurso de 50 mm em aproximadamente 100 segundos;
- registrar o valor da força.

3.3.6.6. Resultados

O cálculo da capacidade resistente do agregado foi realizado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad \sigma_{esm} = \frac{F}{A} \quad [3.11]$$

onde,

σ_{esm} - resistência ao esmagamento (N/mm²);

F - força de compressão (N);

A - área do êmbolo (mm²).

O valor da capacidade resistente do agregado resulta da média dos três ensaios realizados.

3.3.7. Índice de forma

3.3.7.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio tem como objectivo avaliar a geometria dos agregados grossos (partículas de dimensões compreendidas entre 4 e 63 mm). Assim, as partículas são classificadas como cúbicas ou

não-cúbicas, fornecendo esta avaliação informações sobre o comportamento dos agregados no betão fresco e endurecido.

3.3.7.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 933-4 (2002) - “*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 5: Determinação da forma das partículas*”.

3.3.7.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (1999);
- máquina de peneirar;
- paquímetro.

3.3.7.4. Amostras

As amostras são colocadas em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingirem massa constante. Posteriormente, as amostras são separadas segundo fracções granulométricas [estipuladas na norma NP EN 933-2 (2002)] com recurso aos peneiros de abertura de malha compreendidos entre 4 e 63 mm, sendo excluída qualquer partícula não compreendida neste intervalo.

A norma indica ainda qual o valor de massa mínima da amostra a ensaiar consoante a dimensão máxima do agregado, conforme o Quadro 3.8. Caso a dimensão máxima do agregado não se encontre no quadro, a norma sugere a sua interpolação.

Regista-se o valor da massa do provete de ensaio como M_0 .

Quadro 3. 8 - Massa mínima dos provetes [NP EN 933-4 (2002)]

Dimensão máxima dos agregados (mm)	Massa mínima dos provetes (kg)
63,0	45
32,0	6
16,0	1
8,0	0,1

3.3.7.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo a norma NP EN 933-4 (2002):

- preparar os provetes de ensaio segundo o especificado em 3.3.10.4.;
- registar o valor da massa de cada fracção granulométrica como M_{1i} e calcular a sua percentagem (V_{1i}) relativa à massa do provete de ensaio (M_0);

- excluir todas as fracções granulométricas (d_i/D_i) que apresentam mais de 10% de M_0 ;
- com recurso ao paquímetro, medir o comprimento (l) e a espessura (e) de cada partícula, separando todas as partículas não-cúbicas, ou seja, partículas que apresentem um rácio entre o comprimento e a espessura maior do que 3 ($l/e > 3$);
- registar o valor da massa das partículas não-cúbicas de cada fracção granulométrica d_i/D_i como M_{2i} .

3.3.7.6. Resultados

O cálculo do índice de forma do agregado foi realizado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad [3.12]$$

onde,

SI - índice de forma (%);

$\sum M_{1i}$ - soma das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

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

3.3.8. Evolução da absorção de água

3.3.8.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio tem como objectivo a compreensão da evolução da absorção de água dos agregados leves e reciclados ao longo do tempo. O conhecimento desta propriedade permite avaliar, de forma mais precisa, a quantidade de água a adicionar na amassadura, dado que tanto os agregados leves como os reciclados apresentam grande porosidade.

3.3.8.2. Norma do ensaio

Adoptou-se a metodologia seguida em Bogas (2011), dada a inexistência de uma norma europeia relativa ao estudo desta propriedade.

3.3.8.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- estufa ventilada a temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiro de ensaio - 4 mm;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- picnómetro;
- rede metálica.

3.3.8.4. Amostra

Segundo Bogas (2011), a amostra deverá apresentar um volume equivalente a cerca de $\frac{3}{4}$ do volume total do picnómetro. Posteriormente, a amostra é seca em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até se atingir massa constante.

3.3.8.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi realizado segundo o especificado em Bogas (2011):

- preparar o provete de ensaio conforme referido em 3.3.8.4;
- imergir o provete preparado no picnómetro com água, colocando a rede metálica de forma a garantir a total imersão da amostra (dada a menor massa volúmica de alguns agregados leves face à água);
- agitar o picnómetro de forma a remover o ar incluído;
- pesar a massa do conjunto (picnómetro, amostra e água);
- após um período de 3 minutos, registar o valor da massa do conjunto;
- repetir o ponto anterior ao fim de 5, 10, 20, 30, 60 e 120 minutos e ao fim de 24 horas, adicionando sempre que necessário água (até a marca assinalada no picnómetro) antes de cada pesagem;
- após a última pesagem, secar o exterior do picnómetro;
- registar a massa do conjunto (picnómetro, amostra e água);
- transferir o provete escorrido sobre o papel absorvente;
- secar a superfície das partículas;
- registar a massa do agregado de superfície seca como M_1 .

3.3.8.6. Resultados

Os resultados são então dados pelas seguintes expressões:

$$\bullet \quad abs_f = \frac{M_1 - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \quad [3.13]$$

$$\bullet \quad abs_i = \frac{M_{24h} - M_i}{M_i} \times 100 \quad [3.14]$$

onde,

abs_f - absorção final (%);

abs_i - absorção em cada instante i (%);

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

M_{sec} - massa do agregado seco (g);

M_{24h} - massa do agregado no instante final (24 horas) (g);

M_i - massa do agregado em cada instante i (g).

3.4. Produção dos agregados reciclados

3.4.1. Betão de origem (BO)

A produção dos agregados reciclados resultou da betonagem, cura e posterior britagem do BO, seguida pela separação por fracções granulométricas dos agregados britados.

Dado o desconhecimento relativo ao volume de betão necessário para a produção dos dois tipos de agregados reciclados (ARLHD - agregado reciclado leve estrutural; ARLM - agregado reciclado leve não estrutural) utilizados na presente investigação, optou-se por produzir uma pequena amostra de cada betão leve utilizado, nomeadamente betão leve estrutural e betão leve de enchimento, com o intuito de avaliar o posterior rendimento aquando da sua britagem. Posteriormente à sua britagem, foi realizada uma avaliação granulométrica para cada agregado reciclado produzido, que, ao ser comparada com a curva granulométrica da Leca HD (curva de referência para agregados grossos), permitiu concluir da necessidade de produzir quatro vezes mais volume de material reciclado de forma a alcançar uma curva granulométrica idêntica à da Leca HD.

Para a produção dos dois betões de origem (BOHD - betão de origem com Leca HD; BOM - betão de origem com Leca M), foi fabricada, no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, uma cofragem com capacidade de $1,5 \text{ m}^3$ (Figura 3.7). Após a sua construção, procedeu-se então à betonagem “*in situ*” de $0,75 \text{ m}^3$ de cada betão de origem (Figura 3.8). A referida cofragem, construída com recurso a tábuas de contraplacado marítimo, tinha as dimensões $2,5 \times 2,5 \text{ m}$. A limitação imposta pela câmara de admissão da britadeira (cerca de $0,4 \times 0,3 \text{ m}^2$) conduziu à produção de blocos de BO de dimensões $0,35 \times 0,15 \times 0,17 \text{ m}^3$ (Figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12).



Figura 3.7 - Cofragem em contraplacado marítimo



Figura 3.8 - Cofragem betonada



Figura 3. 9 - Blocos do betão do origem BOHD



Figura 3. 10 - Blocos do betão do origem BOM



Figura 3. 11 - Bloco do betão de origem BOHD



Figura 3. 12 - Bloco do betão de origem BOM

As composições e características dos dois BO são apresentadas nos Quadros 3.9 e 3.10, respectivamente.

Quadro 3. 9 - Composição dos betões de origem/m³ betão

Material	BOHD		BOM	
	Volume (l/m ³)	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)	Massa (kg/m ³)
Leca HD	350	-	-	-
Leca M	-	-	630	-
Areia grossa	-	567,2	-	-
Areia fina	-	260,9	-	-
Cimento	-	350,0	-	150,0

Quadro 3. 10 - Características dos betões de origem

Características	BOHD	BOM
Classe de consistência	S3 (100 a 150 mm)	-
Local de fabrico	Lab. de Construção - IST	Lab. de Construção - IST
Tipo de agregado	Leca HD	Leca M
Ligante	CEM I 42,5, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal	CEM I 42,5, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal
Água de amassadura	Potável, da rede de abastecimento pública	Potável, da rede de abastecimento pública
Adjuvantes	Nenhum	Nenhum
Adições	Nenhuma	Nenhuma

O dimensionamento do BOHD foi efectuado de forma idêntica à dos betões de referência, como descrito em 3.5.1. Por outro lado, para o dimensionamento do BOM, optou-se por utilizar uma composição representativa de um betão corrente. Para tal, foi considerada a composição indicada pelo fabricante.

Durante a fase de produção dos respectivos betões, foram preparados individualmente, para o BOM e BOHD, oito provetes cúbicos de 0,15 m de aresta e dois provetes cilíndricos de 0,15 x 0,30 m, com o intuito de os caracterizar quanto à sua resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias, e quanto à sua resistência à tracção (por compressão diametral) aos 28 dias, como indicado nos Quadros 3.11 e 3.12. Porém, optou-se por excluir os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 90 dias, assim como de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias para o betão de origem BOM, dada a elevada dispersão dos resultados obtidos. A elevada dispersão obtida para os referidos ensaios resultou não só da fraca constituição do betão BOM, mas também, da reduzida sensibilidade da prensa.

Quadro 3. 11 - Resultados dos ensaios de compressão do BOM

Ensaio de compressão - BOM						
Idade (dias)	F (kN)	m (g)	σ_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
7	16,8	1912,7	0,75	0,7	0,14	18,70
	13,4	1909,3	0,60			
	19,6	1945,8	0,87			
28	12,8	1936,7	0,57	0,6	0,05	7,45
	14,8	1982,0	0,66			
	14,3	1947,3	0,64			

Quadro 3. 12 - Resultados dos ensaios de compressão e tracção do BOHD

Ensaio de compressão - BOHD						
Idade (dias)	F (kN)	m (g)	σ_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
7	737,1	6143,1	32,76	34,1	1,41	4,13
	766,3	6062,8	34,06			
	800,4	6219,3	35,57			
28	867,8	6219,2	38,57	37,2	1,34	3,61
	807,5	6189,7	35,89			
	835,4	6207,5	37,13			
90	878,1	6173,5	39,03	37,7	1,90	5,05
	817,6	6041,4	36,34			

Ensaio de tracção (por compressão diametral) - BOHD						
28	191,2	9874,1	2,70	2,80	0,12	4,34
	203,3	9815,5	2,88			

3.4.2. Britagem dos agregados

O processo de britagem compreende uma trituração dos blocos de BO que, ao serem introduzidos na camara de admissão da britadeira, são esmagados através das suas maxilas e dão origem a agregados reciclados. Desta forma e após uma cura de 28 dias, os blocos de betão de origem, BOHD e BOM, foram submetidos a este processo, com recurso à britadeira presente no Laboratório de Construção (Figura 3.13), tendo gerado os agregados reciclados ARLHD e ARLM, respectivamente.

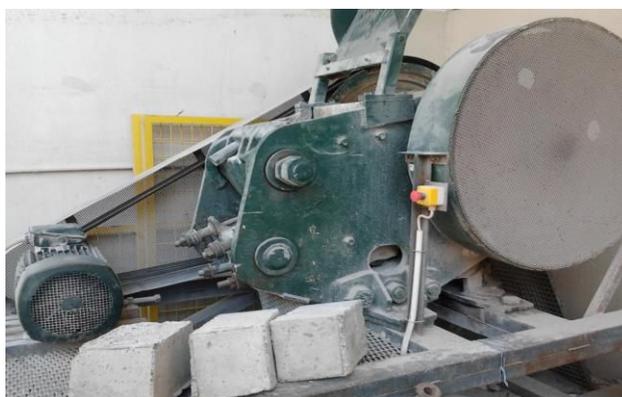


Figura 3. 13 - Britadeira

O controlo da abertura das maxilas tem uma influência directa sobre propriedades como a percentagem de finos e a máxima dimensão do agregado, pelo que também foi alvo de análise. O controlo da abertura das maxilas é feito através da introdução de placas, que aproximam os dentes da britadeira consoante se aumenta o número de placas introduzidas. Desta forma, foram realizados três ensaios de diferentes aberturas, tendo sido posteriormente realizada uma análise granulométrica dos agregados gerados por cada ensaio. Ao comparar a curva granulométrica da Leca HD (curva de referência) com a curva do agregado reciclado gerado, optou-se pela posição mais fechada das maxilas, uma vez que foi a que demonstrou ter maior rendimento aquando da produção do agregado reciclado.

Após a britagem dos BO, os agregados reciclados gerados (ARLHD e ARLM) foram acondicionados no interior do Laboratório de Construção, em barricas de PVC (Figuras 3.14 e 3.15), tendo sido diferenciados consoante as dimensões das partículas. Esta separação granulométrica foi essencial aquando da produção dos betões com incorporação de agregados reciclados.



Figura 3. 14 - Acondicionamento do agregado reciclado RLHD

Figura 3. 15 - Acondicionamento do agregado reciclado RLM

3.5. Formulação dos betões

O betão representa actualmente o material mais empregue na construção civil. Na sua génese, encontram-se usualmente, agregados (grossos e finos), cimento, água e eventuais adjuvantes e aditivos. Assim, a alteração das proporções, bem como dos próprios constituintes utilizados, conferem ao betão alterações muito significativas ao nível do desempenho mecânico e de durabilidade.

A adopção de um método de formulação constitui uma ferramenta essencial com vista à optimização da compacidade do betão. Na presente investigação, optou-se por adoptar o método baseado na curva de referência de Faury para a formulação dos betões. A escolha deste método resulta da sua global aprovação entre a comunidade científica e da experiência adquirida de campanhas anteriores.

Aquando do cálculo de Faury para os agregados grossos, foi considerada a curva granulométrica da Leca HD como sendo a de referência.

3.5.1. Betões de referência

O dimensionamento dos dois betões de referência foi executado segundo o especificado nas normas NP EN 206-1 (2005) e LNEC E 464 (2007), com o intuito de produzir betões com características passíveis de aplicação em elementos estruturais correntes.

Na presente investigação, o dimensionamento dos betões de referência foi tomado como padrão para a produção dos restantes betões.

Porém, torna-se necessário salientar a diferença funcional existente entre os dois betões de referência produzidos, consistindo o BRHD num betão estrutural, enquanto que o BRM integra um betão de características não estruturais. Esta diferenciação ao nível da constituição dos betões suporta a influência que os constituintes conferem ao nível do desempenho mecânico e de durabilidade.

O Quadro 3.13 apresenta resumidamente as características dos dois betões de referência produzidos.

Quadro 3.13 - Características dos betões de referência

Características	BRHD	BRM
Classe de consistência	S3 (100 a 150 mm)	S3 (100 a 150 mm)
Classe de resistência	LC35/38	LC16/18
Local de fabrico	Lab. de Construção - IST	Lab. de Construção - IST
Tipo de agregado	Leca HD	Leca M
Ligante	CEM I 42,5, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal	CEM I 42,5, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal
Água de amassadura	Potável, da rede de abastecimento pública	Potável, da rede de abastecimento pública
Adjuvantes	Nenhum	Nenhum
Adições	Nenhuma	Nenhuma

A formulação dos betões compreendeu ainda os seguintes critérios:

- bom controlo de qualidade de produção;
- vibração média, com agulha vibratória;
- medição dos componentes em peso.

3.5.1.1. Máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$)

A máxima dimensão dos agregados grossos demonstra uma influência directa sobre o desempenho mecânico dos betões. Uma das razões resulta do facto de, quanto maior a dimensão do agregado, maior o efeito de parede. O aumento deste efeito resulta num aumento da dificuldade de vibração do betão (dificuldade ampliada em peças armadas). Porém, o aumento desta propriedade

apresenta uma relação inversa com o índice de vazios, ou seja, quanto maior o agregado, menor será o índice de vazios acidentais presente no betão.

Faury alude para a não consideração do efeito de parede caso a máxima dimensão do agregado ($D_{\text{máx}}$) não seja superior a 1/3 do raio médio do molde (R), conforme indica a expressão:

$$\bullet D \leq \frac{4}{3} \times R \quad [3.15]$$

O raio médio do molde é definido segundo a expressão:

$$\bullet R = \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante desse volume de betão}} \quad [3.16]$$

No que concerne aos moldes cúbicos de 0,15 m de aresta, tem-se que:

$$R = \frac{L^3}{6L^2} = \frac{L}{6} = \frac{150}{6} = 25 \text{ mm}$$

$$D \leq \frac{4}{3} \times 25 = 33,3 \text{ mm}$$

No que concerne aos moldes cúbicos de 0,10 m de aresta, tem-se que:

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

$$D \leq \frac{4}{3} \times 16,67 = 22,2 \text{ mm}$$

Dado que a máxima dimensão dos agregados grossos é de 11,2 mm (definida em 3.3.2.), o efeito de parede pode ser desprezado para ambos os moldes.

3.5.1.2. Dosagem de cimento (C)

Ao formular um betão, é frequente estipular-se uma relação a/c ou uma dosagem de cimento. Segundo a norma LNEC E 464 (2007), ambos os parâmetros são definidos consoante a classe de exposição e o tipo de cimento utilizado. Na presente investigação, optou-se por utilizar um cimento Portland tipo CEM I 42,5 R, cujo valor característico de resistência à compressão aos 28 dias é de 42,5 MPa. No que concerne à dosagem de cimento adoptada aquando da produção dos betões, optou-se por fixar o valor em 350 kg/m^3 , que é um valor considerado corrente.

3.5.1.3. Volume de vazios (V_v)

O volume de ar contido numa amassadura é denominado por volume de vazios e corresponde a um dos parâmetros mais difíceis de calcular. A sua determinação é alcançada através de ensaios directos. No entanto, tanto a norma 613 do American Concrete Institute como Coutinho (1997) sugerem existir uma relação inversa entre a máxima dimensão do agregado e o volume de vazios acidentais, obtida através de relações empíricas, conforme é indicado no Quadro 3.14.

Quadro 3. 14 - Volume de vazios em função da máxima dimensão dos agregados (ACI 613)

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

Dado que os betões leves são mais sensíveis a fenómenos de segregação, a vibração neste tipo de betões tende a ser menos efectiva. Como tal, este tipo de betões está associado a maiores níveis de teor de ar do que os betões convencionais. Tendo em conta o resultado de Bogas (2011), onde se produzem betões leves com $D_{m\acute{a}x}$ semelhante, considera-se 30 l/m³ para o volume de vazios.

3.5.1.4. Índice de vazios

O índice de vazios I_v é definido pela soma dos volumes de água e vazios por unidade de volume de betão, ou seja, corresponde ao volume de materiais não sólidos presentes no betão. Através deste índice, é possível aferir, ainda que de forma indirecta, qual a porosidade expectável para o betão.

O seu cálculo é realizado através da seguinte expressão proposta por Faury:

$$\bullet \quad I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad [3.17]$$

onde,

K e K' - parâmetros que variam consoante a natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de colocação utilizados, conforme indicado no Quadro 3.16;

R - raio médio do molde que contém o betão (mm); porém, para betão simples, pode-se considerar o parâmetro $R/D = \infty$;

D - máxima dimensão do agregado (mm).

Atendendo à natureza dos agregados utilizados (areias roladas e agregados grossos rolados), à classe de trabalhabilidade pretendida para o betão fresco (classe S3) e considerando o raio médio do molde igual à máxima dimensão do agregado, as variáveis da anterior expressão tomam os seguintes valores:

- trabalhabilidade = mole (Quadro 3.15);
- $K = 0,34$;

- $K' = 0,003$;
- $R = D_{\text{máx}}$;
- $D_{\text{máx}} = 11,2$ mm.

Quadro 3. 15 - Classificação da trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes (ACI 211)

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Método de medição da trabalhabilidade	
		Graus Vêbê	Abaixamento do cone de Abrams (cm)
<i>Terra húmida</i>	<i>Vibração muito potente e possível compressão</i>	< 30	-
<i>Seca</i>	<i>Vibração potente</i>	30 a 10	-
<i>Plástica</i>	<i>Vibração média</i>	10 a 2	0 a 4
<i>Mole</i>	<i>Apiloamento</i>	-	4 a 15
<i>Fluída</i>	<i>Sem nada</i>	-	> 15

Quadro 3. 16 - Valores para os parâmetros K e K' em função da natureza dos agregados, meios de colocação em obra e trabalhabilidade [Dreux (1964); Duriez et Arrambide (1961)]

Trabalhabilidade	Meios de colocação	K			K'
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia e agregados grossos britados	
		Agregados grossos rolados	Agregados grossos britados		
<i>Terra húmida</i>	<i>Vibração muito potente e possível compressão</i>	≤ 0,24	≤ 0,25	≤ 0,27	0,002
<i>Seca</i>	<i>Vibração potente</i>	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
<i>Plástica</i>	<i>Vibração média</i>	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,40	0,003
<i>Mole</i>	<i>Apiloamento</i>	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
<i>Fluída</i>	<i>Sem nada</i>	≥ 0,36	≥ 0,38	≥ 0,38	0,004

Substituindo os valores das variáveis na expressão [3.17], tem-se:

$$I_V = \frac{0,34}{\sqrt[5]{11,2}} + \frac{0,003}{\frac{11,2}{11,2} - 0,75} = 222 \text{ l/m}^3$$

3.5.1.5. Dosagem de água da amassadura (A) e relação água / cimento (a/c) efectiva

A dosagem de água a incorporar na amassadura resulta da subtração do volume de vazios (V_V), ao índice de vazios (I_V), que estima o volume total de material não sólido. Assim, a dosagem de água (A) é calculada através da seguinte expressão:

- $A = I_V - V_V$ [3.18]

onde,

A - dosagem de água da amassadura (l/m^3);

I_V - índice de vazios de Faury (l/m^3);

V_V - volume de vazios presentes no betão (l/m^3).

Para a presente investigação, substituindo:

I_V - 222 l/m^3 ;

V_V - 30 l/m^3 .

Resulta:

$$A = 222 - 30 = 192 \text{ l/m}^3$$

Após a obtenção dos valores das dosagens de água e cimento, calculou-se, com recurso à expressão [3.17], uma relação água/cimento (a/c) de 0,55.

$$\text{relação} \frac{\text{água}}{\text{cimento}} = \frac{\text{dosagem de água (l)}}{\text{dosagem de cimento (kg)}} = \frac{192}{350} \cong 0,55 \quad [3.19]$$

3.5.1.6. Volume de cimento (V_C)

O volume de cimento (V_C) por metro cúbico de betão é calculado segundo a expressão:

$$\bullet \quad V_C = \frac{C}{\rho_C} \quad [3.20]$$

onde,

V_C - volume das partículas de cimento (m^3/m^3);

C - dosagem de cimento (kg/m^3);

ρ_C - massa específica do cimento utilizado na campanha experimental (3150 kg/m^3).

Assim, o volume das partículas de cimento é:

$$V_C = \frac{350}{3150} = 0,111 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

3.5.1.7. Volume das partículas sólidas

O volume das partículas sólidas do betão (V_S) corresponde ao volume ocupado pelos agregados e cimento. O seu valor é obtido através da diferença entre o volume total (1 m^3) e o índice de vazios (I_V), conforme indica a expressão:

$$\bullet \quad V_S = 1 - I_V \quad [3.21]$$

onde,

V_S - volume das partículas sólidas (m^3/m^3);

I_V - índice de vazios de Faury (l/m^3);

Logo, o volume de partículas sólidas é:

$$V_S = 1 - 0,222 = 0,778 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

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

Com o intuito de corrigir a curva de Faury de modo a não ter em conta o volume de cimento, é necessário saber o volume relativo que o cimento ocupa na mistura. A sua determinação pode ser alcançada segundo a expressão:

$$\bullet \quad C \% = \frac{V_C}{V_S} \times 100 \quad [3.22]$$

onde,

C - percentagem de cimento relativa ao volume sólido total (%);

V_C - volume das partículas de cimento (m^3/m^3);

V_S - volume das partículas sólidas (m^3/m^3).

Logo, a percentagem de cimento relativa ao volume sólido total é:

$$C \% = \frac{0,111}{0,778} \times 100 = 14,3 \%$$

3.5.1.9. Curva de referência de Faury

A utilização da curva de referência para a optimização granulométrica do agregado resulta no ajuste da composição das fracções sólidas da mistura a uma curva teórica definida conforme os critérios de plasticidade estabelecidos. O método escolhido na realização desta investigação, o método de Faury, permite estimar a quantidade de agregado a utilizar no betão.

A curva de Faury (Figura 3.16) resulta num diagrama, composto por dois segmentos de recta, onde as abcissas exibem as dimensões das partículas, com escala proporcional à sua raiz quinta, e as ordenadas acomodam a percentagem de material que passa por um peneiro de determinada abertura de malha, numa escala linear. A máxima dimensão dos agregados ($D_{m\acute{a}x}$) delimita superiormente o eixo das abcissas enquanto que a menor dimensão das partículas sólidas, correspondentes às partículas de cimento com 0,0065 mm, estabelecem o início do mesmo. A curva de referência é constituída pelos seguintes pontos:

a) Ponto 1

Abcissa: 0,0065 mm

Ordenada: 0%

b) Ponto 2

Abcissa:

$$\frac{D_{m\acute{a}x}}{2} = \frac{11,2}{2} = 5,6 \text{ mm}$$

Ordenada:

$$P_{D_{m\acute{a}x}/2} = A + 17 \times \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D_{m\acute{a}x}} - 0,75} = 28 + 17 \times \sqrt[5]{11,2} + \frac{2}{\frac{11,2}{11,2} - 0,75} = 63,6\%$$

c) Ponto 3

Abcissa: $D_{\text{máx}} = 11,2 \text{ mm}$

Ordenada: 100%

onde,

A e B - parâmetros que variam consoante a natureza dos agregados, meios de colocação e consistência do betão, conforme indicado no Quadro 3.17.

Foram consideradas as seguintes características para o betão pretendido:

Trabalhabilidade - mole;

Natureza dos agregados - areia rolada e agregados grossos rolados;

Meios de colocação - apiloamento.

Dado que a curva de Faury foi definida tendo em conta a inclusão de cimento é necessário proceder à sua correcção através de uma interpolação do segmento de recta que une os pontos 1 e 2.

d) Ponto 4

Abcissa: $D = 0,25 \text{ mm}$

Ordenada: 23,9%

Quadro 3. 17 - Valores dos parâmetros A e B [Duriez et Arrambide (1961)]

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia e agregados grossos britados	
		Agregados grossos rolados	Agregados grossos britados		
<i>Terra húmida</i>	<i>Vibração muito potente e possível compressão</i>	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
<i>Seca</i>	<i>Vibração potente</i>	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
<i>Plástica</i>	<i>Vibração média</i>	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
<i>Fluida</i>	<i>Sem nada</i>	32	34	38	2

Após a determinação dos três pontos, é então possível, através da dedução da percentagem de cimento, traçar a curva de Faury sem cimento (Quadro 3.18).

Quadro 3. 18 - Definição das curvas de Faury

Malha (mm)	Material passante		
	Curva de Faury com cimento	Dedução de cimento da curva de Faury	Curva de Faury sem cimento
0,0065	0,0%	- 14,3%	-35,6%
0,25	23,9%	9,6%	11,2%
5,6	63,6%	49,3%	57,5%
11,2	100%	85,7%	100%

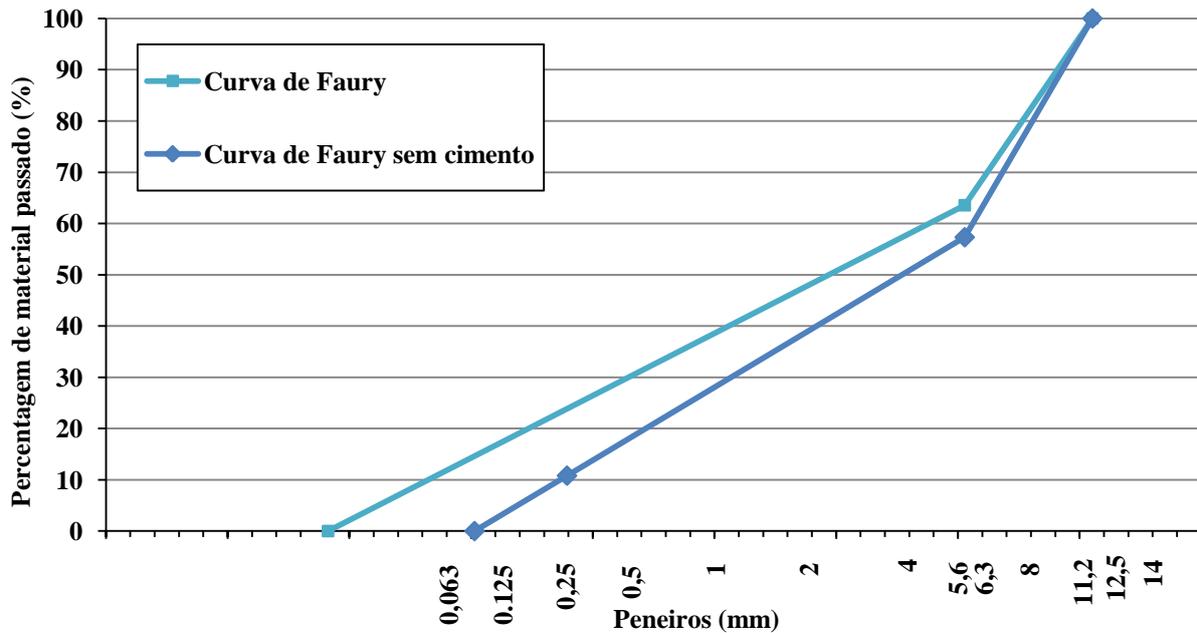


Figura 3.16 - Curva de Faury com e sem cimento

Através destes quatro pontos, torna-se possível deduzir graficamente a proporção de cada agregado (Figura 3.17). O método consiste em traçar uma linha vertical que divida as duas curvas granulométricas contíguas, com o cuidado de obter as áreas adjacentes intersectadas de igual valor. Da diferença resultante entre as ordenadas da intersecção da curva de Faury com a linha vertical obtém-se a proporção de cada agregado a incorporar no betão.

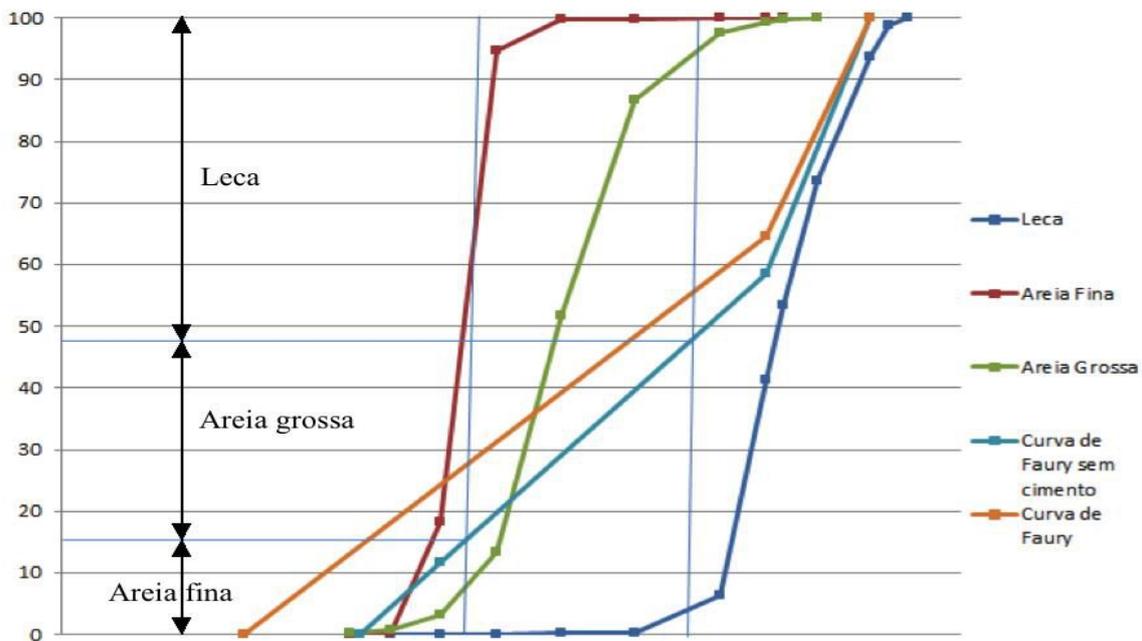


Figura 3.17 - Método gráfico de Faury

A determinação da dosagem de cada material é obtida segundo a expressão:

- $V_i = (V_s - V_c) \times \frac{pp_i}{100} \times 1000$ [3.23]

onde,

V_i - dosagem de cada tipo de agregado (l/m^3);

pp_i - percentagem de cada tipo de agregado (%);

V_S - volume das partículas sólidas (m^3/m^3);

V_C - volume das partículas de cimento (m^3/m^3).

O Quadro 3.19 expõe as dosagens obtidas para cada agregado.

Quadro 3.19 - Dosagem de cada agregado

Agregado	Percentagem (%)	Volume (l/m^3)
<i>Leca</i>	52,5	350
<i>Areia grossa</i>	32,5	217
<i>Areia fina</i>	15,0	100

3.5.2. Betões com agregados leves reciclados

A formulação dos betões constituídos por agregados reciclados leves teve como génese a produção, britagem e posterior separação granulométrica dos betões de origem.

Posteriormente à fase de produção dos agregados reciclados leves, realizou-se uma separação granulométrica com o intuito de a aproximar à curva de referência (curva da Leca HD). No que concerne ao dimensionamento dos betões formados por agregados reciclados leves, a sua formulação foi determinada de forma idêntica ao realizado nos betões de referência, consistindo a única diferença na alteração dos agregados leves por agregados reciclados em taxas de substituição de 20, 50 e 100%.

O ajustamento das dosagens aquando da substituição dos agregados leves convencionais pelos agregados reciclados produzidos, quer de forma parcial quer total, compreendeu a determinação de um rácio entre a curva granulométrica dos dois materiais (leves e reciclados), cujo objectivo foi definir qual a percentagem a substituir em cada fracção de material, conforme expõem as seguintes expressões:

$$\bullet \quad V_{AL} = \frac{Pral_i}{100} \times dlhd \times (1 - tx_j) \quad [3.24]$$

$$\bullet \quad V_{ALR} = \frac{Pralr_i}{100} \times dlhd \times tx_j \times V_i. \quad [3.25]$$

onde,

V_{AL} - volume de agregado leve a utilizar em cada fracção granulométrica;

V_{ALR} - volume de agregado leve reciclado a utilizar em cada fracção granulométrica;

$Pral_i$ - percentagem de agregado leve retido por peneiro i ;

$Pralr_i$ - percentagem de agregado leve reciclado retido por peneiro i ;

$dlhd$ - dosagem de leca HD = $350 l/m^3$;

tx_j - taxa de substituição ($tx = 0,2; 0,5; 1$);

V_i - rácio entre a percentagem das curvas granulométricas por peneiro i .

3.5.3. Composição dos betões

No Quadro 3.20, são resumidas as composições de todos os betões produzidos.

Quadro 3. 20 - Composição dos diversos betões produzidos (1 m³)

	BRHD	BRM	BHD20RHD	BM20RHD	BHD50RHD	BM50RHD	B100RHD	BHD20RM	BM20RM	BHD50RM	BM50RM	B100RM
Abaix. (mm)	130	125	120	130	130	125	125	125	130	135	130	125
Leca M (kg)	0	46,22	0	36,97	0	23,15	0	0	36,97	0	23,15	0
Leca HD (kg)	84,82	0	67,85	0	42,41	0	0	67,85	0	42,41	0	0
Areia grossa (kg)	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88	125,88
Areia fina (kg)	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00
RLM (kg)	0	0	0	0	0	0	0	13,63	13,63	34,08	34,08	68,16
RHD (kg)	0	0	26,95	26,95	67,38	67,38	134,76	0	0	0	0	0
Relação (a/c)	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Água (l)	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89	42,89
Cimento (kg)	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97	77,97

3.6. Produção dos betões

3.6.1. Processo

O processo de amassadura regeu-se pelo procedimento realizado em Bogas (2011), uma vez ter sido abordada, na referida campanha experimental, a complexidade associada à utilização de agregados leves de argila expandida aquando da produção do betão. Assim, o processo de amassadura compreendeu quatro fases distintas:

- pesagem dos agregados;
- betonagem;
- moldagem e compactação;
- cura.

a) Fase 1 - Pesagem dos agregados

Esta primeira fase consistiu, como o nome indica, na pesagem de todos os constituintes a incorporar no betão. Para a sua realização, foi utilizada uma balança de sensibilidade à grama, de modo a alcançar um elevado rigor aquando das pesagens. No entanto, ao contrário do executado por Bogas (2011), dada a indisponibilidade do forno eléctrico não foi possível realizar a secagem dos agregados, pelo que se teve de efectuar, em todas as betonagens, uma análise prévia do teor de humidade de cada constituinte. Esta análise permitiu aferir que correcções, ao nível da quantidade de agregado a introduzir, seriam necessárias para produzir os betões previamente formulados. Por outro lado, como resultado desta mesma análise, também a quantidade de água a incluir na produção de cada betão foi alvo de uma correcção, dada a absorção de água dos agregados reciclados face aos naturais. Com o intuito de produzir betões com uma relação a/c efectiva de 0,55, a referida correcção foi determinada através de uma ponderação entre o teor em água presente nos agregados e a sua absorção ao fim de 30 minutos.

b) Fase 2 - Betonagem

O procedimento de mistura envolveu a utilização de uma betoneira de eixo inclinado basculante (Figura 3.18), com capacidade total de 75 litros.



Figura 3. 18 - Betoneira de eixo basculante

Este processo iniciou-se com a molhagem da betoneira. Após escorrer a água da betoneira em funcionamento, introduziu-se o agregado leve juntamente com cerca de 60% da água total. Contabilizou-se 1 minuto com a betoneira em funcionamento e 1 minuto com a mesma em repouso. Durante o repouso, com recurso a uma colher de pedreiro, remexeu-se a pasta de forma a assegurar a correcta pré-molhagem do agregado. Posteriormente, introduziu-se a areia grossa seguida pela areia fina e misturou-se mais 3 minutos com a betoneira em funcionamento. De seguida, colocou-se de forma gradual o cimento e os restantes 40% da água, registando cerca 1 minuto de funcionamento da betoneira. Por fim, após atingir a homogeneidade da mistura, realizou-se o ensaio de abaixamento, conforme descrito em 3.7.1.1., e confirmou-se a classe de trabalhabilidade pretendida. Este processo foi executado para todos os betões produzidos.

c) Fase 3 - Moldagem e compactação

Todos os moldes foram dispostos numa zona resguardada em cima de um estrado, de forma a garantir a não contaminação dos provetes. Precedendo o enchimento dos moldes, foi realizado, conforme descrito em 3.7.1.2, o ensaio da massa volúmica do betão no estado fresco. Posteriormente à correcta disposição dos moldes, estes foram revestidos, com óleo descofrante, cujo objectivo é permitir a desconfragem dos provetes sem que os mesmos sejam danificados (Figura 3.20). De seguida, procedeu-se então ao enchimento dos moldes, através de uma colher (Figura 3.21). Após o enchimento dos moldes, deu-se início à vibração (Figura 3.19), executada segundo a norma NP EN12390-2 (2000). Tendo em conta a especificidade dos betões leves, foram adoptados períodos de vibração inferiores a 10 s, conforme realizado por Bogas (2011).

Os provetes foram mantidos dentro dos moldes cerca de 24 ± 4 horas, tendo sido cobertos por um plástico de modo a evitar problemas de secagem superficial.



Figura 3.19 - Vibrador de agulha



Figura 3.20 - Preparação dos moldes



Figura 3.21 - Moldes betonados

d) Fase 4 - Cura

Após a desmoldagem dos provetes, procedeu-se à sua identificação anotando a data de produção bem como a descrição do betão produzido. Por último, consoante o tipo de ensaio a realizar, os provetes foram acondicionados em condições diferentes de temperatura e humidade relativa (Figura 3.22). Para o estudo das propriedades mecânicas dos betões, todos os provetes associados foram acondicionados na câmara húmida do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, com humidade relativa superior a 95% (Quadro 3.21).



Figura 3. 22 - Camara húmida e respectivos provetes

Quadro 3. 21 - Processo de cura conforme ensaio a realizar

Ensaio	Idade (dias)	Tipo de molde	Dimensão do molde (cm)	Quantidade	Processo de cura
<i>Resistência à compressão</i>	7	<i>Cúbico</i>	<i>15X15X15</i>	3	<i>Câmara húmida com humidade relativa a 95%</i>
	28			5	
	90			3	
<i>Resistência à tracção</i>	28	<i>Cilíndrico</i>	<i>15X30</i>	3	
<i>Módulo de elasticidade</i>	28	<i>Cilíndrico</i>	<i>15X30</i>	2	
<i>Resistência à abrasão</i>	91	<i>Cúbico</i>	<i>10X10X10</i>	3	

3.7. Ensaio dos betões

Os betões produzidos durante a campanha experimental foram ensaiados no estado fresco e no endurecido.

3.7.1. Ensaios no estado fresco

Os ensaios do betão no estado fresco envolveram a análise da consistência, massa volúmica, constituindo assim um bom indicador relativo ao controlo de produção. Na presente investigação, foram realizados os ensaios de abaixamento e massa volúmica.

3.7.1.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

3.7.1.1.1. Objectivo do ensaio

Foi estipulada a produção de um betão mole (abaixamento do cone de Abrams no intervalo compreendido entre 4 e 15 cm).

3.7.1.1.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 12350-2 (2002) - “*Ensaio do betão - Parte 2: Ensaio de Abaixamento*”.

3.7.1.1.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- molde de metal de forma troncocónica com uma altura de 300 ± 2 mm, um diâmetro interno na base de 200 ± 2 mm e de 100 ± 2 mm no topo; o material que constitui o molde deve ser dotado uma boa resistência à pasta e a superfície interior das suas paredes deve ser completamente lisa e desempenada (sem rebites, cordões de soldadura ou mossas); o molde deve ainda possuir duas pegas junto ao topo e elementos de fixação ou abas na zona da base (Figura 3.23);
- placa / superfície não absorvente, lisa, rígida e plana (Figura 3.23);
- varão de compactação com extremidades arredondadas, de diâmetro de 16 ± 1 mm e comprimento de 600 ± 5 mm (Figura 3.23);
- régua com uma precisão superior ou igual a 5 mm (Figura 3.23);
- colher de pedreiro (Figura 23).
- cronómetro.



Figura 3. 23 - Placa, molde metálico de forma troncocónica, varão de compactação, colher de pedreiro, régua e funil

3.7.1.1.4. Amostras

A amostra é obtida através de várias colheitas, de forma distribuída, do volume de betão fresco. Esta deve ser de imediato inserida no molde troncocónico, de forma a evitar variações de temperatura, ganho ou perda de água, ou mesmo uma possível contaminação do betão fresco.

3.7.1.1.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma NP EN 12350-2 (2002):

- molhar previamente o molde troncocónico e a placa, escorrendo de seguida o excesso de água;
- preencher o molde troncocónico com a amostra definida em 3.7.1.1.4., devendo o enchimento do referido molde ser faseado e efectuado segundo três camadas, sendo a espessura de cada uma equivalente a 1/3 da altura do molde; após a colocação da primeira camada, compactar com 25 pancadas, com recurso ao varão de compactação, iniciando-as perifericamente e ir sucessivamente aproximando-as do centro do cone; cada ciclo de compactação apenas deve incidir sobre a camada previamente inserida; deve-se compensar a redução de altura na última camada devido ao terceiro e último ciclo de compactação; durante o enchimento, o molde troncocónico deve-se encontrar fixo à placa através de um elemento de fixação ou através do peso de um ajudante sobre as abas, localizadas na base do referido molde (Figura 3.24 e Figura 3.25);
- nivelar, com auxílio de uma colher de pedreiro, o topo do molde troncocónico;
- remover o excesso de betão presente na placa, garantindo que esta se encontra completamente lisa;
- retirar cautelosamente o molde troncocónico, num movimento vertical e uníssono, sem que exista a transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional;
- a operação, desde o enchimento até à remoção do molde troncocónico, tem uma duração máxima de 150 s e deve ser executada sem qualquer interrupção;
- após a remoção do molde troncocónico, com o auxílio da régua, regista-se o valor do abaixamento como h .



Figura 3. 24 - Ensaio de abaixamento



Figura 3. 25 - Ensaio de abaixamento

3.7.1.1.6. Resultados

O abaixamento do cone de Abrams (h) resulta da diferença entre a altura do cone, 300 mm, e o ponto mais alto do provete ensaiado. Apenas se pode considerar o ensaio como válido quando se obtém o chamado abaixamento verdadeiro, ou seja, quando após o ensaio, o betão apresenta uma estrutura semi-intacta e simétrica, conforme expõe a Figura 3.26 - abaixamento verdadeiro. Caso a estrutura final do provete ensaiado se encontre deformada (Figura 3.26 - abaixamento deformado), o provete deve ser recolhido e deve ser repetido o ensaio.

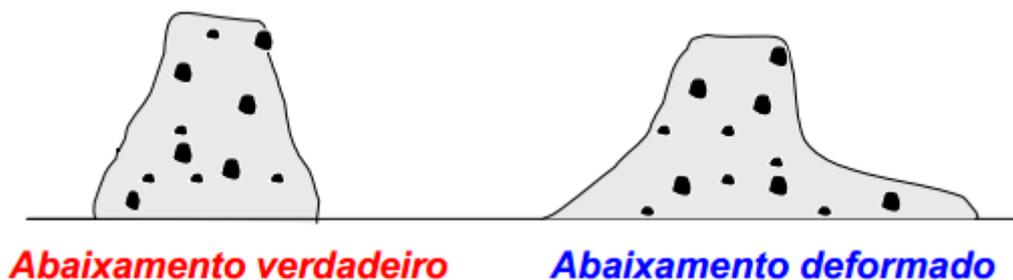


Figura 3. 26 - Formas de abaixamento [NP EN 12350-2 (2002)]

3.7.1.2. Massa volúmica

3.7.1.2.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão no estado fresco permite avaliar a compacidade do betão produzido e eventuais desvios relativos à composição pretendida. Assim, o respectivo ensaio consente, de um modo geral, o controlo *in loco* do betão produzido.

3.7.1.2.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 12350-6 (2002) - “Ensaio do betão - Parte 6: Massa volúmica”.

3.7.1.2.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- recipiente estanque, de volume não inferior a 5 l (na presente campanha experimental, foi utilizado um recipiente de 10 l de capacidade), rígido e de material resistente à mistura; a face interna do referido recipiente deve ser lisa e com o bordo superior com acabamento plano (Figura 3.27);
- colher de pedreiro;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- dispositivo de compactação do betão (na presente campanha experimental, foi utilizado um vibrador de agulha (Figura 3.19)).



Figura 3. 27 - Recipiente estanque de 10l de capacidade

3.7.1.2.4. Amostras

A amostra é obtida através de várias colheitas, de forma distribuída, do volume de betão fresco. Esta deve ser de imediato inserida no recipiente estanque, de forma a evitar variações de temperatura, ganho ou perda de água, ou mesmo uma possível contaminação do betão fresco.

3.7.1.2.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma NP EN 12350-6 (2002):

- registar o valor da massa do recipiente vazio como M_1 ;
- preencher o recipiente com a amostra definida em 3.7.1.2.4., devendo o enchimento do referido recipiente ser faseado e efectuado segundo dois patamares, sendo a espessura de cada um equivalente a 1/2 da altura do recipiente; ao preencher o primeiro patamar, com recurso ao dispositivo de compactação, compactar de forma adequada e controlada sem que sejam identificados quaisquer problemas de segregação ou exsudação; cada ciclo de compactação apenas deve incidir sobre a camada previamente inserida; caso o dispositivo de compactação

seja um vibrador de agulha, deve ser assegurado que o tempo de vibração é o adequado e que o mesmo não entre em contacto com as paredes ou fundo do recipiente;

- nivelar, com auxílio de uma colher de pedreiro, o topo do recipiente;

- remover o excesso de betão presente no exterior do recipiente, garantindo que o mesmo se encontra completamente limpo;

- registar o valor da massa do conjunto (recipiente e amostra) como M_2 (Figura 3.28).



Figura 3. 28 - Ensaio da massa volúmica fresca

3.7.1.2.6. Resultados

O cálculo da massa volúmica de betão fresco foi realizado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad \rho = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad [3.26]$$

onde,

ρ - massa volúmica do betão no estado fresco (kg/m^3);

M_1 - massa do recipiente (kg);

M_2 - massa do conjunto (recipiente e amostra) (kg);

V_r - volume do recipiente (m^3).

3.7.2. Ensaio no estado endurecido

Na presente investigação, foram analisadas as principais propriedades mecânicas do betão no estado endurecido, nomeadamente: resistência à compressão; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; resistência à abrasão.

3.7.2.1. Resistência à compressão

3.7.2.1.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio tem como objectivo a avaliação da capacidade resistente dos diferentes betões produzidos, quando solicitados à compressão segundo uma tensão uniforme. Desta forma, submete-se o provete de betão a uma tensão uniforme crescente até que seja atingida a rotura.

3.7.2.1.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 12390-3 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”.

A geometria e as dimensões dos provetes de ensaio, respeitaram o especificado na NP EN 12390-1 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes”. A produção e cura dos provetes foi realizado tendo em conta a NP EN 12390-2 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica”.

3.7.2.1.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- prensa hidráulica de 4 colunas, com velocidade de carregamento controlável, segundo a norma NP EN 12390-4 (2003) (Figura 3.29);
- pano para limpeza dos provetes;
- instrumentos de limpeza (pá e vassoura);
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar.



Figura 3. 29 - Prensa hidráulica

3.7.2.1.4. Provetes de ensaio

Os provetes a inserir na prensa hidráulica de quatro colunas deverão ter forma geométrica cúbica de 150 mm de aresta e ser submetidos a diferentes períodos de cura (7, 28 e 90 dias). Aquando do planeamento da presente campanha experimental, foi projectado o ensaio de três provetes aos 7 dias, cinco provetes aos 28 dias e finalmente três provetes aos 90 dias, conforme indicado no Quadro 3.23.

3.7.2.1.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma NP EN 12390-3 (2003):

- após o período de cura estipulado, remover o provete do ambiente de cura;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete com o auxílio de um pano, sem ferir ou danificar o mesmo;
- registar o valor da massa do provete como M;
- limpar as superfícies da máquina de ensaio e assegurar que as superfícies de contacto com o provete se encontram perfeitamente lisas;
- introduzir o provete na prensa hidráulica de quatro colunas, posicionando-o no centro da plataforma inferior da mesma, excluindo qualquer tipo de excentricidade; os pratos da respectiva prensa devem encontrar-se afastados por uma distância superior à da aresta do provete, de forma a evitar o contacto inicial do mesmo com os dois pratos da referida prensa;
- definir o valor da carga a aplicar pela prensa hidráulica de 4 colunas, segundo uma velocidade constante; este valor deve estar compreendido entre 0,2 e 1 MPa/s (para a presente campanha experimental, adoptou-se o valor de 13,5 kN/s, correspondente a cerca de 0,6 MPa/s); o ensaio termina quando o provete atinge a rotura;
- registar o valor da carga máxima como F.

