

**DESEMPENHO EM TERMOS DE DURABILIDADE DE BETÕES DE
AGREGADOS LEVES PROVENIENTES DA TRITURAÇÃO DE PISOS DE
BETÃO LEVE**

João Miguel Quilhó Correia Cabaço

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
ENGENHARIA CIVIL

Júri

Presidente: Prof. Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves de Sousa

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Orientador: Prof. Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Prof. Doutor António José da Silva Costa

Vogal: Prof. Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Mai de 2013

RESUMO

Nos dias de hoje, devido ao desenvolvimento da civilização e ao crescimento da população mundial, os problemas ambientais são cada vez mais sérios. O consumo descontrolado de recursos naturais representa uma das maiores consequências provocadas pelo desenvolvimento da tecnologia. Assim, a utilização de agregados reciclados de betão na produção de betões estruturais surge como uma alternativa benéfica, tanto do ponto de vista da protecção ambiental, como da sustentabilidade das reservas de naturais. Para que esta alternativa possa representar uma mais-valia no sector da construção, é necessário assegurar a sua qualidade e compreender a influência da incorporação de agregados reciclados na produção de betões estruturais.

Contudo, grande parte das investigações existentes não considera a hipótese de utilizar agregados de betão leve reciclado como agregado a incorporar no betão e as poucas que o fazem analisam preferencialmente as suas características mecânicas. A elaboração deste estudo pretendeu contribuir para aprofundar o conhecimento da influência destes agregados em termos de durabilidade, não introduzindo qualquer tipo de adição ou adjuvante, que pudesse alterar as características do betão tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Na campanha experimental que culminou nesta dissertação, foram utilizados dois tipos de agregado reciclado, um produzido a partir da trituração de blocos de betão leve estrutural (RLHD) e outro produzido a partir da trituração de blocos de betão leve de enchimento (RLM). Foram produzidas quatro famílias distintas de betões, cada uma formada a partir da substituição de dois agregados leves utilizados na produção de betões leves (Leca HD e Leca M) por agregados de betão leve reciclado (RLHD e RLM) em percentagens de 20, 50 e 100%, num total de 12 composições. Estas foram ensaiadas, no estado fresco, à trabalhabilidade e massa volúmica e, no estado endurecido, à retracção, absorção de água, por imersão e capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.

Os resultados obtidos demonstram que as propriedades dos betões produzidos com ALBR pioram o desempenho em termos de durabilidade. Esta redução do desempenho é tanto maior quanto maior for a taxa de substituição de ALBR e varia consoante o material utilizado. No entanto, no caso do RLHD, a redução observada é aceitável para composições até 20% de incorporação e não compromete o uso destes agregados em betão estrutural. Por outro lado, o uso de RLM não é aconselhável na produção de betão estrutural, podendo, no entanto, ser uma mais-valia na produção de betões com características não estruturais.

Palavras-chave:

Resíduos da construção e demolição; agregados reciclados de betão leve; betão leve; durabilidade.

ABSTRACT

Nowadays, due to the development of civilization and population growth, worldwide environmental problems are becoming increasingly serious. The uncontrolled consumption of natural resources is one of the major consequences of the development of technology. Therefore, the use of recycled aggregate concrete in the production of structural concrete can be a useful alternative, not only in the perspective of environmental protection, but also for the sustainability of natural reserves. So that this material can become a good alternative in the construction sector, it is necessary to ensure its quality and to understand the influence of recycled aggregates in the production of structural concrete.

However, most investigations do not consider the possibility of reusing lightweight concrete as an aggregate for structural concrete production and, since the existing ones only study the mechanical performance of concrete, this work aims to contribute to a better knowledge of the influence of these aggregates, as raw material in the production of structural concrete, in terms of durability. No additions or adjuvants were introduced, because they could modify the characteristics of the concrete in the fresh or hardened state.

There were two kinds of recycled aggregate used in this investigation: one from crushed blocks of structural lightweight concrete (RLHD) and another from crushed blocks of non-structural lightweight concrete (RLM). Four distinct families were produced, each one made with substitution ratios of two primary expanded clay aggregates (Leca HD and Leca M) by two recycled aggregates at the percentages of 20%, 50% and 100%, in a total of 12 concrete mixes. These compositions were tested in the fresh (workability and fresh density) and hardened state (drying shrinkage, water absorption by capillarity and by immersion, resistance to carbonation and to chlorides penetration).

The results obtained show that the recycled lightweight concrete incorporation decreases concrete's performance, in terms of durability. This reduction increases along with the replacement ratio of lightweight aggregates by the recycled aggregates and varies according to the material used. However, when considering the recycled lightweight aggregates produced from structural lightweight concrete, the observed reduction is acceptable for compositions up to 20% incorporation and does not compromise the use of these aggregates in concrete. On the other hand, the recycled aggregates from non-structural lightweight concrete is not recommended in the production of structural concrete, although it can be seen as a good alternative in producing concrete with no structural applications.

Keywords:

Construction and demolition waste; recycled lightweight concrete aggregate; lightweight concrete; durability

AGRADECIMENTOS

Todo o trabalho de investigação que culminou com a redacção desta dissertação foi desenvolvido ao longo de vários meses. Os inúmeros obstáculos e dificuldades que surgiram foram ultrapassados 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, expresse o meu profundo agradecimento, não apenas pela dedicação e exigência que prestou a este trabalho, mas também pela amizade, apoio e disponibilidade demonstrados. Quero ainda agradecer o sentido crítico, ideias e o rigor que trouxe à dissertação que, em muito, a enriqueceram.

Ao professor Doutor José Bogas, co-orientador deste trabalho, pela orientação e apoio prestado e pelas ideias e opiniões construtivas que prestou à dissertação. Quero também agradecer a amizade, a disponibilidade e o incentivo que sempre dedicou, mesmo nos períodos mais críticos.

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

Aos meus colegas investigadores do IST, Eng.^{os} Luís Evangelista, Jorge Pontes