3.7.2.1.6. Resultados

Posteriormente ao ensaio de cada provete, deve ser realizada uma avaliação sobre a configuração de rotura do mesmo, aferindo-o quanto ao grau de satisfação (Figura 3.30), conforme descrito em NP EN 12390-3 (2003).

O cálculo da resistência à compressão de cada provete foi determinado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad f_c = \frac{F}{A_c} \quad [3.27]$$

onde,

f_c - resistência à compressão (MPa ou N/mm²);

F - carga máxima (N);

A_c - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²).

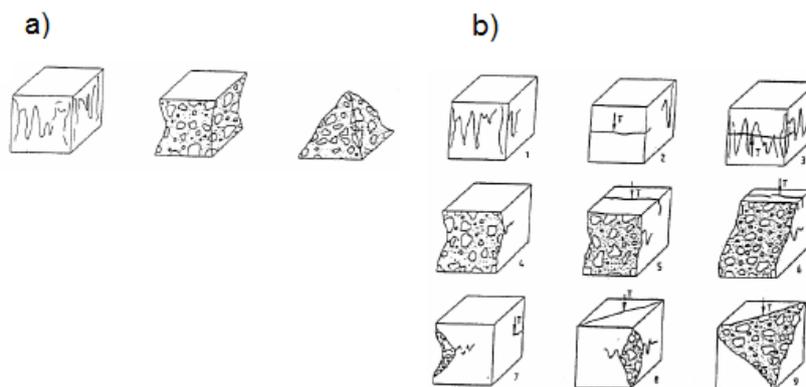


Figura 3.30 - Graus de satisfação relativos à rotura de provetes cúbicos - a) satisfatórias; b) não satisfatórias.

[NP EN 12390-3 (2001)]

3.7.2.2. Resistência à tracção por compressão diametral

3.7.2.2.1. Objectivo do ensaio

A resistência à tracção pode ser determinada através de ensaios de tracção pura, de flexão simples ou de compressão diametral. Na presente campanha experimental, optou-se por analisar esta propriedade através do ensaio de compressão diametral.

O ensaio consiste em submeter o provete cilíndrico de betão a uma força de compressão aplicada numa estreita zona ao longo da sua maior dimensão que, ao gerar tensões ortogonais ao plano de carga, resulta na rotura do provete por tracção.

3.7.2.2.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma NP EN 12390-6 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes”.

No que concerne à geometria e dimensões dos provetes de ensaio, foram adoptados os parâmetros definidos na norma NP EN 12390-1 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes”.

Também a produção e cura dos provetes foram regidos segundo os parâmetros definidos na norma NP EN 12390-2 (2003) - “Ensaio ao betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica”.

3.7.2.2.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- prensa hidráulica de quatro colunas, com velocidade de carregamento controlável, segundo a norma NP EN 12390-4 (2003) (Figura 3.29);
- pano para limpeza dos provetes;

- instrumentos de limpeza (pá e vassoura);
- posicionador / estrutura de suporte dos provetes em aço (Figura 3.31);
- peça de carga em aço (Figura 3.31);
- faixas de cartão prensado, segundo a NP EN 316 (3.31);
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar.



Figura 3. 31 - Posicionador, peça de carga em aço e faixas de cartão prensado

3.7.2.2.4. Provetes de ensaio

Os provetes a inserir na prensa hidráulica de quatro colunas deverão ter forma geométrica cilíndrica de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e ser submetidos a um igual período de cura de 28 dias. Aquando do planeamento da presente campanha experimental, foi projectado o ensaio de dois provetes aos 28 dias de idade para cada betão, conforme o indicado no Quadro 3.23.

3.7.2.2.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma NP EN 12390-6 (2003):

- após o período de cura estipulado, remover o provete do ambiente de cura;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete com o auxílio de um pano, sem ferir ou danificar o mesmo;
- registar o valor da massa do provete como M;
- limpar as superfícies da máquina de ensaio e assegurar que as superfícies de contacto com o posicionador / estrutura de suporte se encontram perfeitamente lisas;
- acoplar o provete ao/à posicionador / estrutura de suporte;
- posicionar as faixas de cartão prensado e a peça de carga ao longo do topo e da base do plano de carregamento do provete;

- introduzir o conjunto (posicionador / estrutura de suporte e provete) na prensa hidráulica de quatro colunas, posicionando-o no centro da plataforma inferior da mesma, excluindo qualquer tipo de excentricidade; os pratos da respectiva prensa devem encontrar-se afastados por uma distância superior à da altura do conjunto, de forma a evitar o contacto inicial do mesmo com os dois pratos da referida prensa;
- definir o valor da carga a aplicar pela prensa hidráulica de quatro colunas, segundo uma velocidade constante; este valor deve estar compreendido entre 0,04 e 0,06 MPa/s (para a presente campanha experimental, adoptou-se o valor de 3,5 kN/s, ou seja, cerca de 0,05 MPa/s); o ensaio termina quando o provete atinge a rotura;
- registar o valor da carga máxima como F.

3.7.2.2.6. Resultados

O cálculo da resistência à compressão de cada provete foi determinado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad [3.28]$$

onde,

f_{ct} - resistência à tracção por compressão diametral (MPa ou N/mm²);

F - carga máxima (N);

L - comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d - dimensão da secção transversal do provete (mm).

3.7.2.3. Módulo de elasticidade

3.7.2.3.1. Objectivo do ensaio

A análise do módulo de elasticidade permite aferir as características de rigidez ou deformabilidade de um betão com base na relação entre a tensão e extensão ($\sigma - \epsilon$) em regime de deformações elásticas. Assim, a resposta das estruturas às solicitações impostas encontra-se intrinsecamente relacionada com este parâmetro, quer ao nível das deformações quer da distribuição dos esforços.

Porém, devido à não linearidade da relação $\sigma - \epsilon$, é usual definir-se o módulo de elasticidade tangente dado pela recta tangente na origem da curva $\sigma - \epsilon$ ou, mais frequentemente, o módulo de elasticidade secante. Na presente campanha experimental, determinou-se o módulo de elasticidade secante do betão, para um nível de tensão inferior a 1/3 da resistência média à compressão (f_{cm}).

3.7.2.3.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma LNEC E 397 (1993) - “*Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão*”.

3.7.2.3.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- prensa hidráulica de 250 kN de capacidade (Figura 3.32);
- pano para limpeza dos provetes;
- instrumentos de limpeza (pá e vassoura);
- deflectómetros eléctricos CDP da marca TML (curso máximo = 5 mm) (Figura 3.33);
- *data logger*, acoplado à prensa hidráulica e aos deflectómetros.



Figura 3. 32 - Prensa hidráulica



Figura 3. 33 - Deflectómetros eléctricos

3.7.2.3.4. Provetes de ensaio

Os provetes a inserir na prensa hidráulica deverão ter forma geométrica cilíndrica de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e ser submetidos a um igual período de cura de 28 dias. Aquando do planeamento da presente campanha experimental, foi projectado o ensaio de dois provetes aos 28 dias de idade para cada betão, conforme indicado no Quadro 3.23.

3.7.2.3.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma LNEC E 397 (1993):

- após o período de cura estipulado, remover o provete do ambiente de cura;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete com o auxílio de um pano, sem ferir ou danificar o mesmo;

- fixar os dois deflectómetros em posições diametralmente opostas do provete;
- limpar as superfícies da máquina de ensaio e assegurar que as superfícies de contacto com o provete se encontram perfeitamente lisas;
- introduzir o provete na prensa hidráulica e, com o auxílio de uma rótula metálica que apenas permite a passagem de esforço axial, posicioná-lo no centro da plataforma inferior da mesma, excluindo qualquer tipo de excentricidade; de modo a verificar o perfeito alinhamento do provete e conseqüente validação do ensaio, a variação de extensão entre os dois deflectómetros ($|\varepsilon_{ext1} - \varepsilon_{ext2}|$), após um ciclo de carga, não pode ultrapassar 10%;
- aplicar uma tensão inicial de 0,5 a 1 MPa (σ_i) e aumentá-la de forma contínua, a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa/s, até 1/3 da tensão média de resistência à compressão ($\sigma_f = f_c / 3$);
- registar o valor das extensões e tensões iniciais e finais;
- no fim de cada ciclo, verificar se a diferença resultante entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$), é inferior a 10^{-5} ; caso a condição seja falsa, regular a posição do provete e repetir o ensaio;
- realizar os ciclos necessários até que a condição anterior seja válida ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| < 10^{-5}$).

3.7.2.3.6. Resultados

No ensaio do módulo de elasticidade em compressão, apenas são considerados válidos os ciclos que respeitem a seguinte condição:

$$\bullet \quad |\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left(\frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_i - \left(\frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_{i+1} \right| \leq 10^{-5} \quad [3.29]$$

O cálculo do módulo de elasticidade em compressão (E_C) de cada provete foi determinado através da seguinte expressão:

$$\bullet \quad E_C = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad [3.30]$$

onde,

E_C - módulo de elasticidade em compressão (GPa);

$\sigma_{i,n}$ - tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);

$\sigma_{f,n}$ - tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);

$\varepsilon_{i,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{i,n}$ registado no ciclo n;

$\varepsilon_{f,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{f,n}$ registado no ciclo n.

3.7.2.4. Resistência à abrasão

3.7.2.4.1. Objectivo do ensaio

A correcta caracterização da resistência ao desgaste por abrasão é importante em estruturas onde o betão se encontra sujeito a acções que suscitam o destacamento dos seus constituintes.

3.7.2.4.2. Normas de ensaio

Foi adoptada a metodologia de ensaio especificada na norma alemã DIN 52108 (2007) - “*Testing of inorganic non-metallic materials: Wear test with grinding wheel according to Böhme*”.

3.7.2.4.3. Equipamento necessário

Para a execução do ensaio, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- máquina de abrasão de Böhme (Figura 3.34);
- pó abrasivo (na presente campanha experimental, optou-se por pó de vidro dado o excelente desempenho demonstrado em anteriores campanhas (Figura 3.35));
- instrumentos de limpeza (pá, vassoura e aspirador);
- pano para limpeza dos provetes;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- paquímetro;
- equipamento para a marcação do provete (caneta, régua e esquadro).



Figura 3. 34 - Máquina de Böhme



Figura 3. 35 - Pó abrasivo

3.7.2.4.4. Provetes de ensaio

Os provetes a colocar na máquina de abrasão de Böhme deverão ter forma geométrica paralelepipedica, de bases quadradas paralelas com $71 \pm 1,5$ mm de aresta, com uma área de teste de 50 ± 2 cm² e, finalmente, com uma altura, não homogeneizada, de cerca de 50 mm. A obtenção dos referidos provetes teve origem em cubos de 100 mm de aresta, previamente curados em câmara

húmida durante 28 dias, e posteriormente cortados, com recurso a uma serra circular de disco diamantado. Após a obtenção dos provetes de dimensões finais, foram secados em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingirem massa constante. Conforme é indicado no Quadro 3.23, aquando do planeamento da presente campanha experimental, foi projectado o ensaio de três provetes aos 91 dias de idade para cada betão.

3.7.2.4.5. Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado segundo a norma alemã DIN 52108 (2007):

- após a obtenção de massa constante, retirar o provete da estufa ventilada;
- remover o excesso de humidade e/ou sujidade do provete com o auxílio de um pano, sem ferir ou danificar o mesmo;
- realizar uma medição da altura inicial do provete em nove pontos marcados previamente na face oposta à de teste, conforme indicado na Figura 3.36;
- limpar a superfície da máquina de abrasão de Böhme através de um aspirador seguido por um pano, de forma a assegurar que a superfícies de ensaio da referida maquina se encontra perfeitamente lisa;
- distribuir de forma uniforme cerca de 20,0 g de pó abrasivo ao longo do trilho de abrasão;
- inserir o provete no mecanismo de fixação e exercer uma pressão na face superior do respectivo provete segundo uma carga vertical, centralizada, de cerca de $30 \pm 0,3$ kPa; esta pressão deverá garantir que existe o atrito necessário entre o provete e o pó abrasivo presente na máquina de abrasão de Böhme;
- dar início à rotação do disco de Böhme segundo uma velocidade definida de 30 ± 1 rpm e terminar ao fim de vinte e duas voltas.; esta fase é usualmente denominada por ciclo de teste; cada provete é sujeito a dezasseis ciclos de teste;
- após cada ciclo de teste, limpar a superfície de teste do provete e o disco de Böhme com recurso a um aspirador; posteriormente, rodar o provete 90 ° em torno do seu eixo vertical, sempre no mesmo sentido e voltar novamente a distribuir 20 g de pó abrasivo no trilho de abrasão; por fim, cada provete é submetido a dezasseis ciclos de ensaio, consumindo cerca de 320 g de pó abrasivo;
- concluído os dezasseis ciclos de teste, limpar o provete e redeterminar a altura dos nove pontos medidos anteriormente.

3.7.2.4.6. Resultados

A diminuição da altura do provete resultante da abrasão por ele sofrida, deriva da diferença entre a média das n alturas iniciais ($L_{i,j}$) e a média das n alturas finais ($L_{f,j}$), conforme expõe a expressão:

$$\bullet \quad \Delta L = \frac{\sum_{j=1}^n (L_{i,j} - L_{f,j})}{n} \quad [3.31]$$

onde,

ΔL - perda média de espessura (mm);

$L_{i,n}$ - espessura inicial do provete, medida no ponto j (mm);

$L_{f,n}$ - espessura final do provete, medida no ponto j (mm);

n - número de pontos marcados no provete.

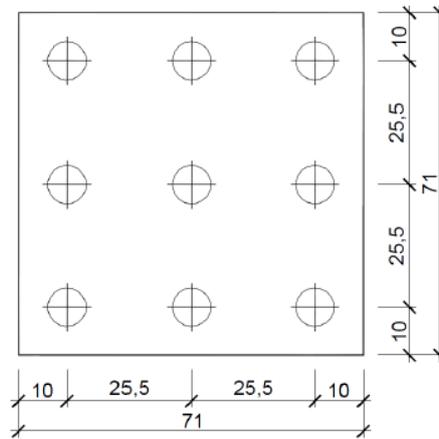


Figura 3. 36 - Distribuição dos pontos de medição [Evangelista (2007)]

4. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na campanha experimental apresentada no capítulo anterior.

É analisada a influência da incorporação de agregados reciclados provenientes de betão leve estrutural e não estrutural na produção de betões leves estruturais.

No presente capítulo, e sempre que possível, é realizado uma análise comparativa dos valores obtidos na campanha experimental com os resultados obtidos por outros autores.

4.2. Ensaios dos agregados

No presente subcapítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados aos agregados utilizados, naturais e reciclados, bem como uma análise crítica dos mesmos e a respectiva comparação com as demais investigações.

4.2.1. Análise granulométrica

Conforme mencionado em 3.3.2., a análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000).

De acordo com o referido em 3.4.1. e 3.5., os valores resultantes desta análise encontram-se na génese da formulação do betão leve estrutural de origem (BOHD) e dos betões leves reciclados, respectivamente.

4.2.1.1. Resultados obtidos

4.2.1.1.1. Areia fina

Nos Quadros 4.1 e 4.2, apresenta-se a análise granulométrica da areia fina, assim como a máxima dimensão do agregado e o módulo de finura, respectivamente.

Na Figura 4.1, apresenta-se a curva granulométrica da areia fina, onde se representa o material passado acumulado em cada peneiro, cuja dimensão da malha é definida no eixo das abcissas proporcionalmente à sua raiz quinta ($\sqrt[5]{D}$).

Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina

Peneiros (mm)	Areia fina			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	passado (%)	retido (%)
5,6	0,0	0,00	100,00	0,00
4	0,3	0,05	99,95	0,05
2	0,5	0,08	99,88	0,12
1	1,0	0,16	99,72	0,28
0,5	32,0	4,96	94,76	5,24
0,25	492,5	76,38	18,38	81,62
0,125	115,9	17,97	0,40	99,60
0,063	1,3	0,20	0,20	99,80
Refugo	0,5	0,08	-	-

Quadro 4.2 - Dimensão máxima e módulo de finura da areia fina

$D_{\text{máx}}$ (mm)	0,5
d_{min} (mm)	0,25
Módulo de finura	1,87

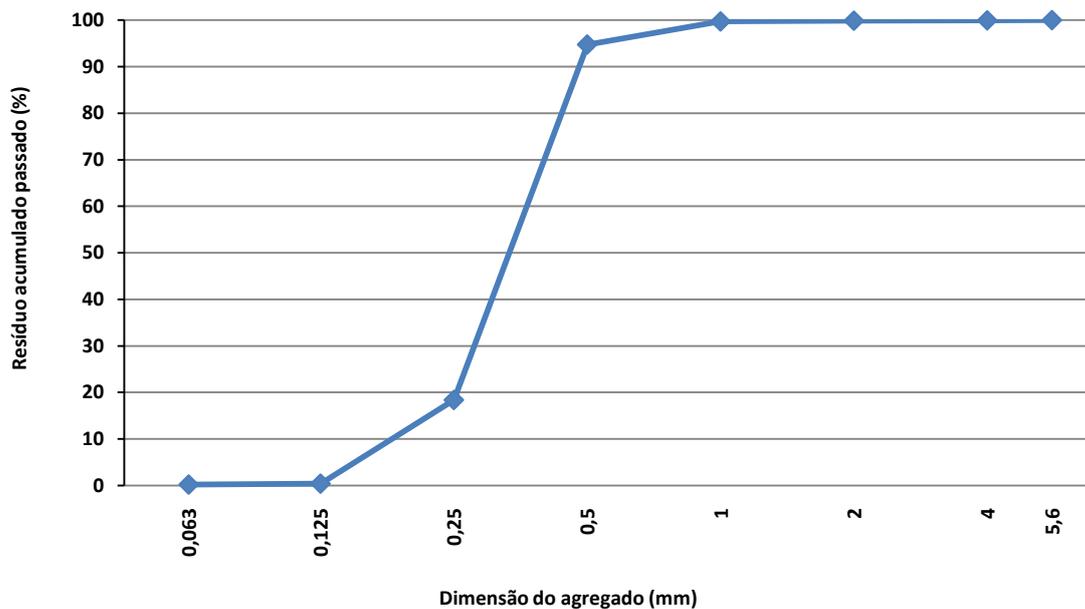


Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina

4.2.1.1.2. Areia grossa

No Quadro 4.3, apresenta-se a análise granulométrica da areia grossa. A máxima dimensão do agregado e o módulo de finura da areia grossa encontram-se no Quadro 4.4.

Na Figura 4.2, apresenta-se a curva granulométrica da areia grossa.

Quadro 4. 3 - Análise granulométrica da areia grossa

Peneiros [mm]	Areia grossa			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	passado (%)	retido (%)
8	0,0	0,00	100,00	0,00
6,3	2,2	0,29	99,71	0,29
5,6	3,1	0,41	99,29	0,71
4	12,2	1,63	97,66	2,34
2	81,0	10,84	86,82	13,18
1	261,2	34,94	51,88	48,12
0,5	285,7	38,22	13,66	86,34
0,25	76,0	10,17	3,49	96,51
0,125	19,1	2,56	0,94	99,06
0,063	4,1	0,55	0,39	99,61
Refugo	1,4	0,19	-	-

Quadro 4. 4 - Dimensão máxima e módulo de finura da areia grossa

$D_{\text{máx}}$ (mm)	4
d_{min} (mm)	0,5
Módulo de finura	3,46

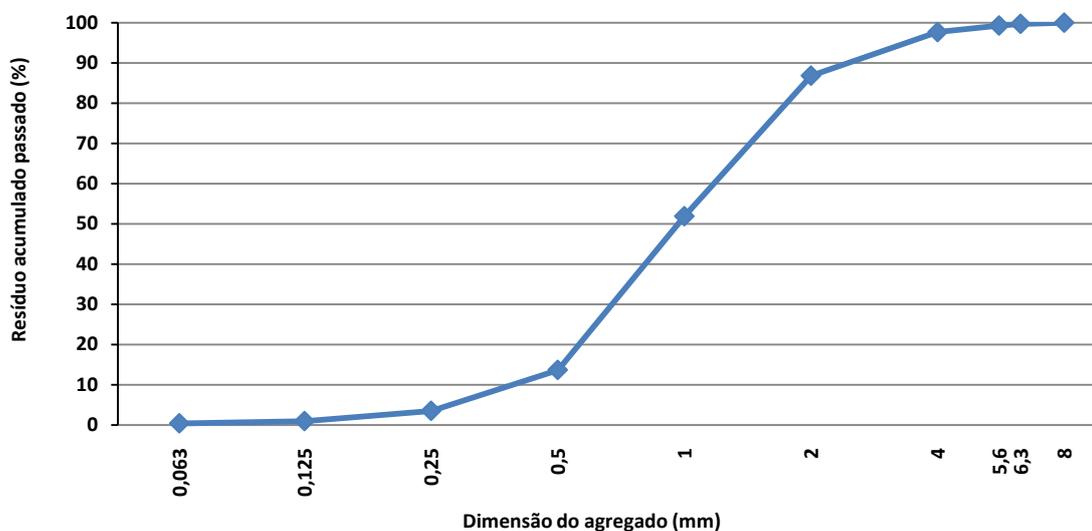


Figura 4. 2 - Curva granulométrica da areia grossa

4.2.1.1.3. Leca HD

Nos Quadros 4.5 e 4.6, são apresentados os resultados relativos à análise granulométrica da Leca HD, bem como a máxima dimensão do agregado e o seu módulo de finura, respectivamente.

Quadro 4. 5 - Análise granulométrica da Leca HD

Leca HD				
Peneiro	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
14	0,0	0,00	100,00	0,00
12,5	17,1	1,26	98,74	1,26
11,2	69,2	5,09	93,65	6,35
8	272,3	20,03	73,62	26,38
6,3	274,5	20,19	53,42	46,58
5,6	164,7	12,12	41,31	58,69
4	474,9	34,94	6,37	93,63
2	81,2	5,97	0,40	99,60
1	2,3	0,17	0,23	99,77
0,5	1,0	0,07	0,15	99,85
0,25	0,4	0,03	0,13	99,87
0,125	0,5	0,04	0,09	99,91
0,063	0,8	0,06	0,03	99,97
Resíduo	0,2	0,01	-	-

Quadro 4. 6 - Dimensão máxima e módulo de finura da Leca HD

$D_{\text{máx}}$ (mm)	11,2
d_{min} (mm)	4
Módulo de finura	6,67

Na Figura 4.3, apresenta-se a curva granulométrica obtida em laboratório da Leca HD e a facultada pelo fornecedor. De salientar, conforme referido em 3.5., que a curva granulométrica da Leca HD adoptada na formulação dos betões leves reciclados foi a de referência.

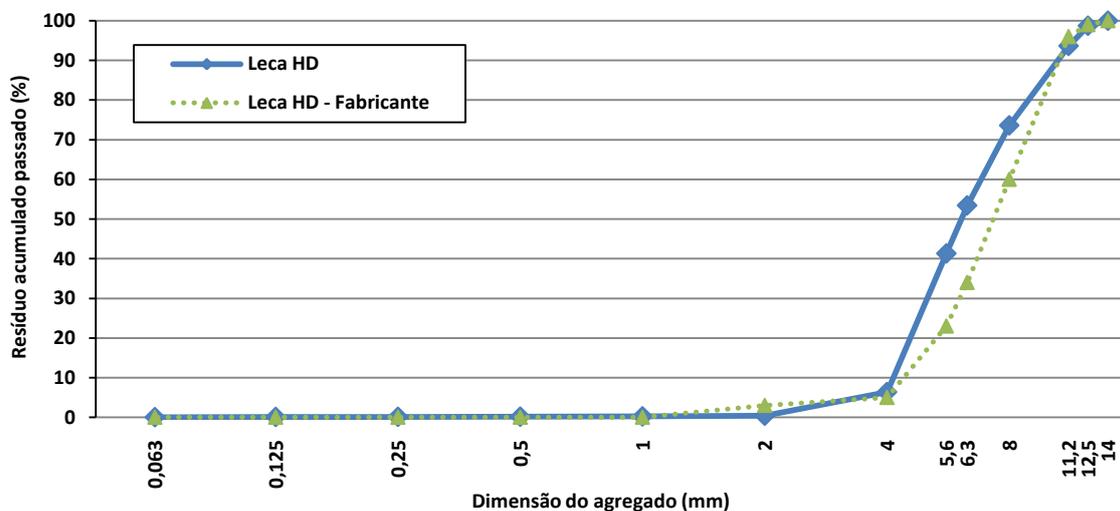


Figura 4. 3 - Comparação da curva granulométrica da Leca HD do fornecedor com a curva obtida no laboratório

4.2.1.1.4. Leca M

Os Quadros 4.7 e 4.8, apresentam os resultados referentes à análise granulométrica da Leca M, assim como à máxima dimensão do agregado e o seu módulo de finura, respectivamente.

Quadro 4. 7 - Análise granulométrica da Leca M

Leca M				
Peneiro	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
14	0,0	0,00	100,00	0,00
12,5	23,4	1,59	98,41	1,59
11,2	74,5	5,06	93,35	6,65
8	361,1	24,52	68,84	31,16
6,3	276,8	18,79	50,04	49,96
5,6	179,2	12,17	37,88	62,12
4	507,2	34,44	3,44	96,56
2	45,0	3,06	0,39	99,61
1	1,6	0,11	0,28	99,72
0,5	1,4	0,10	0,18	99,82
0,25	0,6	0,04	0,14	99,86
0,125	0,3	0,02	0,12	99,88
0,063	0,8	0,05	0,07	99,93
Resíduo	0,7	0,05	-	-

Quadro 4. 8 - Dimensão máxima e módulo de finura da Leca M

$D_{\text{máx}}$ (mm)	11,2
d_{min} (mm)	4
Módulo de finura	6,54

À semelhança do realizado para a Leca HD, a Figura 4.4 compara a curva granulométrica obtida no laboratório da Leca M com a facultada pelo fornecedor, concluindo-se existir uma grande semelhança entre ambas.

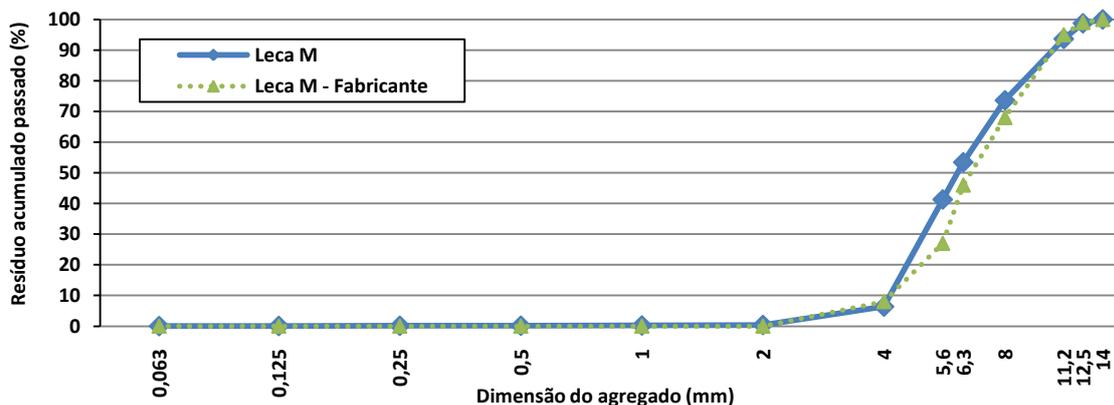


Figura 4. 4 - Comparação da curva granulométrica da Leca M do fornecedor com a curva obtida no laboratório

4.2.1.1.5. RLHD

Nos Quadros 4.9 e 4.10, são apresentados os resultados obtidos da análise granulométrica do agregado proveniente da trituração do betão de origem constituído por Leca HD (RLHD), assim como a máxima dimensão do agregado e o seu módulo de finura. Na Figura 4.5, apresenta-se a curva granulométrica do RLHD.

Quadro 4. 9 - Análise granulométrica do RLHD

Peneiro	RLHD			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,00	100,00	0,00
22,4	17,4	0,66	99,34	0,66
16	69,6	2,65	96,69	3,31
14	358,7	13,67	83,02	16,98
12,5	205,2	7,82	75,20	24,80
11,2	165,9	6,32	68,88	31,12
8	589,7	22,47	46,41	53,59
6,3	325,5	12,40	34,01	65,99
5,6	135,7	5,17	28,84	71,16
4	227,7	8,68	20,16	79,84
2	230,0	8,76	11,40	88,60
1	123,9	4,72	6,68	93,32
0,5	83,5	3,18	3,50	96,50
0,25	32,8	1,25	2,25	97,75
0,125	15,5	0,59	1,66	98,34
0,063	18,0	0,69	0,97	99,03
Resíduo	19,0	0,72	-	-

Quadro 4. 10 - Dimensão máxima e módulo de finura do RLHD

$D_{\text{máx}}$ (mm)	16
d_{min} (mm)	0,5
Módulo de finura	7,19

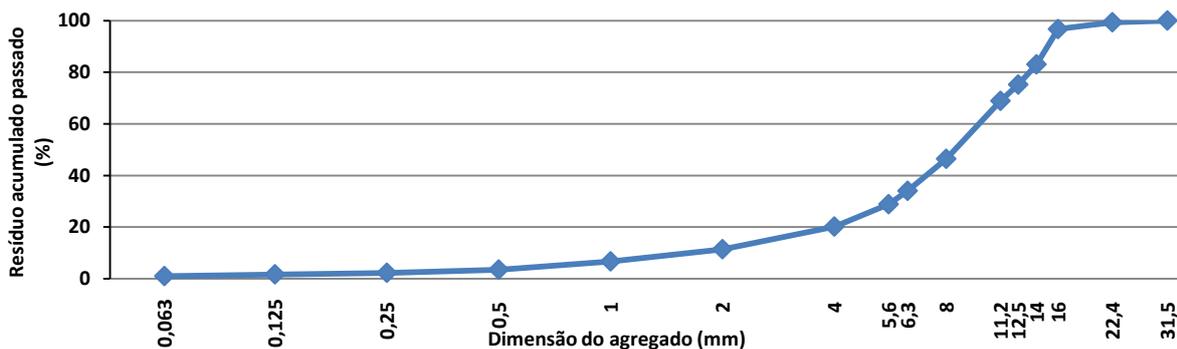


Figura 4. 5 - Curva granulométrica do RLHD

4.2.1.1.6. RLM

O Quadro 4.11 apresenta os resultados da análise granulométrica do agregado proveniente da trituração do betão de origem constituído por Leca M (RLM). A máxima dimensão do RLM, bem como o seu módulo de finura, são apresentados no Quadro 4.12. Na Figura 4.6, apresenta-se a curva granulométrica do RLM.

Quadro 4. 11 - Análise granulométrica do RLM

Peneiro	RLM			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado	Retido
			(%)	(%)
31,5	0,0	0,00	100,00	0,00
22,4	11,6	0,44	99,56	0,44
16	55,4	2,12	97,43	2,57
14	357,6	13,70	83,73	16,27
12,5	242,9	9,30	74,43	25,57
11,2	182,0	6,97	67,46	32,54
8	380,8	14,59	52,87	47,13
6,3	247,9	9,50	43,37	56,63
5,6	92,6	3,55	39,82	60,18
4	203,9	7,81	32,01	67,99
2	313,2	12,00	20,01	79,99
1	234,9	9,00	11,01	88,99
0,5	111,6	4,28	6,73	93,27
0,25	75,8	2,90	3,83	96,17
0,125	41,1	1,58	2,25	97,75
0,063	34,4	1,32	0,93	99,07
Resíduo	20,1	0,77	-	-

Quadro 4. 12 - Dimensão máxima e módulo de finura do RLM

D (mm)	16
d_{min} (mm)	0,25
Módulo de finura	6,72

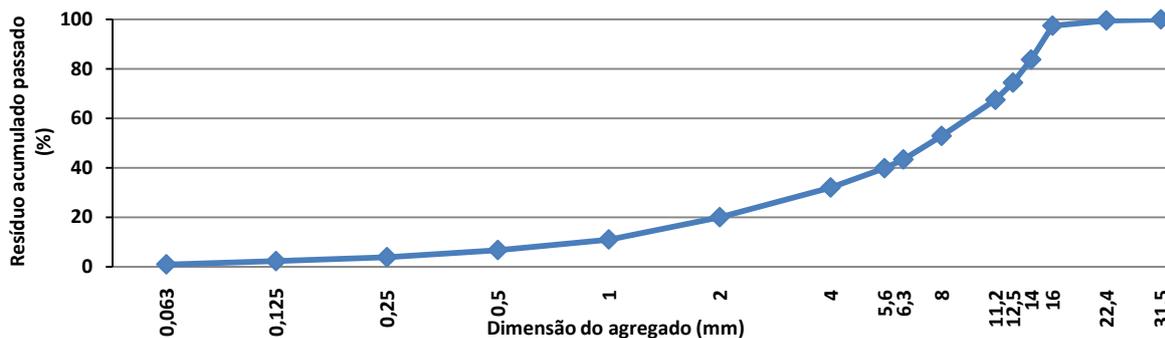


Figura 4. 6 - Curva granulométrica do RLM

4.2.1.2. Discussão de resultados

Todos os resultados obtidos referentes à análise granulométrica das areias revelaram distribuições adequadas à utilização no fabrico de betões, pelo que não foi necessário realizar nenhuma correção ao nível granulométrico. Porém, ao ter como objectivo a comparação de betões de igual composição produzidos com recurso a diferentes percentagens de incorporação de agregados leves reciclados, optou-se por ajustar as curvas granulométricas dos diversos agregados à curva de referência da Leca HD, conforme descrito em 3.5.2..

Em relação aos agregados leves de origem, verifica-se que a britagem dos agregados conduz a curvas granulométricas mais extensas e com maior percentagem de finos.

4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

Conforme descrito em 3.3.3., a determinação da massa volúmica e da absorção dos diversos agregados utilizados foi realizada segundo a norma NP EN 1097-6 (2002), que prevê procedimentos distintos para agregados finos (0,063 a 4 mm) e grossos (4 a 31,5 mm).

4.2.2.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.13 e na Figura 4.7, são apresentados os resultados referentes às propriedades citadas, nomeadamente a massa volúmica do material impermeável (ρ_a), a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}) dos diversos agregados.

Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores das massas volúmicas e absorção são apresentados no ANEXO D.

Quadro 4. 13 - Massas volúmicas dos agregados

	Areia fina	Areia grossa	Leca HD	Leca M	RLHD	RLM
ρ_a (kg/m ³)	2617,5	2624,8	1265,9	732,6	2384,8	1182,8
ρ_{rd} (kg/m ³)	2609,1	2615,4	1229,3	689,7	2007,2	1135,6
ρ_{ssd} (kg/m ³)	2603,9	2609,7	1091,6	594,5	1734,6	877,5

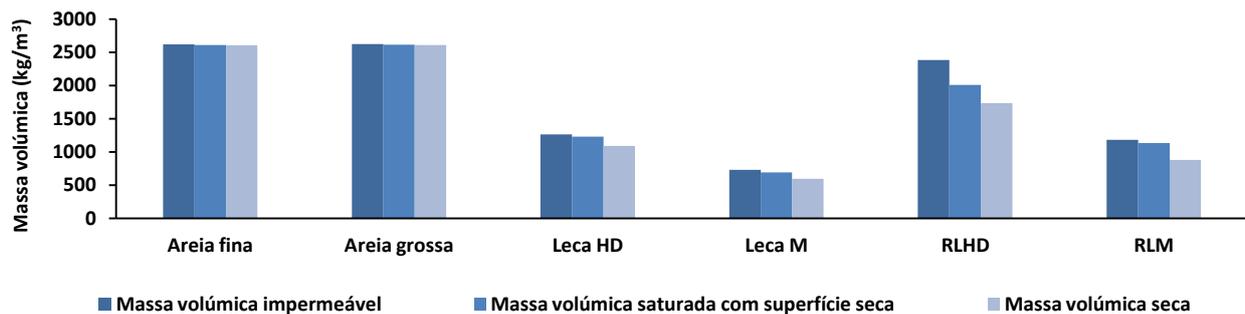


Figura 4. 7 - Massas volúmicas dos agregados

A absorção às 24 h (WA_{24h}) dos diversos agregados é apresentada no Quadro 4.14 bem como na Figura 4.8.

Quadro 4.14 - Absorção dos agregados após 24 horas

	Areia fina	Areia grossa	Leca HD	Leca M	RLHD	RLM
WA_{24h} (%)	0,2	0,2	12,6	23,2	15,7	29,4

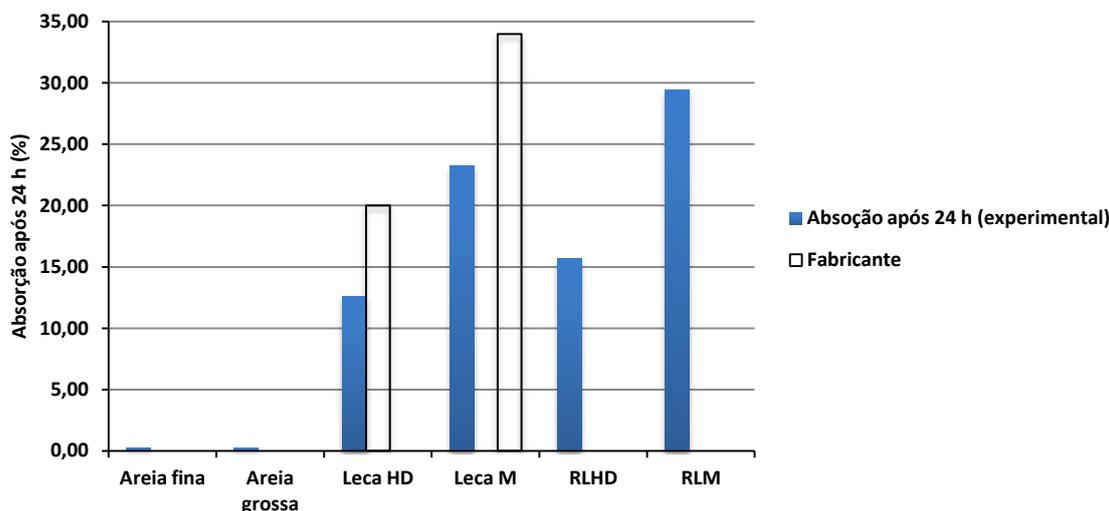


Figura 4.8 - Absorção dos agregados após 24 horas

No ANEXO K, encontram-se os cálculos que permitiram diferenciar, ao nível da constituição, as quantidades percentuais das diferentes fracções presentes nos agregados reciclados, nomeadamente a fracção correspondente à pasta ou argamassa e a fracção correspondente ao agregado de origem. A constituição obtida apresenta-se em seguida:

- $RLHD = 32\% \text{ Leca HD} + 68\% \text{ argamassa}$ [4.1]
- $RLM = 63\% \text{ Leca M} + 37\% \text{ pasta}$ [4.2]

O agregado RLM é composto apenas por agregado de origem e pasta, dado que não foram utilizados agregados finos na produção destes betões.

4.2.2.2. Discussão dos resultados

No que concerne à massa volúmica seca dos agregados leves, registaram-se os valores $1091,6 \text{ kg/m}^3$ para o agregado leve estrutural (Leca HD) e $594,5 \text{ kg/m}^3$ para o agregado leve de enchimento (Leca M). Estes resultados corroboram o trabalho de Bogas (2011), onde o autor obteve uma massa volúmica seca a variar entre 1052 e 1072 kg/m^3 para o agregado leve estrutural constituído por Leca HD. De igual modo, também os resultados cedidos pelo fornecedor corroboram os resultados obtidos, sendo $1080 \pm 150 \text{ kg/m}^3$ para o agregado leve estrutural e $550 \pm 15 \text{ kg/m}^3$ para o agregado leve não estrutural.

Posteriormente, ao analisar esta propriedade nos agregados reciclados de betão leve, concluiu-se existir um aumento da massa volúmica seca de 60% e 50%, comparativamente aos agregados leves estruturais e não estruturais, respectivamente. Conforme referido (equações [4.1] e [4.2]), os agregados reciclados são constituídos não só pela fracção de agregados leves de origem, como também, por uma fracção de argamassa ou pasta. Sendo a massa volúmica desta fracção superior à dos agregados leves de origem, é expectável observar um aumento desta propriedade nos mesmos.

Uma possível justificação para o menor aumento de massa volúmica observado no RLM resulta da menor percentagem de pasta presente no mesmo (equação [4.2]), comparativamente ao RLHD (equação [4.1]).

Porém, vários autores concluem que, na presença de agregados de massa volúmica “normal”, esta característica inverte-se, apresentando os agregados naturais maior massa volúmica, comparativamente aos agregados reciclados [Evangelista (2007), Leite (2001), Brito (2005), Gonçalves (2007)].

No Quadro 4.14 e na Figura 4.10, são apresentados os resultados obtidos da absorção de água às 24 horas para os agregados utilizados. O agregado leve estrutural apresentou uma absorção de 12,6% enquanto que a do agregado leve não estrutural foi de 23,3%. Ambos os valores são coerentes com os facultados pelo fornecedor, que apenas define um valor máximo admissível, sendo 20% no agregado leve estrutural e 34% no agregado leve de enchimento. De igual forma, Bogas (2011) obteve valores similares de absorção às 24 horas (12,3%) para o mesmo agregado leve estrutural (Leca HD). Também o trabalho apresentado em EuroLightConR23 (2000) obteve, para um agregado leve estrutural (Leca 670), uma absorção de 12,5%.

Como seria expectável, o agregado leve não estrutural (Leca M) registou valores de absorção superiores aos registados pelo agregado leve estrutural (Leca HD). Conforme descrito, para condições de interconectividade idênticas, o agregado leve não estrutural (Leca M) apresenta uma menor massa volúmica, possuindo na sua constituição maior porosidade, que por sua vez resulta no aumento da absorção de água.

Nos agregados reciclados de betão leve, à semelhança das diferenças observadas entre os agregados leves estruturais e de enchimento, também estes demonstraram um aumento da absorção face aos agregados leves. Assim, registaram-se aumentos de 3,1% e 6,2% nos agregados reciclados de betão leve estrutural e não estrutural face aos seus homólogos. Este aumento resulta de dois factores: - a maior percentagem de partículas partidas, resultante do processo de trituração dos betões de origem (BOHD e BOM), dá origem a partículas mais angulosas e onde a película exterior dos agregados leves se encontra mais danificada. Ao se expor o interior do agregado leve, de maior porosidade, ocorre um aumento natural da absorção; - a argamassa que circunda os agregados leves contribui também para o aumento da absorção. Não existe um aumento idêntico da absorção nos

agregados reciclados face aos seus homólogos de origem, podendo esta diferença ser relacionada com o aumento mais significativo na massa volúmica do agregado reciclado de betão leve estrutural que, conforme justificado, apresenta uma maior taxa de incorporação de argamassa.

4.2.3. Baridade

A caracterização desta propriedade foi realizada segundo o procedimento especificado na norma NP EN 1097-3 (2000), conforme referido em 3.3.7. De destacar que, à semelhança do sucedido nos ensaios anteriores, foi realizada uma correção granulométrica para todos os agregados, com exceção das areias.

4.2.3.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.15 e na Figura 4.9, são apresentados os valores médios obtidos para a baridade não compactada de cada um dos tipos de agregados analisados. Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores médios são apresentados no ANEXO E.

Quadro 4.15 - Baridade média dos agregados

	Areia fina	Areia grossa	Leca HD	Leca M	RLHD	RLM
Baridade (kg/m ³)	1495	1493	681	339	1000	463

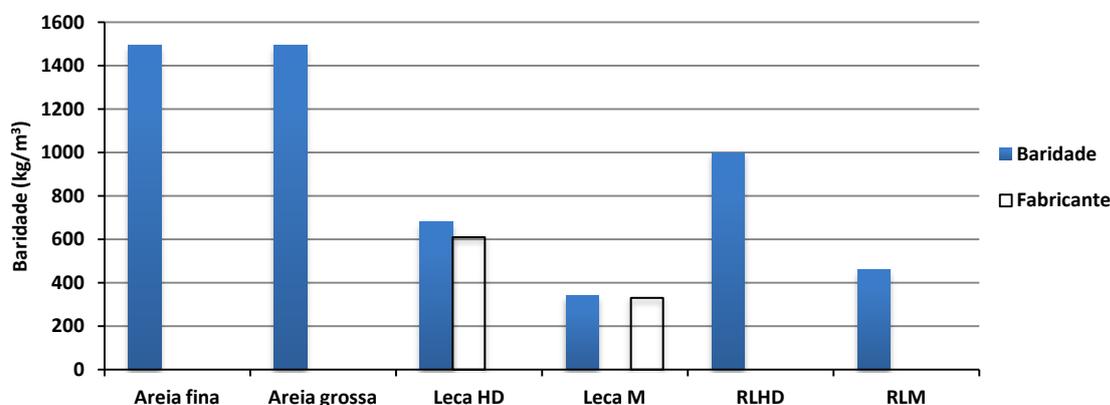


Figura 4.9 - Baridade média dos agregados

4.2.3.2. Discussão dos resultados

Dos ensaios realizados, pode concluir-se que os agregados finos naturais (areia fina e areia grossa) apresentam baridades muito semelhantes, rondando 1500 kg/m³. Quanto aos agregados leves, estes apresentam os valores de 681 (Leca HD) e 339 kg/m³ (Leca M). Os resultados obtidos são suportados pelos valores facultados pelo fornecedor, cerca de 610 kg/m³ para os agregados leves estruturais e 330 kg/m³ para os agregados leves de enchimento. De igual modo, Bogas (2011) obteve para os agregados leves estruturais uma massa volúmica aparente de 688 kg/m³.

À semelhança do verificado em 4.2.2., esta propriedade revelou um aumento muito significativo nos agregados reciclados, tendo sido observado um aumento mais acentuado no agregado reciclado de betão leve estrutural (RLHD). Este aumento era expectável dado que, conforme descrito em 2.2.2., esta propriedade é directamente afectada pela granulometria do agregado (neste caso não interfere uma vez que ambos os agregados reciclados foram alvo de um ajustamento granulométrico à curva de referência da Leca HD), pela forma das partículas e pela compacidade do agregado. Para os agregados reciclados, registaram-se valores de 1000 kg/m^3 para o RLHD e 463 kg/m^3 para o RLM, sendo este aumento face aos seus homólogos justificado pela maior percentagem de pasta presente na sua constituição (equações [4.1] e [4.2]). Verifica-se também que os agregados reciclados, face aos agregados leves de origem, apresentam um menor aumento da baridade do que de massa volúmica. Isso resulta de os agregados reciclados apresentarem uma forma menos esférica, o que contribui para a redução da sua compacidade.

4.2.4. Teor em água

A caracterização desta propriedade foi feita de acordo com o procedimento especificado na norma NP EN 1097-3 (1998), referido em 3.3.8. À semelhança do sucedido nos ensaios anteriores, foi efectuada uma correção granulométrica para todos os agregados, com excepção das areias.

4.2.4.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.16 apresenta os valores médios obtidos para o teor em água de cada um dos tipos de agregados analisados. Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores médios são apresentados no ANEXO F.

Quadro 4.16 - Resultados médios obtidos para o teor em água dos agregados

Material	Teor em água médio (%)
<i>Areia fina</i>	<i>3,0</i>
<i>Areia grossa</i>	<i>2,5</i>
<i>Leca HD</i>	<i>4,7</i>
<i>Leca M</i>	<i>4,1</i>
<i>RLHD</i>	<i>5,1</i>
<i>RLM</i>	<i>5,4</i>

Tendo esta propriedade uma elevada influência na razão a/c e consequentemente na trabalhabilidade dos betões produzidos, optou-se por realizar o ensaio em todos os agregados utilizados durante a campanha experimental. As areias apresentaram um elevado teor em água, registando valores de 3,0% para a areia fina e 2,5% para a areia grossa. Tanto os agregados leves como os agregados reciclados apresentaram teores em água entre 4 e 6%.

4.2.5. Resistência ao esmagamento

A determinação da resistência ao esmagamento incidiu sobre os quatro tipos de agregados grossos utilizados durante a campanha experimental, nomeadamente Leca HD, Leca M, RLHD e RLM, segundo a norma NP EN 13055-1 (2002), conforme mencionado em 3.3.9.

4.2.5.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.17 e a Figura 4.10 apresentam os valores médios obtidos do ensaio de resistência ao esmagamento de cada agregado grosso empregue na presente campanha experimental. Todos os cálculos necessários para a determinação dos valores médios são apresentados no ANEXO G.

Quadro 4.17 - Resistência ao esmagamento dos agregados grossos

Valores médios	Leca HD	Leca M	RLHD	RLM
F (N)	75800	15900	100200	25867
A (mm ²)	13273	13273	13273	13273
Tensão de ruptura (MPa)	5,7	1,2	7,6	2,0

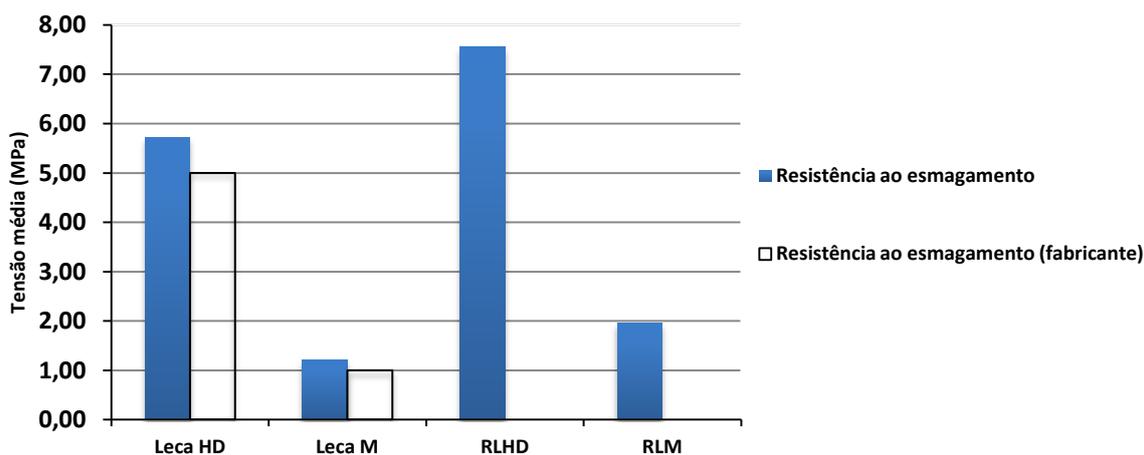


Figura 4.10 - Resistência ao esmagamento dos agregados grossos

4.2.5.2. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos para os agregados leves demonstraram ser coerentes com os facultados pelo fornecedor, registando uma tensão média de ruptura de 5,7 MPa para os agregados leves estruturais (5 MPa segundo o fornecedor) e 1,2 MPa para os agregados leves de enchimento (1 MPa segundo o fornecedor). Conforme 2.2.4., os agregados que apresentam maior massa volúmica e maior baridade (Leca HD) registaram valores superiores de resistência ao esmagamento, comparativamente ao agregado de enchimento (Leca M). Também Bogas (2011) obteve 6,8 MPa para o valor médio da resistência ao esmagamento do agregado leve estrutural Leca HD.

Para além da forma e da granulometria do agregado, a resistência ao esmagamento é condicionada pela resistência do próprio agregado. Nos agregados reciclados, a quantidade de argamassa aderida ao próprio agregado confere ao mesmo um incremento de resistência ao esmagamento. Esta é uma característica muito própria dos agregados reciclados de betão leve, uma vez que o mesmo não sucede nos agregados naturais, dada a sua maior resistência face à argamassa. Desta forma, a resistência ao esmagamento do agregado reciclado de betão leve estrutural foi de 7,6 MPa e do agregado reciclado de betão leve de enchimento foi de 2,0 MPa. O maior incremento na resistência do RLM resulta da melhor capacidade de arrumação destes agregados no recipiente utilizado para efectuar o ensaio de esmagamento (maior esfericidade do agregado) e ainda do confinamento proporcionado pela pasta.

4.2.6. Índice de forma

A caracterização desta propriedade foi feita segundo o procedimento especificado na norma NP EN 933-4 (2002), conforme referido em 3.3.10.. Este ensaio apenas incidiu sobre os agregados britados (visto serem os únicos a exibir partículas de forma não cúbica), RLHD e RLM.

4.2.6.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.18 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de índice de forma para cada agregado grosso reciclado empregue na presente campanha experimental. Todos os cálculos necessários para a determinação dos valores médios são expostos no ANEXO H.

Quadro 4.18 - Índice de forma dos agregados reciclados

Agregado	ΣM_1 (g)	ΣM_2 (g)	IF (%)
<i>RLHD</i>	983.3	235.2	23.9
<i>RLM</i>	998.6	87.4	8.8

4.2.6.2. Discussão dos resultados

Conforme é mostrado no Quadro 4.18, o agregado reciclado de betão leve estrutural (RLHD) teve um índice de forma muito elevado, 23,9%, quando comparado com o agregado reciclado de betão leve de enchimento (RLM), 8,8%. Esta diferença deve-se à forma das partículas mais angulosas presentes no RLHD, característica esta própria dos agregados reciclados de betão, como é sustentado por vários autores, como Matias e Brito (2005), Pereira (2010), Amorim (2008) e Fonseca (2009).

No que concerne ao agregado reciclado de betão de enchimento (RLM), dado que o betão de origem (BOM) foi produzido sem agregados finos, o agregado resultante da trituração do mesmo apresenta uma forma similar ao agregado de origem (Leca M), de forma menos angulosa do que o RLHD.

4.2.7. Evolução da absorção de água

A determinação da evolução da absorção de água incidiu sobre os quatro tipos de agregados grossos utilizados durante a campanha experimental, nomeadamente Leca HD, Leca M, RLHD e RLM, segundo o método adoptado na campanha de Bogas (2011).

4.2.7.1. Resultados obtidos

4.2.7.1.1. Agregados não reciclados

No Quadro 4.19 e na Figura 4.11, apresenta-se a evolução da absorção de água ao longo do tempo dos agregados leves. Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores percentuais da absorção são apresentados no ANEXO I.

Quadro 4.19 - Evolução da absorção de água nos agregados leves

Leitura (min)	Leca HD	Leca M
	Absorção (%)	Absorção (%)
3	5,3	12,9
5	6,2	15,2
10	7,2	17,5
20	8,2	19,6
30	9,3	21,2
60	10,4	22,5
120	12,2	23,1
1440	12,7	23,4

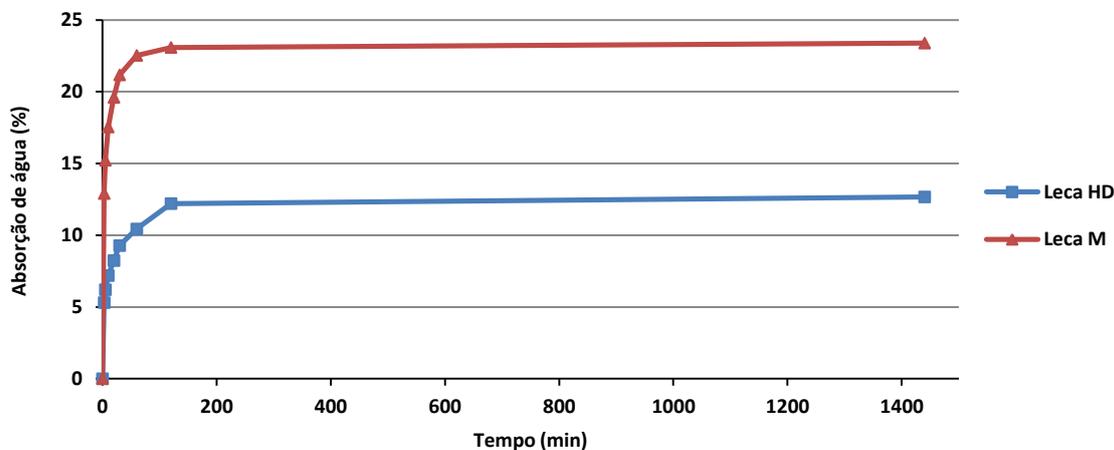


Figura 4.11 - Evolução da absorção de água nos agregados leves

4.2.7.1.2. Agregados reciclados

De igual modo, no Quadro 4.20 e na Figura 4.12, são apresentados os valores da absorção de água ao longo do tempo, para os dois tipos de agregados grossos reciclados utilizados, RLHD e RLM respectivamente. Todos os dados necessários para a obtenção dos valores percentuais da absorção se encontram de igual forma no ANEXO I.

Quadro 4. 20 - Evolução da absorção de água nos agregados reciclados

Leitura (min)	RLHD	RLM
	Absorção (%)	Absorção (%)
3	11,1	19,0
5	12,0	21,0
10	12,8	23,4
20	13,0	25,3
30	13,2	26,4
60	13,8	27,4
120	14,2	27,8
1440	14,4	28,1

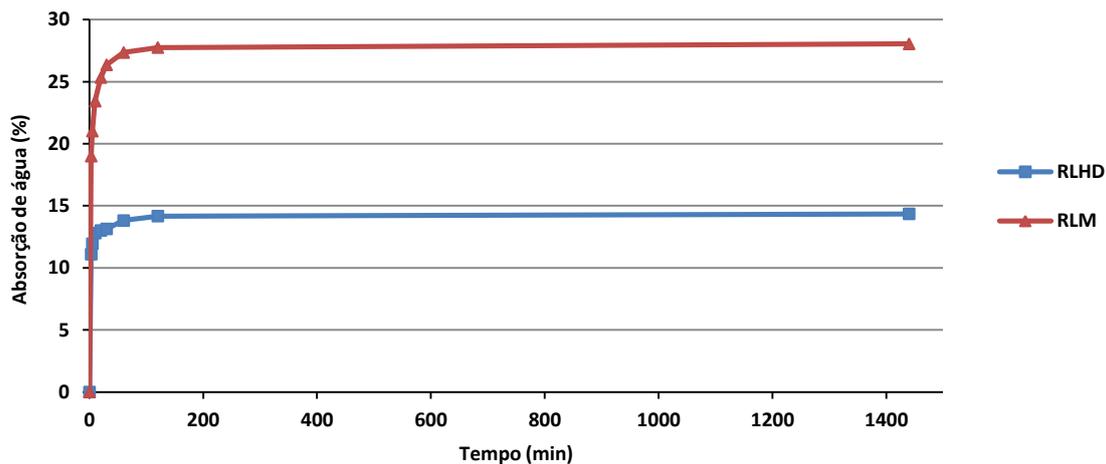


Figura 4. 12 - Evolução da absorção de água nos agregados leves reciclados

4.2.7.2. Discussão dos resultados

Conforme se observa no Quadro 4.19, registou-se uma absorção inicial bastante elevada para ambos os agregados leves utilizados, ocorrendo, no entanto, uma quebra da evolução inicial após os primeiros 30 minutos. O agregado leve Leca HD registou uma absorção de 7,2% quando decorridos 10 minutos do respectivo ensaio, correspondendo a mais de 50% da absorção total registada ao fim das 24 horas de ensaio. Os resultados obtidos são coerentes com o que seria expectável, apresentando uma elevada absorção inicial, resultante da elevada porosidade característica do agregado, e mostrando uma tendência de estabilização desta propriedade em 13% quando decorridas 2 horas, conforme mostra a Figura 4.13.

No entanto, dada a elevada porosidade que a estrutura interior deste tipo de agregado apresenta, esta característica poderia conduzir a uma taxa de absorção mais elevada, ficando patente a elevada importância que a película exterior tem no controlo da absorção por parte deste tipo de agregados.

Aos 30 minutos de ensaio, o agregado Leca HD registou uma absorção de 9,3% (cerca de 74% da absorção total registada às 24 horas), sendo que, após este período, o agregado apresenta uma tendência de estabilização até às 2 horas de ensaio.

Os resultados obtidos são suportados pelos obtidos na investigação de Bogas (2011), onde o autor obteve para o agregado leve estrutural (Leca HD) uma absorção às 24 horas de 12,3%.

Segundo o Quadro 4.19, à semelhança do verificado para a Leca HD, constatou-se que o agregado Leca M registou um crescimento muito acentuado da absorção inicial, sendo porém de notar que, decorridos os primeiros 30 minutos de ensaio, houve uma tendência de estabilização em 28% (correspondendo a cerca de 2 horas de ensaio). Aos 5 minutos de ensaio, a Leca M registou uma absorção de 21,0%, cerca de 60% da absorção total registada ao fim de 24 horas de ensaio, enquanto que, após 30 minutos, o agregado atingiu cerca de 90% da absorção total registada às 24 horas.

O agregado Leca M demonstra uma tendência idêntica à observada na Leca HD, apesar de registar uma absorção final superior, cerca de 28%. Esta elevada absorção deve-se novamente à elevada porosidade do material que o constitui, sendo que a diferença da absorção registada para este agregado, face à Leca HD, deriva da sua maior porosidade.

No que concerne ao agregado reciclado RLHD, segundo a Figura 4.14, existe uma absorção muito rápida durante os primeiros 30 minutos de ensaio, sendo que após este período se verifica uma redução da taxa de absorção até estabilizar em 14%, ao fim de 2 horas de ensaio. Através do Quadro 4.20, aos 5 minutos de ensaio, o agregado RLHD obteve uma absorção de 12,0%, correspondente a 80% da absorção total registada ao fim das 24 horas de ensaio. Estes resultados voltam novamente a estar de acordo com o que seria expectável, residindo uma vez mais a origem deste fenómeno na elevada porosidade característica deste tipo de agregados.

Quando comparados estes valores com os registados para a Leca HD, conclui-se que os agregados reciclados apresentam uma absorção inicial superior. Na génese deste aumento inicial de absorção por parte dos agregados reciclados, face aos seus agregados de origem, encontra-se a quantidade de partículas partidas, que, ao comprometerem a integridade da película exterior do agregado, promovem o aumento da absorção. Não obstante, também a quantidade de pasta aderida ao agregado de origem provoca um incremento desta propriedade.

Leite (2001) observou também este tipo de fenómeno, sendo que o incremento da absorção inicial registado nos agregados reciclados de betão se prende essencialmente com a quantidade de argamassa aderida ao agregado natural.

O agregado RLM demonstra uma tendência similar à registada pelo agregado RLHD, porém superior, tendo-se obtido ao fim de 30 minutos de ensaio uma absorção de 26,4%. Após este período, a absorção evolui até às 2 horas de ensaio, estabilizando em 28%. Através da análise do Quadro 4.20, é possível verificar uma absorção de 21,0% ao fim de 5 minutos de ensaio, correspondente a 75% da absorção total registada às 24 horas. Já ao fim de 30 minutos, o agregado RLM apresentou uma absorção de 26,4%, correspondente a cerca de 90% da sua capacidade total.

Estes resultados demonstraram novamente estar de acordo com o que era expectável, sendo a elevada absorção inicial fundamentada pela elevada porosidade característica deste tipo de agregados.

Porém, ao contrário do verificado para o RLHD, o agregado RLM apresentou uma absorção ligeiramente inferior.

Finalmente, quando comparado o agregado RLM com o agregado Leca M, regista-se uma absorção inicial ligeiramente superior por parte do RLM, apesar de ambos demonstrarem uma evolução desta propriedade muito similar. Assim, torna-se inequívoco o papel que a película exterior assume no controlo desta propriedade.

4.3. Ensaio do betão no estado fresco

Este subcapítulo tem como intuito a apresentação e discussão dos resultados referentes à caracterização dos betões produzidos no estado fresco. Assim, conforme é indicado em 3.7.1., são apresentados de seguida os valores obtidos para a trabalhabilidade e massa volúmica fresca dos betões produzidos.

4.3.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

Conforme descrito em 3.7.1.1., a determinação do ensaio de abaixamento foi realizada segundo a norma NP EN 12350-2 (2002), tendo sido estipulado um abaixamento de 125 ± 10 mm para cada composição, de forma a se obter uma trabalhabilidade mole, correspondente a um betão de classe de consistência S3.

4.3.1.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.21 e na Figura 4.15, são apresentados os valores obtidos relativos ao abaixamento, assim como a relação a/c efectiva, para cada composição produzida.

Quadro 4. 21 - Resultados do abaixamento e relação a/c segundo cada composição produzida

Composição de betão	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Composição de betão	Abaixamento (mm)	Relação a/c
BRHD	130	0,55	BRM	125	0,55
BHD20RHD	120	0,55	BHD20RM	125	0,55
BM20RHD	130	0,55	BM20RM	130	0,55
BHD50RHD	130	0,55	BHD50RM	135	0,55
BM50RHD	125	0,55	BM50RM	130	0,55
B100RHD	125	0,55	B100RM	125	0,55

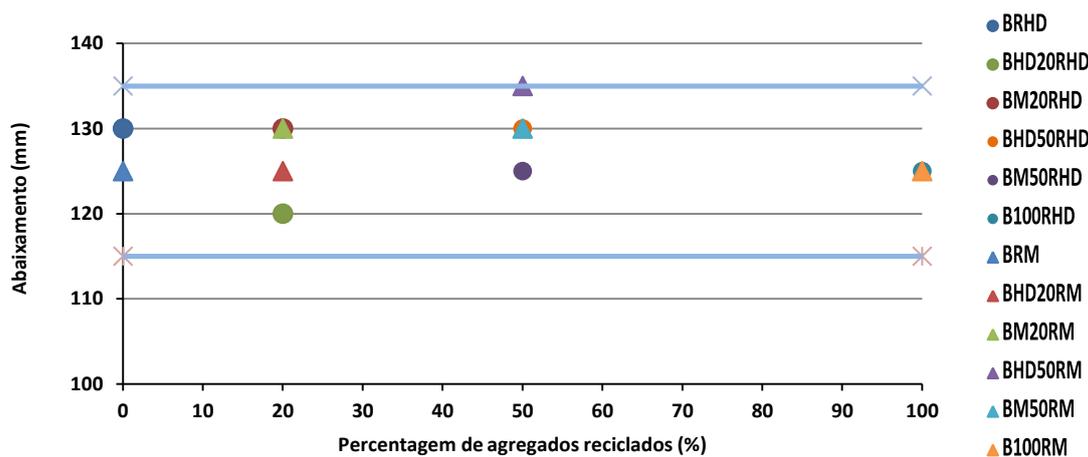


Figura 4. 13 - Resultados do abaixamento

4.3.1.2. Discussão dos resultados

Do Quadro 4.21, conclui-se que todas as misturas cumpriram o abaixamento estipulado, registando valores compreendidos no intervalo definido, sem que seja necessário corrigir a relação a/c.

Segundo o projecto EuroLightCon R12 (2000), a absorção dos agregados leves pode dar origem a variações na trabalhabilidade dos betões. Bogas (2011) concluiu que existem três factores principais que podem resultar na variação desta propriedade: alteração na quantidade de água da mistura por variações do teor de água inicial ou variação na percentagem de absorção dos agregados leves; alteração na granulometria e massa volúmica do agregado; variação (menos provável) da dosagem dos restantes constituintes.

Assim, antes de se produzir os betões a ensaiar, foram executados dois ensaios (teor em água e absorção de água aos 30 minutos) com o objectivo de avaliar a quantidade de água de amassadura necessária, sem que se registasse uma alteração da relação a/c efectiva. Porém, este controlo é difícil, podendo ocorrer variações na quantidade de água efectiva. Na origem do maior abaixamento obtido para o betão BHD50RM (135 mm), pode assim estar associada uma variação da absorção de

água por parte dos agregados utilizados, devido ao difícil controlo da quantidade de água a adicionar.

4.3.2. Ensaio de massa volúmica fresca

A caracterização desta propriedade adopta o procedimento referido em 3.7.1.2., segundo a norma NP EN 12350-6 (2002).

4.3.2.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.22, são apresentados todos os valores da massa volúmica fresca de todas as composições produzidas.

Quadro 4. 22 - Massa volúmica fresca de todas as composições produzidas

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)
<i>BRHD</i>	1897	<i>BRM</i>	1710
<i>BHD20RHD</i>	1910	<i>BHD20RM</i>	1888
<i>BM20RHD</i>	1728	<i>BM20RM</i>	1761
<i>BHD50RHD</i>	1983	<i>BHD50RM</i>	1866
<i>BM50RHD</i>	1897	<i>BM50RM</i>	1809
<i>B100RHD</i>	2092	<i>B100RM</i>	1842

Na Figura 4.14, apresenta-se a variação desta propriedade em função da taxa de substituição de agregado leve por reciclado RLHD.

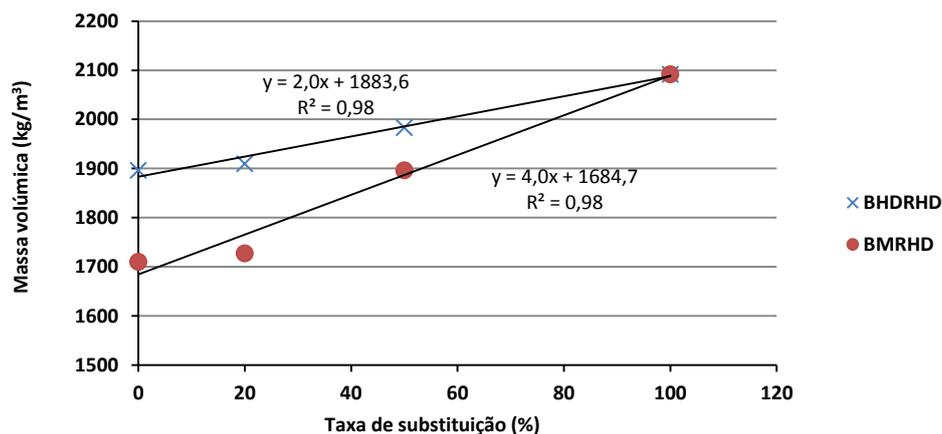


Figura 4. 14 - Variação da massa volúmica fresca em função da taxa de substituição de RLHD

O Quadro 4.23 descreve a variação da massa volúmica fresca em relação aos betões de origem (BRHD e BRM), em função da taxa de substituição do agregado reciclado RLHD.

Quadro 4. 23 - Massa volúmica fresca e variação de massa aquando da substituição de RLHD

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Taxa de incorporação de RLHD (%)	Varição da massa volúmica (%)
<i>BRHD</i>	1897	1628	0	0,0
<i>BHD20RHD</i>	1910	1672	20	6,0
<i>BHD50RHD</i>	1983	1739	50	9,9
<i>B100RHD</i>	2092	1852	100	15,6
<i>BRM</i>	1710	1453	0	0,0
<i>BM20RHD</i>	1761	1533	20	7,4
<i>BM50RHD</i>	1809	1653	50	16,7
<i>B100RHD</i>	1842	1852	100	28,2

A Figura 4.15 apresenta a variação da massa volúmica fresca em função da taxa de substituição de agregado leve por reciclado RLM, com destaque para as regressões obtidas tanto para a série BHD como para a série BM.

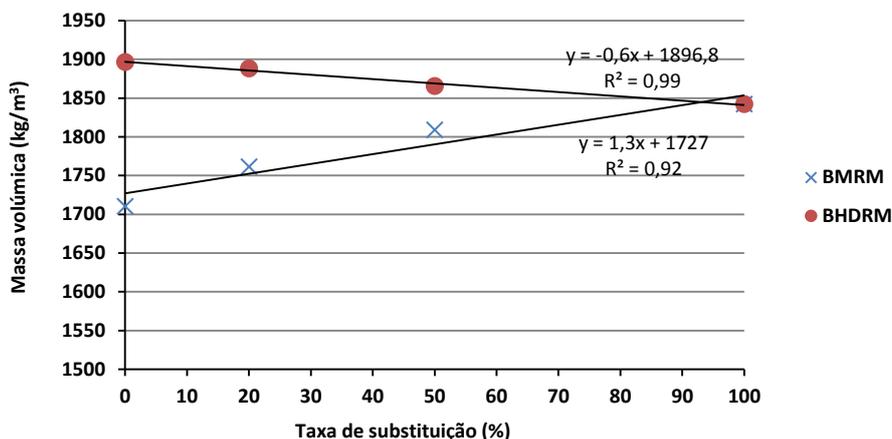


Figura 4. 15 - Variação da massa volúmica fresca consoante a taxa de substituição de RLM

O Quadro 4.24 apresenta a variação da massa volúmica fresca em relação aos betões de origem (BRHD e BRM), consoante o aumento da taxa de substituição do agregado reciclado RLM.

Quadro 4. 24 - Massa volúmica fresca e variação de massa aquando da substituição de RLM

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Taxa de incorporação de RLHD (%)	Varição da massa volúmica (%)
<i>BRHD</i>	1897	1628	0	0,0
<i>BHD20RM</i>	1888	1612	20	-0,4
<i>BHD50RM</i>	1866	1590	50	-1,6
<i>B100RM</i>	1842	1552	100	-2,9
<i>BRM</i>	1710	1453	0	0,0
<i>BM20RM</i>	1761	1473	20	3,0
<i>BM50RM</i>	1809	1503	50	5,8
<i>B100RM</i>	1842	1552	100	7,7

4.3.2.2. Discussão dos resultados

O Quadro 4.22 mostra uma clara tendência de crescimento da massa volúmica fresca conforme se adiciona agregado reciclado em substituição de agregado leve. Este fenómeno era expectável, uma vez que a massa volúmica dos agregados reciclados é superior à dos agregados leves.

Esta conclusão é atestada pela regressão indicada na Figura 4.16, que demonstra que, à medida que se substitui agregado leve por agregado reciclado RLHD, a massa volúmica fresca aumenta de forma quase linear. Porém, através da análise dos declives das regressões relativas à adição de RLHD nas séries de betões constituídos pelos agregados leves Leca HD e Leca M (série BHD e BM), é possível constatar que a adição de RHD na série BM implica um maior crescimento desta propriedade comparativamente à adição deste agregado reciclado (RHD) na série BHD. Tal deve-se à maior diferença existente entre a massa volúmica do agregado reciclado RHD (1735 kg/m^3) e o agregado leve Leca M (594 kg/m^3).

Por outro lado, de acordo com a Figura 4.16 e o Quadro 4.22, os betões constituídos pelo agregado reciclado RHD apresentam massas volúmicas elevadas, podendo ultrapassar o limite definido para o betão leve ($\rho_{\text{betão leve}} = 2000 \text{ kg/m}^3$, segundo EN NP206-1). No entanto, este limite é definido para a massa volúmica seca que, de acordo com os valores de cálculo apresentados no Quadro 4.23, não é ultrapassado.

Do Quadro 4.23, pode-se concluir que a substituição total de Leca M pelo agregado reciclado RHD origina um incremento da massa em 28,2% face ao respectivo betão de referência (BRM), enquanto que, em relação ao betão BRHD, a substituição total do agregado Leca HD pelo agregado reciclado RHD resulta num aumento de apenas 15,6%.

Na Figura 4.17, confirma-se o aumento da massa volúmica com a substituição de agregado leve Leca M por agregado reciclado RLM. Isso resulta novamente da maior massa volúmica do agregado reciclado RLM face à do agregado leve Leca M. Porém, aquando da substituição do agregado leve Leca HD por agregado reciclado RLM, o mesmo não sucede, dada a maior massa volúmica do agregado leve Leca HD comparativamente ao agregado reciclado RLM, demonstrando então uma tendência decrescente consoante se incorpora RLM em substituição da Leca HD. A justificação da menor massa volúmica do agregado reciclado RLM face à do agregado leve Leca HD prende-se, uma vez mais, com a produção do BOM (betão de enchimento), desprovido de agregados finos. De salientar que, de acordo com vários autores (Leite (2001); Matias e Brito (2005); Evangelista (2007)), esta tendência decrescente é característica dos betões reciclados convencionais, aquando da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de betão. De igual modo, vários autores (Kou *et al.* (2008); Lima *et al.* (2009); Akcaozoglu *et al.* (2009); Bravo (2009); Ferreira (2012)) referem que a substituição de agregados naturais por agregados

leves reciclados, como o vidro expandido, a borracha ou o plástico, conduz a uma tendência similar à observada aquando da substituição do agregado leve Leca M pelo agregado reciclado RLM.

No entanto, tanto a pequena variação de massa entre BRHD e B100RM (Quadro 4.24), como o reduzido declive da regressão relativa à adição de RLM na série de betão constituído pelo agregado leve Leca HD (Figura 4.17), derivam da similaridade das massas volúmicas ($\rho_{\text{LecaHD}} = 1092 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{RLM}} = 877 \text{ kg/m}^3$). São ainda de referir os resultados obtidos por Nassar e Soroushian (2011), onde os mesmos observam o crescimento da massa volúmica consoante a adição de agregado reciclado leve (vidro expandido), confirmando os valores obtidos na presente investigação, com excepção das composições onde foi substituído o agregado leve Leca HD pelo agregado reciclado RLM.

4.4. Ensaios do betão no estado endurecido

4.4.1. Resistência à compressão

Esta propriedade foi determinada segundo o procedimento especificado na norma NP EN 12390-3 (2003), conforme referido em 3.7.2.1.. O ensaio foi efectuado para todas as misturas produzidas (incluindo os betões de origem) aos 7, 28 e 90 dias, sendo que se optou por ensaiar cinco provetes aos 28 dias de idade, tendo em vista a obtenção de uma maior representatividade.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, a sua interpretação é feita segundo as duas séries de betões produzidos, BHD e BM. Entende-se por série BHD todos os betões cujo agregado leve constituinte corresponde à Leca HD e onde posteriormente é executada a sua substituição por agregado reciclado RLHD e RLM. De forma análoga, a série BM é constituída por todos os betões que apresentam na sua constituição o agregado leve Leca M, sendo este posteriormente substituído pelos agregados reciclados RLHD e RLM.

4.4.1.1. Série BHD

4.4.1.1.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.25 apresenta os valores médios de resistência à compressão obtidos para a série BHD. No respectivo quadro, são ainda indicados os valores da massa volúmica seca (ρ_{seca}), a eficiência estrutural aos 7 e 28 dias, a tensão média de ruptura (f_{cm}), o desvio padrão (S_{f_c}) e, finalmente, o coeficiente de variação (CV_{f_c}). O cálculo da eficiência estrutural resulta do rácio entre a tensão média de ruptura e a massa volúmica seca ($f_{\text{cm}} / \rho_{\text{seca}} \times 1000$). Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores médios são indicados no ANEXO J.

Quadro 4. 25 - Resistência média à compressão da série BHD

Amassadura	Taxa de substituição (%)	ρ_{seca}^a (kg/m ³)	7 dias			28 dias			90 dias						
			(f_{cm} / ρ_{seca})		(f_{cm} / S_{7dias})		(f_{cm} / ρ_{seca})		(f_{cm} / S_{28dias})		(f_{cm} / ρ_{seca})		(f_{cm} / S_{90dias})		
			ρ_{seca} (10 ³ m)	S_{7dias} (10 ³ m)	ρ_{seca} (10 ³ m)	S_{28dias} (10 ³ m)	f_{cm} (MPa)	S_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)	f_{cm} (MPa)	S_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)	f_{cm} (MPa)	S_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)
BRHD	0	1628	20,2	0,8	23,6	1,1	32,8	1,30	3,97	38,4	1,73	4,51	39,3	2,03	5,17
BHD20RHD	20	1672	20,3	1,1	24,1	0,7	33,9	1,84	5,45	40,4	1,15	2,84	41,3	1,89	4,56
BHD50RHD	50	1739	19,8	0,1	24,8	0,4	34,4	0,20	0,58	43,1	0,72	1,66	46,8	0,17	0,36
B100RHD	100	1852	19,5	0,5	23,6	0,4	36,1	0,97	2,69	43,7	0,74	1,69	48,5	0,73	1,51
BHD20RM	20	1612	20,5	0,3	23,9	0,7	33,1	0,53	1,60	38,5	1,08	2,80	39,2	2,19	5,59
BHD50RM	50	1590	20,3	0,6	22,8	1,6	32,2	0,99	3,09	36,3	1,08	2,80	38,7	2,19	5,59

^a - Valor de cálculo da massa volúmica seca

A Figura 4.16 mostra a evolução da resistência à compressão das misturas da série BHD para as idades pré-definidas (7, 28 e 90 dias). Todas as misturas mencionadas apresentam uma tendência de crescimento da resistência à compressão com a idade, observando-se porém uma evolução menos acentuada a partir dos 7 dias, nomeadamente nas misturas com menos percentagem de agregado reciclado. Esta evolução aparentemente mais rápida da resistência à compressão é uma característica dos betões leves, devido à limitação imposta pela capacidade do agregado, que é maior nos agregados reciclados.

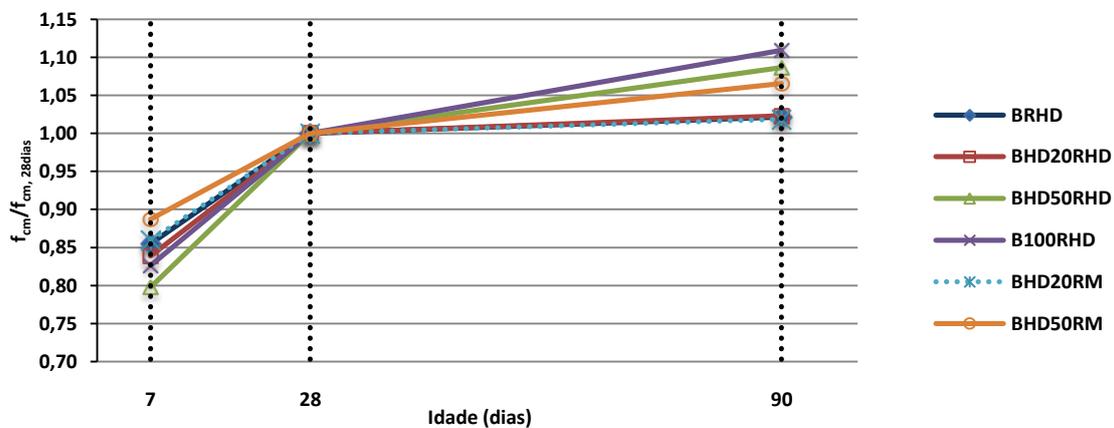


Figura 4. 16 - Evolução da resistência à compressão da série BHD

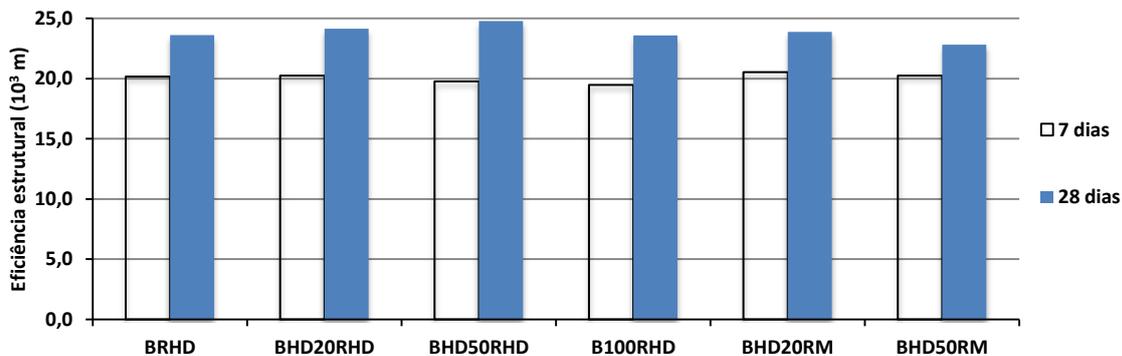


Figura 4. 17 - Eficiência estrutural aos 28 dias da série BHD

A Figura 4.17 mostra que a maior eficiência estrutural é obtida para a mistura BHD50RHD (24,8 m). Na origem deste resultado, encontra-se a participação da argamassa aliada à contribuição da maior capacidade do agregado reciclado. A redução da eficiência estrutural verificada para o B100RHD (23,6 m) resulta do aumento de resistência a partir de uma dada percentagem de substituição não compensar o incremento de massa volúmica. Neste caso, a capacidade do betão é condicionada pela resistência da argamassa, que em função da relação a/c utilizada atinge o seu valor máximo. Por outras palavras, existe uma maior influência da contribuição do agregado para percentagens de substituição até 50%. De facto isso pode ser demonstrado pela evolução verificada na eficiência estrutural aos 7 dias, onde para resistências inferiores de argamassa existe um aumento contínuo da eficiência estrutural. A mistura BHD20RM apresenta uma eficiência estrutural similar à registada para o betão de referência (BRHD). Uma justificação possível é o facto de a adição de 20% de RLM ser demasiado pequena para que ganhe expressão na massa volúmica e na resistência à compressão (Quadro 4.26). Porém, quando se substituiu 50% do agregado leve Leca HD por RLM, registou-se um decréscimo de 2,3% da massa volúmica e 5,5% na resistência à compressão comparativamente ao betão de referência, o que conduz a uma redução de 3,3% na eficiência estrutural.

Por último, pode concluir-se que a utilização de agregados reciclados conduz a betões de maior eficiência estrutural, ou seja, o aumento observado da massa volúmica foi compensado pelo aumento obtido na resistência à compressão.

À semelhança das equações apresentadas em 4.2.2., são apresentados no Quadro 4.26 as percentagens de agregado leve de origem (Leca HD e Leca M) e de argamassa para cada nível de substituição das misturas produzidas, quer para a série BHD, quer para a série BM.

Quadro 4. 26 - Percentagem de agregado e argamassa para cada nível de substituição

Misturas	Percentagem de agregado e argamassa para cada nível de substituição (%)				
	Leca HD	Leca M	Argamassa	RLHD	RLM
<i>BRHD</i>	35,0	-	65,0	0	0
<i>BHD20RHD</i>	30,5	-	69,5	20	0
<i>BHD50RHD</i>	23,8	-	76,2	50	0
<i>B100RHD</i>	12,6	-	87,4	100	0
<i>BHD20RM</i>	28,0	4,4	67,6	0	20
<i>BHD50RM</i>	17,5	11,0	71,5	0	50
<i>BRM</i>	-	35,0	65,0	0	0
<i>BM20RM</i>	-	32,4	67,6	0	20
<i>BM50RM</i>	-	28,5	71,5	0	50
<i>B100RM</i>	-	22,1	78,0	0	100
<i>BM20RHD</i>	2,5	28,0	69,5	20	0
<i>BM50RHD</i>	6,3	17,5	76,2	50	0

O Quadro 4.26 mostra que a substituição de agregado leve pelo agregado reciclado RLHD equivale à realização de uma redução progressiva do volume de agregado leve no betão e conseqüente aumento do volume de argamassa no mesmo. De forma análoga, a substituição de agregado leve pelo agregado reciclado RLM resulta, uma vez mais, num decréscimo do volume de agregado leve, acompanhado pelo crescimento do volume de argamassa no betão. Porém, a substituição deste tipo de agregado reciclado implica uma redução menos acentuada do volume de agregado leve no betão, comparativamente ao agregado reciclado RLHD.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam a influência da taxa de substituição e massa volúmica seca na resistência à compressão aos 28 dias da série BHD. A Figura 4.21 mostra o efeito que a taxa de substituição tem na massa volúmica seca das misturas da série BHD.

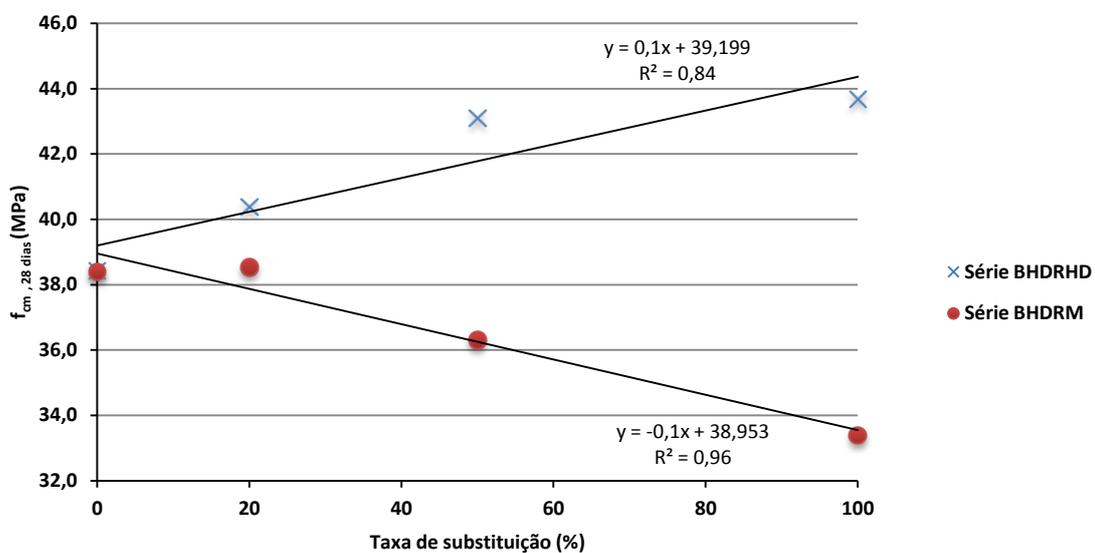


Figura 4.18 - Influência da taxa de substituição na resistência à compressão aos 28 dias relativo à série BHD

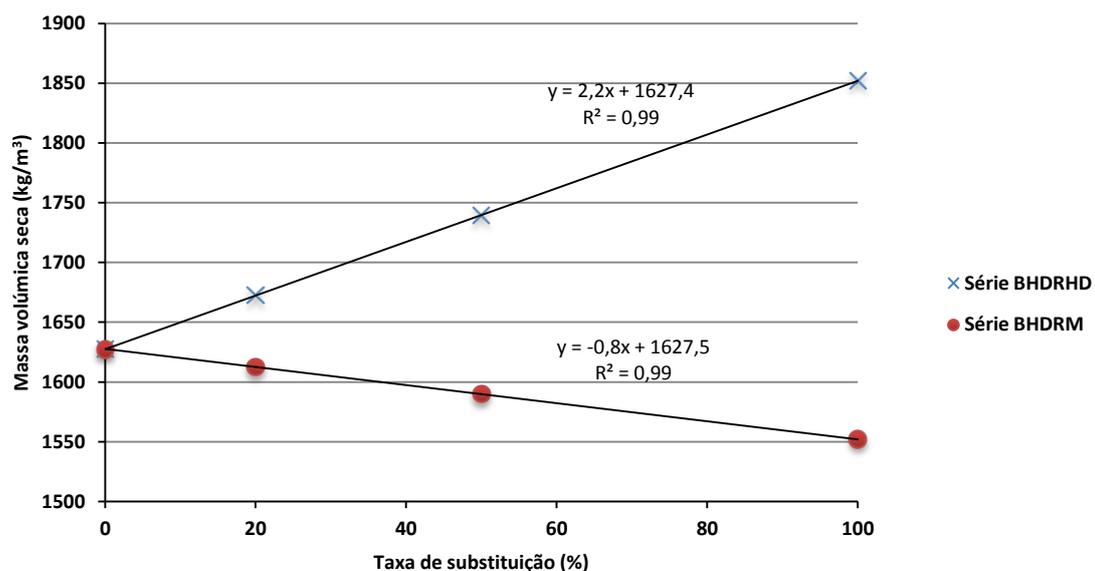


Figura 4.19 - Influência da taxa de substituição na massa volúmica seca da série BHD

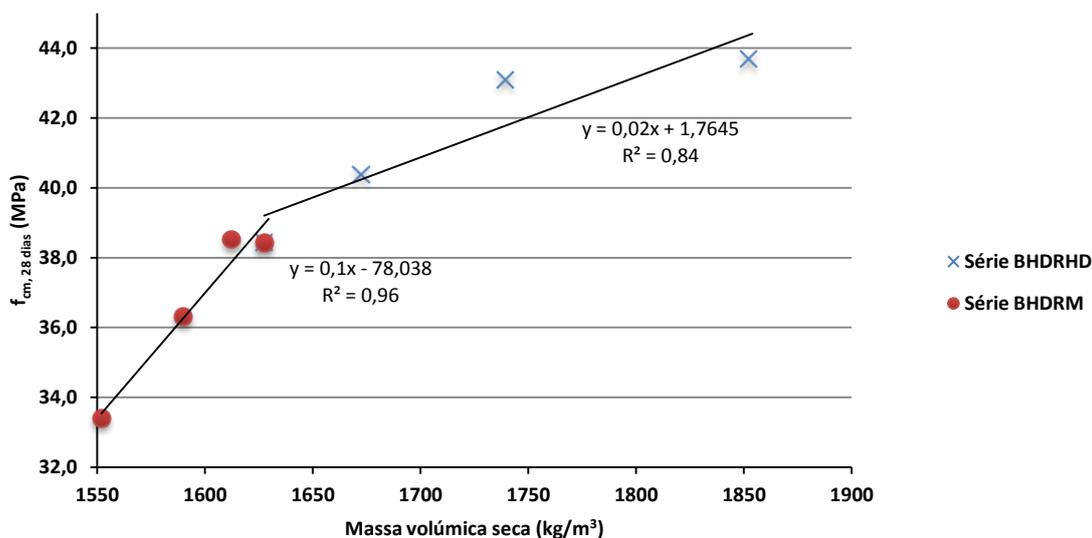


Figura 4. 20 - Influência da massa volúmica seca na resistência à compressão aos 28 dias da série BHD

Para a substituição de agregado leve Leca HD por RLM, existe uma maior correlação da resistência à compressão aos 28 dias com as diferentes taxas de substituição ($R^2 \cong 0,96$) comparativamente à substituição por RLHD ($R^2 \cong 0,84$), o que revela que o RLM tem uma maior influência na resistência à compressão da série BHD, conforme indica a Figura 4.20. Esta maior influência tem como principal justificação a constituição do betão de origem BOM, dado que se trata de um betão de enchimento (desprovido de finos), e o facto de se terem considerado argamassas de fraca resistência, com relação a/c = 0,55. Para argamassas de menor compacidade, seria de esperar correlações mais elevadas para a série BHD.

Ao contrário do que sucede com a substituição por RLHD, nota-se um decréscimo da tensão média de ruptura com a substituição por RLM. A diminuição da resistência à compressão observada aquando da substituição de agregado leve Leca HD por RLM deve-se à menor capacidade resistente do agregado reciclado. Por outro lado, o aumento da resistência à compressão observado para as misturas da série BHD com RLHD resulta do aumento percentual de argamassa e da maior capacidade resistente do agregado reciclado introduzido.

Reinhardt e Kümmel (1999) observaram um decréscimo desta propriedade com a redução da relação a/c, sendo que, para a mesma relação, a exclusão de agregados finos também resultou na redução da resistência à compressão. Não obstante, também os resultados obtidos em EuroLightCon R26 (2000) apresentam uma tendência de redução da resistência à compressão com a diminuição da relação a/c.

A Figura 4.19 mostra uma correlação igual ($R^2 \cong 0,99$) para ambas as substituições de agregados reciclados (RLHD e RLM). Os valores obtidos confirmam os resultados que relacionam a resistência à compressão aos 28 dias da série BHD com a taxa de substituição, uma vez que, à

medida que se incorpora RHD, a massa volúmica apresenta um crescimento acentuado. O aumento resulta do acréscimo percentual de argamassa que é introduzida aquando da substituição ($\rho_{\text{RLHD}} = 1735 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{Leca HD}} = 1070 \text{ kg/m}^3$). Não obstante e como referido, a substituição por RLM implica a introdução de um agregado de capacidade inferior na mistura, que apresenta uma massa volúmica seca inferior à do agregado leve de origem ($\rho_{\text{RLM}} = 878 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{Leca HD}} = 1070 \text{ kg/m}^3$). De acordo com o Quadro 4.26, embora a substituição por este tipo de agregado reciclado resulte num aumento percentual do volume de argamassa na mistura, a menor massa volúmica seca do agregado reciclado resulta na redução desta propriedade com o aumento da taxa de substituição.

Em ambas as substituições se notou um aumento da tensão média de ruptura das misturas da série BHD com o aumento da massa volúmica, tendo sido mais acentuado para o RLM. Estes resultados corroboram as anteriores conclusões.

A utilização dos dois tipos de agregado reciclado (RLHD e RLM) conduziu a alterações significativas da resistência à compressão nas misturas da série BHD, pelo que se optou por diferenciar a aplicação de cada tipo de agregado reciclado segundo as Figuras 4.21 e 4.22, onde é mostrada a influência que o uso de RLHD e RLM tem nas misturas da série BHD, respectivamente.

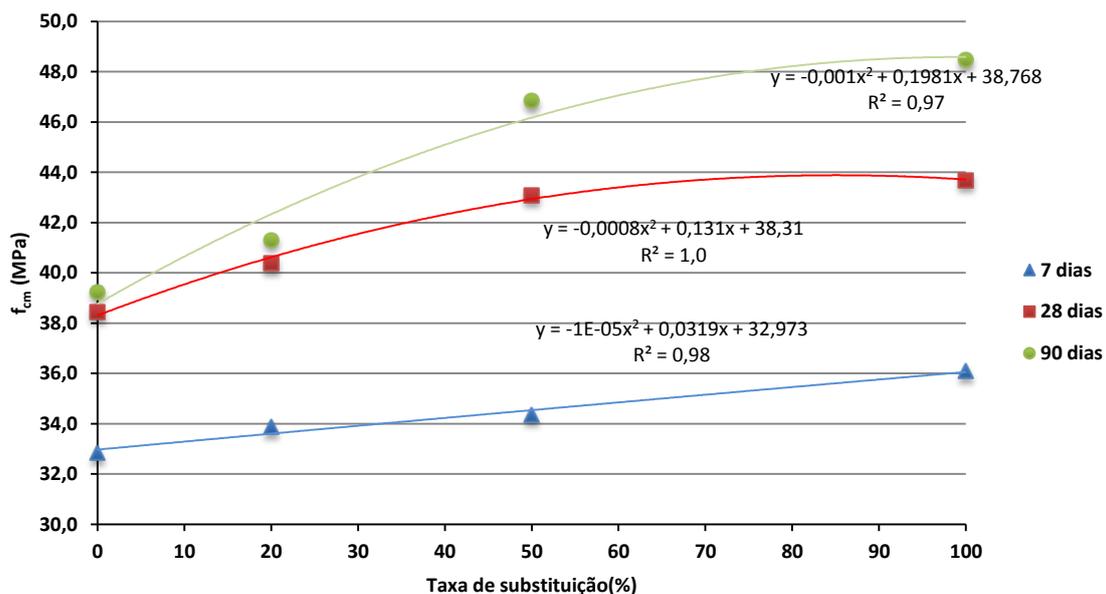


Figura 4. 21 - Influência da adição de RLHD na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BHD

A Figura 4.21 apresenta uma tendência de crescimento da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de RLHD e com a idade de cura.

Aos 7 dias, verifica-se uma reduzida evolução da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição dado que a argamassa apresenta uma menor maturidade e, como tal, a diferença entre agregados apresenta uma menor importância na resistência dos betões.

À medida que aumenta a idade e a taxa de substituição observa-se que a resistência à compressão do betão começa a ser limitada pela capacidade da argamassa. Para uma taxa de substituição até 20%, verifica-se que a resistência do betão é essencialmente condicionada pela capacidade do agregado. No entanto, a partir de 50% de substituição, a resistência à compressão apresenta uma evolução mais acentuada devido à contribuição mais importante da capacidade da argamassa, que deixa de ser tão condicionada pela resistência mais elevada dos agregados reciclados.

Em argamassas de razão $a/c = 0,55$, Bogas (2011) obtém resistências à compressão de cerca de 45 MPa, o que é da ordem de grandeza do valor da tensão média de ruptura obtido para o B100RHD (48,5 MPa). Por outras palavras, a evolução da resistência do betão B100RHD é truncada pela capacidade máxima da argamassa.

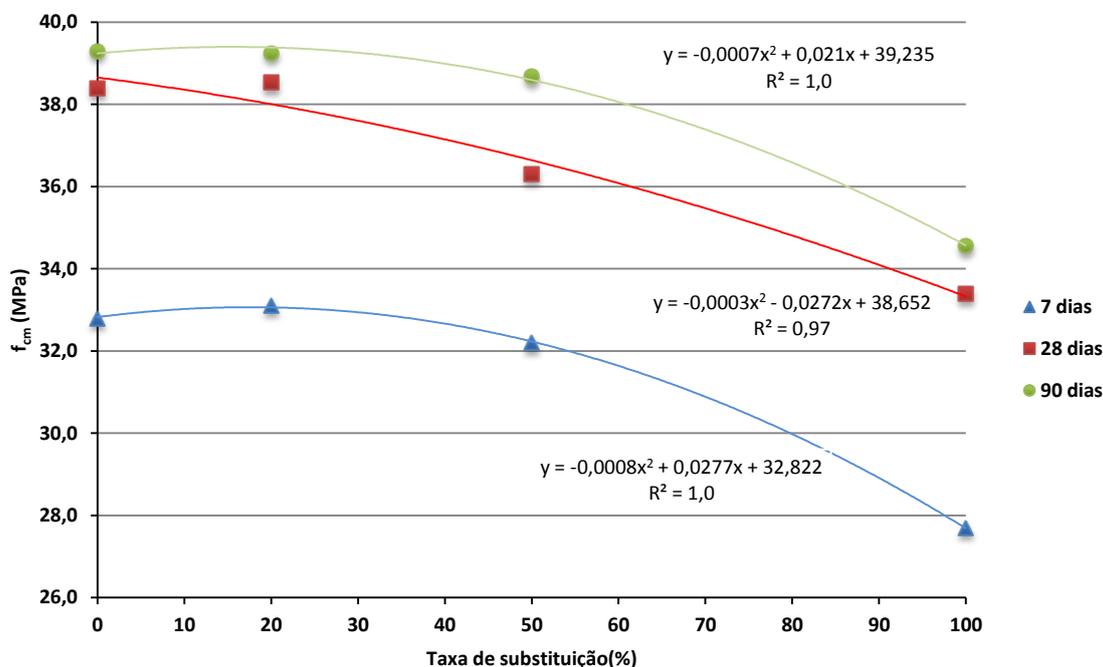


Figura 4.22 - Influência da substituição de RLM na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BHD

Ao contrário do observado para a substituição de agregado leve Leca HD por RLHD, a Figura 4.22 apresenta um decréscimo da resistência à compressão da série BHD com o aumento da taxa de substituição de RLM para todas as idades ensaiadas, sendo mais acentuado aos 7 e 28 dias. A justificação para a maior influência da taxa de substituição na resistência à compressão aos 7 e 28 dias resulta da contribuição dos agregados mais fracos ser maior na limitação da resistência à compressão à medida que evolui a maturidade da argamassa. Conforme o Quadro 4.26, a substituição de agregado leve por RLM origina uma redução menos acentuada do volume de agregado na mistura e, sendo a capacidade resistente do agregado reciclado RLM inferior à da

argamassa, o aumento da taxa de substituição de RLM resulta na redução da resistência à compressão das misturas da série BHD compostas pelo respectivo agregado reciclado.

Segundo Bogas (2011), os efeitos do incremento da dosagem do agregado dependem do tipo de agregado e nível de resistência considerado. Nos BEAL usualmente utilizados, onde a capacidade resistente dos agregados é inferior à da argamassa, ao aumentar o volume de agregado utilizado na mistura, o autor observou um decréscimo de resistência da mesma, sendo este aumento tanto menor quanto melhor for a qualidade do agregado introduzido. Não obstante, Bogas (2011) refere que não é apenas a quantidade de agregado utilizado mas também o nível de resistência e a “resistência limite” que influem na resistência dos BEAL.

Porém, à semelhança do verificado para a eficiência estrutural da mistura BHD20RM, o valor da tensão média de ruptura foi ligeiramente superior ao registado para o betão de referência. Este ligeiro aumento resulta do facto de a adição de 20% de RLM não ter grande significado na massa volúmica e na resistência à compressão. De facto, a substituição de 20% de RLM corresponde a uma substituição efectiva de apenas 13% de agregado, dado que o restante corresponde à pasta aderente ao agregado reciclado (Quadro 4.26).

O Quadro 4.27 mostra os valores da resistência à compressão relativos aos dois betões de referência, nomeadamente o BRHD e o BRM, para a série BHD. Assim, torna-se perceptível o/a incremento / redução da resistência à compressão aquando da substituição do agregado leve Leca HD pelos agregados reciclados.

Quadro 4. 27 - Resistência à compressão da série BHD relativa aos betões de referência

Amassadura	Taxa de incorporação (%)	7 dias		28 dias		90 dias	
		$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)
<i>BRHD</i>	0	0,0	104,8	0,0	100,6	0,0	89,4
<i>BHD20RHD</i>	20	3,1	111,2	5,1	110,8	5,2	99,2
<i>BHD50RHD</i>	50	4,7	114,3	12,1	125,0	19,3	125,9
<i>B100RHD</i>	100	9,9	125,0	13,7	128,0	23,4	133,8
<i>BHD20RM</i>	20	0,8	106,4	0,3	101,1	0,0	89,3
<i>BHD50RM</i>	50	-2,0	100,7	-5,5	89,5	-1,5	86,6

As Figuras 4.23 e 4.24 ilustram a diferença percentual da resistência à compressão ao longo do tempo, das misturas da série BHD face à resistência à compressão, dos betões de referência BRHD e BRM, respectivamente.

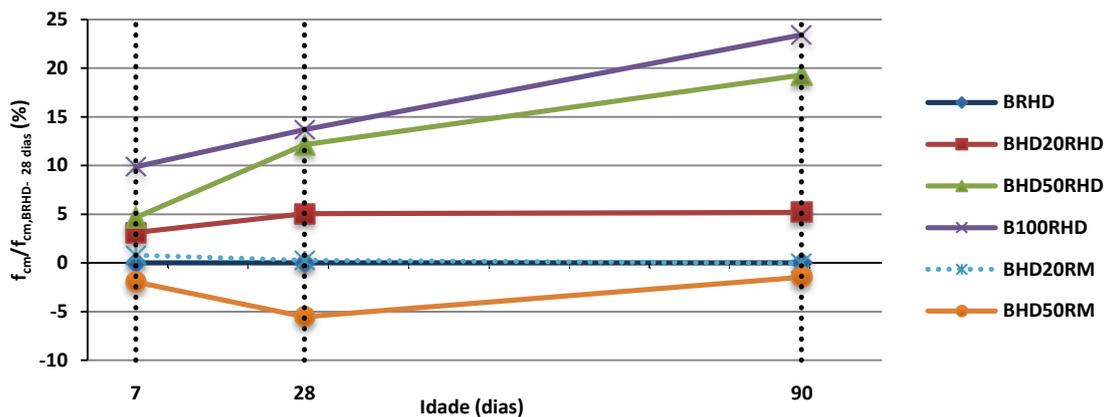


Figura 4. 23 - Evolução da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRHD

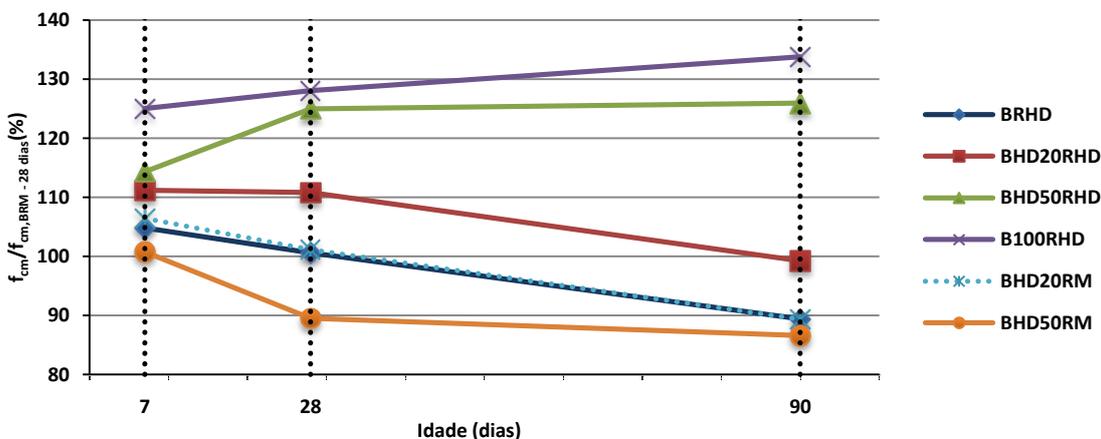


Figura 4. 24 - Evolução da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRM

No que concerne à evolução da resistência à compressão relativa ao betão BRHD, nota-se um incremento desta propriedade com a idade de ensaio em todas as misturas da série BHD cujo agregado reciclado corresponde ao RLHD. À semelhança do concluído, verificou-se uma variação mais acentuada desta propriedade dos 7 aos 28 dias, que deriva da maior limitação imposta pelo agregado em idades mais avançadas. Porém, as misturas com agregado reciclado RLM demonstram uma redução desta propriedade face ao betão de referência BRHD, encontrando-se a justificação intrinsecamente relacionada com a menor qualidade do agregado RLM. O respectivo agregado não só apresenta uma resistência ao esmagamento inferior à do agregado leve Leca HD, como aquando da sua utilização o valor percentual da introdução de argamassa na mistura é inferior ao conferido pelo RLHD (37% face aos 64%), conforme indicam as equações [4.1] e [4.2]. Desta forma, considera-se os resultados obtidos dentro do que seria expectável.

4.4.1.2. Série BM

4.4.1.2.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.28, são apresentados os valores médios de resistência à compressão obtidos para a série BM.

De igual modo, todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores médios são apresentados no ANEXO J.

Quadro 4. 28 - Resistência média à compressão da série BM

Amassadura	Taxa de substituição (%)	ρ_{seca} (kg/m ³)	7 dias			28 dias			90 dias						
			f_{cm} / ρ_{seca}	S_{7dias}	ρ_{seca}	f_{cm} / ρ_{seca}	S_{28dias}	f_{cm}	S_{fc}	CV_{fc}	f_{cm}	S_{fc}	CV_{fc}		
			(10 ³ m)	(10 ³ m)	(10 ³ m)	(10 ³ m)	(10 ³ m)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)		
BRM	0	1453	11,0	1,0	13,2	1,4	16,0	1,48	9,26	19,2	1,97	10,29	20,7	0,64	3,10
BM20RM	20	1473	14,7	0,8	17,0	1,0	21,6	1,25	5,77	25,1	1,43	5,71	26,5	0,61	2,31
BM50RM	50	1503	15,8	1,1	18,4	0,9	23,8	1,71	7,17	27,7	1,33	4,79	30,5	1,52	4,98
B100RM	100	1552	17,8	0,9	21,5	1,1	27,7	1,42	5,12	33,4	1,71	5,13	34,6	1,65	4,77
BM20RHD	20	1533	14,7	0,4	17,2	0,7	22,6	0,61	2,68	26,4	1,00	3,80	28,6	2,01	7,02
BM50RHD	50	1653	14,6	1,3	18,6	0,9	24,2	2,14	8,83	30,7	1,55	5,06	32,8	0,19	0,59

A Figura 4.25 apresenta a evolução da resistência à compressão das misturas da série BM ao longo das idades pré-definidas (7, 28 e 90 dias). De forma análoga à série BHD, todas as misturas da série BM apresentaram um crescimento desta propriedade com a idade, tendo sido observada novamente uma evolução menos acentuada a partir dos 7 dias.

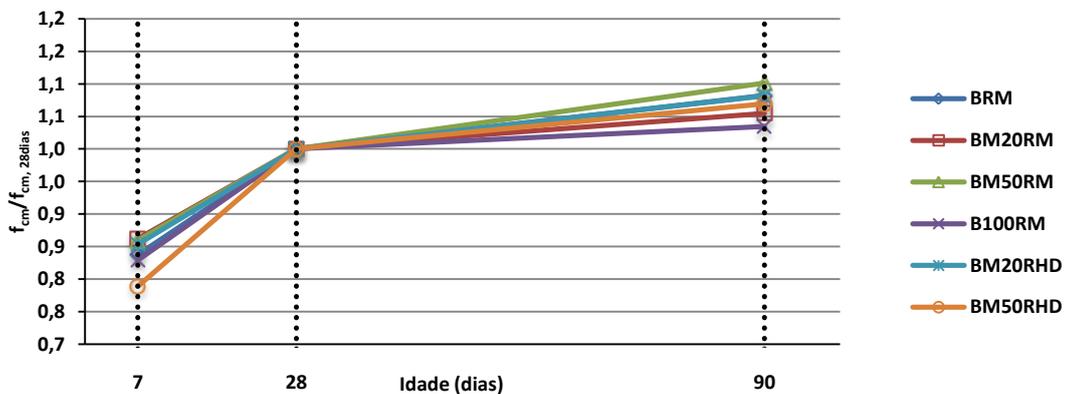


Figura 4. 25 - Evolução da resistência à compressão da série BM

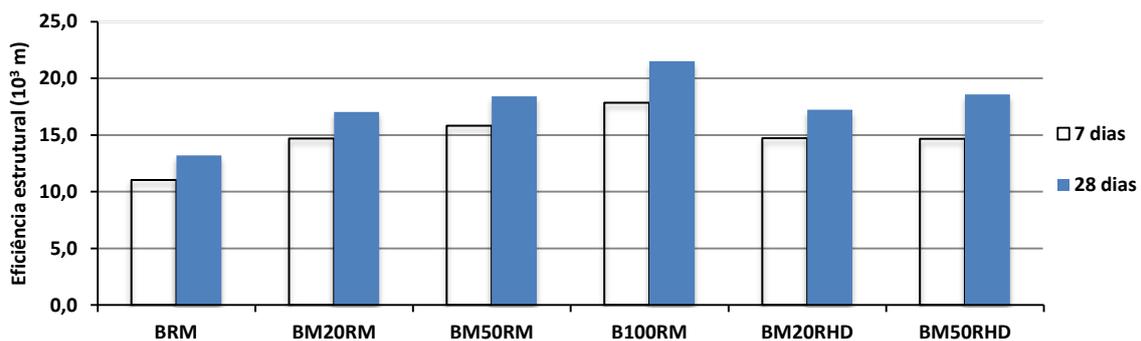


Figura 4. 26 - Eficiência estrutural aos 28 dias da série BM

Ao contrário do registado para a série BHD, a Figura 4.26 evidencia o crescimento da eficiência estrutural com o aumento da taxa de substituição, para todas as misturas constituídas pelo agregado reciclado RLM. Estes resultados derivam directamente do incremento de massa volúmica, conseqüente da redução global da porosidade do betão. Por outro lado, a reduzida resistência do betão de referência (BRM) permite, aquando da substituição de agregado leve por RLM, um incremento muito significativo da resistência à compressão. Este aumento deve-se à maior capacidade resistente do agregado reciclado (resultante do efeito de confinamento da pasta em torno do agregado) e à maior percentagem de pasta incorporada na mistura (Quadro 4.26).

No que concerne à incorporação de RLHD nas misturas da série BM, o incremento de resistência observado para a mesma taxa de substituição foi superior ao registado aquando da substituição pelo RLM, devido quer à maior percentagem de argamassa que a substituição deste tipo de agregado reciclado introduz na mistura, quer à introdução de um agregado reciclado cujo agregado leve de origem apresenta uma maior capacidade resistente.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam a influência que a taxa de substituição e a massa volúmica seca têm na resistência à compressão aos 28 dias da série BM. A Figura 4.29 mostra o efeito que a taxa de substituição tem na massa volúmica seca das misturas da série BM.

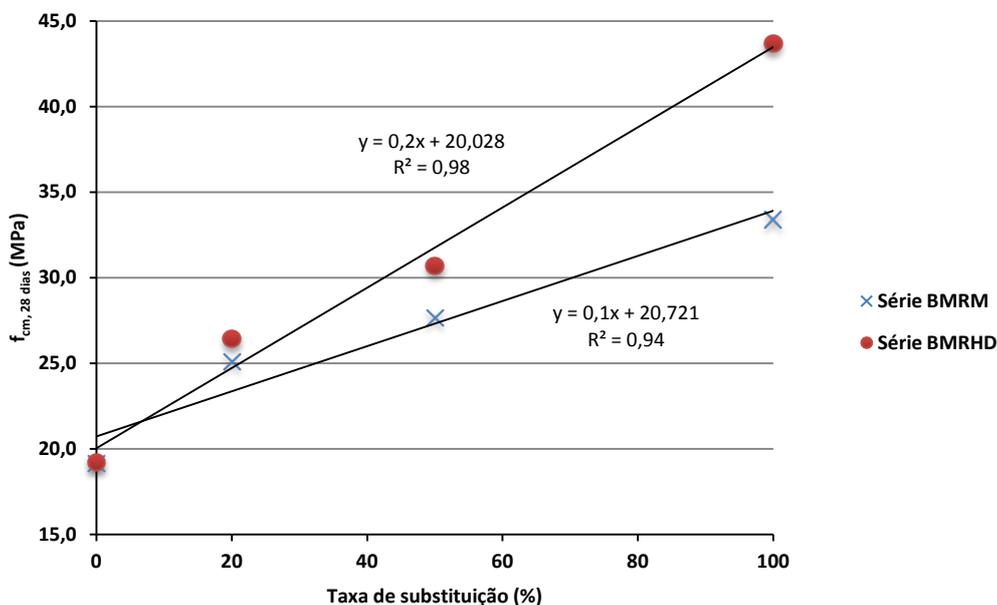


Figura 4. 27 - Influência da taxa de substituição na resistência à compressão aos 28 dias relativo à série BM

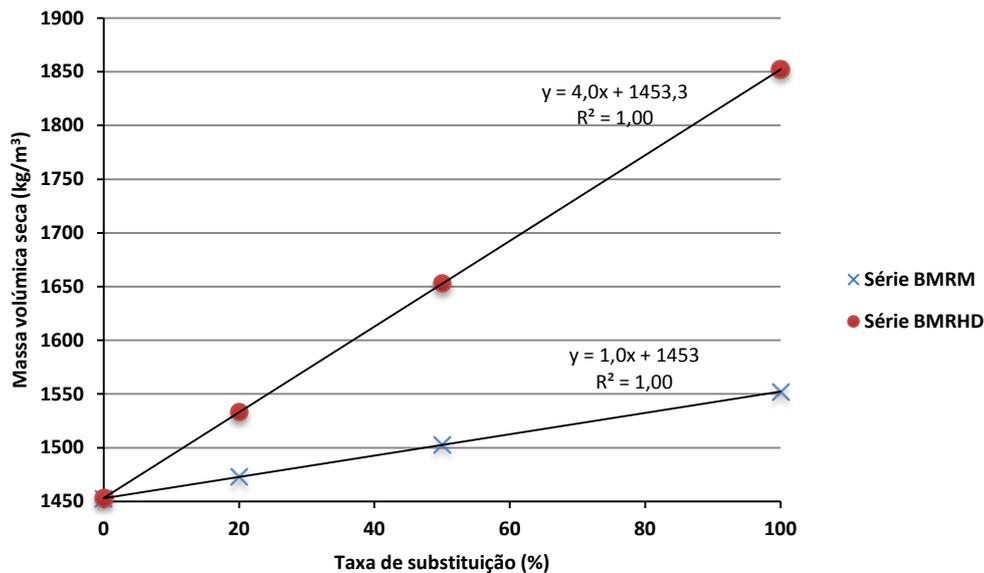


Figura 4. 28 - Influência da taxa de substituição na massa volúmica seca da série BM

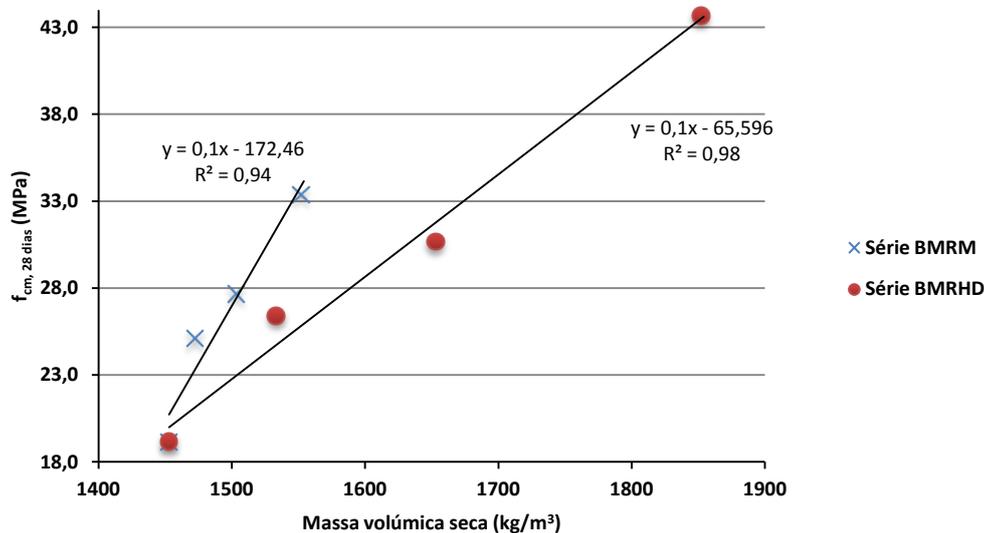


Figura 4. 29 - Influência da massa volúmica seca na resistência à compressão aos 28 dias da série BM

A Figura 4.27 mostra existir uma elevada correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a taxa de substituição, nas misturas da série BM. Porém, a taxa de substituição de agregado leve Leca M por RLHD mostrou uma correlação ligeiramente superior com a resistência à compressão aos 28 dias ($R^2 \cong 0,98$) comparativamente à substituição por RLM ($R^2 \cong 0,94$). Na origem da maior influência na resistência à compressão aquando da substituição por RLHD encontra-se o aumento percentual de argamassa que o recurso a este tipo de agregado provoca na mistura e a melhoria das características do agregado leve de origem. Não obstante, a incorporação de RLM também apresenta uma tendência de crescimento da resistência à compressão, devido novamente ao aumento percentual de pasta e à maior capacidade resistente do agregado reciclado (resultante do efeito de confinamento da pasta em torno do agregado leve).

As tendências observadas na Figura 4.28 corroboram as conclusões a que se chega quanto à relação entre a resistência à compressão aos 28 dias da série BM e a taxa de substituição. O crescimento observado da massa volúmica seca deriva do acréscimo percentual de argamassa / pasta aquando da substituição de agregado leve Leca M pelos agregados reciclados RLHD / RLM, sendo este crescimento mais expressivo para a substituição pelo RLHD, dada a maior massa volúmica seca comparativamente ao RLM ($\rho_{RLM} = 877,52 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{RLHD} = 1735 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Leca M} = 594 \text{ kg/m}^3$) bem como a maior massa volúmica do agregado de origem.

A Figura 4.29 demonstra a elevada contribuição que o acréscimo da massa volúmica seca confere à resistência à compressão aos 28 dias das misturas da série BM. O aumento de resistência observado para a respectiva série foi muito superior ao registado para a série BHD, dada a menor resistência inicial do betão leve não estrutural. Desta forma, ao ser substituído o agregado leve Leca M por agregado reciclado, o acentuado crescimento da resistência à compressão resulta da maior mobilização da resistência da argamassa assim como do aumento da resistência característica do agregado, verificando-se um crescimento mais acentuado aquando da utilização do RLM. Por outro lado, dada a maior percentagem de argamassa introduzida aquando da utilização do RLHD (Quadro 4.26), bem como a maior resistência característica do agregado reciclado, patente em 4.2.5., observou-se, conforme seria expectável, que as misturas da série BM com RHD atingiram valores de resistência superiores às registadas para as misturas da mesma série mas cujo agregado reciclado empregue foi o RLM.

À semelhança do efectuado para a série BHD, optou-se por diferenciar, consoante as idades de ensaio pré-definidas, a influência que a incorporação dos dois tipos de agregados reciclados (RLHD e RLM) tem nas misturas da série BM, segundo as Figuras 4.30 e 4.31.

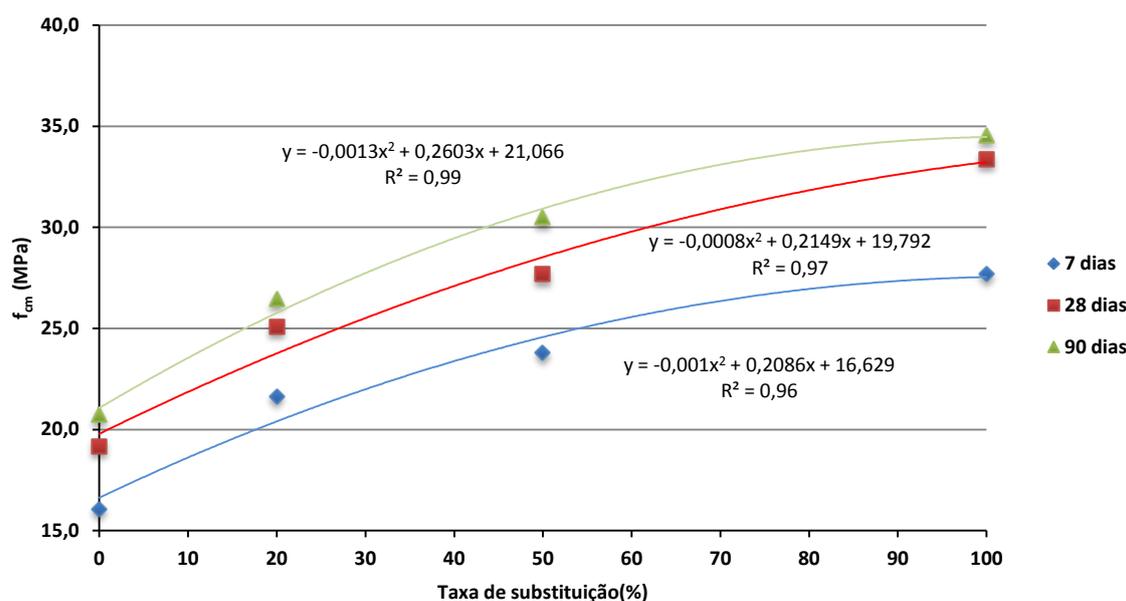


Figura 4. 30 - Influência da substituição de RLM na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BM

A Figura 4.30 mostra que, para todas as idades ensaiadas, à medida que se substitui agregado leve M por RLM, o valor da tensão média de ruptura das misturas da série BM tende a crescer, em concordância com todas as anteriores análises. Observa-se que é aos 90 dias que a resistência à compressão tende a evoluir de forma mais expressiva. Na origem deste resultado, encontra-se o facto de ser atingido, por parte das misturas da série BM, o patamar de resistência dos agregados. Assim, conclui-se que o betão BM se encontra muito limitado ao nível da sua resistência potencial.

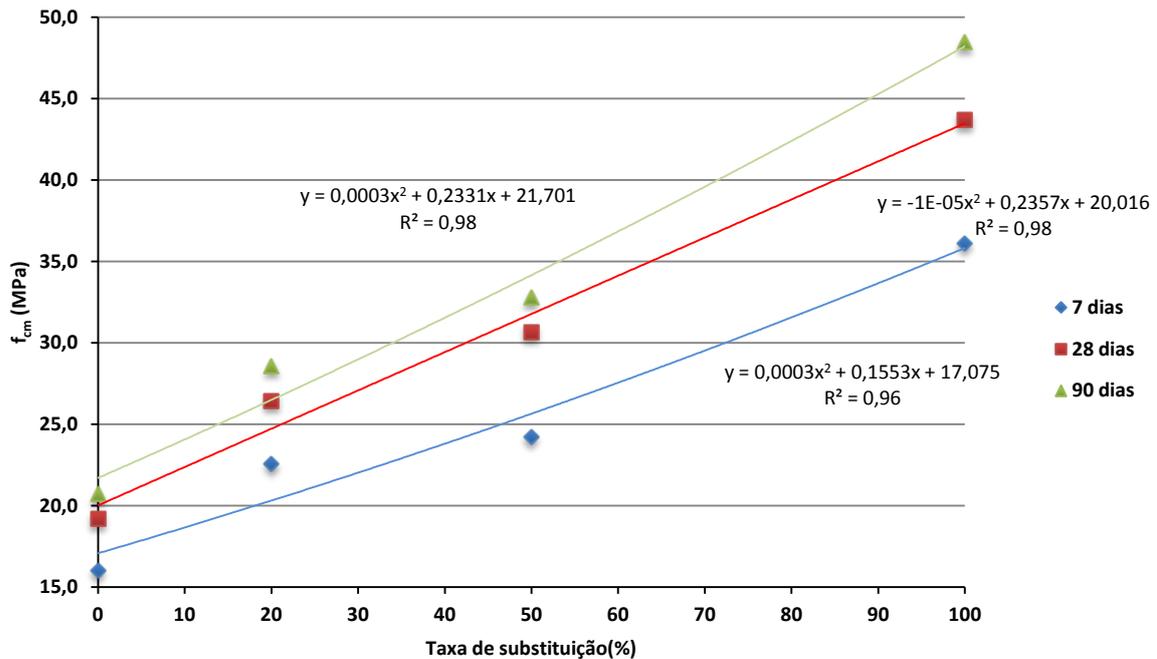


Figura 4.31 - Influência da substituição de RLHD na resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias da série BM

De igual modo, aquando da substituição de agregado leve Leca M por RLHD, a resistência à compressão das misturas da série BM também mostrou uma tendência de crescimento, mais expressiva aos 90 dias. Quando se substituiu 20% do agregado leve Leca M pelo agregado reciclado RLHD, observa-se um crescimento acentuado da resistência à compressão devido à maior capacidade do agregado reciclado RLHD e ao elevado acréscimo percentual de argamassa, resultante da incorporação do RLHD (Quadro 4.26).

À semelhança do efectuado para a série BHD, o Quadro 4.29 mostra os valores da resistência à compressão relativos aos dois betões de referência, nomeadamente BRHD e BRM, para a série BM. Desta forma, torna-se perceptível o/a incremento/redução da resistência à compressão aquando da substituição do agregado leve Leca M pelos agregados reciclados.

Quadro 4. 29 - Resistência à compressão da série BM relativa aos betões de referência

Amassadura	Taxa de incorporação (%)	7 dias		28 dias		90 dias	
		$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRHD}$ (%)	$\Delta_{BAR/BRM}$ (%)
BRM	0	-51,2	0,0	-50,2	0,0	-47,2	0,0
BM20RM	20	-34,1	34,9	-34,7	31,0	-32,6	27,7
BM50RM	50	-27,6	48,3	-28,0	44,5	-22,4	47,0
B100RM	100	-15,7	72,6	-13,1	74,3	-12,0	66,7
BM20RHD	20	-31,3	40,6	-31,2	38,0	-27,2	37,9
BM50RHD	50	-26,3	50,9	-20,1	60,2	-16,4	58,3

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam a relação percentual da resistência à compressão ao longo do tempo, das misturas da série BM comparativamente à resistência à compressão, dos betões de referência BRM e BRHD, respectivamente.

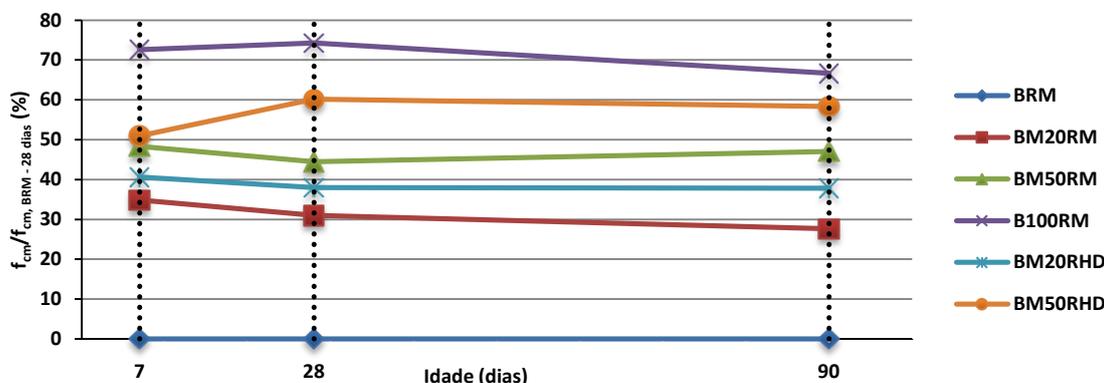


Figura 4. 32 - Evolução da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRM

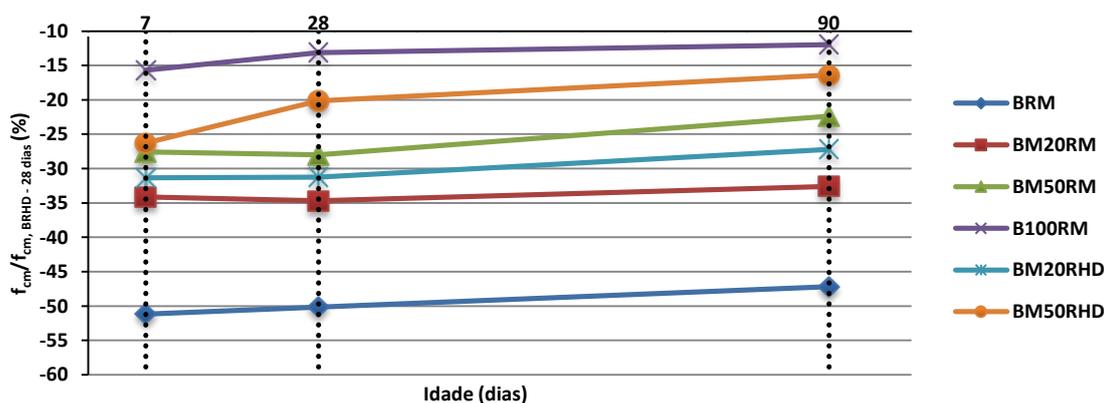


Figura 4. 33 - Evolução da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRHD

A evolução da resistência à compressão relativa ao betão BRHD mostra uma melhoria desta propriedade com a idade de ensaio, em todas as misturas da série BM. No entanto, à excepção da mistura BM50RHD que apresentou um crescimento de 10%, esta melhoria não chega a ultrapassar 4% relativamente ao betão de referência BRHD. Uma possível justificação reside na limitação da resistência característica dos agregados Leca M e RLM, que, face ao agregado leve Leca HD, é significativamente menor.

Por outro lado, aos 28 dias, a variação da resistência à compressão relativa ao betão de referência BRM mostrou, como era expectável, melhorias muito significativas. Todas as misturas demonstraram um elevado crescimento desta propriedade aos 7 dias de idade, sendo que, com o aumento da idade, à excepção da mistura BM50RHD, notou-se uma tendência decrescente, chegando a atingir-se uma redução de 7,2% na mistura BM20RM dos 7 para os 90 dias de ensaio. Já a mistura BM50RHD mostrou uma variação do crescimento da resistência à compressão de 7,4% dos 7 dias para os 90 dias, revelando um incremento final da resistência de 58,32%, comparativamente ao betão de referência BRM. Na génese deste incremento, encontra-se essencialmente a elevada percentagem de argamassa que a utilização de 50% de RLHD confere à respectiva mistura (BM50RHD), bem como a elevada resistência do próprio agregado reciclado.

4.4.2. Resistência à tracção por compressão diametral

A resistência à tracção por compressão diametral foi determinada de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2003), conforme referido em 3.7.2.2. Todas as misturas produzidas (incluindo os betões de origem) foram ensaiadas aos 28 dias.

De forma análoga ao efectuado no estudo da resistência à compressão, a avaliação dos valores obtidos é realizada segundo as duas séries de betões produzidos, BHD e BM.

4.4.2.1. Série BHD

4.4.2.1.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.30, são apresentados os valores médios de resistência à tracção por compressão diametral obtidos para a série BHD, aos 28 dias. Assim, são apresentados no respectivo quadro, os valores da massa volúmica seca (ρ_{seca} [kg/m³]), da tensão média de ruptura à tracção ($f_{ctm,sp}$ [MPa]), do desvio padrão (s_{fc} [MPa]) e, finalmente, do coeficiente de variação (CV_{fc} [%]). Todos os cálculos requeridos para a obtenção dos valores médios são apresentados no ANEXO M.

Quadro 4. 30 - Resistência média à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BHD

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Tracção por compressão diametral			Resistência à compressão		
			$f_{ctm,sp}$ (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)	f_{cm} (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)
<i>BRHD</i>	0	1628	3,0	0,46	15,44	38,4	1,73	4,51
<i>BHD20RHD</i>	20	1672	2,9	0,23	8,07	40,4	1,15	2,84
<i>BHD50RHD</i>	50	1739	3,5	0,55	15,67	43,1	0,72	1,66
<i>B100RHD</i>	100	1852	3,9	0,22	5,57	43,7	0,74	1,69
<i>BHD20RM</i>	20	1612	3,0	0,21	7,18	38,5	1,08	2,80
<i>BHD50RM</i>	50	1590	2,9	0,60	20,91	36,3	1,08	2,80

A Figura 4.34 mostra a influência que a taxa de substituição de agregado leve por agregado reciclado tem na resistência à tracção por compressão diametral das misturas da série BHD aos 28 dias.

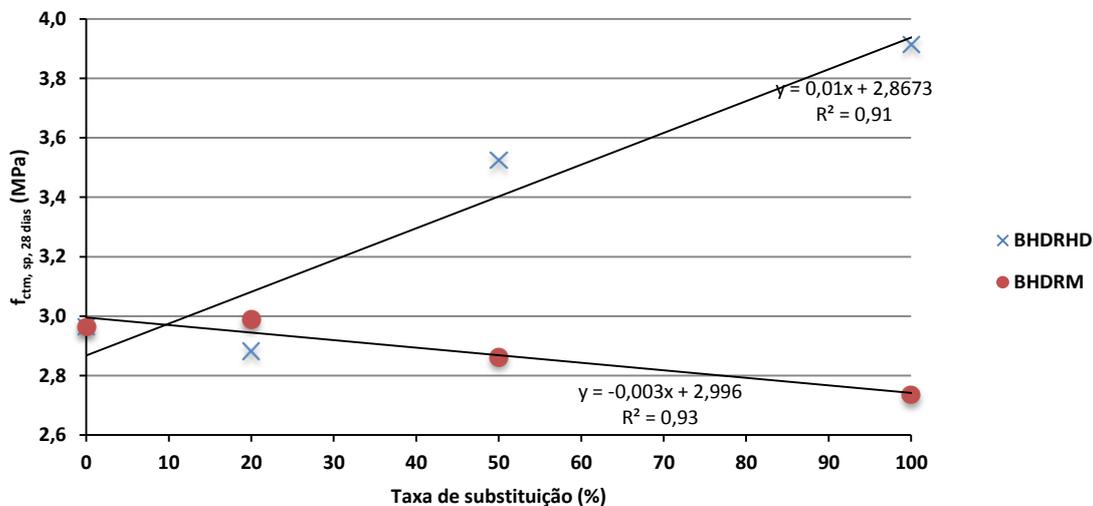


Figura 4. 34 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias relativo à série BHD



Figura 4. 35 - Superfície de ruptura das misturas da série BHD (ruptura pelo agregado em ambas as substituições por RLHD e RLM)

A análise da Figura 4.34 indicia uma clara evolução da resistência à tracção por compressão diametral à medida que se incrementa a substituição de agregado leve Leca HD por agregado reciclado RLHD, sugerindo existir uma elevada influência da taxa de substituição nesta propriedade ($R^2 \cong 0,91$). Conforme referido em 2.4.4., decorrendo a variação desta propriedade essencialmente da textura do agregado, da sua tensão de rotura à tracção e da qualidade da zona transição agregado-pasta, o recurso ao agregado reciclado RLHD promove o aumento da resistência à tracção por compressão diametral uma vez que, face ao agregado leve Leca HD, este possui uma forma mais angulosa assim como uma tensão de ruptura à tracção superior. Por outro lado, a substituição do agregado leve Leca HD por agregado reciclado RLM mostra um decréscimo da resistência à tracção por compressão diametral, apresentando também este uma elevada correlação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a taxa de substituição ($R^2 \cong 0,93$). Na origem desta redução, está novamente a forma do RLM, que é menos angulosa do que a do RLHD, e a sua capacidade resistente, que é inferior à da Leca HD. Não obstante, todas as misturas da série BHD apresentaram o mesmo modo de ruptura nos ensaio da resistência à tracção por compressão diametral, com a superfície de ruptura a atravessar os agregados (Figura 4.35). Assim, pode concluir-se que esta propriedade tende a ser essencialmente condicionada pela resistência limite à tracção do agregado.

A influência da massa volúmica seca na resistência à tracção por compressão diametral das misturas da série BHD é apresentada na Figura 4.36.

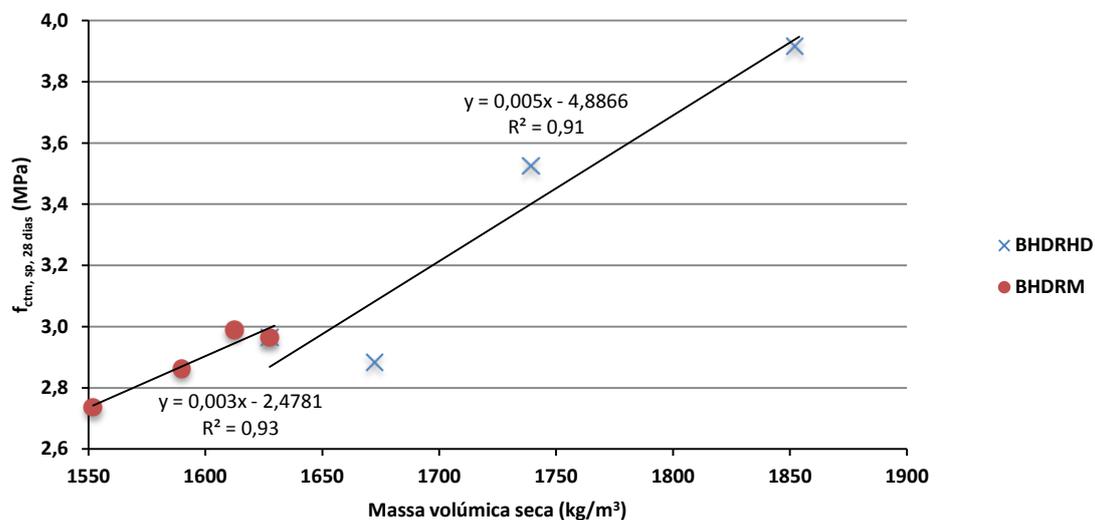


Figura 4. 36 - Influência da massa volúmica seca na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BHD

Nota-se, à semelhança do observado para a resistência à compressão, uma melhoria desta propriedade com o aumento da massa volúmica seca. Tal deriva do incremento de argamassa conferida pela substituição de agregado leve por agregado reciclado. Conforme indicado no Quadro 4.26, a quantidade de argamassa aderida, que é maior no RLHD do que no RLM, gera um aumento da rigidez do agregado (capacidade resistente do agregado reciclado superior à do agregado leve).

Não obstante, as elevadas correlações obtidas na Figura 4.35 resultam de ocorrerem modos de ruptura semelhantes em todas as misturas da série BHD.

A Figura 4.37 mostra a relação da resistência à tracção por compressão diametral com a resistência à compressão aos 28 dias da série BHD.

Finalmente, é apresentada na Figura 4.38 a comparação dos valores obtidos segundo a EN 1992-1-1 (2004) com os resultados obtidos na campanha experimental, sendo que, para a expressão definida na EN 1992-1-1 (2004), admitiu-se que a resistência à tracção axial é cerca de 90% de $f_{ctm,sp}$, conforme proposto por este documento. Todos os cálculos necessários para a obtenção da tensão média de ruptura à tracção por compressão diametral segundo a EN 1992-1-1 (2004) são apresentados no ANEXO M.

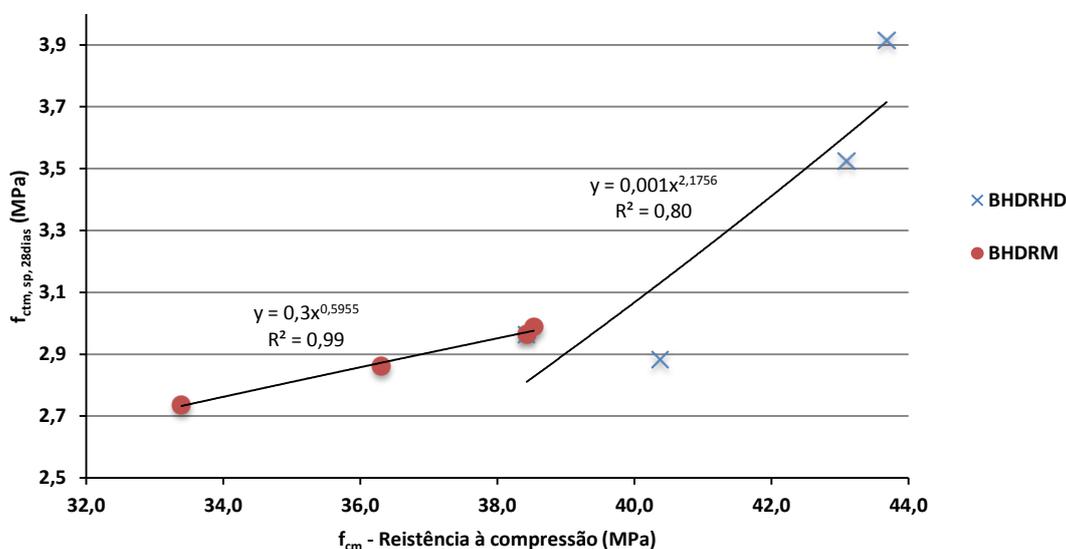


Figura 4. 37 - Resistência à tracção por compressão diametral versus resistência à compressão aos 28 dias da série BHD

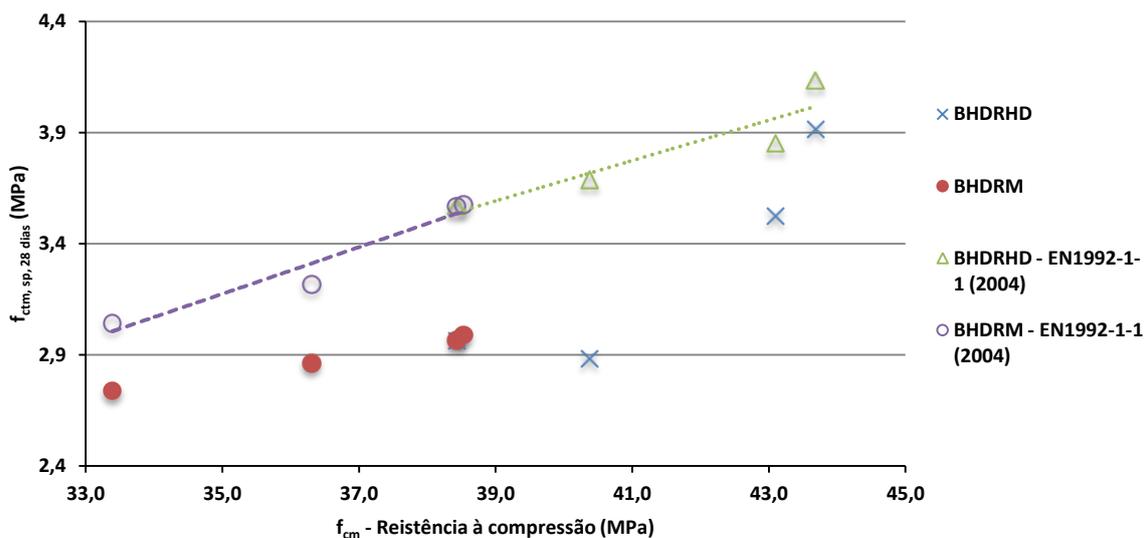


Figura 4. 38 - Resistência à tracção por compressão diametral versus resistência à compressão aos 28 dias da série BHD tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)

Conforme é possível constatar, observa-se uma correlação elevada entre estas propriedades aquando da substituição de agregado leve Leca HD por agregado reciclado RLM ($R^2 \cong 0,99$), justificada pela influência do agregado na resistência à tracção. Conforme demonstrado no Quadro (4.26) apresentado em 4.4.1.1., apesar de a substituição por RLM conduzir a um aumento da percentagem total de argamassa na mistura, a rigidez similar do agregado reciclado RLM, face ao agregado de origem Leca HD, limita a evolução da resistência à tracção.

Por outro lado, o maior crescimento notado para a substituição do agregado leve Leca HD pelo agregado reciclado RLHD resulta, não só da incorporação da argamassa na mistura, como também da maior capacidade do agregado reciclado.

A expressão proposta na EN 1992-1-1 (2004) conduz a estimativas não conservativas para os níveis de resistência observados na série BHD, apesar de prever tendências semelhantes na evolução de f_{ctm} versus f_{cm} . Face ao previsto na EN 1992-1-1 (2004), existe uma menor contribuição dos agregados na resistência à tracção por compressão diametral para um dado nível de resistência à compressão.

Em geral, pode-se concluir que a resistência à tracção por compressão diametral é fortemente condicionada pela resistência limite à tracção do agregado.

4.4.2.2. Série BM

4.4.2.2.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.31 mostra os valores médios de resistência à tracção por compressão diametral determinados para a série BM, aos 28 dias. De igual modo, todos os cálculos necessários para a determinação dos valores médios são apresentados no ANEXO M.

Quadro 4. 31 - Resistência média à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BM

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Tracção por compressão diametral			Resistência à compressão		
			$f_{ctm, SP}$ (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)	f_{cm} (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)
BRM	0	1453	1,5	0,03	1,71	19,2	1,97	10,29
BM20RM	20	1473	2,5	0,08	3,11	25,1	1,43	5,71
BM50RM	50	1503	2,4	0,20	7,98	27,7	1,33	4,79
B100RM	100	1552	2,7	0,13	4,65	33,4	1,71	5,13
BM20RHD	20	1533	2,5	0,05	2,00	26,4	1,00	3,80
BM50RHD	50	1653	2,8	0,47	17,11	30,7	1,55	5,06

Na Figura 4.39, apresenta-se o efeito que a taxa de substituição de agregado leve por agregado reciclado tem na resistência à tracção por compressão diametral das misturas da série BM aos 28 dias de idade.

Desempenho mecânico de betões de agregados leves provenientes
da trituração de pisos de betão leve

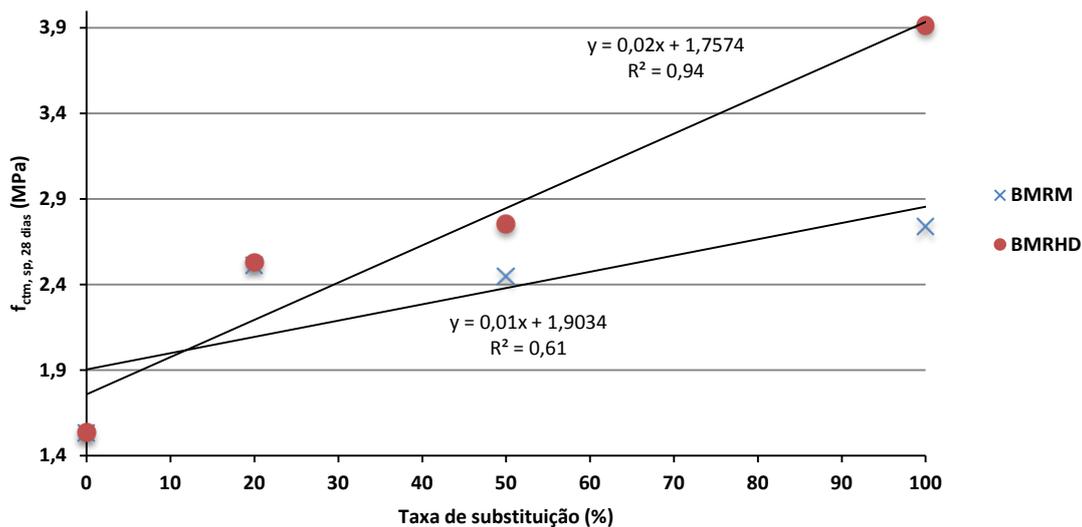


Figura 4. 39 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias relativo à série BM

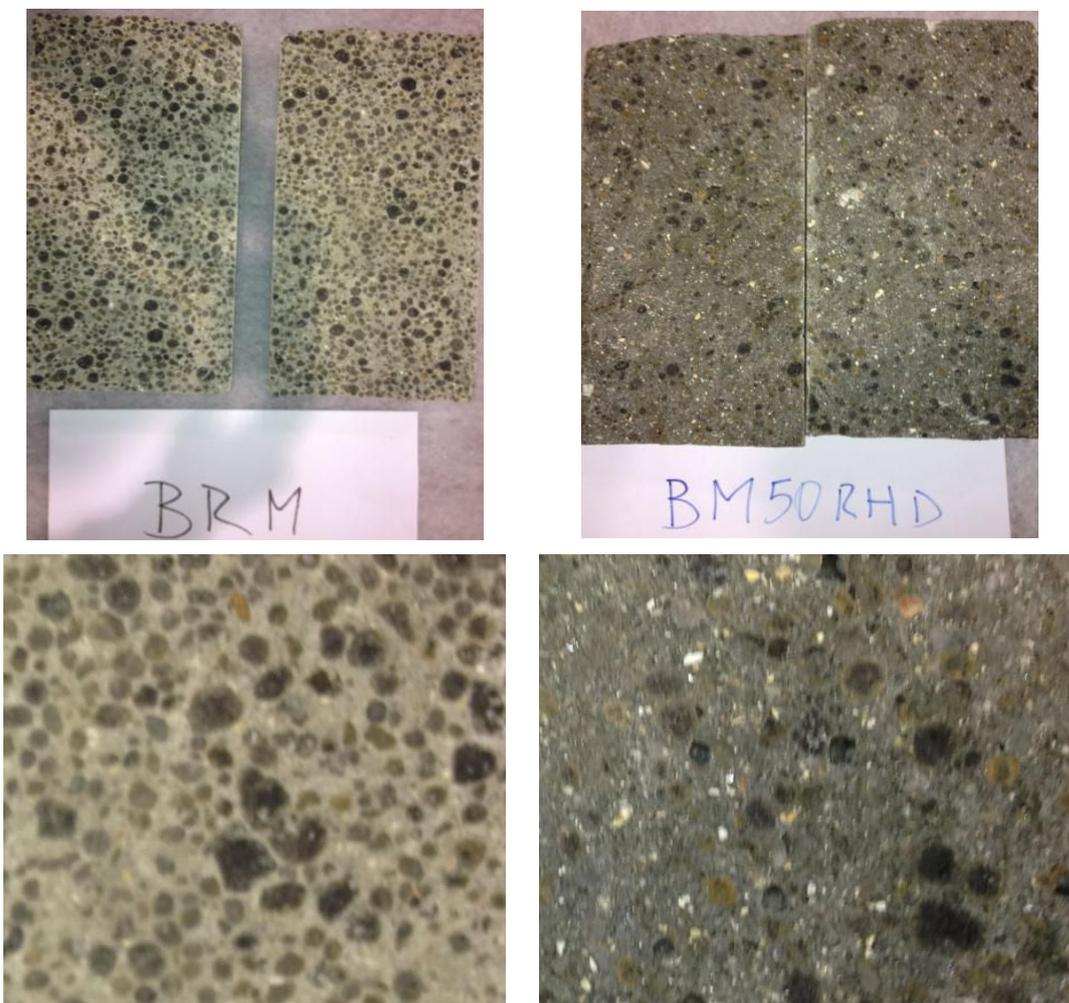


Figura 4. 40 - Superfície de ruptura das misturas da série BM (ruptura pelo agregado em ambas as substituições por RLHD e RLM)

À semelhança do observado para a resistência à compressão aos 28 dias na série BM, a Figura 4.39 mostra uma significativa evolução da resistência à tracção por compressão diametral conforme

se incrementa a substituição de agregado leve Leca M por agregado reciclado RLHD, apresentando uma elevada correlação ($R^2 \cong 0,94$). Conforme referido para a série BHD, a variação desta propriedade deriva fundamentalmente de três factores: a qualidade da zona de transição agregado-pasta; a textura do agregado; a tensão de rotura à tracção do agregado. No entanto, a principal causa do aumento da resistência à tracção por compressão diametral registado para a substituição do agregado leve M por agregado reciclado RLHD é a maior tensão de ruptura à tracção do agregado reciclado, face ao agregado leve Leca M. Não obstante, também o recurso ao agregado reciclado RLM apresentou um crescimento da resistência à tracção por compressão diametral, demonstrando no entanto existir uma menor correlação com a taxa de substituição ($R^2 \cong 0,61$). A razão pela qual o crescimento da resistência à tracção por compressão diametral não é tão significativo como aquando da substituição pelo RLHD é a menor resistência à tracção apresentada pelo RLM.

À semelhança da série BHD, todas as misturas da série BM tiveram o mesmo modo de ruptura, apresentando novamente uma superfície de ruptura pelos agregados (Figura 4.40). Desta forma, o modo de ruptura observado permite, uma vez mais, concluir que esta propriedade é condicionada pela resistência à tracção do agregado.

A Figura 4.41 mostra a influência que a massa volúmica seca tem na resistência à tracção por compressão diametral das misturas da série BM.

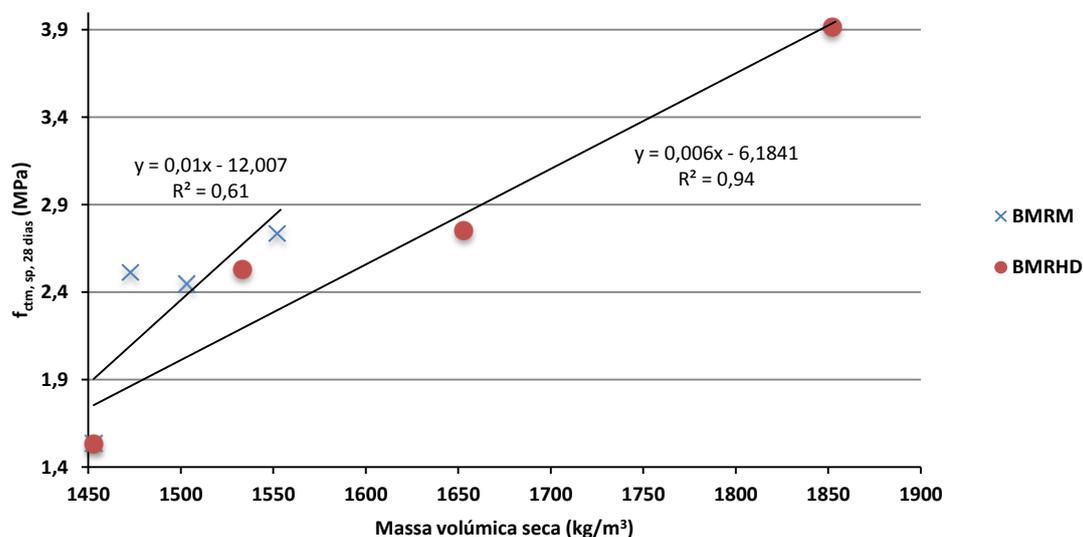


Figura 4. 41 - Influência da massa volúmica seca na resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias da série BM

A Figura 4.41 mostra uma melhoria da resistência à tracção por compressão diametral com o acréscimo da massa volúmica seca. Este fenómeno justifica-se pelo facto de a porosidade dos materiais estar relacionada com a sua massa volúmica e resistência mecânica. Neste caso, como existe um decréscimo da porosidade do agregado reciclado, quer devido ao incremento de pasta no agregado (RLM), quer devido às melhores características do agregado leve de origem (RLHD), aumentam a resistência e a massa volúmica dos betões com eles produzidos.

A Figura 4.42 apresenta a relação da resistência à tracção por compressão diametral com a resistência à compressão aos 28 dias da série BM.

Por último, é apresentada na Figura 4.43 a comparação entre os valores estimados segundo a expressão EN 1992-1-1 (2004) e os resultados registados na campanha experimental.

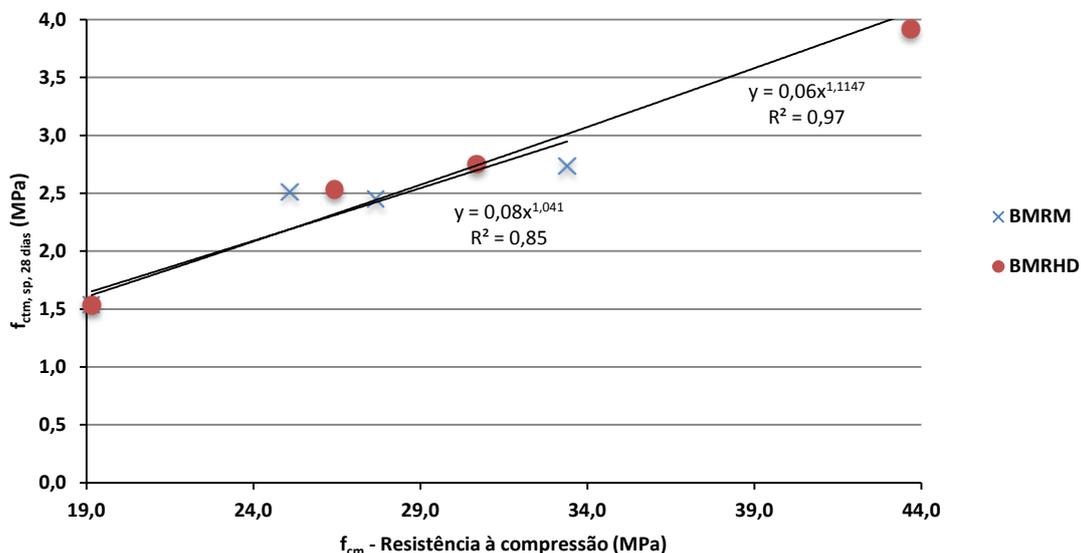


Figura 4. 42 - Resistência à tracção por compressão diametral versus resistência à compressão aos 28 dias da série BM

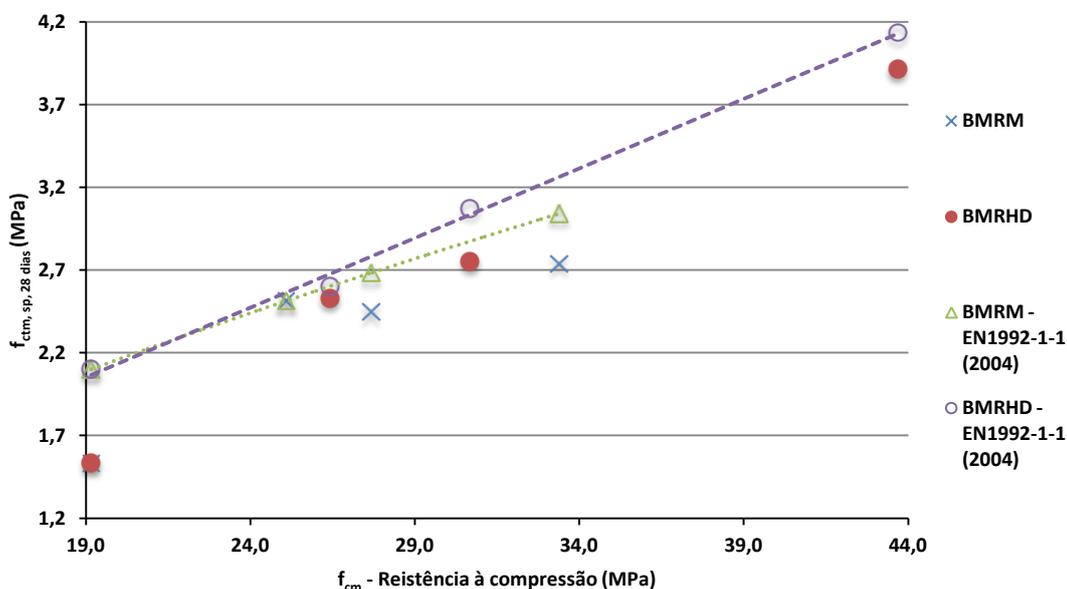


Figura 4. 43 - Resistência à tracção por compressão diametral versus resistência à compressão aos 28 dias da série BM tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)

Da análise da Figura 4.42, conclui-se existir uma correlação muito elevada entre a resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral relativamente à substituição de agregado leve Leca M por agregado reciclado RLHD ($R^2 \approx 0,97$), fundamentada pela constituição do próprio reciclado que condiciona a resistência limite à tracção. O Quadro 4.26, apresentado em 4.4.1.1., mostra que a substituição do agregado leve Leca M por RLM gera uma redução percentual

de agregado na mistura, resultando assim no aumento percentual de argamassa. Esta variação percentual das quantidades da mistura conduz a uma mobilização superior da argamassa aquando da resistência à tração. Porém, o modo de ruptura observado (a superfície de ruptura atravessa o agregado) sugere que a resistência à tração por compressão diametral é condicionada pela resistência à tração do próprio agregado que, conforme justificado anteriormente, aumenta com a taxa de substituição. As substituições (RLHD e RLM) demonstraram crescimentos semelhantes desta propriedade ($m_{BMRM} \cong m_{BMRHD}$).

A Figura 4.43 mostra que a expressão proposta na EN 1992-1-1 (2004) volta a não ser conservativa para os níveis de resistência observados na série BM, permitindo assim concluir, uma vez mais, que a relação entre a tensão média de ruptura à tração por compressão diametral e a resistência à compressão não depende apenas da tensão média de ruptura (f_{cm}).

4.4.3. Módulo de elasticidade

Procedeu-se à caracterização do módulo de elasticidade de acordo com a norma LNEC E 397 (1993), referido em 3.7.2.3. Com excepção dos betões de origem, todas as misturas produzidas foram alvo de análise aquando da caracterização desta propriedade aos 28 dias.

À semelhança do realizado para a análise da resistência à compressão, a apreciação dos valores obtidos é feita segundo as duas séries de betões produzidos, BHD e BM.

4.4.3.1. Série BHD

4.4.3.1.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.32 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade (E [GPa]) obtidos para a série BHD, aos 28 dias. São ainda apresentados os valores da massa volúmica seca (ρ_{seca} [kg/m^3]) e os valores médios obtidos da resistência à compressão. De forma paralela, todos os cálculos requeridos para a determinação dos valores médios são apresentados no ANEXO N.

Quadro 4. 32 - Módulo de elasticidade aos 28 dias da série BHD

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m^3)	Módulo de elasticidade	Resistência à compressão		
			E (GPa)	f_{cm} (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)
<i>BRHD</i>	0	1628	20,75	38,4	1,73	4,51
<i>BHD20RHD</i>	20	1672	20,74	40,4	1,15	2,84
<i>BHD50RHD</i>	50	1739	23,41	43,1	0,72	1,66
<i>B100RHD</i>	100	1852	25,37	43,7	0,74	1,69
<i>BHD20RM</i>	20	1612	21,26	38,5	1,08	2,80
<i>BHD50RM</i>	50	1590	21,19	36,3	1,08	2,80

A variação do módulo de elasticidade em função da taxa de substituição de agregado leve por agregado reciclado é ilustrada na Figura 4.44.

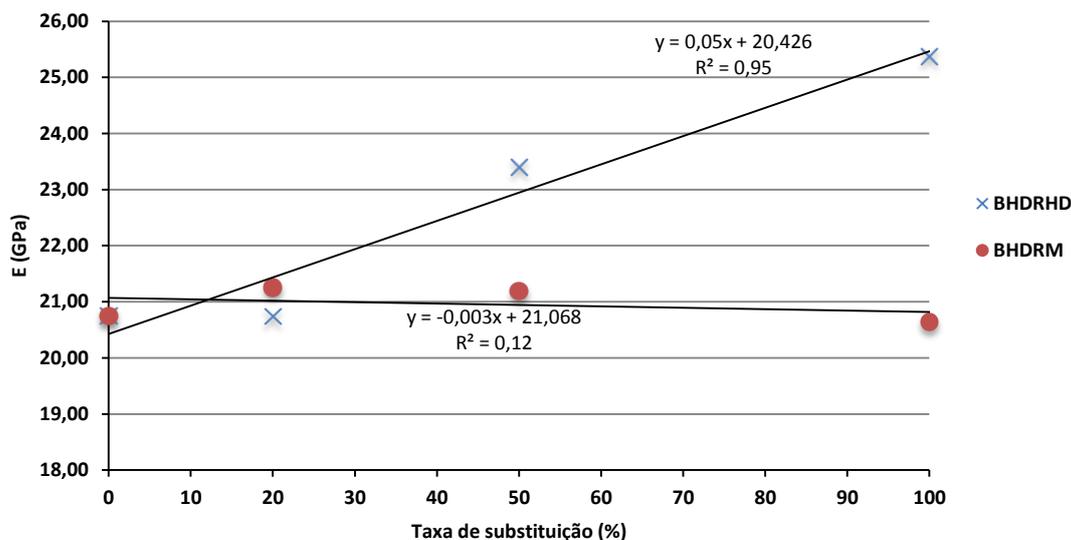


Figura 4. 44 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado no módulo de elasticidade aos 28 dias relativo à série BHD

De forma similar ao observado na caracterização da resistência à tracção por compressão diametral, a Figura 4.44 evidencia uma elevada correlação entre o módulo de elasticidade e a taxa de substituição de agregado leve Leca HD por agregado reciclado RLHD ($R^2 \cong 0,95$), concluindo-se existir uma grande influência da taxa de substituição no módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade depende fundamentalmente da proporção e rigidez dos seus constituintes, nomeadamente a pasta de cimento e os agregados. A substituição do agregado leve por RLHD resulta num incremento percentual de argamassa na mistura (Quadro 4.26, referido em 4.4.1.1.1.), resultando no aumento do módulo de elasticidade. Por outro lado, nas misturas da série BHD compostas por RLM, observou-se uma ligeira melhoria inicial do módulo de elasticidade, ligada ao incremento da rigidez superficial do agregado reciclado RLM face ao agregado leve de origem (efeito do envolvimento da pasta em torno do agregado leve Leca M). Não obstante, o aumento da taxa de substituição de agregado leve por RLM demonstra uma ligeira tendência de redução desta propriedade, justificada pela semelhança da rigidez do agregado reciclado RLM com a do agregado leve de origem (Leca HD). Esta semelhança decorre da similaridade das massas volúmicas do agregado leve de origem (Leca HD) e do agregado reciclado RLM. Por outro lado, a camada de pasta que envolve o agregado reciclado RLM exerce uma acção de confinamento sobre este, que contribui para um incremento adicional da sua rigidez. Assim, apesar de a massa volúmica do RLM ser ligeiramente inferior à do agregado leve de origem (Leca HD), as rigidezes tendem a ser idênticas. No entanto, verificou-se existir uma baixa correlação ($R^2 \cong 0,12$) entre o módulo de elasticidade das misturas e a taxa de substituição.

Aquando do estudo desta propriedade, Bogas (2011) obteve valores similares aos observados para o betão de referência BRHD, comprovando assim a sua conformidade.

A Figura 4.45 ilustra a influência que a massa volúmica seca tem no módulo de elasticidade.

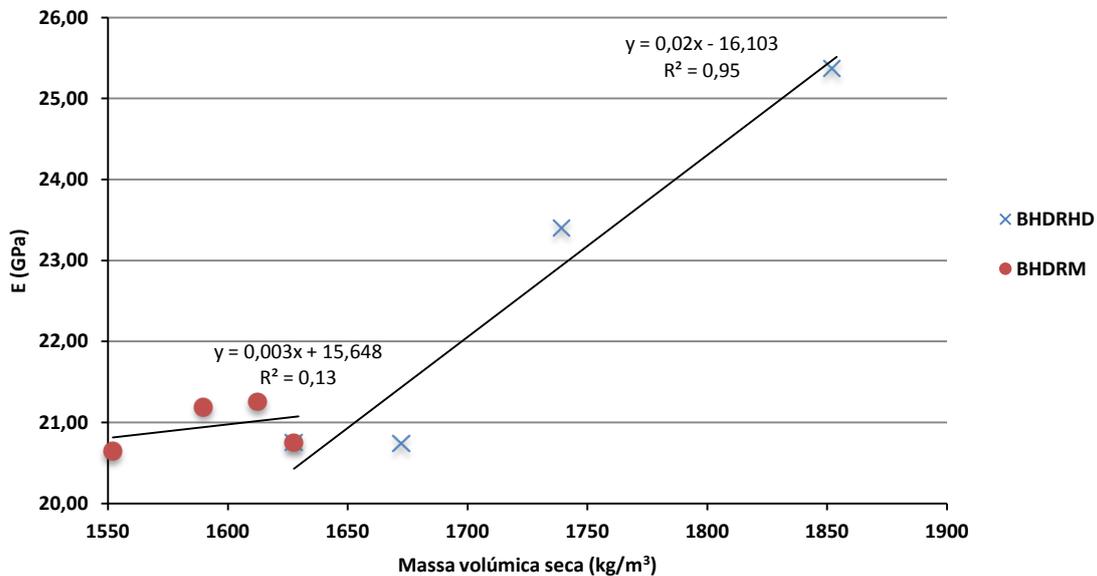


Figura 4. 45 - Influência da massa volúmica seca no módulo de elasticidade aos 28 dias da série BHD

Através da análise da Figura 4.45, é possível concluir que, para a substituição de agregado leve Leca HD por RLHD, existe um crescimento muito expressivo do módulo de elasticidade com a massa volúmica, assim como uma elevada correlação entre estas duas propriedades ($R^2 \approx 0,95$). Este crescimento provém do incremento de argamassa facultado pelo RLHD (Quadro 4.26), que origina um aumento da rigidez e da massa volúmica da mistura. No entanto, é de realçar a ligeira redução do módulo de elasticidade das misturas da série BHD compostas por RLM, comparativamente ao betão de referência (BRHD). Este decréscimo menos acentuado da rigidez do betão em função da massa volúmica resulta, uma vez mais, da contribuição adicional da pasta no confinamento do agregado (rigidez do RLM semelhante à da Leca HD, sendo a massa volúmica do RLM ligeiramente inferior à da Leca HD).

A Figura 4.46 relaciona a resistência à compressão das misturas da série BHD aos 28 dias com o respectivo módulo de elasticidade.

Finalmente, na Figura 4.47, apresenta-se a comparação dos valores obtidos segundo a EN 1992-1-1 (2004) com os resultados registados na campanha experimental. Todos os cálculos necessários para a obtenção do módulo de elasticidade segundo a EN 1992-1-1 (2004) são apresentados no ANEXO N.

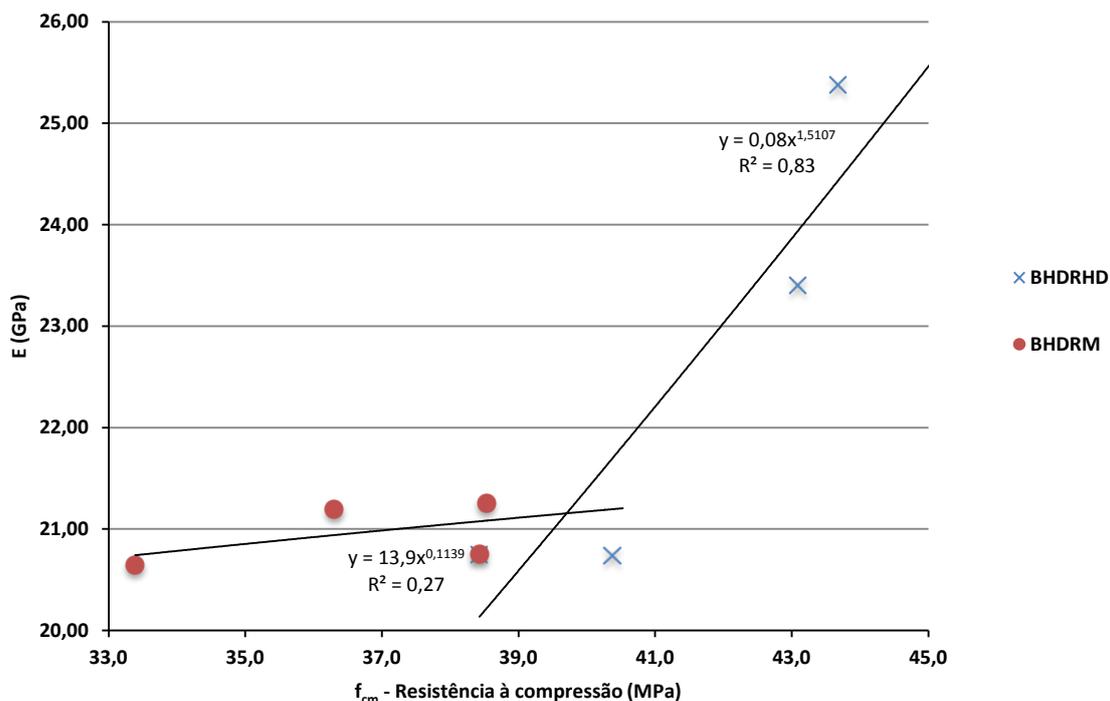


Figura 4. 46 - Módulo de elasticidade versus resistência à compressão aos 28 dias da série BHD

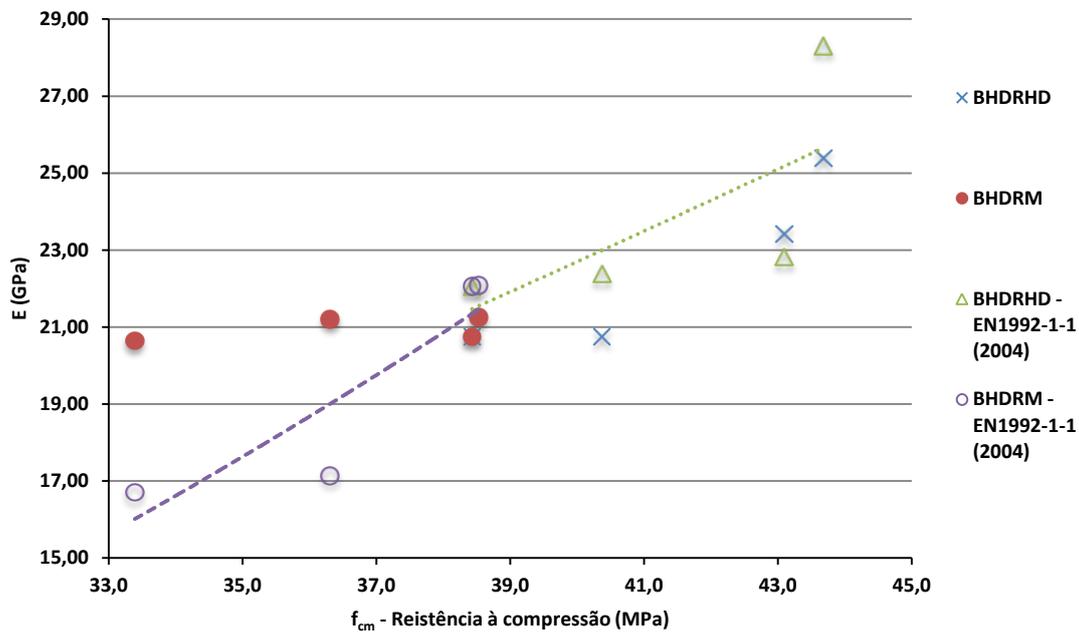


Figura 4. 47 - Módulo de elasticidade versus resistência à compressão aos 28 dias da série BHD tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)

À semelhança das figuras anteriores, a Figura 4.46 permite concluir a melhoria do módulo de elasticidade com o aumento da resistência à compressão. As misturas da série BHD constituídas por RLHD demonstram uma elevada correlação entre estas duas propriedades ($R^2 \cong 0,83$), demonstrando que o módulo de elasticidade do betão está directamente

relacionado com o módulo de elasticidade dos seus agregados e com a sua proporção na mistura. Assim, a tendência de redução do módulo de elasticidade observada nas misturas da série BHD constituídas por RLM está de acordo com as anteriores análises.

A expressão proposta na EN 1992-1-1 (2004) tende a ser ligeiramente conservativa para os níveis de resistência observados nas misturas da série BHD, constituídas pelo agregado reciclado RLM. Por outro lado, verifica-se que, à medida que resistência à compressão aumenta, a referida expressão apresenta um crescimento do módulo de elasticidade superior à da presente campanha experimental, sobrevalorizando, assim, a respectiva propriedade nas misturas da série BHD compostas pelo agregado reciclado RLHD. Este crescimento resulta da expressão da EN 1992-1-1(2004) depender, não só de f_{cm} , como também da massa volúmica, que nas misturas da série BHD compostas por RLHD é muito superior, comparativamente às misturas da mesma série constituídas pelo agregado reciclado RLM.

4.4.3.2. Série BM

4.4.3.2.1. Resultados obtidos

À semelhança do indicado para a série BHD, o Quadro 4.33 mostra os valores médios do ensaio do módulo de elasticidade obtidos para a série BM, aos 28 dias. Todos os cálculos requeridos para a determinação dos valores médios são apresentados no ANEXO N.

Quadro 4. 33 - Módulo de elasticidade aos 28 dias da série BM

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Módulo de elasticidade	Resistência à compressão		
			E (GPa)	f_{cm} (MPa)	s_{fc} (MPa)	CV_{fc} (%)
<i>BRM</i>	0	1453	12,77	19,2	1,97	10,29
<i>BM20RM</i>	20	1473	19,11	25,1	1,43	5,71
<i>BM50RM</i>	50	1503	19,82	27,7	1,33	4,79
<i>B100RM</i>	100	1552	20,64	33,4	1,71	5,13
<i>BM20RHD</i>	20	1533	18,40	26,4	1,00	3,80
<i>BM50RHD</i>	50	1653	21,79	30,7	1,55	5,06

A Figura 4.48 apresenta a variação do módulo de elasticidade em função da taxa de substituição de agregado leve por agregado reciclado.

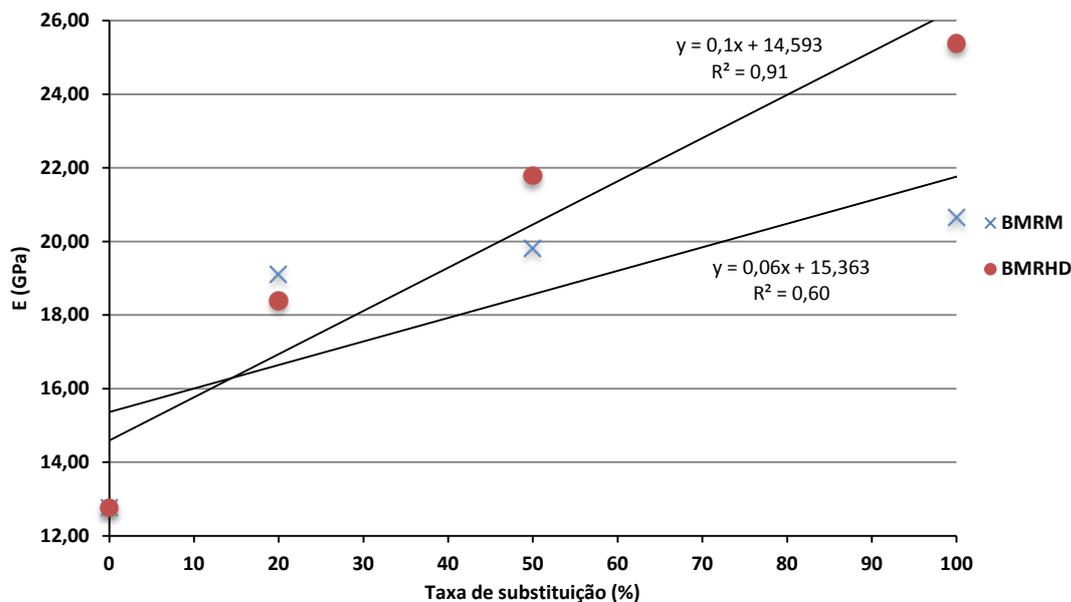


Figura 4. 48 - Influência da taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado no módulo de elasticidade aos 28 dias relativo à série BM

A Figura 4.48 comprova existir uma elevada correlação do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de agregado leve Leca M por agregado reciclado RLHD ($R^2 \cong 0,91$). Conforme mencionado, o módulo de elasticidade de uma mistura está relacionado com a proporção e rigidez dos constituintes. Assim, o módulo de elasticidade aumenta com a substituição de Leca M por RLHD, dado que o agregado RLHD apresenta uma capacidade resistente e rigidez superiores à da Leca M. Todas as misturas da série BM constituídas por RLM também demonstram uma melhoria desta propriedade com o aumento da taxa de substituição. O aumento de rigidez resulta, uma vez mais, da inclusão de um agregado reciclado (RLM) de rigidez superior à do agregado de origem (Leca M), não só porque possui maior massa volúmica como também devido ao envolvimento de pasta, que confere um efeito de confinamento do próprio agregado.

O efeito da massa volúmica seca no módulo de elasticidade é apresentado na Figura 4.49.

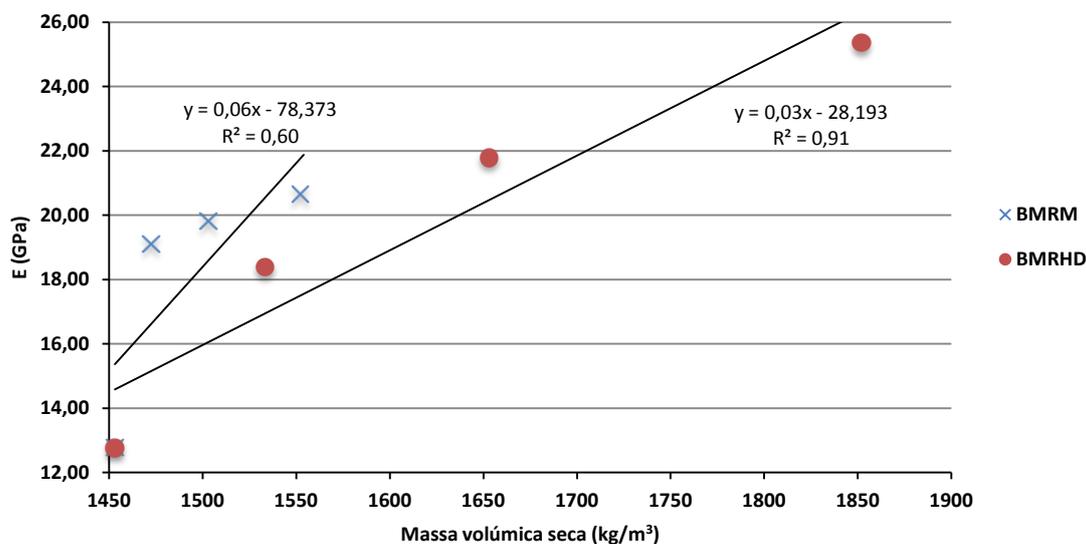


Figura 4. 49 - Influência da massa volúmica seca no módulo de elasticidade aos 28 dias da série BM

A Figura 4.49 mostra o crescimento do módulo de elasticidade das misturas da série BM constituídas por RLHD, com o aumento da massa volúmica seca, devido ao incremento de argamassa que a substituição deste tipo de agregado reciclado confere à mistura, realçando-se a elevada correlação existente entre estas duas propriedades ($R^2 \cong 0,91$). Por outro lado, as misturas da série BM compostas por RLM evidenciaram um crescimento ainda mais acentuado do módulo de elasticidade com o incremento da massa volúmica. Na génese desta melhoria, encontra-se o aumento da rigidez do agregado RLM, decorrente da contribuição adicional de pasta no confinamento de agregado e o conseqüente aumento da massa volúmica devido ao aumento percentual de argamassa na mistura. De salientar, no entanto, que, para estas misturas, a correlação observada entre as duas propriedades não é elevada ($R^2 \cong 0,60$).

A Figura 4.50 apresenta a variação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão das misturas da série BM aos 28 dias.

Por último, a Figura 4.51 mostra a comparação dos valores obtidos de acordo com a EN 1992-1-1 (2004) com os resultados da presente campanha experimental.

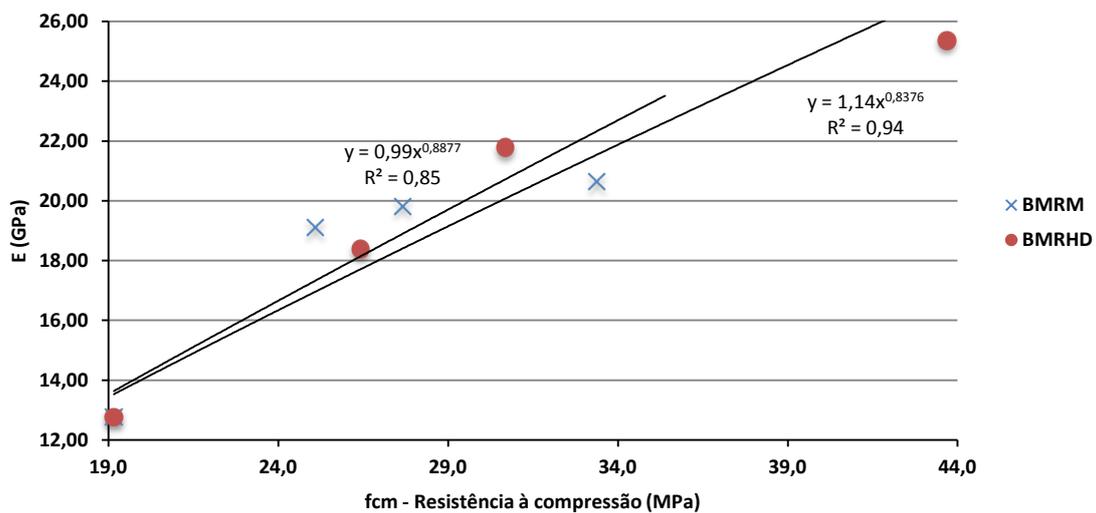


Figura 4. 50 - Módulo de elasticidade versus resistência à compressão aos 28 dias da série BM

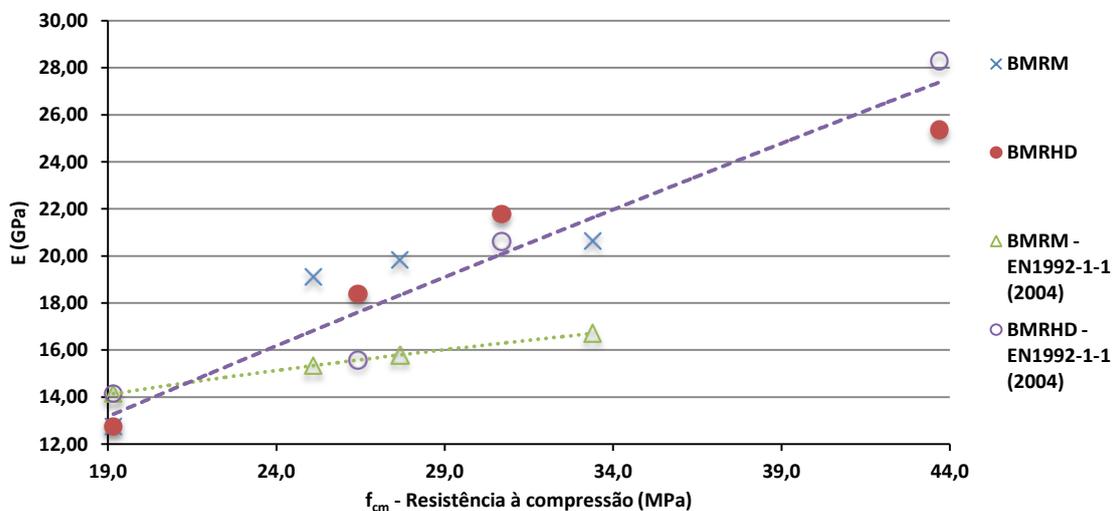


Figura 4. 51 - Módulo de elasticidade versus resistência à compressão aos 28 dias da série BM tendo em consideração a EN1992-1-1 (2004)

A melhoria do módulo de elasticidade das misturas da série BM com o aumento da resistência à compressão aos 28 dias encontra-se patente na Figura 4.50. Aquando da substituição do agregado leve Leca M por RLHD, o módulo de elasticidade apresenta uma elevada correlação com o aumento da resistência à compressão aos 28 dias ($R^2 \cong 0,94$), demonstrando a elevada importância da proporção dos agregados na mistura, bem como do módulo de elasticidade dos mesmos. De forma análoga, as misturas da respectiva série constituídas por RLM também apresentaram um crescimento significativo desta propriedade com o aumento da resistência à compressão aos 28 dias, mostrando uma elevada correlação entre estas duas propriedades ($R^2 \cong 0,85$).

Para as misturas da série BM compostas pelo agregado reciclado RLM, a expressão proposta na EN 1992-1-1 (2004) tende a subestimar o módulo de elasticidade, comparativamente aos resultados obtidos na presente campanha experimental. Por outro lado, verifica-se que a referida expressão conduz a estimativas razoáveis nas misturas da mesma série, mas cujo agregado reciclado utilizado foi o RLHD. Este bom ajustamento resulta da baixa resistência inicial do betão de referência (BRM), assim como da sua reduzida massa volúmica. Deste modo, ao ser substituído agregado leve Leca M por agregado reciclado RLHD, tanto a resistência como a massa volúmica apresentam um crescimento significativo. Assim, dado que a expressão EN 1992-1-1 (2004) depende destas duas propriedades, era expectável um crescimento acentuado, conforme ilustra a Figura 4.51.

4.4.4. Resistência à abrasão

A caracterização da resistência à abrasão seguiu o procedimento especificado na norma alemã DIN 52108 (2007), conforme referido em 3.7.2.4.. A análise desta propriedade incidiu sobre todas as misturas produzidas aos 91 dias.

À semelhança de todos os ensaios realizados, todos os resultados obtidos são expostos segundo as duas séries de betões produzidos, BHD e BM.

4.4.4.1. Série BHD

4.4.4.1.1. Resultados obtidos

O Quadro 4.34 apresenta os valores médios de resistência à abrasão registados para a série BHD, aos 91 dias de idade. Deste modo, são apresentados no respectivo quadro os valores da massa volúmica seca (ρ_{seca} [kg/m^3]), desgaste médio (mm), perda de massa média (g) e, finalmente, todos os valores da respectiva resistência à compressão das misturas. Todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores médios são apresentados no ANEXO O.

Quadro 4. 34 - Resistência à abrasão aos 91 dias da série BHD

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Resistência à abrasão		Resistência à compressão
			Desgaste médio (mm)	Diferença de massas (g)	f _{cm} (MPa)
<i>BRHD</i>	0	1628	4,55	9,3	19,2
<i>BHD20RHD</i>	20	1672	4,22	9,0	25,1
<i>BHD50RHD</i>	50	1739	4,12	8,5	27,7
<i>B100RHD</i>	100	1852	4,46	9,4	33,4
<i>BHD20RM</i>	20	1612	4,53	9,5	26,4
<i>BHD50RM</i>	50	1590	4,17	8,5	30,7

A Figura 4.52 apresenta a influência da taxa de substituição no desgaste médio obtido aquando da caracterização da resistência à abrasão das misturas da série BHD.

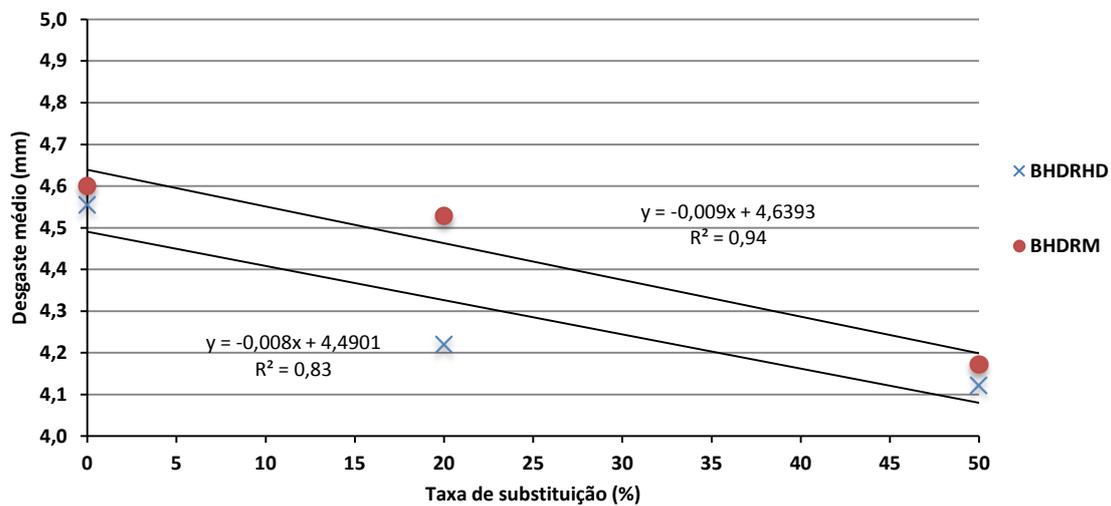


Figura 4. 52 - Desgaste médio aos 91 dias da série BHD (com excepção da mistura B100RHD)

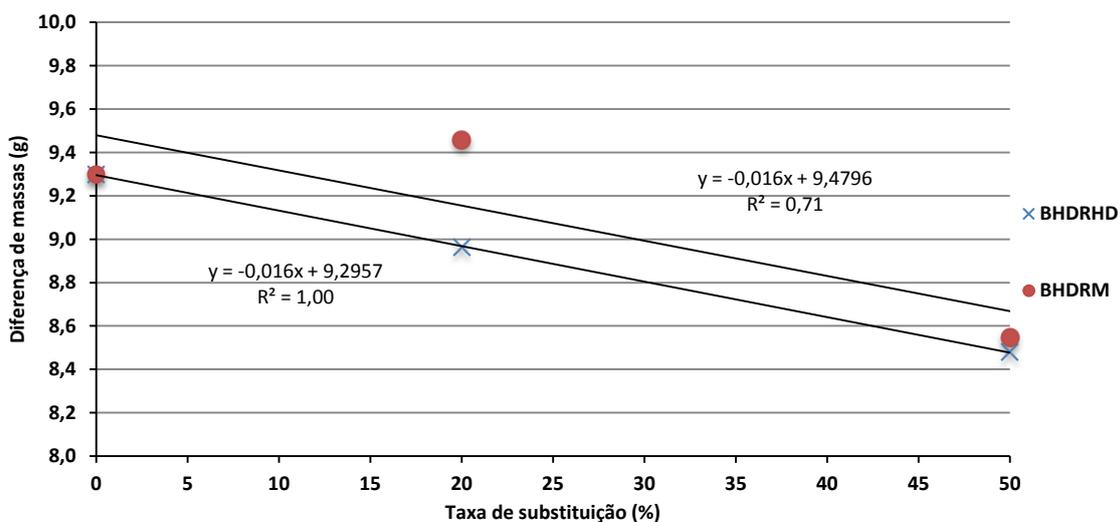


Figura 4. 53 - Diferença de massas da série BHD (com excepção da mistura B100RHD)

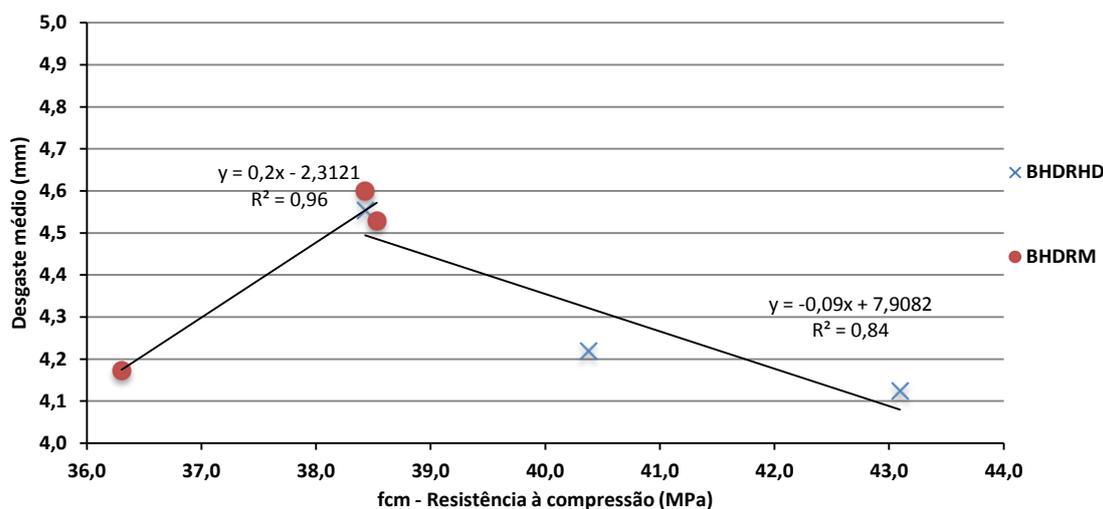


Figura 4. 54 - Desgaste médio versus resistência à compressão aos 28 dias da série BHD (com exceção da mistura B100RHD)

Nos betões leves, a resistência à abrasão depende tanto dos próprios agregados leves como da resistência da matriz e da ligação entre os agregados e a pasta de cimento. Assim, era expectável que as misturas da série BHD apresentassem um melhor comportamento à abrasão, uma vez que a melhor resistência da argamassa compensa o menor valor da resistência ao desgaste do agregado, e existe uma boa ligação agregado-pasta. No que concerne à substituição de agregado leve Leca HD por RLHD, à parte a mistura B100RHD, cujo resultado registado parece ser anómalo face à tendência observada, verifica-se uma melhoria significativa da resistência ao desgaste consoante o aumento da taxa de substituição, consistindo esta melhoria no aumento percentual de argamassa conferida pelo RLHD (Quadro 4.26). O resultado obtido para a mistura B100RHD pode em parte ser justificado pela variabilidade associado ao ensaio de abrasão. Esta variabilidade pode resultar de vários factores, tais como: variação da percentagem de agregado na face de “ataque” ao desgaste; heterogeneidade do agregado; percentagem do teor de ar; inclusão de pó abrasivo nas partículas de agregado contribuindo para a redução da sua porosidade; variabilidade do próprio ensaio. De facto, por vezes verifica-se que a diferença de desgaste entre os três provetes ensaiados em cada mistura é superior à diferença média de desgaste entre diferentes misturas (ANEXO O). A variabilidade observada assume maior importância neste ensaio devido ao facto de a resistência à abrasão não sofrer alterações muito significativas nas diferentes misturas. Isso dificulta a interpretação dos resultados, podendo no entanto concluir-se que o desempenho dos betões à abrasão não é prejudicado pela substituição de agregado leve reciclado.

Por outro lado, na substituição do agregado leve Leca HD por RLM, registaram-se melhorias significativas da resistência à abrasão, demonstrando uma redução do desgaste com o aumento da taxa de substituição por RLM (Figura 4.52). Na génese deste resultado, reside, uma vez mais, tanto o aumento percentual de argamassa na mistura como o facto de o agregado leve de origem (Leca

M) ser beneficiado pelo efeito de confinamento da pasta, que resulta no aumento da sua resistência superficial, e portanto, da sua resistência ao desgaste.

4.4.4.2. Série BM

4.4.4.2.1. Resultados obtidos

No Quadro 4.35, são apresentados os valores médios da resistência à abrasão das misturas da série BM.

De igual modo, todos os cálculos requeridos para a determinação dos valores médios são expostos no ANEXO O.

Quadro 4. 35 - Resistência à abrasão aos 91 dias da série BM

Amassaduras	Taxa de substituição (%)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Resistência à abrasão		Resistência à compressão
			Desgaste médio (mm)	Diferença de massas (g)	f _{cm} (MPa)
<i>BRM</i>	0	1453	5,78	12,2	19,2
<i>BM20RM</i>	20	1473	4,69	9,9	25,1
<i>BM50RM</i>	50	1503	3,59	7,5	27,7
<i>B100RM</i>	100	1552	4,10	8,5	33,4
<i>BM20RHD</i>	20	1533	4,88	10,0	26,4
<i>BM50RHD</i>	50	1653	3,61	8,1	30,7

A Figura 4.55 mostra a evolução do desgaste médio das misturas da série BM consoante o aumento da taxa de substituição de agregado leve Leca M por RLM.

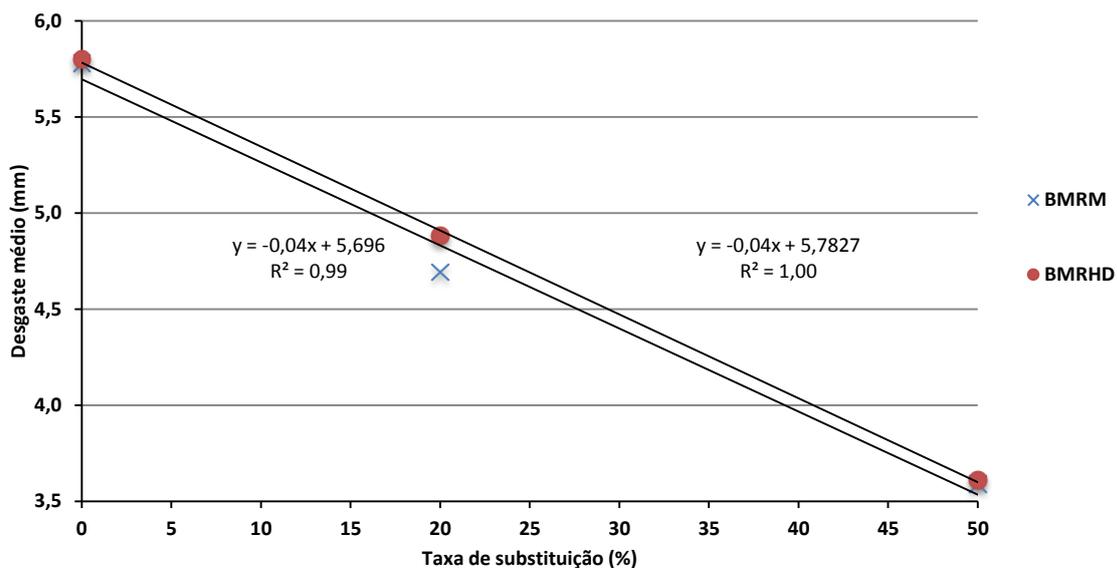


Figura 4. 55 - Desgaste médio aos 91 dias da série BM (com exceção da mistura B100RM)

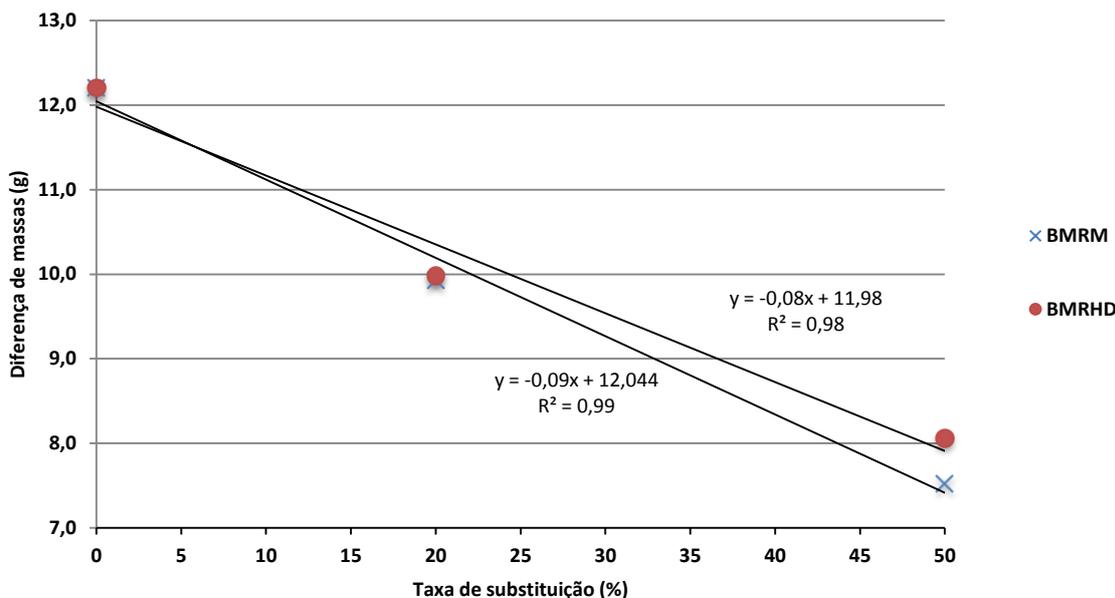


Figura 4.56 - Diferença de massas da série BM (com exceção da mistura B100RM)

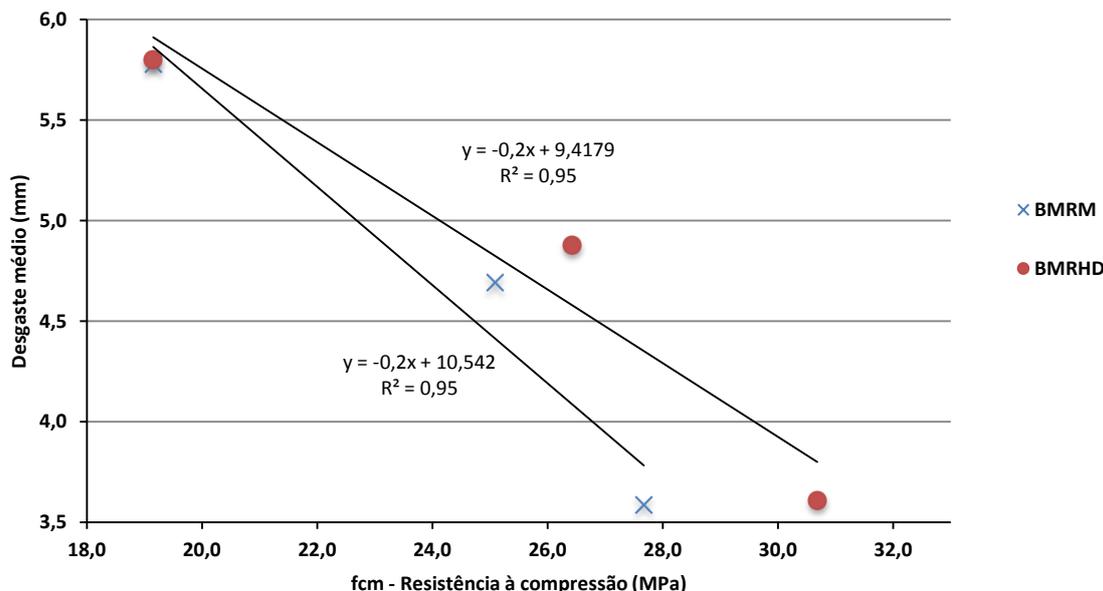


Figura 4.57 - Desgaste médio versus resistência à compressão aos 28 dias da série BM (com exceção da mistura B100RM)

No que concerne à substituição de agregado leve Leca M por RLM, a Figura 4.55 demonstra novamente o aumento da resistência à abrasão até taxas de substituição de 50%, devido fundamentalmente ao aumento da capacidade resistente do agregado substituído que decorre do envolvimento de pasta em torno do agregado leve Leca M e do aumento percentual de argamassa, conferido aquando da substituição pelo RLM (Quadro 4.26). Contudo, para as taxas de substituição de 100% de agregado reciclado (RLHD / RLM), registaram-se, à semelhança da série BHD, valores anómalos. A mesma justificação referida em 4.4.1.1 é aplicável. De forma paralela, a substituição por RLHD evidenciou uma tendência similar à observada para a substituição por RLM, salientando-se, no entanto, uma maior degradação da resistência à abrasão. As diferenças de massas observadas

são coerentes com os valores obtidos para o desgaste (Figura 4.56). É de salientar a concordância obtida entre a resistência à compressão aos 28 dias, das misturas da série BM, e os respectivos desgastes registrados (Figura 4.57), com exceção uma vez mais para as misturas compostas por 100% de agregado leve reciclado.

5. CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O actual consumo de recursos naturais tem vindo a registar uma tendência de crescimento exponencial, resultante da inevitável evolução socioeconómica observada nos diversos países. No que concerne à protecção e manutenção do meio em que nos inserimos, a reciclagem aparenta ser um dos caminhos que promovem tal objectivo. Não obstante, o sector da construção origina, em todas as etapas do seu processo, impactes ambientais muito significativos, promovendo o esgotamento dos recursos naturais bem como o aumento da poluição, resultantes da criação de resíduos. Por outro lado, o referido sector representa um consumo, do ponto de vista global, de aproximadamente 30% das matérias-primas, 42% do consumo de energia, 25% do uso de água e 16% do uso de terra, sendo responsável por 40% das emissões atmosféricas, 20% dos efluentes líquidos, 25% dos sólidos e 13% de outras emissões.

Deste modo, e com o intuito da autossustentabilidade do sector da construção, que passa inevitavelmente pela consciencialização ao nível ambiental e económico, a reciclagem dos resíduos da construção e demolição (RCD) assume um papel de destaque e deverá ter sempre como objectivo, a busca incessante de soluções alternativas que promovam a reutilização e reciclagem dos produtos gerados pela construção, evitando assim a prática do *downcycling* aquando da reciclagem de resíduos, particularmente na produção de betões reciclados de função estrutural.

Apesar dos consecutivos movimentos de globalização ao nível social, económico e tecnológicos, a introdução de novas técnicas, assim como de materiais inovadores, no âmbito da construção, é sistematicamente estigmatizado na actual conjuntura, que conduz à sua rejeição, pelo que investigações como a presente têm o dever de compreender e apresentar os desempenhos mecânicos e de durabilidade de betões produzidos com recurso a agregados reciclados, assim como as condicionantes à sua utilização, de forma a harmonizar a aceitação no respectivo sector. Assim, a presente investigação teve como objectivo compreender as características mecânicas de betões de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve estrutural e de enchimento, apresentando tanto os seus benefícios como também, as suas limitações nas diversas condições de utilização.

5.2. CONCLUSÕES GERAIS

A presente investigação permitiu verificar uma melhoria significativa da maioria das propriedades dos agregados leves reciclados, assim como das características mecânicas dos betões por eles constituídos. Na presente investigação, optou-se por apresentar as principais conclusões segundo três pontos: propriedades dos agregados leves reciclados, no que diz respeito à massa

volúmica, absorção de água, resistência ao esmagamento e, finalmente, índice de forma; propriedades do betão no estado fresco, que compreende a massa volúmica fresca; propriedades mecânicas do betão no estado endurecido, ilustradas pela resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade e, por último, a resistência à abrasão.

5.2.1. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES RECICLADOS

Ao contrário dos agregados reciclados de betão de massa volúmica natural, observou-se um incremento muito considerável da massa volúmica nos agregados leves reciclados, comparativamente aos agregados leves de origem. Relativamente à massa volúmica dos agregados leves de origem (Leca HD e Leca M), registaram-se incrementos desta propriedade de aproximadamente 60% e 50% para o agregado leve reciclado estrutural (RLHD) e agregado leve reciclado não estrutural (RLM). O aumento registado desta propriedade resulta da maior massa volúmica da argamassa face ao agregado de origem, tendo-se verificado, no entanto, que, segundo os limites especificados na norma EN 13055-1, o acréscimo obtido na massa volúmica não condiciona a natureza “leve” dos agregados leves reciclados.

Também a capacidade de absorção de água por parte dos agregados leves reciclados demonstrou ser superior à registada nos agregados leves de origem, traduzindo-se num aumento de 25% e 27%, relativamente ao RLHD e RLM. Na génese deste aumento, encontra-se o aumento da porosidade conferida pela pasta aderida ao agregado leve de origem, bem como pela degradação da película exterior do próprio agregado leve aquando da sua produção (trituração). De salientar que a ocorrência deste fenómeno é similar nos agregados reciclados de betão convencional e resulta, uma vez mais, do aumento de porosidade conferida pela pasta aderida ao agregado de origem.

A resistência ao esmagamento nos agregados leves reciclados teve um aumento muito significativo nos agregados leves reciclados RLHD e RLM face aos seus agregados leves de origem, respectivamente Leca HD e Leca M, tendo-se registado aumentos na ordem de 32% e 63%. O incremento tido na resistência ao esmagamento advém da presença de pasta no agregado leve, que por sua vez confere ao agregado leve reciclado um acréscimo na sua rigidez. O elevado aumento registado para o RLM (63%) resulta do envolvimento de pasta em torno do agregado leve Leca M, exercendo um efeito de confinamento que potencia a fraca resistência original do agregado leve Leca M. Por outro lado, as conclusões obtidas aquando da caracterização desta propriedade nos agregados leves reciclados revelaram ser contrárias ao conhecido nos agregados reciclados de betão convencional, dada a maior resistência que o agregado natural possui, comparativamente à argamassa.

Por último, à semelhança dos agregados reciclados de betão convencional, os agregados leves reciclados apresentaram um maior índice de forma face aos seus homólogos. Na origem desta

situação, encontra-se o processo de trituração, que gera partículas partidas de forma mais angulosa, resultando num maior índice de forma. Porém, registou-se uma diferenciação acentuada desta propriedade entre os dois tipos de agregados leves reciclados analisados ($IF_{RLHD} \approx 24\%$; $IF_{RLM} \approx 9\%$), assentando a mesma na composição dos betões de origem. A trituração do betão leve de função não estrutural (BOM) gerou um agregado com uma grande percentagem de partículas cúbicas (RLM), residindo a justificação no facto de este ser destituído de finos aquando da sua produção e da sua elevada razão a/c ($a/c = 0,6$).

5.2.2. PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

No que concerne à massa volúmica fresca, observou-se, conforme seria expectável, um incremento desta propriedade consoante a taxa de substituição de agregado leve por agregado leve reciclado aumenta, em todas as misturas produzidas, devendo-se este resultado à maior massa volúmica dos agregados leves reciclados face aos seus homólogos. No entanto, todas as amassaduras constituídas pelo agregado leve Leca HD e pelo agregado leve reciclado RLM mostraram uma redução desta propriedade, remetendo-a uma vez mais para a menor massa volúmica do RLM, comparativamente à da Leca HD ($\rho_{Leca\ HD} = 1266\text{ kg/m}^3$; $\rho_{RLM} = 1183\text{ kg/m}^3$). Apesar de, no estado fresco, todas as misturas compostas pelo agregado leve Leca HD e pelo agregado leve reciclado RLHD terem tido uma massa volúmica fresca superior a 2000 kg/m^3 , aquando da determinação da massa volúmica seca, todas as misturas produzidas se encontram dentro do limite especificado na EN 206 ($\rho_{betão\ leve} = 2000\text{ kg/m}^3$), demonstrando assim a possibilidade de produzir betão leve recorrendo a agregados leves reciclados.

5.2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização mecânica de todas as misturas produzidas apresentou, em todas as propriedades analisadas, diferenças muito significativas consoante o tipo de agregado leve empregue na origem das mesmas, pelo que se optou por dividir os resultados obtidos em duas séries distintas, BHD e BM respectivamente.

No que concerne à resistência à compressão, à excepção das misturas constituídas pelo agregado leve Leca HD e pelo agregado leve reciclado RLM (BHDRLM), todos os restantes betões produzidos demonstraram um incremento considerável desta propriedade consoante o acréscimo da taxa de substituição, identificando a relação existente entre a massa volúmica e a resistência à compressão. Encontrando-se a resistência à compressão de um betão leve condicionada pela resistência do próprio agregado leve, era previsível que as amassaduras BHDRLM apresentassem uma redução desta propriedade face ao betão de referência BRHD, dada a menor capacidade resistente do agregado leve reciclado RLM quando comparada à do agregado leve Leca HD. Ainda

relativamente à série BHD, aos 28 dias de idade, não foram registadas grandes variações da eficiência estrutural face à do betão de referência BRHD, nunca chegando a ultrapassar 5%, concluindo-se que a adição de betão leve reciclado estrutural não produz melhorias significativas aquando da produção de betão leve reciclado de função estrutural. De destacar os resultados obtidos para a mistura BHD20RM com agregado leve reciclado não estrutural, que obteve uma resistência à compressão similar à do betão de referência BRHD, com uma taxa de substituição pelo RLM de apenas 20%.

Por outro lado, para a série BM, composta por todas as misturas constituídas pelo agregado leve Leca M e pelos dois tipos de agregado leve reciclado, registaram-se incrementos da resistência à compressão muito significativos, traduzindo-se também em eficiências estruturais elevadas. Aos 28 dias de idade, é de destacar a mistura B100RM que, quando comparada com o betão de referência BRM, obteve um incremento de resistência de 74%, tendo registado, de igual modo, um aumento da eficiência estrutural de 21,5%. Esta melhoria resulta da fraca resistência do betão de referência aliada à introdução de um agregado de maior capacidade resistente, associado a uma maior percentagem de pasta. Por último, é ainda de salientar o bom comportamento que a mistura BM20RM demonstrou aquando do estudo desta propriedade, apresentando uma melhoria da resistência à compressão aos 28 dias de 30,7%, e um aumento da eficiência estrutural de 17%, face ao betão de referência.

De forma análoga ao observado para a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral mostrou melhorar com o aumento da taxa de substituição. À excepção das misturas compostas por RLM, a série BHD mostrou um incremento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição por RLHD, permitindo concluir a correlação desta propriedade com o modo de ruptura (a superfície de ruptura atravessou os agregados em ambas as séries), bem como a sua tensão de rotura à tracção. Como era expectável, o betão B100RHD foi que apresentou uma melhoria mais acentuada desta propriedade (32%), comparativamente ao betão de referência BRHD, dada a maior percentagem de argamassa presente na referida mistura. Não obstante, foi na série BM que se verificaram variações mais acentuadas desta propriedade, devido, uma vez mais, à reduzida resistência à tracção do betão de referência BRM. Assim, chegou-se a registar um incremento desta propriedade de 81% na mistura BM50RHD, comparativamente ao betão de referência BRM. Na génese deste resultado, encontra-se o incremento de argamassa conferido aquando da introdução de 50% de agregado leve reciclado RLHD, assim como a introdução de um agregado de capacidade resistente superior e de forma mais angulosa. Finalmente, é de salientar o melhor desempenho que a substituição por 20% de RLM provoca na mistura BRM (BM20RM), tendo-se notado um elevado acréscimo da resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias de 65%, face ao betão de referência BRM. Uma vez mais, é possível concluir que a adição de

20% de agregado leve reciclado não estrutural (RLM) apresenta melhorias significativas na resistência à tracção do betão leve de função não estrutural, sem comprometer no entanto, a sua massa volúmica.

O módulo de elasticidade demonstrou uma tendência idêntica à obtida na caracterização da resistência à compressão e tracção, melhorando com o aumento da taxa de substituição por agregado reciclado. Assim, à excepção das misturas constituídas por RLM, todos os betões da série BHD apresentaram um incremento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição por RLHD, tendo-se registado um aumento de 22% para a mistura B100RHD. O incremento observado para a respectiva mistura deriva, essencialmente, da proporção e rigidez dos seus constituintes, nomeadamente a pasta de cimento e agregados, que, é alcançado aquando da substituição total de Leca HD por RLHD, existindo um aumento do volume de argamassa. Deste modo, pode afirmar-se que existe uma elevada relação entre o módulo de elasticidade e a proporção e rigidez dos constituintes do betão leve estrutural.

Não obstante, também a série BM teve aumentos muito consideráveis aquando da substituição do agregado leve Leca M por agregado leve reciclado. Registou-se um aumento de 71% para a mistura BM50RHD, comprovando, uma vez mais, a relação entre a proporção e rigidez dos constituintes da amassadura, traduzindo-se na melhoria da capacidade resistente do agregado, bem como no aumento percentual de argamassa na mistura. Contudo, os betões da série BM compostos por RLM também manifestaram uma melhoria desta propriedade com o aumento da taxa de substituição, embora o respectivo incremento tenha sido menos acentuado, revelando a menor percentagem de pasta adicionada aquando da substituição pelo RLM. O agregado RLM beneficia do confinamento da pasta em torno do agregado que promove o aumento da sua rigidez. Por fim, é de destacar o elevado incremento desta propriedade (50%) para uma substituição de apenas 20% de RLM, conforme a mistura BM20RM mostrou.

Finalmente, a resistência à abrasão também demonstrou, de uma forma geral, uma melhoria até a uma taxa de substituição de 50%. Dependendo a resistência à abrasão, tanto dos próprios agregados leves como da resistência da matriz e da ligação entre os agregados e a pasta de cimento, era expectável que as misturas de ambas as séries apresentassem um bom comportamento à abrasão. Na origem desta previsão, reside o facto de a elevada resistência da argamassa compensar o reduzido valor da resistência do agregado leve, assim como a ligação entre a argamassa e a pasta de cimento apresentar melhor qualidade, resultante da penetração da pasta na superfície dos mesmos. Assim, na série BHD, verificou-se um incremento de 10% para a mistura BHD50RHD, resultante do aumento percentual de argamassa aquando da substituição. No entanto, de forma menos esperada, o betão B100RHD apresentou uma resistência ao desgaste inferior ao da mistura BHD50RHD. Este resultado pode em parte ser justificado pela variabilidade associada ao ensaio de

abrasão. Adicionalmente, esta variabilidade assume maior importância neste ensaio devido ao facto de a resistência à abrasão não sofrer alterações muito significativas nas diferentes misturas. Porém, aquando da substituição do agregado leve Leca HD por RLM, observaram-se melhorias muito consideráveis da resistência à abrasão com o incremento da taxa de substituição por RLM.

De forma análoga à série BHD, a série BM demonstrou uma vez mais uma evolução muito significativa da resistência à abrasão (38%) até à taxa de substituição de 50%, proveniente do aumento da capacidade resistente do agregado substituído (devido ao envolvimento de pasta em torno do agregado leve Leca M) e de pasta aquando da substituição pelo RLM. Porém, para a mistura B100RM, observou-se, de forma similar ao B100RHD, um resultado anómalo à tendência registada, residindo muito provavelmente a causa deste valor, uma vez mais, na variabilidade associada a este tipo de ensaio. Por outro lado, a substituição por RLHD manifestou uma tendência idêntica à registada aquando da substituição por RLM, destacando-se no entanto, uma maior degradação da resistência à abrasão, em termos comparativos.

De uma forma geral, é possível concluir que a substituição de agregado leve por agregado leve reciclado no betão leve promove o crescimento das suas propriedades mecânicas. Esse acréscimo é acompanhado pelo incremento de massa volúmica o que em geral se traduz numa variação pouco significativa da eficiência estrutural. Não obstante, é de destacar a incorporação de 20% de agregado leve reciclado RLM, aquando da produção do betão leve de função não estrutural, que indicou melhorias muito significativas ao nível do seu desempenho mecânico.

5.3. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Através da análise de todos os resultados obtidos no decorrer desta dissertação, foi possível aprofundar o nível de conhecimento sobre betões com agregados reciclados de betão leve. Porém, dada a elevada complexidade do betão leve, assim como do processo de reciclagem, existem várias propriedades que poderão ainda ser caracterizadas e interpretadas. De forma a promover a melhor compreensão das propriedades dos betões leves reciclados, assim como dos próprios agregados leves reciclados, são sugeridas algumas propostas de desenvolvimento:

- desempenho mecânico e de durabilidade em betões com ALBR, tendo em consideração outras composições, nomeadamente composições de maior compacidade;
- desempenho mecânico e de durabilidade em betões com agregados finos reciclados de betão leve;
- influência das condições de cura no desempenho mecânico e durabilidade de betões com agregados leves reciclados;
- influência da pré-saturação dos agregados leves reciclados na produção de betões;

- análise da resistência dos betões com agregados leves reciclados em condições extremas, tais como fogo e ciclos de gelo-degelo;
- análise do comportamento mecânico, em estados limite de serviço e estados limite últimos, de elementos estruturais compostos por ALBR (e.g. lajes, vigas, pilares);
- realização de um estudo de análise qualitativa e quantitativa das características das zonas de transição pasta-ALBR;
- avaliação das características térmicas e acústicas em betões com ALBR;
- modelação numérica dos betões com agregados reciclados de betão leve.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **ACI211.2 (1998)** - *"Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete"*, American Concrete Institute (Reapproved 2004);
- **ACI213R (2003)** - *"Guide for structural lightweight-aggregate concrete"*, American Concrete Institute, Detroit, USA;
- **ACI304R (1997)** - *"Batching, mixing, and job control of lightweight concrete"*, American Concrete Institute (Reapproved 1997);
- **ACI318 (2009)** - *"Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary (ACI 318R-08)"*, American Concrete Institute, Farmington Hills;
- **Aictin, P.C. (1998)** - *"High performance concrete"*, E & FN Spon, London;
- **Albenque, M.; Arnould, M.; Cougny, G. (1986)** - *"La fabrication des granulats d'argile et de schistes expansés"*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **Altherman, D. (2002)** - *"Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil"*, Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil;
- **Alves, F. (2007)** - *"Betões com agregados reciclados: Levantamento do state-of-the-art experimental nacional"*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Amorim, P. (2008)** - *"Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão"*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Araujo, E. C.; Dias, F. M. (2011)** - *"Massa específica e absorção de água de concretos manufaturados com agregados alternativos"*, Vol. 4, No. 5, pp. 764-783;
- **ASTMC33-03 (2003)** - *"Standard specification for concrete aggregates"*, American Society for Testing & Materials (ASTM), USA;
- **ASTMC330 (2004)** - *"Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete"*, American Society for Testing & Materials (ASTM), Philadelphia, USA;
- **ASTMC496 (2004)** - *"Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens"*, American Society for Testing & Materials (ASTM), USA;
- **Banthia, N.; Chan, C. (2000)** - *"Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete"*, Concrete International, Vol. 22, No. 06, p. 41-45;

- **Barra, M. (1996)** - *“Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado”*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Técnica Superior d’Enginyers de Camin, Canal i Ports, Universitat Politècnica de la Catalunya, Barcelona, Espanha;
- **Barra, M.; Vasquez, E. (1998)** - *“Properties of concrete with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation”*, Use of recycled concrete aggregate, International symposium on sustainable construction, London, pp. 19-30;
- **Bayasi, Ziad; Jing Zhou (1993)** - *“Properties of silica fume concrete and mortar”*, ACI Materials Journal, No. 90-M38, pp. 349-356;
- **Bazuco, R. S. (1999)** - *“Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos”*, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil;
- **Bertolini, Luca; Bernhard Elsener; Pietri Pedferri; Rob Polder (2004)** - *“Corrosion of steel in concrete - Prevention, diagnosis, repair”*, Wiley-VCH;
- **Bogas, J. (2011)** - *“Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida”*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Bremner, T. W.; T. A. Holm (1986)** - *“Elastic compatibility and the behavior of concrete”*, ACI Materials Journal, No. 83-25, pp. 244-250;
- **Brito, J. de (2005)** - *“Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões”*, Lição de Síntese de Agregação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Brodda, R.; Weber, J. W. (1977)** - *“Leicht und normal betone mit ausfallkörnung und stetiger sieblinie”*, Vol.. 27, No. 9, pp. 340-342;
- **Building Contractors Society of Japan (B.C.S.J.) (1978)** - *“Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete”*, Concrete Journal, Vol. 16, No. 7, pp. 18-31;
- **Cabral, A. E. B. (2007)** - *“Mechanical properties and durability modeling of recycled aggregates concrete”*, Considering the construction and demolition waste variability, University of São Paulo, Brasil;
- **Canovas, M. F. (2004)** - *“Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos”*, Séptima edición, Espanha;
- **Castro, Alessandra Lorenzetti de (2007)** - *“Aplicações de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho”*, Tese de Doutoramento em Ciência e Engenharia dos materiais. Universidade de São Paulo, Interunidades (IFSC-IQSC-EESC), Brasil;
- **CEB-FIB (1990)** - *“CEB-FIB Model Code 1990: Design Code”*, Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, England;

- **CEB-FIP (1977)** - *“Lightweight aggregate concrete - CEB-FIP manual of design and technology”*, Comité Euro-international du Béton (CEB) and Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP). The Construction Press, England;
- **Chandra, S.; Berntsson, L. (2003)** - *“Lightweight concrete. Science, Technology and applications”*, Noyes publications-Wiliam Andrew Publishing, USA;
- **Chandra, S.; Berntsson, L. (2002)** - *“Lightweight aggregate concrete – Science technology and application”*, Chalmers University of Technology, Gotenborg, Sweden;
- **Coquillat, G. (1986)** - *“Influence des caractéristiques physiques et mécaniques des granulats légers sur les propriétés des bétons légers de structure”*, Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **Chen, H-J; T. Yen; T-P. Lai (1995)** - *“A new proportion method of light-weight aggregate concrete based on dividing strenght”*, International Symposium on structural lightweight aggregate concrete, Sandefjord, Norway: Editors: I. Holand et al., 1995. pp 463-471;
- **Coquillat, G. (1982)** - *“Recyclage de matériaux de démolition dans la confection de béton”*, Service d’Étude des Matériaux Unité: Technologie des Bétons, França;
- **Coquillat, G.; C. Lejeune; R. Lesage; R. Oger. (1986)** - *“Granulats legers existants (argile, schist, latier): caractéristiques, modes opératoires, fiches d’information”*, Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **Coutinho, A. Sousa (1988)** - *“Fabrico e propriedades do betão”*, Vol. 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa;
- **Coutinho, A. Sousa (1988b)** - *“Fabrico e propriedades do betão”*, Vol.. 2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa;
- **Coutinho, A.; Gonçalves, A. (1997)** - *“Fabrico e propriedades do betão”*, Volume I, II e III, LNEC, Lisboa;
- **Dreux, G.; Festa, J. (2002)** - *“Nouveau guide du béton et de ses constituants”*, Eyrolles. Huitième edition, França;
- **Dreux, G. (1986)** - *“Composition des bétons légers”*, Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **EuroLightCon R2 (1998)** - *“LWAC Material properties state-of-the-art”*, Project BE96-3942R2;
- **EuroLightCon R7 (2000)** - *“Grading and composition of the aggregate”*, Project BE96-3942R7;
- **EuroLightCon R12 (2000)** - *“Applicability of the particle-matrix model to LWAC”*, Project BE96-3942R12;

- **EuroLightCon R14 (2000)** - “*Structural LWAC - Specification and guideline for materials production*”, Project BE96-3942R14;
- **EuroLightConR19 (2000)** - “*Evaluation of the early age cracking of lightweight aggregate*”, Project BE96-3942/R19;
- **EuroLightCon R26 (2000)** - “*Recycling lightweight aggregate concrete*”, Project BE96-3942R26;
- **EuroLightConR32 (2000)** - “*Tensile strength as design parameter*”, Project BE96-3942/R32;
- **EuroLightConR35 (2000)** - “*Composite models for short- and long-term strength and deformation properties of LWAC*”, Project BE96-3942/R35;
- **Evangelista, L. (2007)** - “*Betões executados com agregados finos reciclados de betão*”, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Faust, T. (2000)** - “*Properties of different matrixes and LWAs and their influences on the behavior of structural LWAC*”, *Second International Symposium on structural lightweight aggregate concrete*, S. Helland et al., Kristiansand, Norway, pp. 502-511;
- **Faust, T. (2000b)** - “*The behavior of structural LWAC in compression*”, *Second International Symposium on structural lightweight aggregate concrete*, S. Helland et al., Kristiansand, Norway, pp. 512-521;
- **FIP (1983)** - “*FIP manual of lightweight aggregate concrete*”, Fédération internationale de la précontrainte (FIP), second edition, Surrey University Press, 259 p;
- **Fonseca, N. (2009)** - “*Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão - Influência das condições de cura no desempenho mecânico*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Fouré, B. (1986)** - “*Comportement en compression, flexion, flexion compose et flambement*”, Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **Fragoulis, D.; Stamatakis, M. G.; Chaniotakis, E.; G. Columbus (2004)** - “*Characterization of light aggregates produced with clayey diatomite rocks originating from Greece.*” *Materials Characterization*, Vol. 53, 2004, pp 307-316;
- **Galloway, J. E. Jr. (1994)** - “*Grading, shape, and surface properties*”, ASTM Special Technical Publication No. 169C, Philadelphia;
- **Gerritse, A. (1981)** - “*Design considerations for reinforced lightweight concrete*”, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-69;
- **Giaccio, G.; Rocco C.; Violini D.; Zappitelli J.; Zerbino R. (1992)** - “*High-strength concretes incorporating different coarse aggregates*”, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 3, pp. 242-246;

- **H. Al-Khaiat; M.N. Haque (1998)** - *“Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete”*, Cement Concrete Research, Vol. 28, pp. 859–866;
- **Hansen, T. C. (1992)** - *“Recycled of demolished concrete and masonry”*, Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Chapman & Hall, London;
- **Hansen, T.; Marga, M. (1988)** - *“Strength of concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregates”*, Second Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Prentice Hall, Vol. 2, Tóquio, Japão, pp. 605-612;
- **Hoff, G. C. (1992)** - *“High strength lightweight aggregate concrete for artic applications - part 1, 2, 3”*, Structural Lightweight aggregate concrete performance, ACI SP-136. Editors Thomas A. Holm and Alexander M. Vaysburd;
- **Holm, T. A.; T. W. Bremner (2000)** - *“State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments”*, Us Army Corps of Engineers. Structural Laboratory, ERDC/SL TR-00-3, USA;
- **ICAR104 (2004)** - *“The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete”*, International Center for Aggregates Research, ICAR, Research report 104-1F;
- **Iravani, Said (1996)** - *“Mechanical properties of high-performance concrete”*, ACI Materials Journal, No. 93-M47, pp. 416-426;
- **Jastrzebski, Z. D. (1959)** - *“Nature and properties of engineering materials”*, John Wiley & Sons, Inc., Tokyo, Japan;
- **John, V. M. (1997)** - *“Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos”*, Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, EPUSP/ANTAC, São Paulo, Brasil, pp. 21–30;
- **Karaa, T. (1986)** - *“Evaluation technique des possibilités d’emplois des déchets dans la construction - Recherche expérimentale appliqué au cas de béton à partie des granulats de bétons recyclés”*, Tese de Doutorado da Universidade de Paris, França;
- **Khalaf, F. M.; Devenny, A. S. (2004)** - *“Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: Review”*, J Mater Civil Engineering, Vol. 16, pp. 331–40;
- **Khatib, J. M. (2005)** - *“Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate”*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 763-769;
- **Kikuchi, M.; Dosho, Y.; Narikawa, M.; Miutra, T. (1998)** - *“Application of recycled concrete aggregate concrete for structural concrete. Part 1 - Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete”*, Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate, Thomas Telford, pp. 55-68;

- **Latterza, L. M. (1994)** - “*Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação*”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil;
- **Leite, M. (2001)** - “*Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*”, Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, Brasil;
- **Levy, S. (2001)** - “*Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;
- **Lima, J. A. R. (1999)** - “*Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo São Carlos, Brasil;
- **Lovato, P. S.; Possan, E.; Dal Molin, D. C. C.; Masuero, A. B. (2012)** - “*Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes*”, *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 437–447;
- **Lydon, F. D.; Balendran, R. V. (1980)** - “*Some properties of higher strength lightweight concrete under short-term tensile stress*”, *Journal of Lightweight Concrete*, Vol. 2, No. 3, pp. 125-139;
- **Machado, Jr. E. F.; Latterza, L. M.; Mendes, C. L. (1998)** - “*Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda da abatimento do concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido*”, Congresso Brasileiro do Concreto, No. 40, Rio de Janeiro, 14p, CD-ROM;
- **Matias, D.; Brito, J. de (2005)** - “*Betão com agregados grossos reciclados de betão e recurso a adjuvantes*”, Relatório ICIST DTC nº. 3/05, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **McIntosh, J. D. (1957)** - “*The selection of natural aggregates for various types of concrete work*”, *Reinforced Concrete Review*, Vol. 4, No. 5, pp. 281-305;
- **Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008)** - “*Concrete: structure, properties and materials*”, 3ª edição, São Paulo, Brasil;
- **Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (1994)** - “*Concreto: estrutura, propriedades e materiais*”, São Paulo, Brasil;
- **Mehta, P. Kumar; Paulo J. M. Monteiro (2006)** - “*Concrete: Microstructure, properties and materials*”, third edition, Mc Graw Hil;

- **Merlet, J. D., Pimienta, P. (1993)** - *“Mechanical and physico-chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled concrete aggregates”*, Demolition and reuse of concrete and masonry, RILEM proceedings 23, Odense, pp. 343-353;
- **Mindess, S.; Young, J.F. (1981)** - *“Concrete”*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA;
- **Mindess, S.; Young, F. J.; Darwin, D. (2003)** - *“Concrete”*, Prentice-Hall, Pearson Education, Inc., New Jersey, USA;
- **Monteiro, P. J. M. (1991)** - *“A note on the hirsch model”*, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 947-950;
- **Mueller, A.; Winkler, A. (1998)** - *“Characteristics of processed concrete rubble”* Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, Thomas Telford Pub.; London, pp. 109-119;
- **Nassar, Roz-Ud-Din; Soroushian, P. (2012)** - *“Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement”*, Construction and Building Materials, Vol. 29, pp. 368–377;
- **Neville, A. M. (2003)** - *“Properties of concrete”*, Longman Scientific & Technical, England;
- **Newman, J. B. (1993)** - *“Properties of structural lightweight aggregate concrete”*, In Structural Lightweight Aggregate Concrete, Chapman & Hall, pp. 19-44;
- **Olorunsogo, F. T. (1999)** - *“Early age properties of recycled aggregate concrete”*, International Seminar on Exploiting Waste in Concrete, University of Dundee, Scotland, pp. 163 -170;
- **Özen, M. (2007)** - *“Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques”*, A thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey;
- **Pankhurst, R. N. W. (1993)** - *“Construction.” In Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Chapman & Hall;
- **Pelisser F.; Barcelos A.; Santos D.; Peterson M.; Bernardin A. M. (2012)** - *“Lightweight concrete production with low Portland cement consumption”*, Journal of Cleaner Production, Vol. 23, pp. 68-74;
- **Pereira, P. S. B. (2010)** - *“Betões estruturais com a incorporação de agregados finos reciclados de betão - Influência de superplastificantes”*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Punkki, J.; Odd E. Gjorv (1995)** - *“Effect of aggregate absorption on properties of high-strength lightweight concrete”*, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, pp. 604-616;

- **Quebaud, M. (1996)** - "*Caracterisation des granulats recyclés i étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats*", Tese de Doutoramento em Engenharia Cívil, Universidade d'Artois. França;
- **Quiroga, P. (2003)** - "*The effect of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete.*", Dissertation in Civil Engineering presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, USA;
- **Rahal, K. (2007)** - "*Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*", in Building and Environment, Vol. 42, Issue 1, pp. 407-415;
- **Ravindrarajah, R. et al. (1987)** - "*Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete*", Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 141, pp. 214-220;
- **Rossignolo, J. A.; M. V. Agnesini; J. A. Morais. (2000)** - "*High-performance LWAC for precast structures: Properties in the fresh and hardened state*", Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, pp. 699-708;
- **Rossignolo J. A.; Marcos V. C. Agnesini; Jerusa A. Morais (2003)** - "*Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates*", Cement & Concrete Composites, Vol. 25, pp. 77-82;
- **Sarkar, Shondeep L.; Chandra Satish; Berntsson Leif (1992)** - "*Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete*", Cement and Concrete Composites, Vol. 14, Issue 4, pp. 239-248;
- **Schulz, R. (1988)** - "*Concrete with recycled rubble. Development in West-Germany*", Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Vol. 2, Tóquio, Japão, Prentice Hall, pp. 550-559;
- **Shilstone, J. M. (1990)** - "*Concrete mixture optimization*", Concrete International: Design and Construction, Vol. 12, No 6;
- **Shilstone, J. M. (1999)** - "*The aggregate: The most important value-adding component in concrete*", Seventh Annual Symposium International Center for Aggregates Research, Austin, Texas - Referido por ICAR104 (2004);
- **Silva, Bruno (2007)** - "*Betão leve estrutural com agregados de argila expandida*", Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto;
- **Smeplass, S. (1992)** - "*Mechanical properties - Lightweight concrete*", Materials Design, SINTEF. 15.50;
- **Tavakoli, M.; Soroushian, P. (1996a)** - "*Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete*", Concrete International, Vol. 18, No. 11, p. 58-61;
- **Topcu, I.B. (1997)** - "*Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags*", Cement Concrete Research, Vol. 27, pp. 15-21;

- **Turatsinze, A., Garros, M. (2008)** - "*On the modulus of elasticity and strain capacity of self compacting concrete incorporating rubber aggregates*", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 52, pp. 1209-1215;
- **Virlogeux, M. (1986)** - "*Généralités sur les caractères des bétons légers*", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, França;
- **Valadares, F. (2009)** - "*Desempenho mecânico de betões estruturais com granulado de borracha proveniente de pneus usados*", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- **Vaysburd, A. M. (1992)** - "*Durability of lightweight concrete and its connections with the composition of concrete, design and construction methods*" Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, ACI SP-136, pp. 295-318;
- **Videla, Carlos; Mauricio López (2000)** - "*Mixture proportioning Methodology for structural sand-lightweight concrete*", ACI Materials Journal, Vol. 97, Issue 3, pp. 281-289;
- **Yasar, Ergul; Cengiz Duran Atis; Alaettin Kilic.; Hasan Gulsen. (2003)** - "*Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash*", Materials Letters, Vol. 57, Issue 15, pp. 2267-2270;
- **Wirquin, E. et al. (2000)** - "*Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés*", Materials and Structures, Vol. 33, pp. 403-08;
- **Zhang, Min-Hong; Odd E. Gjorv (1991)** - "*Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete*", ACI Materials Journal, Vol. 88, Issue 2, pp. 150-158;
- **Zordan, S. (1997)** - "*A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

PÁGINAS DE INTERNET

- Ciocchi, L. (2003) - Reciclagem de concreto:
www.piniweb.com.br/construcao/noticias/reciclagem-de-concreto-80112-1.asp (visitado em 14/04/2011);
- Instituto Nacional de Estatística:
www.ine.pt (visitado em 21/11/2011);
- ZORDAN, S. E. (2000) - Entulho da indústria da construção civil:
www.recycle.pcc.usp.br/fichatecnica.htm (visitado em 13/12/2011).

NORMAS

- **DIN 52108 (2002)** - *Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme;*
- **LNEC E 397 (1993)** - *Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão,* LNEC, Lisboa;
- **NP EN 933-1 (2000)** - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 933-4 (2002)** - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma,* IPQ, Lisboa,;
- **NP EN 1097-3 (2002)** - *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios,* IPQ, Lisboa,;
- **NP EN 1097-5 (2011)** - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 5: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 1097-6 (2003)** - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 12350-2 (2009)** - *Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 12350-6 (2009)** - *Ensaio do betão fresco: Massa volúmica,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 12390-3 (2003)** - *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 12390-6 (2003)** - *Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes,* IPQ, Lisboa;
- **NP EN 13055-2 (2005)** - *Agregados leves. Parte 2: Agregados leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais e para aplicações em camadas de materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos,* IPQ, Lisboa.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS	A1
ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES	B1
ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	C1
ANEXO D - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA	D1
ANEXO E - BARIDADE	E1
ANEXO F - RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO	F1
ANEXO G - TEOR EM ÁGUA	G1
ANEXO H - ÍNDICE DE FORMA	H1
ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	I1
ANEXO J - MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO	J1
ANEXO K - QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS	K1
ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	L1
ANEXO M - RESISTÊNCIA À TRACCAO POR COMPRESSAO DIAMETRAL	M1
ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE	N1
ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO	O1

ANEXO A

FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS:

- FICHA TÉCNICA DO LIGANTE UTILIZADO (CEM I 42,5 R)
- FICHA TÉCNICA DO AGREGADO LEVE ESTRUTURAL UTILIZADO (LECA HD)
- FICHA TÉCNICA DO AGREGADO LEVE NÃO ESTRUTURAL UTILIZADO (LECA M)
- FICHA TÉCNICA DA AREIA FINA UTILIZADA
- FICHA TÉCNICA DA AREIA GROSSA UTILIZADA

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada e muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.
Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).
Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.

Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

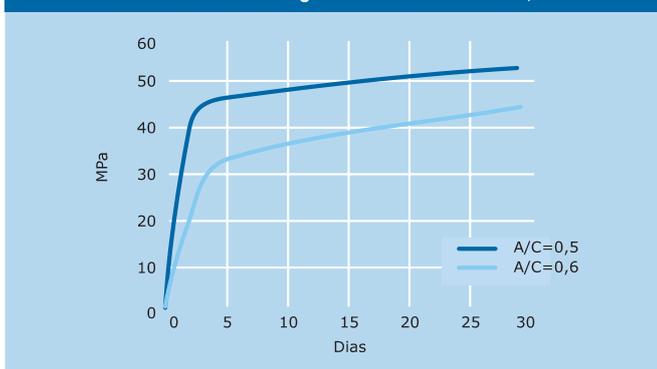
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5
NP EN 196-1		

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direcção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt



Leca® ESTRUTURAL HD

Descrição do produto

Granulado de argila expandida com granulometria entre 4 e 12 mm.

Armazenamento

O manuseamento do material durante o transporte e o armazenamento podem influenciar as suas características. Ex.: segregação, quebra ou absorção de humidade podem ocorrer, o que pode influenciar algumas características do material expedido.

Aplicações

Betões leves estruturais, pré-fabricação.

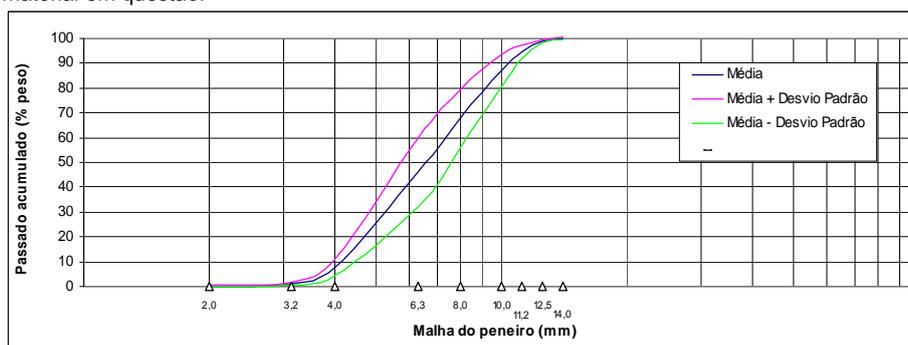
Embalagem

Granel

Unisaco com 1,5 m³

Curva granulométrica (NP EN 933-1)

A curva e valores apresentados neste ponto referem-se a 12 testes efectuados a 96 amostras recolhidas durante 2010, e não devem ser considerados como uma especificação geral do material em questão.



Malha do peneiro [mm]	2	3,15	4	6,3	8	10	11,2	12,5	14
Média-Passado acumulado [% peso]	0	1	8	46	68	87	95	99	100
Desvio Padrão	0	1	3	14	12	6	3	1	1
Média+Desvio Padrão	1	2	11	60	79	93	98	99	100
Média-Desvio Padrão	0	1	5	32	56	81	92	98	99
Max. Valor Declarado		15							
Mini. Valor Declarado								90	
d ₅₀ ± Desvio Padrão		6,7	±	0,9					



Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. | Tojeira, Apartado 16 | 3240-908 Avelar | T. 51 236 620 600 | F. 236 620 620 | www.weber.com.pt

Assistência Técnica Telefónica: 800 200 025

FT20110204LecaEstrutural HD

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS



Características físicas do produto

- Humidade na entrega: acima de 3% (kg/kg), variando com as condições climatéricas;
- Forma da partícula do agregado leve de argila expandida: aproximadamente esférica;
- Reacção ao fogo: incombustível Euro Classe A1 Decisão 96/603/CE⁽¹⁾;
- Resistência ao esmagamento: 5 MPa NP EN 13055-1;
- Percentagem de partículas esmagadas: 22% da massa NP EN 933-5;
- Densidade aparente seca: 610 kg/m³ ± 15% NP EN 1097-3;
- Densidade da partícula: 1 080 kg/m³ ± 150 kg/m³ NP EN 1097-6;
- Absorção de água após 24h de imersão: <20% da massa seca NP EN 1097-6;
- Humidade higroscópica: material não higroscópico EN 1097-10.

Características químicas do produto

- Teor de cloretos (Cl): <0,1 % NP EN 1744-1;
- Sulfato solúvel em ácido (SO₃): <0,2 % NP EN 1744-1;
- Teor de enxofre (S): <0,2 % NP EN 1744-1;
- pH = 9-10.

Para mais informação consultar a Declaração de Conformidade CE segundo a NP EN 13055-1.

A informação sobre o produto constante desta Ficha é apresentada de boa fé e baseia-se na experiência e conhecimento acumulados, em situações de utilização tipificadas. As condições de aplicação e utilização poderão influenciar o comportamento do produto, pelo que será aconselhável realizar verificações e testes em cada situação específica.

(1) Alterada pela Decisão 2000/605/CE



Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. | Tojeira, Apartado 16 | 3240-908 Avelar | T. 51 236 620 600 | F. 236 620 620 | www.weber.com.pt

Assistência Técnica Telefónica: 800 200 025

FT20110204LecaEstrutural HD



Leca® M

Descrição do produto

Granulado de argila expandida com granulometria entre 4 e 12,5 mm.

Armazenamento

O manuseamento do material durante o transporte e o armazenamento podem influenciar as suas características. Ex.: segregação, quebra ou absorção de humidade podem ocorrer, o que pode influenciar algumas características do material expedido.

Aplicações

Isolamento de pisos térreos, coberturas e terraços, acessíveis ou não acessíveis; criação de pendentes; betões leves de enchimento e de isolamento; pré-fabricação; agricultura e floricultura.

Embalagem

Granel

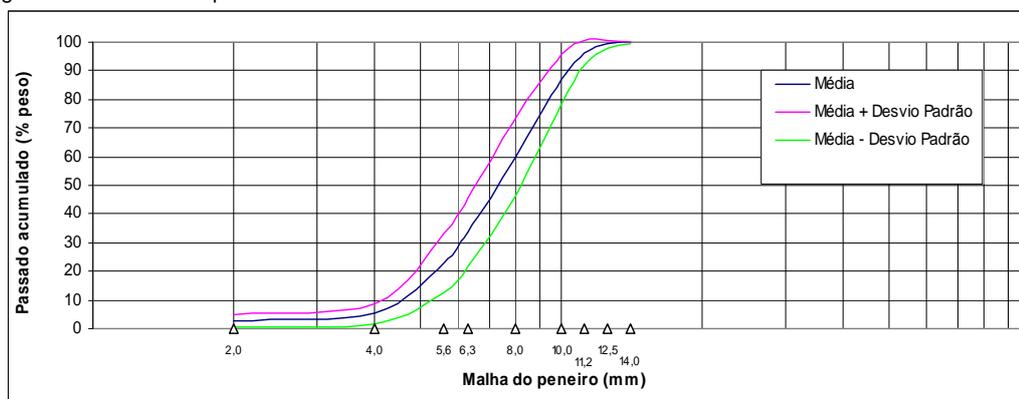
Unisaco com 3 m³

Unisaco com 1,5 m³

Saco 50 l

Curva granulométrica (NP EN 933-1)

A curva e valores apresentados neste ponto referem-se a 419 testes efectuados a 3352 amostras recolhidas durante 2010 e não devem ser considerados como uma especificação geral do material em questão.



Malha do peneiro [mm]	2,00	4,00	5,60	6,30	8,00	10,00	11,20	12,50	14,00
Média-Passado acumulado [% peso]	3	5	23	34	60	87	96	99	100
Desvio Padrão	2	4	10	12	14	9	4	1	0
Média+Desvio Padrão	5	9	33	46	73	96	100	100	100
Média-Desvio Padrão	1	2	12	22	46	78	92	98	100
Max. Valor Declarado		15							
Mini. Valor Declarado								90	

d ₅₀ ± Desvio Padrão	7,4	±	1,0
---------------------------------	-----	---	-----

SAINT-GOBAIN

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS



Características físicas do produto

- Humidade na entrega: acima de 3% (kg/kg), variando com as condições climáticas;
- Forma da partícula do agregado leve de argila expandida: aproximadamente esférica;
- Reacção ao fogo: incombustível Euro Classe A1 Decisão 96/603/CE⁽¹⁾;
- Resistência ao esmagamento: 1,0 MPa NP EN 13055-1;
- Percentagem de partículas esmagadas: 25 % da massa NP EN 933-5;
- Massa volúmica aparente seca: 330kg/m³ ± 15% NP EN 1097-3;
- Massa volúmica da partícula: 550 kg/m³ ± 15% NP EN 1097-6;
- Resistência sonora (sons aéreos R) de uma camada com 10 cm de espessura, confinada entre duas camadas de betão/argamassa, e uma f = 500 Hz: 34 dB; (Valor estimado segundo Tabelas Técnicas J. S. Brazão Farinha e A. Correia dos Reis Edições Técnicas ETL Edição 2000)
- Absorção de água após 24h de imersão: <34 % da massa seca NP EN 1097-6;
- Humidade higroscópica: material não higroscópico EN 1097-10.

Características químicas do produto

- Teor de cloretos (Cl): <0,1 % NP EN 1744-1;
- Sulfato solúvel em ácido (SO₃): <0,4 % NP EN 1744-1;
- Teor de enxofre (S): <0,2 % NP EN 1744-1;
- pH = 9-10.

Para mais informação consultar a Declaração de Conformidade CE segundo a NP EN 13055-1.

A informação sobre o produto constante desta Ficha é apresentada de boa fé e baseia-se na experiência e conhecimento acumulados, em situações de utilização tipificadas. As condições de aplicação e utilização poderão influenciar o comportamento do produto, pelo que será aconselhável realizar verificações e testes em cada situação específica.
(1) Alterada pela Decisão 2000/605/CE



Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. | Tojeira, Apartado 16 | 3240-908 Avelar | T. 51 236 620 600 | F. 236 620 620 | www.weber.com.pt

Assistência Técnica Telefónica: 800 200 025

FT20110204Leca M

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

GRUPO SOARVAMIL

Produto: Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100		
6,3	100		
4	100	100	100
2	100	95	100
1	99	79	100
0,5	77		
0,25	18	0	48
0,125	1		
0,063	0,5	0,0	3,0

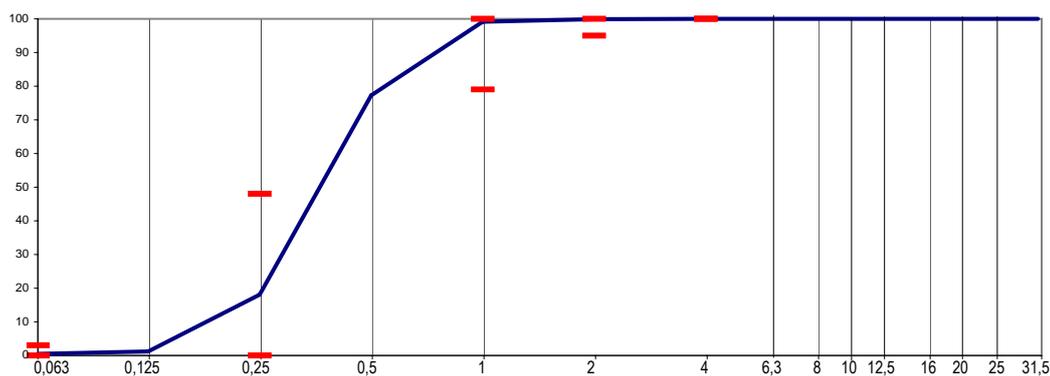
¹⁾ Valores em percentagem de passados

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/2	
Granulometria	G _F -85	G _F -85-G _{TC} -20
Massa Volúmica:		
– Material impermeável	2,63 Mg/m ³	
– Partículas secas em estufa	2,62 Mg/m ³	
– Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
Absorção de água	0,2%	
Teor de finos	f ₃	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	□ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,8}	
Enxofre total	0,04%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retracção por secagem	0,019%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,03	1,53	2,53
CF	2,27	1,77	2,77



Data: 03/11/2006

O Director Produção _____

F06.01 - 16/09/2005

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto: Origem:

Aplicação:

Tipo:

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100	100	100
6,3	100	98	100
4	97	92	99
2	85	65	99
1	52	32	72
0,5	12		
0,25	3	0	23
0,125	1		
0,063	0,4	0,0	3,0

¹⁾ Valores em percentagem de passados

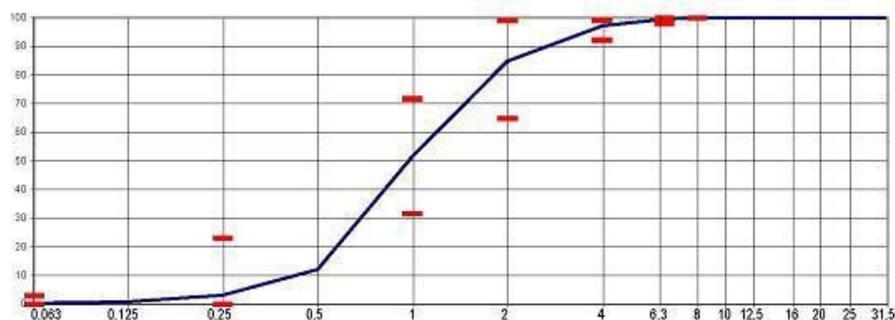
Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,49	2,99	3,99
CF	3,81	3,31	4,31

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/4	
Granulometria	G ₈₅	G ₉₀ -G _{TC20}
Massa Volúmica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m ³	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
Absorção de água	0,5%	
Teor de finos	f ₃	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS ₀₂	
Enxofre total	0,07%	
Teor de Húmus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	DND	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Retração por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcali-silica	DND	
Resistência choque térmico	DND	

NA- Não aplicável DND-Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

F 06.01 - 16/09/2005

ANEXO B

COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Rácio para se atingir a curva de Leca HD

Peneiro (mm)	Leca HD / Leca M	Leca HD / RLHD	Leca HD / RLM
14	0,00	0,00	0,00
12,5	0,79	0,16	0,14
11,2	1,01	0,81	0,73
8	0,82	0,89	1,37
6,3	1,07	1,63	2,13
5,6	1,00	2,34	3,41
4	1,01	4,03	4,47
2	1,96	0,68	0,50

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca HD</i>	14	-	16	1092	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		4,441	0,989	1,080
	11,2	-	12,5		17,818	3,970	4,335
	8	-	11,2		70,113	15,621	17,058
	6,3	-	8		70,680	15,747	17,196
	5,6	-	6,3		42,408	9,448	10,318
	4	-	5,6		122,280	27,244	29,750
	2	-	4		20,908	4,658	5,087
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,099	148,184	268,711

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca M</i>	14	-	16	595	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		4,428	0,987	0,587
	11,2	-	12,5		17,818	3,970	2,362
	8	-	11,2		70,113	15,621	9,295
	6,3	-	8		70,680	15,747	9,370
	5,6	-	6,3		42,408	9,448	5,622
	4	-	5,6		122,280	27,244	16,210
	2	-	4		20,908	4,658	2,772
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,087	148,181	230,103

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BHD20RHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca HD</i>	14	-	16	1092	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		3,522	0,785	0,857
	11,2	-	12,5		14,254	3,176	3,468
	8	-	11,2		56,091	12,497	13,647
	6,3	-	8		56,544	12,598	13,757
	5,6	-	6,3		33,926	7,559	8,254
	4	-	5,6		97,824	21,795	23,800
	2	-	4		16,726	3,727	4,069
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
	<i>RLHD</i>	14	-		16	1735	0,000
12,5		-	14	0,881	0,196		0,340
11,2		-	12,5	3,564	0,794		1,378
8		-	11,2	14,023	3,124		5,421
6,3		-	8	14,136	3,149		5,464
5,6		-	6,3	8,482	1,890		3,279
4		-	5,6	24,456	5,449		9,454
2		-	4	4,182	0,932		1,616
1		-	2	-	-		-
0,5		-	1	-	-		-
0,25		-	0,5	-	-		-
0,125		-	0,25	-	-		-
0,063		-	0,125	-	-		-
Areia grossa				2610	216,478		48,231
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	278,690

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BHD50RHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca HD</i>	14	-	16	1092	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,536
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	2,168
	8	-	11,2		35,057	7,811	8,529
	6,3	-	8		35,340	7,874	8,598
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	5,159
	4	-	5,6		61,140	13,622	14,875
	2	-	4		10,454	2,329	2,543
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLHD</i>	14	-	16	1735	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,851
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	3,444
	8	-	11,2		35,057	7,811	13,551
	6,3	-	8		35,340	7,874	13,661
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	8,197
	4	-	5,6		61,140	13,622	23,634
	2	-	4		10,454	2,329	4,041
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	293,673

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BM20RHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca M</i>	14	-	16	595	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		3,522	0,785	0,467
	11,2	-	12,5		14,254	3,176	1,890
	8	-	11,2		56,091	12,497	7,436
	6,3	-	8		56,544	12,598	7,496
	5,6	-	6,3		33,926	7,559	4,497
	4	-	5,6		97,824	21,795	12,968
	2	-	4		16,726	3,727	2,217
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLHD</i>	14	-	16	1735	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		0,881	0,196	0,340
	11,2	-	12,5		3,564	0,794	1,378
	8	-	11,2		14,023	3,124	5,421
	6,3	-	8		14,136	3,149	5,464
	5,6	-	6,3		8,482	1,890	3,279
	4	-	5,6		24,456	5,449	9,454
	2	-	4		4,182	0,932	1,616
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	247,808

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BM50RHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca M</i>	14	-	16	595	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,292
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	1,181
	8	-	11,2		35,057	7,811	4,647
	6,3	-	8		35,340	7,874	4,685
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	2,811
	4	-	5,6		61,140	13,622	8,105
	2	-	4		10,454	2,329	1,386
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLHD</i>	14	-	16	1735	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,851
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	3,444
	8	-	11,2		35,057	7,811	13,551
	6,3	-	8		35,340	7,874	13,661
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	8,197
	4	-	5,6		61,140	13,622	23,634
	2	-	4		10,454	2,329	4,041
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,705	148,319	274,457

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

B100RHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>RLHD</i>	14	-	16	1735	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		4,403	0,981	1,702
	11,2	-	12,5		17,818	3,970	6,888
	8	-	11,2		70,113	15,621	27,103
	6,3	-	8		70,680	15,747	27,322
	5,6	-	6,3		42,408	9,448	16,393
	4	-	5,6		122,280	27,244	47,268
	2	-	4		20,908	4,658	8,082
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	318,643

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BHD20RM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca HD</i>	14	-	16	1092	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		3,522	0,785	0,857
	11,2	-	12,5		14,254	3,176	3,468
	8	-	11,2		56,091	12,497	13,647
	6,3	-	8		56,544	12,598	13,757
	5,6	-	6,3		33,926	7,559	8,254
	4	-	5,6		97,824	21,795	23,800
	2	-	4		16,726	3,727	4,069
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLM</i>	14	-	16	878	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		0,881	0,196	0,172
	11,2	-	12,5		3,564	0,794	0,697
	8	-	11,2		14,023	3,124	2,742
	6,3	-	8		14,136	3,149	2,764
	5,6	-	6,3		8,482	1,890	1,658
	4	-	5,6		24,456	5,449	4,781
	2	-	4		4,182	0,932	0,818
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	265,370

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BHD50RM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca HD</i>	14	-	16	1092	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,536
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	2,168
	8	-	11,2		35,057	7,811	8,529
	6,3	-	8		35,340	7,874	8,598
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	5,159
	4	-	5,6		61,140	13,622	14,875
	2	-	4		10,454	2,329	2,543
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLM</i>	14	-	16	878	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,430
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	1,742
	8	-	11,2		35,057	7,811	6,854
	6,3	-	8		35,340	7,874	6,909
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	4,146
	4	-	5,6		61,140	13,622	11,954
	2	-	4		10,454	2,329	2,044
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	260,372

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BM20RM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca M</i>	14	-	16	595	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		3,522	0,785	0,467
	11,2	-	12,5		14,254	3,176	1,890
	8	-	11,2		56,091	12,497	7,436
	6,3	-	8		56,544	12,598	7,496
	5,6	-	6,3		33,926	7,559	4,497
	4	-	5,6		97,824	21,795	12,968
	2	-	4		16,726	3,727	2,217
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLM</i>	14	-	16	878	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		0,881	0,196	0,172
	11,2	-	12,5		3,564	0,794	0,697
	8	-	11,2		14,023	3,124	2,742
	6,3	-	8		14,136	3,149	2,764
	5,6	-	6,3		8,482	1,890	1,658
	4	-	5,6		24,456	5,449	4,781
	2	-	4		4,182	0,932	0,818
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	234,488

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

BM50RM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>Leca M</i>	14	-	16	595	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,292
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	1,181
	8	-	11,2		35,057	7,811	4,647
	6,3	-	8		35,340	7,874	4,685
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	2,811
	4	-	5,6		61,140	13,622	8,105
	2	-	4		10,454	2,329	1,386
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
<i>RLM</i>	14	-	16	878	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		2,202	0,490	0,430
	11,2	-	12,5		8,909	1,985	1,742
	8	-	11,2		35,057	7,811	6,854
	6,3	-	8		35,340	7,874	6,909
	5,6	-	6,3		21,204	4,724	4,146
	4	-	5,6		61,140	13,622	11,954
	2	-	4		10,454	2,329	2,044
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
	0,063	-	0,125		-	-	-
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,705	148,319	241,156

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO B - COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

B100RM

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
<i>RLM</i>	14	-	16	878	0,000	0,000	0,000
	12,5	-	14		4,403	0,981	0,861
	11,2	-	12,5		17,818	3,970	3,484
	8	-	11,2		70,113	15,621	13,708
	6,3	-	8		70,680	15,747	13,819
	5,6	-	6,3		42,408	9,448	8,291
	4	-	5,6		122,280	27,244	23,907
	2	-	4		20,908	4,658	4,088
	1	-	2		-	-	-
	0,5	-	1		-	-	-
	0,25	-	0,5		-	-	-
	0,125	-	0,25		-	-	-
0,063	-	0,125	-	-	-		
Areia grossa				2610	216,478	48,231	125,883
Areia fina				2604	99,974	22,274	58,002
Total					665,061	148,176	252,043

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

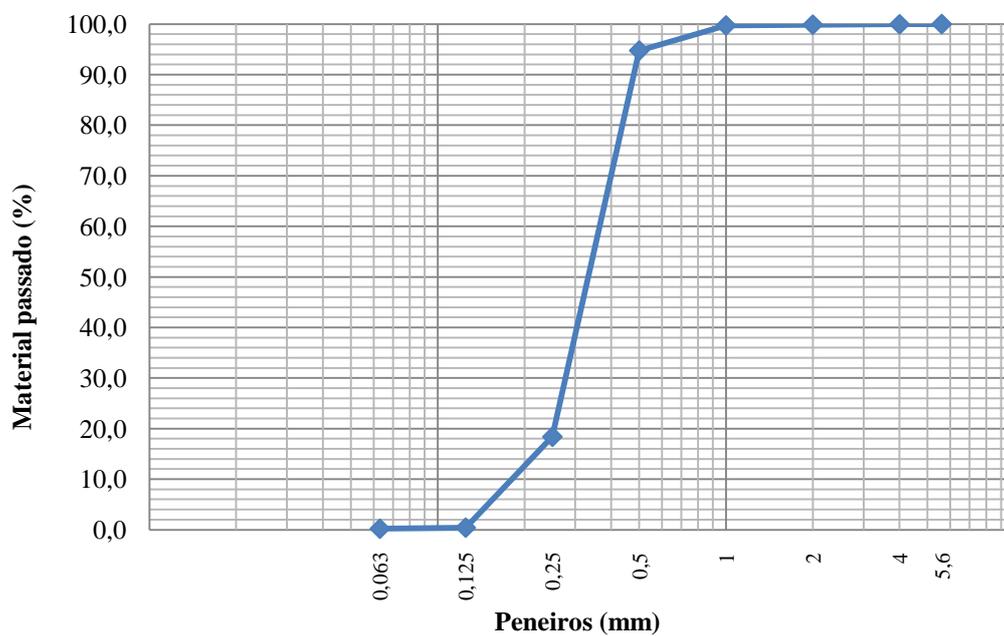
ANEXO C

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Areia fina

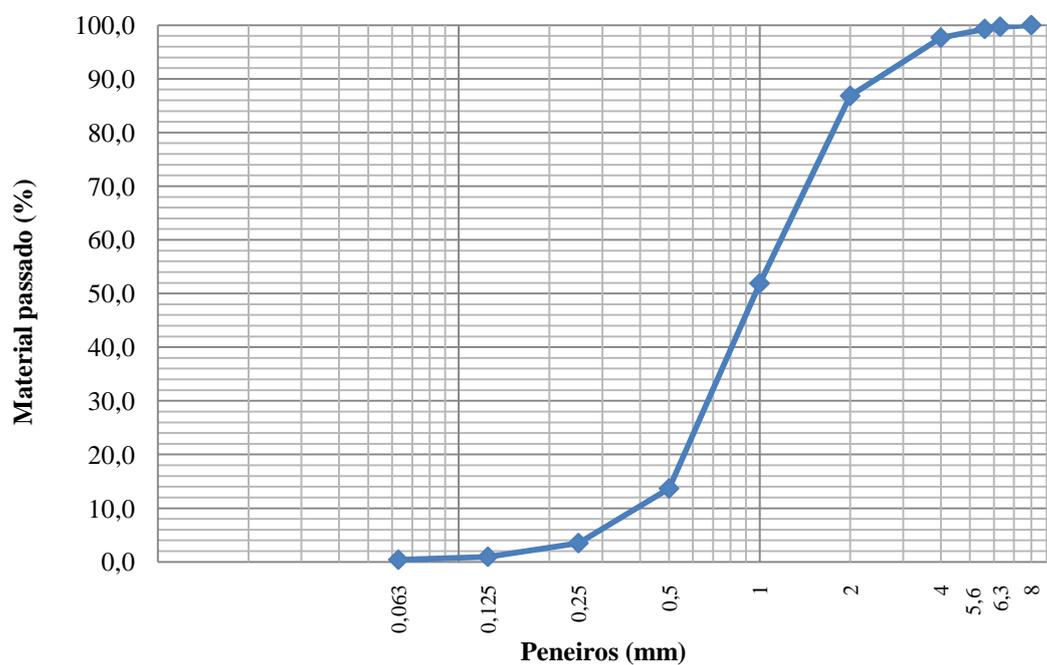
Peneiros (mm)	Areia fina			
	Resíduo (g)	Resíduo (%)	Resíduo acumulado (Passado (%))	Resíduo acumulado (Retido (%))
5,6	0	0,00	100,00	0,0
4	0,3	0,05	99,95	0,05
2	0,5	0,08	99,88	0,12
1	1	0,16	99,72	0,28
0,5	32	4,96	94,76	5,24
0,25	492,5	76,38	18,38	81,62
0,125	115,9	17,97	0,40	99,60
0,063	1,3	0,20	0,20	99,80
Resíduo	0,5	0,08	-	-
Totais	644	99,88	M.F.	1,87
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				644,8
<i>Massa final (g)</i>				644,0
<i>Erro (%)</i>				0,12
<i>D máx. (mm)</i>				0,5
<i>D mín. (mm)</i>				0,25



ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Areia grossa

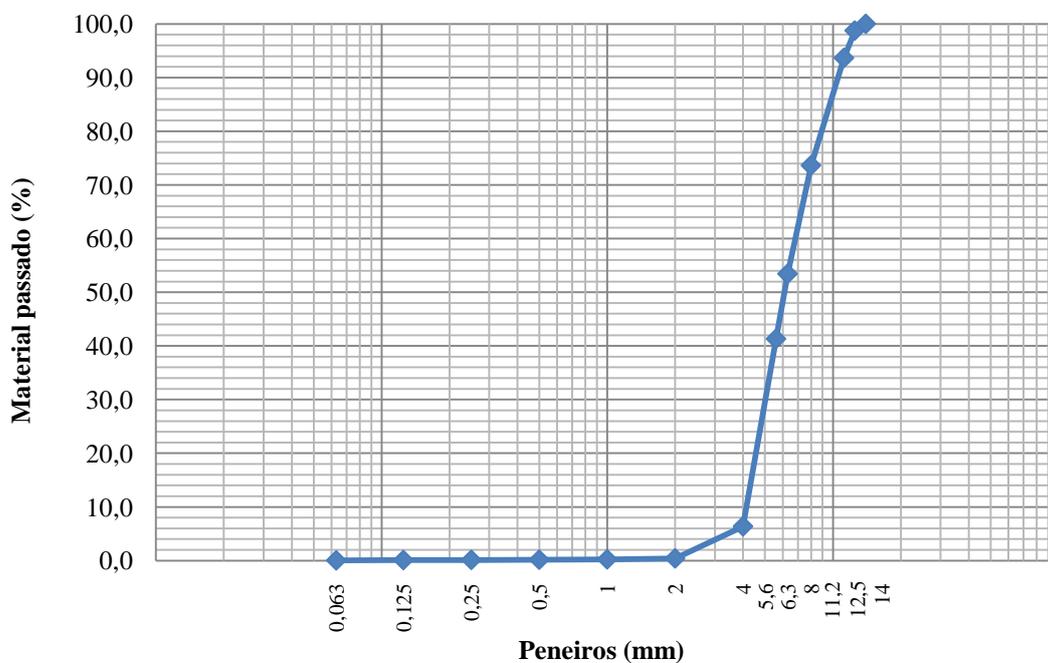
<i>Areia grossa</i>				
Peneiros (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
8	0	0,00	100,0	0,0
6,3	2,2	0,29	99,7	0,3
5,6	3,1	0,41	99,3	0,7
4	12,2	1,63	97,7	2,3
2	81	10,84	86,8	13,2
1	261,2	34,94	51,9	48,1
0,5	285,7	38,22	13,7	86,3
0,25	76	10,17	3,5	96,5
0,125	19,1	2,56	0,9	99,1
0,063	4,1	0,55	0,4	99,6
Resíduo	1,4	0,19	-	-
Totais	746	99,80	M.F.	3,46
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				747,5
<i>Massa final (g)</i>				747,0
<i>Erro (%)</i>				0,20
<i>D máx. (mm)</i>				4
<i>D mín. (mm)</i>				0,5



ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Leca HD

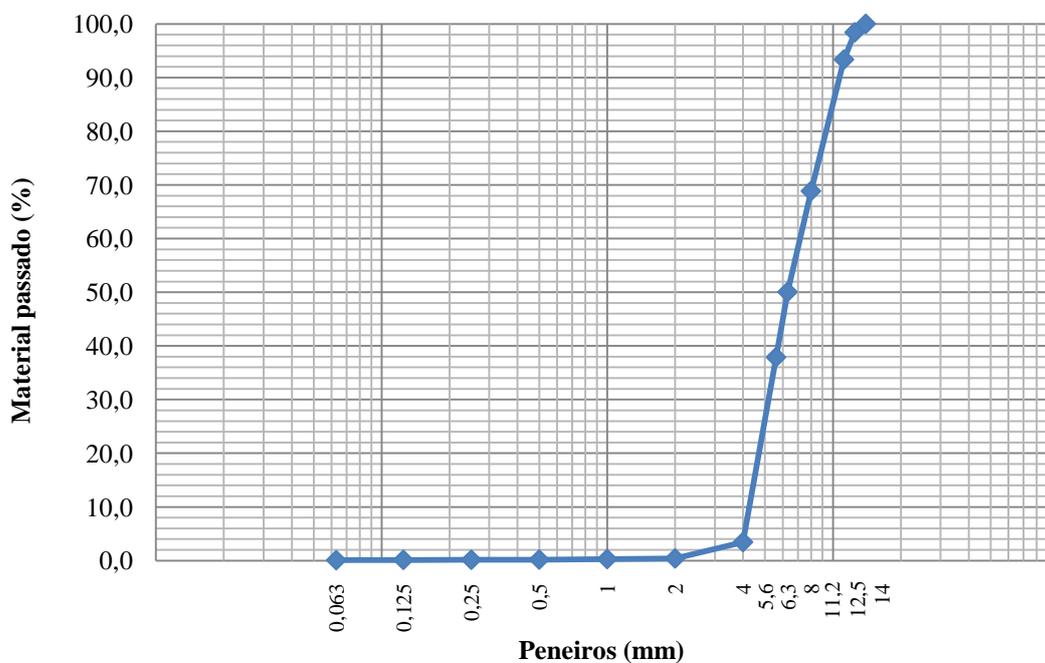
<i>Leca HD</i>				
Peneiros (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
14	0,0	0	100	0
12,5	17,1	1,26	98,74	1,26
11,2	69,2	5,09	93,65	6,35
8	272,3	20,03	73,62	26,38
6,3	274,5	20,19	53,42	46,58
5,6	164,7	12,12	41,31	58,69
4	474,9	34,94	6,37	93,63
2	81,2	5,97	0,40	99,60
1	2,3	0,17	0,23	99,77
0,5	1,0	0,07	0,15	99,85
0,25	0,4	0,03	0,13	99,87
0,125	0,5	0,04	0,09	99,91
0,063	0,8	0,06	0,03	99,97
Resíduo	0,2	0,01	-	-
Totais	1359,1	99,80	M.F.	6,67
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				1359,3
<i>Massa final (g)</i>				1359,2
<i>Erro (%)</i>				0,01
<i>D máx. (mm)</i>				11,2
<i>D mín. (mm)</i>				4



ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Leca M

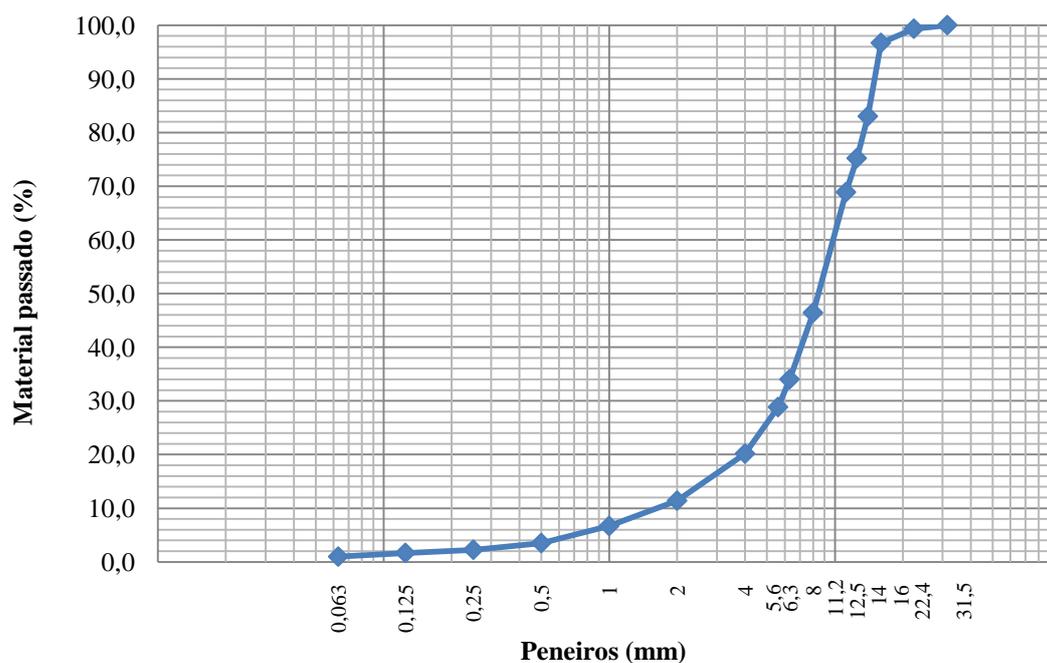
<i>Leca M</i>				
Peneiros (mm)	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
14	0	0	100	0
12,5	23,4	1,59	98,41	1,59
11,2	74,5	5,06	93,35	6,65
8	361,1	24,52	68,84	31,16
6,3	276,8	18,79	50,04	49,96
5,6	179,2	12,17	37,88	62,12
4	507,2	34,44	3,44	96,56
2	45,0	3,06	0,39	99,61
1	1,6	0,11	0,28	99,72
0,5	1,4	0,10	0,18	99,82
0,25	0,6	0,04	0,14	99,86
0,125	0,3	0,02	0,12	99,88
0,063	0,8	0,05	0,07	99,93
Resíduo	0,7	0,05	-	-
Totais	1472,6	99,98	M.F.	6,54
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				1472,9
<i>Massa final (g)</i>				1472,6
<i>Erro (%)</i>				0,02
<i>D máx. (mm)</i>				11,2
<i>D mín. (mm)</i>				4



ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

RLHD

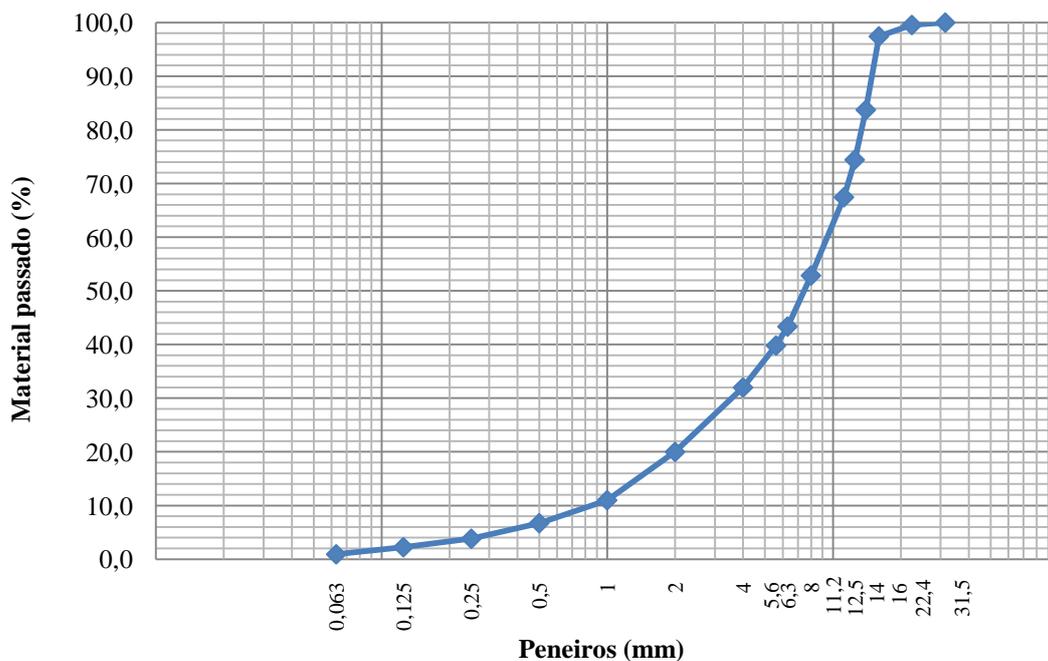
Peneiros (mm)	RLHD			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0,0	0,0	100,00	0,00
22,4	17,4	0,7	99,34	0,66
16	69,6	2,7	96,69	3,31
14	358,7	13,7	83,02	16,98
12,5	205,2	7,8	75,20	24,80
11,2	165,9	6,3	68,88	31,12
8	589,7	22,5	46,41	53,59
6,3	325,5	12,4	34,01	65,99
5,6	135,7	5,2	28,84	71,16
4	227,7	8,7	20,16	79,84
2	230,0	8,8	11,40	88,60
1	123,9	4,7	6,68	93,32
0,5	83,5	3,2	3,50	96,50
0,25	32,8	1,2	2,25	97,75
0,125	15,5	0,6	1,66	98,34
0,063	18,0	0,7	0,97	99,03
Resíduo	19,0	0,7	-	-
Totais	2618,1	99,75	M.F.	7,19
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				2624,6
<i>Massa final (g)</i>				2624,1
<i>Erro (%)</i>				0,06
<i>D máx. (mm)</i>				16
<i>D mín. (mm)</i>				0,5



ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

RLM

Peneiros (mm)	RLM			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
31,5	0	0	100	0,00
22,4	11,60	0,4	99,56	0,44
16	55,40	2,1	97,43	2,57
14	357,58	13,7	83,73	16,27
12,5	242,87	9,3	74,43	25,57
11,2	181,97	7,0	67,46	32,54
8	380,81	14,6	52,87	47,13
6,3	247,94	9,5	43,37	56,63
5,6	92,62	3,5	39,82	60,18
4	203,90	7,8	32,01	67,99
2	313,21	12,0	20,01	79,99
1	234,91	9,0	11,01	88,99
0,5	111,65	4,3	6,73	93,27
0,25	75,76	2,9	3,83	96,17
0,125	41,14	1,6	2,25	97,75
0,063	34,44	1,3	0,93	99,07
Resíduo	20,12	0,8	-	-
Totais	2605,9	99,8	M.F.	6,72
<i>Massa da amostra seca (g)</i>				2610,1
<i>Massa final (g)</i>				2605,9
<i>Erro (%)</i>				0,16
<i>D máx. (mm)</i>				16
<i>D mín. (mm)</i>				0,25



ANEXO D

MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

ANEXO D - MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Material	M₁ (g)	M₂ (g)	M₃ (g)	M₄ (g)
<i>Areia fina</i>	1355,4	2366,1	1352,7	1530,2
<i>Areia grossa</i>	1044,6	2175,4	1042,3	1530,2
<i>Leca HD</i>	1441,1	3358,7	1279,7	3089,9
<i>Leca M</i>	798,0	2795,6	647,6	3086,9
<i>RLHD</i>	1694,1	3937,0	1464,0	3086,9
<i>RLM</i>	1324,0	3245,0	1023,1	3086,9

Material	ρ_a (kg/m³)	ρ_{rd} (kg/m³)	ρ_{ssd} (kg/m³)	WA₂₄ (%)
<i>Areia fina</i>	2617,45	2609,05	2603,85	0,20
<i>Areia grossa</i>	2624,78	2615,42	2609,66	0,22
<i>Leca HD</i>	1265,90	1229,29	1091,61	12,61
<i>Leca M</i>	689,74	732,58	594,51	23,22
<i>RLHD</i>	2384,75	2007,23	1734,60	15,72
<i>RLM</i>	1182,77	1135,60	877,52	29,41

M₁ - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M₂ - massa do picnómetro, contendo o agregado saturado imerso em água (g);

M₃ - massa do provete de ensaio após secagem em estufa (g).

M₄ - massa do picnómetro cheio de água (g);

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m³);

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m³);

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m³);

WA₂₄ - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%).

ANEXO E

BARIDADE

ANEXO E - BARIDADE

Material	Amostra	M₁ (kg)	M₂ (g)	M_{prov} (kg)	V (m³)	b_i (kg/m³)	B (kg/m³)
<i>Areia fina</i>	1	1,8576	6,3412	4,4836	0,003	1494,53	
	2	1,8576	6,3356	4,4780	0,003	1492,67	1500,68
	3	1,8576	6,4021	4,5445	0,003	1514,83	
<i>Areia grossa</i>	1	1,8576	6,3142	4,4566	0,003	1485,53	
	2	1,8576	6,3364	4,4788	0,003	1492,93	1490,66
	3	1,8576	6,3381	4,4805	0,003	1493,50	
<i>Leca HD</i>	1	1,8576	3,9010	2,0434	0,003	681,13	
	2	1,8576	3,9054	2,0478	0,003	682,60	681,42
	3	1,8576	3,8992	2,0416	0,003	680,53	
<i>Leca M</i>	1	1,8576	2,8883	1,0307	0,003	343,57	
	2	1,8576	2,8662	1,0086	0,003	336,20	339,68
	3	1,8576	2,8754	1,0178	0,003	339,27	
<i>RLHD</i>	1	1,8576	4,8691	3,0115	0,003	1003,83	
	2	1,8576	4,8386	2,9810	0,003	993,67	999,10
	3	1,8576	4,8570	2,9994	0,003	999,80	
<i>RLM</i>	1	1,8576	3,2555	1,3979	0,003	465,97	
	2	1,8576	3,2413	1,3837	0,003	461,23	463,29
	3	1,8576	3,2456	1,3880	0,003	462,67	

M₁ - massa do recipiente de ensaio (g);

M₂ - massa do recipiente de ensaio com o provete de ensaio (g);

M_{prov} - massa do provete de ensaio (g);

V - volume do recipiente de ensaio (m³);

b_i - massa volúmica aparente do provete de ensaio i (kg/m³);

B - massa volúmica aparente do agregado (kg/m³).

ANEXO F

RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

ANEXO F - RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

Material	Amostra	F (N)	A (mm²)	σ_i (MPa)	σ (MPa)
Leca HD	1	77300	13273,23	5,82	5,71
	2	75400	13273,23	5,68	
	3	74700	13273,23	5,63	
Leca M	1	16100	13273,23	1,21	1,20
	2	15900	13273,23	1,20	
	3	15700	13273,23	1,18	
RLHD	1	97400	13273,23	7,34	7,55
	2	108300	13273,23	8,16	
	3	94900	13273,23	7,15	
RLM	1	25700	13273,23	1,94	1,95
	2	26100	13273,23	1,97	
	3	25800	13273,23	1,94	

F - força aplicada no provete (N);

A - área da superfície de contacto do provete (mm²);

σ_i - tensão do provete de ensaio *i* (MPa);

σ - tensão de esmagamento do agregado (MPa).

ANEXO G

TEOR EM ÁGUA

ANEXO G - TEOR EM ÁGUA

Material	1ª betonagem - BHD			2ª betonagem - BM		
	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1372,4	1333,0	2,96	1313,3	1274,0	3,08
<i>Areia grossa</i>	1549,9	1513,7	2,39	1516,1	1481,3	2,35
<i>Leca HD</i>	1157,9	1098,9	5,37	1158,7	1103,3	5,02
<i>Leca M</i>	1547,5	1475,5	4,88	1245,3	1190,8	4,58
<i>RLHD</i>	1275,3	1213,5	5,09	1507,2	1434,5	5,07
<i>RLM</i>	1028,6	976,8	5,30	1226,8	1163,0	5,49

Material	3ª betonagem - BHD20RHD			4ª betonagem - BM20RHD		
	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1340,4	1301,6	2,98	1312,7	1272,6	3,15
<i>Areia grossa</i>	1500,4	1461,9	2,63	1529,4	1492,1	2,50
<i>Leca HD</i>	1132,1	1078,3	4,99	1242,6	1187,6	4,63
<i>Leca M</i>	1523,5	1465,4	3,96	1357,1	1309,5	3,63
<i>RLHD</i>	1245,3	1185,5	5,04	1215,3	1158,5	4,90
<i>RLM</i>	1015,6	963,4	5,42	1324,1	1256,1	5,41

Material	5ª betonagem - BHD50RHD			6ª betonagem - BM50RHD		
	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1312,7	1272,6	3,15	1354,4	1313,6	3,11
<i>Areia grossa</i>	1529,4	1492,1	2,50	1550,0	1512,1	2,51
<i>Leca HD</i>	1242,6	1187,6	4,63	1136,7	1088,9	4,39
<i>Leca M</i>	1357,1	1309,5	3,63	1500,5	1437,5	4,38
<i>RLHD</i>	1215,3	1158,5	4,90	1500,3	1429,5	4,95
<i>RLM</i>	1324,1	1256,1	5,41	1528,6	1456,8	4,93

Material	7ª betonagem - B100RHD			8ª betonagem - BHD20RM		
	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1500,4	1458,1	2,90	1500,4	1458,1	2,90
<i>Areia grossa</i>	1512,4	1475,9	2,47	1512,4	1475,9	2,47
<i>Leca HD</i>	1207,1	1155,9	4,43	1207,1	1155,9	4,43
<i>Leca M</i>	1500,5	1440,8	4,14	1500,5	1440,5	4,17
<i>RLHD</i>	1255,3	1193,5	5,18	1255,3	1193,5	5,18
<i>RLM</i>	1228,6	1162,8	5,66	1228,6	1166,8	5,30

Material	9ª betonagem - BM20RM			10ª betonagem - BHD50RM		
	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1302,4	1263,7	3,06	1200,4	1165,9	2,96
<i>Areia grossa</i>	1502,3	1467,2	2,39	1549,4	1511,1	2,53
<i>Leca HD</i>	1207,9	1155,9	4,50	1257,9	1198,9	4,92
<i>Leca M</i>	1347,5	1298,5	3,77	1269,3	1215,9	4,39
<i>RLHD</i>	1275,3	1213,3	5,11	1250,3	1188,1	5,24
<i>RLM</i>	1328,6	1260,9	5,37	1048,6	994,1	5,48

ANEXO G - TEOR EM ÁGUA

Material	11ª betonagem - BM50RM			12ª betonagem - B100RM		
	<i>M</i> ₁ (g)	<i>M</i> ₂ (g)	W (%)	<i>M</i> ₁ (g)	<i>M</i> ₂ (g)	W (%)
<i>Areia fina</i>	1200,4	1165,9	2,96	1292,4	1255,1	2,97
<i>Areia grossa</i>	1549,4	1511,1	2,53	1650,4	1614,9	2,20
<i>Leca HD</i>	1257,9	1201,5	4,69	1232,4	1177,6	4,65
<i>Leca M</i>	1269,3	1215,9	4,39	1347,1	1299,5	3,66
<i>RLHD</i>	1250,3	1188,1	5,24	1205,3	1147,5	5,04
<i>RLM</i>	1048,6	994,1	5,48	1314,1	1246,1	5,46

M₁ - massa do provete de ensaio (g);

M₂ - massa constante do provete de ensaio seco (g);

W - teor de humidade do agregado (%).

Material	W_{médio} (%)
<i>Areia fina</i>	3,02
<i>Areia grossa</i>	2,46
<i>Leca HD</i>	4,72
<i>Leca M</i>	4,13
<i>RLHD</i>	5,08
<i>RLM</i>	5,39

ANEXO H

ÍNDICE DE FORMA

ANEXO H - ÍNDICE DE FORMA

RLHD

M_0 (g)	1405,9		
Peneiros (mm)	M_1 (g)	M_1/M_0 (%)	M_2 (g)
22,4	58,9	4,2	-
16	181,9	12,9	79,2
14	141,6	10,1	42,6
12,5	208,3	14,8	49,6
11,2	205,5	14,6	32,6
8	246	17,5	31,2
6,3	107,9	7,7	-
5,6	36,5	2,6	-
4	42,7	3,0	-
		ΣM_1 (g)	983,3
		ΣM_2 (g)	235,2
		IF	23,92

M_0 - massa do provete de ensaio (g);

M_1 - massa das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M_2 - massa das partículas não cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M_1/M_0 - percentagem da massa M_1 relativamente à massa M_0 do provete de ensaio (%).

ΣM_1 - somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

ΣM_2 - somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

IF - índice de forma.

ANEXO H - ÍNDICE DE FORMA

RLM

M_0 (g)	1402,7		
Peneiros (mm)	M_1 (g)	M_1/M_0 (%)	M_2 (g)
22,4	5,1	0,4	-
16	169,4	12,1	42,6
14	152,5	10,9	22,2
12,5	240,6	17,2	10,2
11,2	145,8	10,4	7,2
8	290,3	20,7	5,2
6,3	119,6	8,5	-
5,6	49,1	3,5	-
4	50,3	3,6	-
		ΣM_1 (g)	998,6
		ΣM_2 (g)	87,4
		IF	8,75

M_0 - massa do provete de ensaio (g);

M_1 - massa das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M_2 - massa das partículas não cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M_1/M_0 - percentagem da massa M_1 relativamente à massa M_0 do provete de ensaio (%).

ΣM_1 - somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

ΣM_2 - somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

IF - índice de forma.

ANEXO I

EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Leca HD

V (l)	2	
M₁ (g)	388,7	
M₂ (g)	345,0	
WA₂₄ (%)	12,67	
Leitura (min)	M_i (g)	WA_i (%)
3	3195,7	5,30
5	3198,8	6,20
10	3202,2	7,19
20	3205,8	8,23
30	3209,4	9,28
60	3213,4	10,43
120	3219,5	12,20
1440	3221,1	12,67

V - capacidade do recipiente (l);

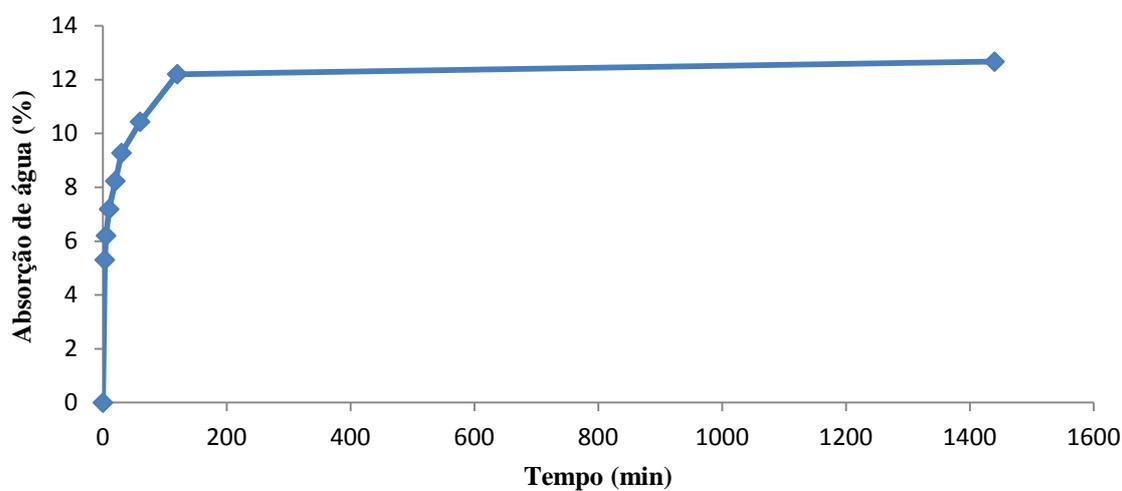
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

M₂ - massa da amostra seca (g);

WA₂₄ - absorção de água às 24 horas (%);

M_i - massa do conjunto água+picnómetro+amostra na leitura *i* (g);

WA_i - absorção de água no instante *i* (%).



ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Leca M

V (l)	<i>l</i>	
M₁ (g)	<i>244,8</i>	
M₂ (g)	<i>198,4</i>	
WA₂₄ (%)	<i>23,09</i>	
Leitura (min)	M_i (g)	WA_i (%)
<i>3</i>	<i>1560,1</i>	<i>12,90</i>
<i>5</i>	<i>1564,7</i>	<i>15,22</i>
<i>10</i>	<i>1569,3</i>	<i>17,54</i>
<i>20</i>	<i>1573,4</i>	<i>19,61</i>
<i>30</i>	<i>1576,5</i>	<i>21,17</i>
<i>60</i>	<i>1579,2</i>	<i>22,53</i>
<i>120</i>	<i>1580,3</i>	<i>23,08</i>
<i>1440</i>	<i>1580,9</i>	<i>23,39</i>

V - capacidade do recipiente (l);

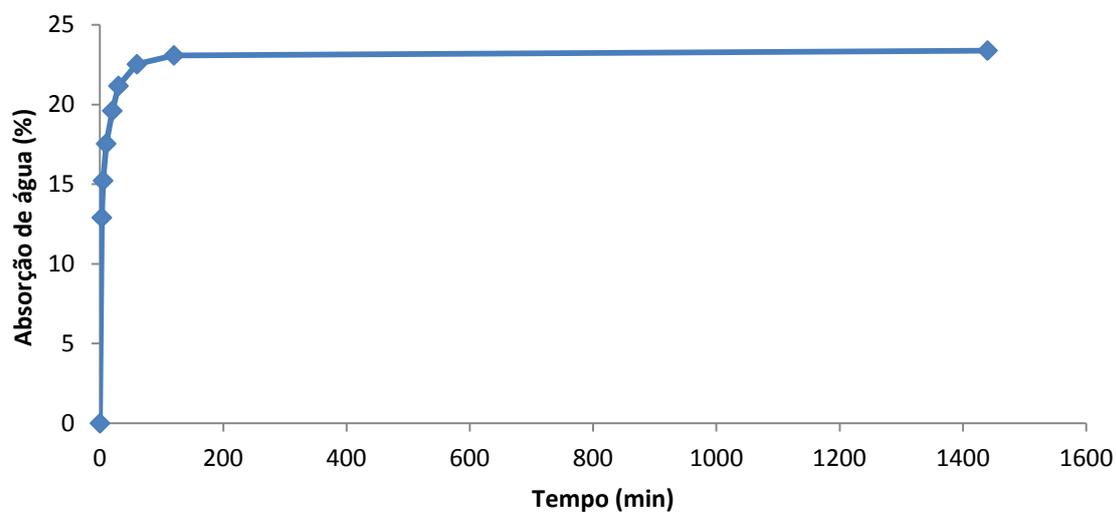
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

M₂ - massa da amostra seca (g);

WA₂₄ - absorção de água às 24 horas (%);

M_i - massa do conjunto água+picnómetro+amostra na leitura *i* (g);

WA_i - absorção de água no instante *i* (%).



ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

RLHD

V (l)	<i>l</i>	
M₁ (g)	<i>699,4</i>	
M₂ (g)	<i>612,0</i>	
WA₂₄ (%)	<i>14,36</i>	
Leitura (min)	M_i (g)	WA_i (%)
<i>3</i>	<i>2015,6</i>	<i>11,10</i>
<i>5</i>	<i>2020,8</i>	<i>11,95</i>
<i>10</i>	<i>2026</i>	<i>12,80</i>
<i>20</i>	<i>2027,3</i>	<i>13,02</i>
<i>30</i>	<i>2028,1</i>	<i>13,15</i>
<i>60</i>	<i>2032,2</i>	<i>13,82</i>
<i>120</i>	<i>2034,4</i>	<i>14,18</i>
<i>1440</i>	<i>2035,5</i>	<i>14,36</i>

V - capacidade do recipiente (l);

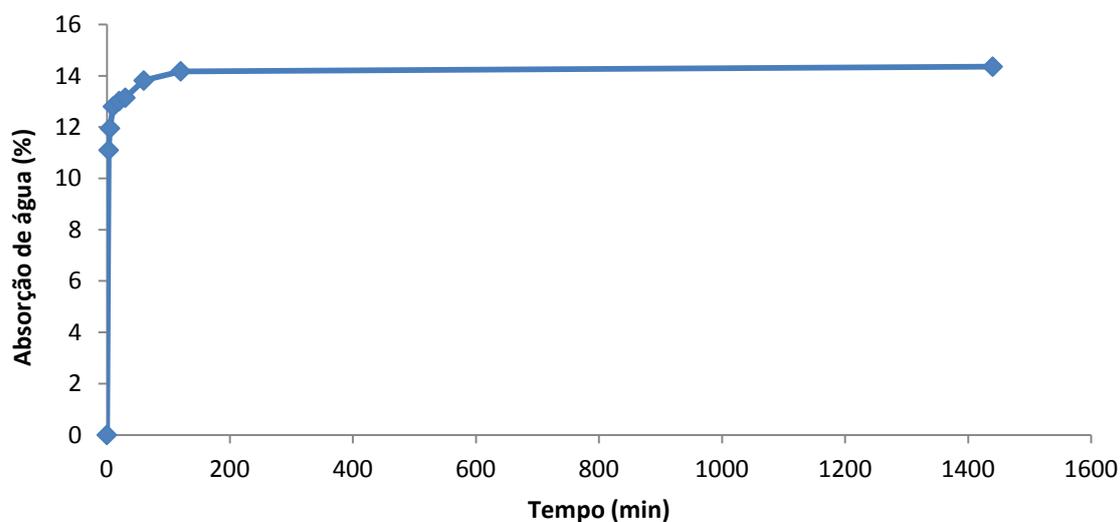
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

M₂ - massa da amostra seca (g);

WA₂₄ - absorção de água às 24 horas (%);

M_i - massa do conjunto água+picnómetro+amostra na leitura *i* (g);

WA_i - absorção de água no instante *i* (%).



ANEXO I - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

RLM

V (l)	<i>l</i>	
M₁ (g)	<i>349,7</i>	
M₂ (g)	<i>273,1</i>	
WA₂₄ (%)	<i>28,05</i>	
Leitura (min)	M_i (g)	WA_i (%)
3	<i>1661,1</i>	<i>19,00</i>
5	<i>1666,6</i>	<i>21,02</i>
10	<i>1673,2</i>	<i>23,43</i>
20	<i>1678,4</i>	<i>25,34</i>
30	<i>1681,2</i>	<i>26,36</i>
60	<i>1683,9</i>	<i>27,35</i>
120	<i>1685</i>	<i>27,76</i>
1440	<i>1685,8</i>	<i>28,05</i>

V - capacidade do recipiente (l);

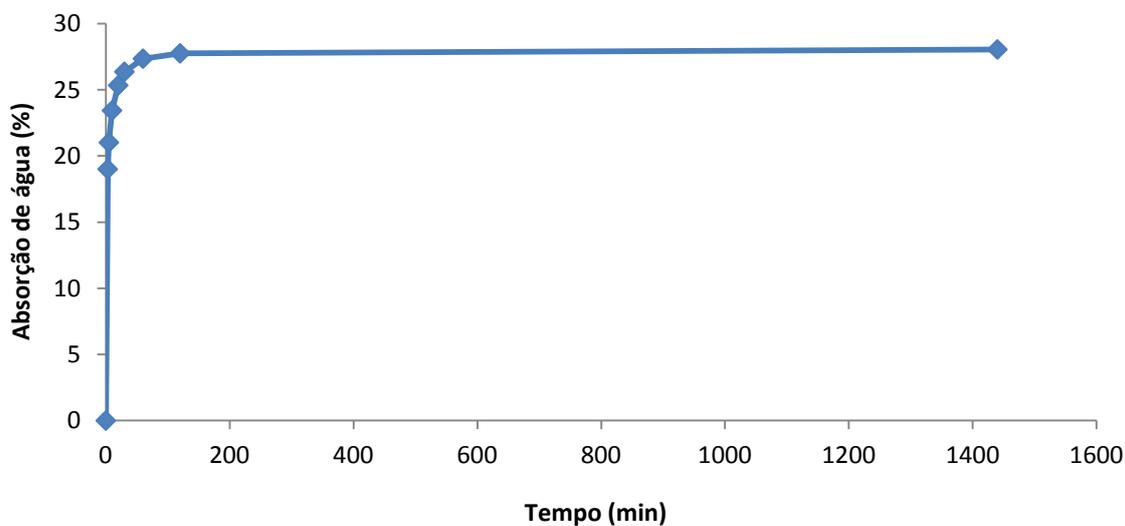
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

M₂ - massa da amostra seca (g);

WA₂₄ - absorção de água às 24 horas (%);

M_i - massa do conjunto água+picnómetro+amostra na leitura *i* (g);

WA_i - absorção de água no instante *i* (%).



ANEXO J

MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO

ANEXO J - MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO

Composição	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_t (kg/m ³)
<i>BHD</i>	6220,6	2853,5	1847,5	1627,5
<i>BM</i>	5317,4	2005,1	1605,3	1453,0
<i>BHD20RHD</i>	6351,5	2992,9	1891,1	1672,4
<i>BM20RHD</i>	6028,8	2457,0	1687,9	1533,3
<i>BHD50RHD</i>	6628,9	3248,2	1960,8	1739,3
<i>BM50RHD</i>	6279,5	2856,9	1834,7	1653,0
<i>B100RHD</i>	6965,7	3524,5	2024,2	1852,0
<i>BHD20RM</i>	6389,7	2920,3	1841,7	1612,4
<i>BM20RM</i>	5500,7	2200,8	1666,9	1472,5
<i>BHD50RM</i>	6391,2	2873,5	1816,9	1589,9
<i>BM50RM</i>	5976,6	2480,0	1709,3	1503,0
<i>B100RM</i>	6003,2	2608,7	1768,5	1552,0

M_1 - massa do provete ao ar (g);

M_2 - massa do provete em água (g);

ρ - massa volúmica do betão no estado endurecido (kg/m³);

ρ_t - massa volúmica seca de cálculo (kg/m³).

ANEXO K

QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS

ANEXO K - QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Material	Massa volúmica (kg/m ³)
<i>Areia fina</i>	2604
<i>Areia grossa</i>	2610
<i>Leca HD</i>	1092
<i>Leca M</i>	595
<i>RLHD</i>	1735
<i>RLM</i>	878
<i>Cimento</i>	3150

BOHD

Material	Quantidades (kg/m ³ de betão)
<i>Areia fina</i>	260,9
<i>Areia grossa</i>	567,2
<i>Cimento</i>	350,0
<i>Água</i>	192,5

Volume de argamassa:

$$V_{\text{água}} + V_{\text{areia fina}} + V_{\text{areia grossa}} + V_{\text{cimento}} =$$

$$192,5 + \frac{260,9}{2604} + \frac{567,2}{2610} + \frac{350}{3150} = 0,621 \text{ m}^3 \text{ de argamassa}$$

Quantidade de argamassa por metro cúbico de betão:

$$\frac{M_{\text{areia fina}} + M_{\text{areia grossa}} + \alpha M_{\text{cimento}}}{\text{Volume de argamassa}} = 260,9 + 567,2 + 1,25 \times 350 = 2030 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{RLHD}} = x \cdot \rho_{\text{Leca HD}} + (1 - x) \cdot M_{\text{argamassa}} / \text{m}^3 \text{ betão} \Leftrightarrow x = 0,32$$

$$\mathbf{RLHD = 32\% Leca HD + 68\% argamassa}$$

$V_{\text{água}}$ - volume de água (m³);

$V_{\text{areia fina}}$ - volume de areia fina (m³);

$V_{\text{areia grossa}}$ - volume de areia grossa (m³);

V_{cimento} - volume de cimento (m³);

$M_{\text{areia fina}}$ - massa de areia fina (kg);

$M_{\text{areia grossa}}$ - massa de areia grossa (kg);

M_{cimento} - massa de cimento (kg);

α - coeficiente que tem em conta a água quimicamente ligada após hidratação do cimento, que se admite igual a 1,25 (EuroLightCon R14, 2000) [Bogas (2011)];

ρ_{RLHD} - massa volúmica do RLHD (kg/m³);

ANEXO K - QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS

$\rho_{Leca\ HD}$ - massa volúmica da Leca HD (kg/m^3);

$M_{argamassa / m^3\ bet\tilde{a}o}$ - massa de argamassa por metro cúbico de betão (kg/m^3).

BOM

Material	Quantidades (kg/m^3 de betão)
<i>Cimento</i>	150
<i>Água</i>	90

Volume de pasta:

$$V_{\acute{a}gua} + V_{cimento} = 90 + \frac{150}{3150} = 0,138\ m^3\ de\ pasta$$

Quantidade de pasta por metro cúbico de betão:

$$\frac{\alpha M_{cimento}}{Volume\ de\ pasta} = 1,25 \times 150 = 1362,5\ kg/m^3$$

$$\rho_{RLM} = x \cdot \rho_{Leca\ M} + (1 - x) \cdot M_{pasta / m^3\ bet\tilde{a}o} \Leftrightarrow x = 0,63$$

$$**RLHD = 63\% Leca HD + 37\% argamassa**$$

$V_{\acute{a}gua}$ - volume de água (m^3);

$V_{cimento}$ - volume de cimento (m^3);

$M_{cimento}$ - massa de cimento (kg);

α - coeficiente que tem em conta a água quimicamente ligada após hidratação do cimento, que se admite igual a 1,25 (EuroLightCon R14, 2000) (Bogas, 2011);

ρ_{RLM} - massa volúmica de RLM (kg/m^3);

$\rho_{Leca\ M}$ - massa volúmica da leca M (kg/m^3);

$M_{pasta / m^3\ bet\tilde{a}o}$ - massa de pasta por metro cúbico de betão (kg/m^3).

ANEXO L

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

7 dias

Composição	M (g)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)
BOHD	6143,1	737,1	32,76	34,1
	6062,8	766,3	34,06	
	6219,3	800,4	35,57	
BOM	1912,7	16,8	0,57	0,7
	1909,3	13,4	0,60	
	1945,8	19,6	0,87	
BRHD	6211,0	745,8	33,1	32,8
	6086,5	706,9	31,4	
	6202,3	764,4	34,0	
BRM	5424,1	395,4	17,6	16,0
	5160,7	328,7	14,6	
	5255,8	358,6	15,9	
BHD20RHD	6484,8	809,6	36,0	33,9
	6367,3	743,9	33,1	
	6407,8	732,8	32,6	
BM20RHD	6017,3	527,7	23,5	24,2
	6030,3	599,1	26,6	
	5812,0	507,5	22,6	
BHD50RHD	6731,9	837,0	37,2	36,1
	6694,3	803,0	35,7	
	6574,6	796,2	35,4	
BM50RHD	6357,8	495,4	22,0	22,6
	6372,0	522,2	23,2	
	6334,6	504,6	22,4	
B100RHD	7105,5	778,6	34,6	34,4
	7065,0	771,2	34,3	
	7081,9	770,4	34,2	
BHD20RM	6288,1	731,1	32,5	33,1
	6413,2	752,0	33,4	
	6340,1	751,6	33,4	
BM20RM	5998,4	476,4	21,2	21,6
	5871,7	465,2	20,7	
	6080,9	518,5	23,0	
BHD50RM	6379,3	722,0	32,1	32,2
	6337,1	703,5	31,3	
	6423,9	748,0	33,2	
BM50RM	6087,2	516,3	22,9	23,8
	6217,3	579,4	25,8	
	6112,3	510,0	22,7	
B100RM	6451,1	644,1	28,6	27,7
	6451,1	586,3	26,1	
	6432,4	638,7	28,4	

ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

M - massa do provete (g);

f_{ci} - tensão de ruptura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de ruptura do betão (MPa).

28 dias

Composição	M (g)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)
BOHD	6219,2	867,8	38,57	37,2
	6189,7	807,5	35,89	
	6207,5	835,4	37,13	
BOM	1936,7	12,8	0,57	0,6
	1982,0	14,8	0,66	
	1947,3	14,3	0,64	
BRHD	6345,0	881,3	39,2	38,4
	6239,4	889,8	39,5	
	6180,5	905,9	40,3	
	6264,6	819,7	36,4	
	6155,7	826,5	36,7	
BRM	5583,7	491,3	21,8	19,2
	5112,2	394,8	17,5	
	5206,1	403,8	17,9	
	5702,0	465,5	20,7	
	5198,6	399,6	17,8	
BHD20RHD	6421,5	878,5	39,0	40,4
	6490,9	894,8	39,8	
	6510,2	918,4	40,8	
	6414,6	903,8	40,2	
	6507,7	946,7	42,1	
BM20RHD	6019,1	598,6	26,6	26,4
	6073,3	588,3	26,1	
	5948,9	626,3	27,8	
	6043,2	563,3	25,0	
	6061,1	596,4	26,5	
BHD50RHD	6697,0	968,2	43,0	43,1
	6695,2	950,3	42,2	
	6631,4	961,8	42,7	
	6673,8	974,0	43,3	
	6759,5	993,8	44,2	
BM50RHD	6438,7	709,9	31,6	30,7
	6422,3	670,4	29,8	
	6405,9	641,1	28,5	
	6428,6	729,9	32,4	
	6421,1	700,8	31,1	

ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Composição	M (g)	F (kN)	f_{ci} (MPa)	f_{cm} (MPa)
<i>B100RHD</i>	7245,4	1006,0	44,7	43,7
	7123,3	991,0	44,0	
	7140,0	980,0	43,6	
	7062,4	961,8	42,7	
	7074,4	975,4	43,4	
<i>BHD20RM</i>	6384,1	850,7	37,8	38,5
	6355,2	905,3	40,2	
	6282,9	864,4	38,4	
	6320,7	871,4	38,7	
	6345,5	842,7	37,5	
<i>BM20RM</i>	5899,3	598,9	26,6	25,1
	5969,3	574,7	25,5	
	6101,4	586,7	26,1	
	5957,1	540,7	24,0	
	5946,3	521,9	23,2	
<i>BHD50RM</i>	6387,5	875,5	38,9	36,3
	6334,1	877,9	39,0	
	6471,6	799,1	35,5	
	6510,4	750,0	33,3	
	6468,4	781,7	34,7	
<i>BM50RM</i>	6157,6	649,4	28,9	27,7
	6127,0	629,6	28,0	
	6178,6	616,8	27,4	
	6257,7	574,3	25,5	
	6166,0	643,3	28,6	
<i>B100RM</i>	6495,6	798,4	35,5	33,4
	6461,1	704,0	31,3	
	6469,8	776,6	34,5	
	6485,0	755,0	33,6	
	6426,4	722,3	32,1	

M - massa do provete (g);

f_{ci} - tensão de ruptura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de ruptura do betão (MPa).

ANEXO L - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

90 dias

Composição	M (g)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)
BOHD	6173,5	878,1	39,03	37,7
	6041,4	817,6	36,34	
BRHD	6154,9	930,2	41,3	39,3
	6140,3	839,0	37,3	
	6136,9	880,9	39,2	
BRM	5362,8	478,7	21,3	20,7
	5280,9	450,5	20,0	
	5249,3	470,1	20,9	
BHD20RHD	6496,8	885,2	39,3	41,3
	6542,4	932,9	41,5	
	6536,4	969,8	43,1	
BM20RHD	5938,2	669,8	29,8	28,6
	5830,4	668,3	29,7	
	6008,4	590,9	26,3	
BHD50RHD	6660,6	1051,1	46,7	46,8
	6643,4	1052,0	46,8	
	6682,7	1058,0	47,0	
BM50RHD	6477,0	733,7	32,6	32,8
	6404,7	739,5	32,9	
	6442,2	742,2	33,0	
B100RHD	7156,0	1107,0	49,2	48,5
	7099,5	1074,0	47,7	
	7197,4	1090,0	48,4	
BHD20RM	6402,1	934,4	41,5	39,2
	6362,3	836,0	37,2	
	6403,5	878,9	39,1	
BM20RM	6058,0	603,6	26,8	26,5
	6024,2	603,3	26,8	
	5936,0	579,6	25,8	
BHD50RM	6395,9	878,5	39,0	38,7
	6444,7	895,6	39,8	
	6435,9	836,7	37,2	
BM50RM	6189,6	652,4	29,0	30,5
	6198,1	684,1	30,4	
	6237,8	720,7	32,0	
B100RM	6487,6	786,5	35,0	34,6
	6481,3	809,1	36,0	
	6541,7	736,6	32,7	

M - massa do provete (g);

f_{ci} - tensão de ruptura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de ruptura do betão (MPa).

ANEXO M

RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

ANEXO M - RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

28 dias

Composição	M (g)	F (kN)	$f_{ctmi, sp}$ (MPa)	$f_{ctm, sp}$ (MPa)
BOHD	9874,1	191,2	2,7	2,8
	9815,5	203,3	2,9	
BRHD	9717,2	189,5	2,7	3,0
	9821,1	246,9	3,5	
	9819,8	192,3	2,7	
BRM	8341,1	106,6	1,5	1,5
	8419,8	108,3	1,5	
	8366,0	110,3	1,6	
BHD20RHD	10285,5	191,7	2,7	2,9
	10224,1	222,5	3,2	
	10286,2	197,1	2,8	
BM20RHD	9492,2	179,8	2,5	2,5
	9396,3	175,0	2,5	
	9375,7	182,0	2,6	
BHD50RHD	10598,2	294,2	4,2	3,5
	10628,3	228,5	3,2	
	10672,5	224,8	3,2	
BM50RHD	10124,0	196,8	2,8	2,8
	10150,4	226,8	3,2	
	10141,7	160,3	2,3	
B100RHD	11339,5	293,6	4,2	3,9
	11348,8	263,3	3,7	
	11279,4	273,4	3,9	
BHD20RM	10064,9	221,9	3,1	3,0
	10094,0	193,9	2,7	
	9940,9	218,0	3,1	
BM20RM	9478,3	175,4	2,5	2,5
	9475,5	173,7	2,5	
	9467,6	184,0	2,6	
BHD50RM	10112,9	244,7	3,5	2,9
	10080,9	202,1	2,9	
	10136,4	160,1	2,3	
BM50RM	9787,5	180,7	2,6	2,4
	9801,6	181,1	2,6	
	9780,9	157,0	2,2	
B100RM	10218,7	203,5	2,9	2,7
	10251,5	190,8	2,7	
	10225,4	186,1	2,6	

M - massa do provete (g);

$f_{ctmi, sp}$ - tensão de ruptura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

$f_{ctm, sp}$ - tensão de ruptura do betão (MPa).

ANEXO N

MÓDULO DE ELASTICIDADE

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BRHD	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	148,00
Data do ensaio	02/05/12	0,0012	0,02904
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00348	0,02904
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00348	0,02916
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	8,38	0,0036	0,02928
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	148,00		
Diferença (Waveform)	130,3		
		Coefficiente Poisson	
		0,42	

Ciclo	BRHD				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	43,04	404,86	40,12	420,91	5,24	371,31	19,86
2	51,06	425,29	52,52	415,08	3,12	368,39	20,02
3	50,33	427,48	52,04	415,08	3,74	370,09	19,93
4	48,88	426,75	51,06	413,62	4,05	370,21	19,92
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00708	0,06660	0,00660	0,06924			
2	0,00840	0,06996	0,00864	0,06828			
3	0,00828	0,07032	0,00856	0,06828			
4	0,00804	0,07020	0,00840	0,06804			

Ciclo	BRHD				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	43,77	421,64	45,96	434,04	2,70	382,98	19,26
2	47,42	424,56	56,90	440,61	1,74	380,43	19,39
3	43,77	425,29	66,38	452,28	1,15	383,71	19,22
4	40,85	423,10	74,41	211,19	64,22	259,51	28,42
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00720	0,06936	0,00756	0,07140			
2	0,00780	0,06984	0,00936	0,07248			
3	0,00720	0,06996	0,01092	0,07440			
4	0,00672	0,06960	0,01224	0,03474			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BRM	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	67,90
Data do ensaio	03/05/12	0,00468	0,02412
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00612	0,02388
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00612	0,02376
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	3,84	0,00612	0,02352
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	67,90		
Diferença (Waveform)	50,2		
		Coeficiente Poisson	
		0,46	

Ciclo	BRM				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	80,97	310,76	70,03	313,68	6,03	236,72	12,01
2	90,46	312,22	80,24	314,41	5,59	227,96	12,47
3	90,46	312,22	79,51	314,41	5,92	228,33	12,45
4	89,00	315,87	79,51	315,87	4,18	231,61	12,27
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01332	0,05112	0,01152	0,05160			
2	0,01488	0,05136	0,01320	0,05172			
3	0,01488	0,05136	0,01308	0,05172			
4	0,01464	0,05196	0,01308	0,05196			

Ciclo	BRM				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	81,70	285,96	89,73	313,68	9,64	214,10	13,28
2	83,16	293,98	84,62	304,92	4,50	215,56	13,19
3	81,70	288,88	88,27	310,03	7,04	214,47	13,25
4	80,24	287,42	89,00	312,22	7,75	215,20	13,21
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01344	0,04704	0,01476	0,05160			
2	0,01368	0,04836	0,01392	0,05016			
3	0,01344	0,04752	0,01452	0,05100			
4	0,01320	0,04728	0,01464	0,05136			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BHD20RHD	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	157,90
Data do ensaio	10/05/12	0,00048	0,0168
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00048	0,01584
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0	0,01632
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	8,94	0	0,01632
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	157,90		
Diferença (Waveform)	140,2		
		Coeficiente Poisson	
		0,22	

BHD20RHD					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	40,85	461,03	49,60	452,28	4,17	411,43	19,29
2	70,03	478,54	55,44	446,44	4,29	399,76	19,85
3	70,03	478,54	55,44	443,53	5,00	398,30	19,92
4	72,95	478,54	55,44	440,61	5,04	395,38	20,07
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00672	0,07584	0,00816	0,07440			
2	0,01152	0,07872	0,00912	0,07344			
3	0,01152	0,07872	0,00912	0,07296			
4	0,01200	0,07872	0,00912	0,07248			

BHD20RHD					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	29,18	402,67	61,28	423,10	3,13	367,66	21,58
2	46,69	411,43	58,36	417,26	1,60	361,82	21,93
3	40,85	411,43	61,28	420,18	3,15	364,74	21,76
4	37,93	411,43	61,28	425,58	2,46	368,90	21,51
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00480	0,06624	0,01008	0,06960			
2	0,00768	0,06768	0,00960	0,06864			
3	0,00672	0,06768	0,01008	0,06912			
4	0,00624	0,06768	0,01008	0,07001			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BM20RHD	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	112,50
Data do ensaio	12/05/12	0,00216	0,01836
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00288	0,01836
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00276	0,01836
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	6,37	0,00276	0,01848
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	112,50		
Diferença (Waveform)	94,8		
		Coeficiente Poisson	
		0,32	

Ciclo	BM20RHD				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	53,25	352,34	50,33	344,32	1,71	296,53	18,10
2	69,30	361,82	51,79	336,29	2,74	288,51	18,60
3	71,49	366,20	49,60	334,83	3,22	289,97	18,51
4	74,41	368,39	49,60	333,37	3,47	288,88	18,58
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00876	0,05796	0,00828	0,05664			18,44
2	0,01140	0,05952	0,00852	0,05532			
3	0,01176	0,06024	0,00816	0,05508			
4	0,01224	0,06060	0,00816	0,05484			

Ciclo	BM20RHD				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	87,54	388,09	52,52	332,64	6,80	290,33	18,48
2	75,87	379,33	52,52	335,56	6,73	293,25	18,30
3	81,70	385,17	52,52	332,64	7,69	291,79	18,39
4	81,70	388,09	52,52	335,56	7,62	294,71	18,21
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01440	0,06384	0,00864	0,05472			18,35
2	0,01248	0,06240	0,00864	0,05520			
3	0,01344	0,06336	0,00864	0,05472			
4	0,01344	0,06384	0,00864	0,05520			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BHD50RHD	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	135,80
Data do ensaio	12/05/12	0,00048	0,01476
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00252	0,01476
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00264	0,01488
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	7,68	0,00264	0,01488
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	135,80		
Diferença (Waveform)	118,1		
		Coeficiente Poisson	
		0,27	

BHD50RHD					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	34,29	325,35	42,31	331,19	0,75	289,97	23,05
2	41,58	329,73	47,42	329,73	2,03	285,23	23,44
3	43,04	331,19	47,42	328,27	2,53	284,50	23,50
4	44,50	332,64	47,42	328,27	2,53	284,50	23,50
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00564	0,05352	0,00696	0,05448			
2	0,00684	0,05424	0,00780	0,05424			
3	0,00708	0,05448	0,00780	0,05400			
4	0,00732	0,05472	0,00780	0,05400			

BHD50RHD					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	50,33	337,75	39,39	323,16	1,27	285,59	23,41
2	50,33	337,02	43,04	325,59	1,44	284,62	23,49
3	50,33	334,83	43,77	326,81	0,51	283,77	23,56
4	47,42	335,56	42,31	327,54	1,01	286,69	23,32
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00828	0,05556	0,00648	0,05316			
2	0,00828	0,05544	0,00708	0,05356			
3	0,00828	0,05508	0,00720	0,05376			
4	0,00780	0,05520	0,00696	0,05388			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BM50RHD	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	115,38
Data do ensaio	17/05/12	0,00048	0,01392
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00192	0,01396
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00192	0,01392
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	6,53	0,00192	0,01392
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	115,38		
Diferença (Waveform)	97,7		
		Coeficiente Poisson	
		0,28	

BM50RHD					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	40,85	312,22	35,02	297,63	3,23	266,99	20,71
2	61,28	312,22	43,77	297,63	1,16	252,40	21,91
3	64,19	315,14	43,77	297,63	1,16	252,40	21,91
4	64,19	315,14	43,77	297,63	1,16	252,40	21,91
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00672	0,05136	0,00576	0,04896			
2	0,01008	0,05136	0,00720	0,04896			
3	0,01056	0,05184	0,00720	0,04896			
4	0,01056	0,05184	0,00720	0,04896			

BM50RHD					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	40,85	303,47	61,28	303,47	7,78	252,40	21,91
2	43,77	303,47	64,19	306,38	6,74	250,94	22,03
3	43,77	306,38	67,11	309,30	7,78	252,40	21,91
4	46,69	309,30	70,03	309,30	8,89	250,94	22,03
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00672	0,04992	0,01008	0,04992			
2	0,00720	0,04992	0,01056	0,05040			
3	0,00720	0,05040	0,01104	0,05088			
4	0,00768	0,05088	0,01152	0,05088			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	<i>B100RHD</i>	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	207,65
Data do ensaio	19/05/12	0,00036	0,02064
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00276	0,02064
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00264	0,02054
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	11,75	0,00252	0,02052
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	207,65		
Diferença (Waveform)	190,0		
		Coefficiente Poisson	
		0,27	

<i>B100RHD</i>					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	36,47	458,12	35,02	463,22	1,56	424,92	25,30
2	47,42	470,52	48,15	463,22	1,90	419,09	25,65
3	52,52	470,52	52,52	461,03	2,27	413,25	26,01
4	51,06	474,89	47,42	465,41	1,38	420,91	25,54
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00600	0,07536	0,00576	0,07620			25,63
2	0,00780	0,07740	0,00792	0,07620			
3	0,00864	0,07740	0,00864	0,07584			
4	0,00840	0,07812	0,00780	0,07656			

<i>B100RHD</i>					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	35,74	461,76	28,45	461,76	1,71	429,67	25,02
2	40,85	471,98	39,39	461,76	2,03	426,75	25,19
3	44,50	476,35	41,58	461,76	2,70	426,02	25,23
4	43,77	478,54	37,93	461,76	2,52	429,30	25,04
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00588	0,07596	0,00468	0,07596			25,12
2	0,00672	0,07764	0,00648	0,07596			
3	0,00732	0,07836	0,00684	0,07596			
4	0,00720	0,07872	0,00624	0,07596			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	<i>BHD20RM</i>	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	155,10
Data do ensaio	19/05/12	0,00264	0,0222
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,0024	0,02196
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00192	0,02184
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	8,78		
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	155,10		
Diferença (Waveform)	137,4		
		Coeficiente Poisson	
		0,32	

<i>BHD20RM</i>					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	32,10	411,43	53,25	407,78	6,54	366,93	21,19
2	37,93	410,70	61,28	423,83	2,74	367,66	21,15
3	32,83	406,32	71,73	430,40	3,97	366,08	21,24
4	27,72	399,03	91,91	442,07	5,70	360,73	21,56
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00528	0,06768	0,00876	0,06708			
2	0,00624	0,06756	0,01008	0,06972			21,29
3	0,00540	0,06684	0,01180	0,07080			
4	0,00456	0,06564	0,01512	0,07272			

<i>BHD20RM</i>					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	40,85	398,30	41,58	418,72	5,51	367,29	21,17
2	47,42	399,76	35,74	418,12	8,52	367,36	21,17
3	51,06	396,84	36,47	414,35	9,28	361,82	21,49
4	45,23	398,30	29,18	414,35	9,09	369,12	21,07
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00672	0,06552	0,00684	0,06888			
2	0,00780	0,06576	0,00588	0,06878			21,23
3	0,00840	0,06528	0,00600	0,06816			
4	0,00744	0,06552	0,00480	0,06816			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BM20RM	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	106,60
Data do ensaio	23/05/12	0,00336	0,02112
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00432	0,02112
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00432	0,02112
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	6,03	0,00432	0,02112
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	106,60		
Diferença (Waveform)	88,9		
		Coeficiente Poisson	
		0,39	

Ciclo	BM20RM				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	32,10	315,14	64,19	332,64	5,15	275,74	18,70
2	46,69	318,05	70,03	329,73	4,30	265,53	
3	46,69	320,97	67,11	329,73	4,26	268,45	
4	49,60	320,97	67,11	329,73	3,23	266,99	
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00528	0,05184	0,01056	0,05472			
2	0,00768	0,05232	0,01152	0,05424			
3	0,00768	0,05280	0,01104	0,05424			
4	0,00816	0,05280	0,01104	0,05424			

Ciclo	BM20RM				Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	Base de medida 1		Base de medida 2				
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	60,79	335,56	37,93	288,88	8,67	262,86	19,51
2	61,28	329,73	52,52	297,63	8,70	256,78	
3	61,28	329,73	52,52	300,55	7,61	258,24	
4	64,19	326,81	55,44	300,55	6,67	253,86	
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01000	0,05520	0,00624	0,04752			
2	0,01008	0,05424	0,00864	0,04896			
3	0,01008	0,05424	0,00864	0,04944			
4	0,01056	0,05376	0,00912	0,04944			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	<i>BHD50RM</i>	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	162,52
Data do ensaio	27/05/12	0,00348	0,0234
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00336	0,0234
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00336	0,02352
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	9,20	0,00336	0,02352
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	162,52		
Diferença (Waveform)	144,8		
		Coeficiente Poisson	
		0,32	

<i>BHD50RM</i>					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	62,74	453,74	43,04	437,69	0,93	392,83	20,87
2	67,11	458,12	41,58	437,69	1,31	393,56	20,83
3	67,84	458,84	39,39	436,23	1,49	393,92	20,81
4	72,95	463,22	42,31	439,15	1,68	393,56	20,83
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01032	0,07464	0,00708	0,072			
2	0,01104	0,07536	0,00684	0,072			
3	0,01116	0,07548	0,00648	0,07176			
4	0,012	0,0762	0,00696	0,07224			

<i>BHD50RM</i>					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10 ⁻⁶)	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10 ⁻⁶)	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10 ⁻⁶)			
1	32,10	431,85	40,85	417,99	5,66	388,45	21,10
2	45,96	434,04	48,15	415,08	5,45	377,51	21,71
3	48,15	437,69	48,15	415,08	5,81	378,24	21,67
4	51,06	439,88	48,88	414,35	6,00	377,14	21,73
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00528	0,07104	0,00672	0,06876			
2	0,00756	0,0714	0,00792	0,06828			
3	0,00792	0,072	0,00792	0,06828			
4	0,0084	0,07236	0,00804	0,06816			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	BM50RM	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	112,92
Data do ensaio	26/05/12	0,00372	0,01944
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00384	0,0198
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00396	0,01992
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	6,39	0,00408	0,01992
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	112,92		
Diferença (Waveform)	95,2		
		Coeficiente Poisson	
		0,37	

BM50RM					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{média}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	52,52	332,10	59,09	320,24	6,59	270,36	19,94
2	53,25	336,29	56,90	320,24	6,96	273,19	19,73
3	55,44	335,56	55,44	317,33	6,51	271,00	19,89
4	57,63	335,56	55,44	316,60	6,04	269,54	20,00
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00864	0,05463	0,00972	0,05268			
2	0,00876	0,05532	0,00936	0,05268			
3	0,00912	0,05520	0,00912	0,05220			
4	0,00948	0,05520	0,00912	0,05208			

BM50RM					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{média}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{fc/3}$ (% x 10^{-6})			
1	51,06	324,62	61,28	330,46	1,60	271,37	19,86
2	48,88	326,81	59,09	331,19	2,10	275,02	19,60
3	50,33	325,35	60,30	329,73	2,03	272,22	19,80
4	50,33	326,81	60,30	330,46	2,29	273,31	19,72
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00840	0,05340	0,01008	0,05436			
2	0,00804	0,05376	0,00972	0,05448			
3	0,00828	0,05352	0,00992	0,05424			
4	0,00828	0,05376	0,00992	0,05436			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mistura	<i>B100RM</i>	Carga	
		Força aplicada para tensão inicial (kN)	Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)
Idade (dias)	28	17,67	136,30
Data do ensaio	29/05/12	0,00288	0,01728
Tensão inicial (0.5 a 1 MPa)	1,00	0,00288	0,01776
Força aplicada para tensão inicial (kN)	17,67	0,00288	0,01776
Tensão de ensaio - $f_{c/3}$ (MPa)	7,71	0,00288	0,01728
Força aplicada para $f_{c/3}$ (kN)	136,30		
Diferença (Waveform)	118,6		

Coefficiente Poisson
0,27

<i>B100RM</i>					Cilindro 1		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	61,28	385,17	64,19	396,84	2,70	328,27	20,45
2	49,60	379,33	58,36	391,00	0,88	331,19	20,27
3	55,44	385,17	61,28	396,84	1,77	332,64	20,18
4	52,52	382,25	58,36	393,92	1,77	332,64	20,18
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,01008	0,06336	0,01056	0,06528			
2	0,00816	0,0624	0,0096	0,06432			
3	0,00912	0,06336	0,01008	0,06528			
4	0,00864	0,06288	0,0096	0,0648			

<i>B100RM</i>					Cilindro 2		
Ciclo	Base de medida 1		Base de medida 2		Δ bases %	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (% x 10^{-6})	E (GPa)
	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{inicial}$ (% x 10^{-6})	$\epsilon_{f_{c/3}}$ (% x 10^{-6})			
1	40,85	370,58	40,85	373,50	0,88	331,19	20,27
2	52,52	370,58	58,36	373,50	0,92	316,60	21,20
3	52,52	370,58	58,36	373,50	0,92	316,60	21,20
4	55,44	370,58	61,28	373,50	0,93	313,68	21,40
	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)	Deformação inicial (mm)	Deformação $f_{c/3}$ (mm)			
1	0,00672	0,06096	0,00672	0,06144			
2	0,00864	0,06096	0,0096	0,06144			
3	0,00864	0,06096	0,0096	0,06144			
4	0,00912	0,06096	0,01008	0,06144			

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

ANEXO N - MÓDULO DE ELASTICIDADE

ANEXO O

RESISTÊNCIA À ABRASÃO

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BRHD

Provete	Massa inicial (g)
1	410,1
2	411,7
3	434,3

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	399,9	401,2	424,5
5 - 8	389,9	391,5	415,3
9 - 12	379,6	382,6	406,1
13 - 16	369,2	373,0	397,1
Diferença de massas (mf-mi) (g)	40,9	38,7	37,2
Média da diferença de massas (g)	38,9		
Desvio padrão	1,9		
Média massas iniciais (g)	418,7		
Dif. Massas relativa (%)	9,3		

Betão <i>BRHD</i>	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	47,75	43,37	48,46	43,47	50,05	46,18
2	47,63	42,94	48,72	44,22	50,45	45,65
3	47,59	42,75	48,88	44,26	50,33	45,53
4	47,66	43,15	48,62	43,64	50,19	46,01
5	47,84	43,15	48,68	43,96	50,14	45,85
6	47,78	42,94	48,89	44,33	50,21	45,57
7	47,80	43,63	48,51	44,11	50,25	46,23
8	47,64	43,27	48,86	43,87	50,06	45,81
9	47,47	42,80	48,81	44,27	49,80	45,14
Média	47,68	43,11	48,71	44,01	50,16	45,77
Desgaste (mm)	4,57		4,70		4,39	
Média de desgaste (mm)	4,55					
Desvio padrão	0,16					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BRM

Provete	Massa inicial (g)
1	353,0
2	362,6
3	356,2

Massa final de ciclo (g)			
Ciclo	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	342,0	351,5	346,1
5 - 8	331,0	338,8	336,5
9 - 12	320,1	327,7	327,4
13 - 16	309,2	315,3	316,5
Diferença de massas (mf-mi) (g)	43,8	47,3	39,7
Média da diferença de massas (g)	43,6		
Desvio padrão	3,8		
Média massas iniciais (g)	357,3		
Dif. Massas relativa (%)	12,2		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
BRM	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	48,65	42,63	47,92	42,55	48,42	43,13
2	48,97	42,82	48,15	42,55	48,36	43,19
3	48,58	42,66	48,52	42,62	47,90	43,44
4	48,84	42,80	48,20	42,09	48,37	42,91
5	48,72	42,84	48,78	42,43	48,56	43,36
6	48,27	42,78	48,72	42,72	48,29	43,32
7	48,66	42,52	48,83	41,81	48,45	42,72
8	48,39	42,60	48,88	42,11	48,78	42,90
9	48,19	42,61	48,60	42,32	48,62	43,14
Média	48,59	42,70	48,51	42,36	48,42	43,12
Desgaste (mm)	5,89		6,16		5,29	
Média de desgaste (mm)	5,78					
Desvio padrão	0,44					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BHD20RHD

Provete	Massa inicial (g)
1	430,0
2	417,0
3	431,5

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	420,2	406,8	421,3
5 - 8	410,8	397,8	411,3
9 - 12	401,6	388,0	402,1
13 - 16	392,1	378,9	392,9
Diferença de massas (mf-mi) (g)	37,9	38,1	38,6
Média da diferença de massas (g)	38,2		
Desvio padrão	0,4		
Média massas iniciais (g)	426,2		
Dif. Massas relativa (%)	9,0		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	48,90	45,04	47,04	43,43	49,00	44,65
2	49,30	45,10	47,15	43,46	49,02	44,77
3	49,00	44,89	47,19	43,16	48,97	45,01
4	49,38	45,11	47,53	43,23	48,94	44,68
5	49,36	45,07	47,35	43,07	49,22	44,88
6	49,00	44,99	47,32	42,76	49,12	45,02
7	49,47	44,98	47,27	43,15	49,17	44,63
8	49,34	44,92	47,32	42,68	49,02	44,81
9	49,05	44,75	47,11	42,51	48,98	44,86
Média	49,20	44,98	47,25	43,05	49,05	44,81
Desgaste (mm)	4,22		4,20		4,24	
Média de desgaste (mm)	4,22					
Desvio padrão	0,02					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BM20RHD

Provete	Massa inicial (g)
1	378,4
2	386,4
3	391,6

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	369,9	376,6	381,7
5 - 8	360,6	366,4	371,8
9 - 12	351,6	356,5	362,4
13 - 16	342,2	346,2	352,6
Diferença de massas (mf-mi) (g)	36,2	40,2	39,0
Média da diferença de massas (g)	38,5		
Desvio padrão	2,1		
Média massas iniciais (g)	385,5		
Dif. Massas relativa (%)	10,0		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	47,81	43,33	48,62	43,87	48,75	43,63
2	47,98	43,36	48,74	43,50	49,21	43,69
3	48,04	43,47	48,54	43,66	48,66	44,00
4	47,75	43,36	48,69	43,41	48,72	43,70
5	47,83	43,29	48,74	43,60	48,74	43,80
6	47,60	43,24	48,41	43,39	48,60	43,57
7	47,60	43,20	48,68	43,31	48,78	43,60
8	47,43	43,01	48,42	43,44	48,78	43,64
9	47,48	42,98	48,35	43,46	48,94	43,61
Média	47,72	43,25	48,58	43,52	48,80	43,69
Desgaste (mm)	4,48		5,06		5,10	
Média de desgaste (mm)	4,88					
Desvio padrão	0,35					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BHD50RHD

Provete	Massa inicial (g)
1	458,6
2	447,4
3	433,7

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	448,2	438,0	424,5
5 - 8	438,9	427,9	415,6
9 - 12	429,3	418,4	405,8
13 - 16	420,5	407,7	397,9
Diferença de massas (mf-mi) (g)	38,1	39,7	35,8
Média da diferença de massas (g)	37,9		
Desvio padrão	2,0		
Média massas iniciais (g)	446,6		
Dif. Massas relativa (%)	8,5		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	49,90	46,31	49,05	44,40	47,86	43,88
2	50,16	46,13	48,94	44,34	47,92	43,79
3	50,41	46,07	48,85	44,27	47,48	43,86
4	50,01	46,30	48,55	44,84	47,82	43,92
5	50,51	46,20	48,71	44,28	47,79	44,07
6	50,37	46,18	48,62	44,06	47,73	43,90
7	50,04	46,06	48,58	44,18	47,53	44,34
8	50,58	46,12	48,79	44,25	47,67	44,06
9	50,20	45,87	48,87	44,05	47,85	43,74
Média	50,24	46,14	48,77	44,30	47,74	43,95
Desgaste (mm)	4,10		4,48		3,79	
Média de desgaste (mm)	4,12					
Desvio padrão	0,34					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BM50RHD

Provete	Massa inicial (g)
1	412,8
2	452,5
3	305,8

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	404,8	444,0	297,9
5 - 8	396,4	435,8	291,0
9 - 12	385,5	428,1	284,0
13 - 16	379,7	419,5	277,5
Diferença de massas (mf-mi) (g)	33,1	33,0	28,3
Média da diferença de massas (g)	31,5		
Desvio padrão	2,7		
Média massas iniciais (g)	390,4		
Dif. Massas relativa (%)	8,1		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	46,77	43,44	51,04	47,29	35,20	32,01
2	47,12	43,56	50,43	47,25	35,19	31,93
3	46,94	43,43	50,86	47,15	35,06	31,83
4	46,89	43,40	51,04	47,05	35,29	31,76
5	47,21	43,34	50,91	47,23	35,08	31,73
6	47,02	43,27	50,79	47,10	34,96	31,61
7	47,04	43,11	51,12	47,12	34,79	31,43
8	47,36	43,03	50,87	47,18	34,84	31,60
9	47,25	43,01	50,77	46,93	34,87	31,43
Média	47,07	43,29	50,87	47,14	35,03	31,70
Desgaste (mm)	3,78		3,73		3,33	
Média de desgaste (mm)	3,61					
Desvio padrão	0,25					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

B100RHD

Provete	Massa inicial (g)
1	476,6
2	480,2
3	464,6

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	465,0	467,5	452,9
5 - 8	452,8	456,9	444,5
9 - 12	442,6	445,4	433,0
13 - 16	431,3	434,5	422,1
Diferença de massas (mf-mi) (g)	45,3	45,7	42,5
Média da diferença de massas (g)	44,5		
Desvio padrão	1,7		
Média massas iniciais (g)	473,8		
Dif. Massas relativa (%)	9,4		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	48,38	44,17	49,00	44,50	47,59	43,60
2	48,40	44,08	48,95	44,42	47,76	43,55
3	48,79	43,98	48,87	44,15	48,24	43,47
4	48,38	44,07	49,09	44,53	47,94	43,60
5	48,86	44,03	49,06	44,39	47,92	43,57
6	48,52	43,89	48,80	44,22	48,06	43,37
7	48,36	44,31	49,05	44,33	47,51	43,81
8	48,69	44,06	48,84	44,23	47,74	43,55
9	48,50	43,74	48,44	44,13	47,68	43,31
Média	48,54	44,04	48,90	44,32	47,83	43,54
Desgaste (mm)	4,51		4,58		4,29	
Média de desgaste (mm)	4,46					
Desvio padrão	0,15					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BHD20RM

Provete	Massa inicial (g)
1	455,4
2	413,5
3	404,3

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	446,2	402,6	394,5
5 - 8	436,1	392,2	385,4
9 - 12	425,9	380,7	375,8
13 - 16	415,1	371,1	366,6
Diferença de massas (mf-mi) (g)	40,3	42,4	37,7
Média da diferença de massas (g)	40,1		
Desvio padrão	2,4		
Média massas iniciais (g)	424,4		
Dif. Massas relativa (%)	9,5		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	50,14	46,06	48,63	44,08	45,63	42,04
2	50,51	46,20	48,46	44,02	46,07	41,64
3	50,53	46,05	48,61	43,97	46,25	41,50
4	50,27	46,14	48,90	44,20	45,68	41,77
5	50,74	46,09	48,84	43,97	45,98	41,56
6	50,53	45,82	48,87	43,81	46,17	41,27
7	50,32	46,25	49,23	44,01	45,76	41,53
8	50,48	45,94	48,95	43,91	45,73	41,40
9	50,52	45,91	48,69	43,77	45,89	41,20
Média	50,45	46,05	48,80	43,97	45,91	41,55
Desgaste (mm)	4,40		4,83		4,36	
Média de desgaste (mm)	4,53					
Desvio padrão	0,26					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BM20RM

Provete	Massa inicial (g)
1	412,0
2	395,7
3	389,0

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	401,0	386,2	378,8
5 - 8	391,8	376,2	368,0
9 - 12	382,5	366,5	359,0
13 - 16	372,5	356,6	348,8
Diferença de massas (mf-mi) (g)	39,5	39,1	40,2
Média da diferença de massas (g)	39,6		
Desvio padrão	0,6		
Média massas iniciais (g)	398,9		
Dif. Massas relativa (%)	9,9		

Betão <i>BM20RM</i>	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	48,97	44,43	48,55	43,95	47,17	42,01
2	49,22	44,42	48,68	44,04	47,18	42,04
3	49,18	44,58	48,51	44,09	47,13	42,23
4	49,22	44,55	48,72	43,87	47,28	42,27
5	49,40	44,59	48,54	44,00	47,29	42,43
6	48,96	44,38	48,31	43,94	47,28	42,26
7	49,25	44,43	48,60	44,03	47,10	42,37
8	49,24	44,61	48,29	43,92	47,10	42,52
9	49,04	44,31	48,15	44,12	47,24	42,53
Média	49,16	44,48	48,48	44,00	47,20	42,30
Desgaste (mm)	4,69		4,49		4,90	
Média de desgaste (mm)	4,69					
Desvio padrão	0,21					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BHD50RM

Provete	Massa inicial (g)
1	439,1
2	417,9
3	401,9

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	430,5	408,7	392,6
5 - 8	422,4	399,5	383,8
9 - 12	414,0	389,8	374,4
13 - 16	404,7	381,2	365,4
Diferença de massas (mf-mi) (g)	34,4	36,7	36,5
Média da diferença de massas (g)	35,9		
Desvio padrão	1,3		
Média massas iniciais (g)	419,6		
Dif. Massas relativa (%)	8,5		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	49,49	45,88	47,86	44,09	46,63	42,40
2	49,47	45,63	48,03	44,00	46,92	42,41
3	49,50	45,61	48,49	44,01	47,17	42,86
4	49,45	45,92	48,75	43,88	47,10	42,59
5	49,63	45,69	48,43	43,90	46,87	42,65
6	49,35	45,60	48,52	43,81	47,33	42,44
7	49,60	45,60	47,75	43,87	46,84	42,72
8	49,57	45,58	48,20	43,94	46,51	42,83
9	49,48	45,50	48,29	43,72	47,24	42,68
Média	49,50	45,67	48,26	43,91	46,96	42,62
Desgaste (mm)	3,84		4,34		4,34	
Média de desgaste (mm)	4,17					
Desvio padrão	0,29					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

BM50RM

Provete	Massa inicial (g)
1	413,8
2	449,4
3	405,0

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	406,5	440,4	395,9
5 - 8	398,2	432,5	388,5
9 - 12	390,6	425,6	379,8
13 - 16	383,8	417,3	371,7
Diferença de massas (mf-mi) (g)	30,0	32,1	33,3
Média da diferença de massas (g)	31,8		
Desvio padrão	1,7		
Média massas iniciais (g)	422,7		
Dif. Massas relativa (%)	7,5		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	47,96	44,83	49,52	46,66	46,77	43,25
2	48,09	44,81	49,88	46,45	46,42	43,12
3	48,19	44,67	50,04	46,28	46,39	43,09
4	48,40	44,79	49,67	46,46	46,59	42,96
5	48,23	44,66	50,12	46,31	46,97	42,99
6	48,20	44,43	50,07	46,24	46,34	43,13
7	48,18	44,51	49,83	46,18	46,73	42,73
8	47,85	44,32	49,94	46,13	46,78	42,71
9	47,91	44,13	49,92	46,38	46,74	42,59
Média	48,11	44,57	49,89	46,34	46,64	42,95
Desgaste (mm)	3,54		3,54		3,68	
Média de desgaste (mm)	3,59					
Desvio padrão	0,08					

ANEXO O - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

B100RM

Provete	Massa inicial (g)
1	418,0
2	422,4
3	412,6

Ciclo	Massa final de ciclo (g)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1 - 4	408,7	413,6	403,8
5 - 8	400,7	404,1	395,3
9 - 12	392,4	393,9	386,6
13 - 16	384,5	384,1	378,1
Diferença de massas (mf-mi) (g)	33,5	38,3	34,5
Média da diferença de massas (g)	35,4		
Desvio padrão	2,5		
Média massas iniciais (g)	417,7		
Dif. Massas relativa (%)	8,5		

Betão	Desgaste (mm)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pontos	X _i	X _f	X _i	X _f	X _i	X _f
1	49,27	45,14	49,20	44,77	47,48	43,26
2	48,74	44,98	48,82	44,67	47,49	43,45
3	48,75	44,93	49,26	44,69	47,27	43,18
4	48,84	45,11	49,32	44,69	47,50	43,66
5	49,12	45,01	49,12	44,65	47,47	43,65
6	48,66	44,75	48,94	44,75	47,47	43,49
7	48,63	44,86	49,19	44,54	47,34	43,91
8	48,82	44,68	49,17	44,42	47,20	43,79
9	48,79	44,53	49,02	44,35	47,18	43,50
Média	48,85	44,89	49,12	44,61	47,38	43,54
Desgaste (mm)	3,96		4,50		3,83	
Média de desgaste (mm)	4,10					
Desvio padrão	0,35					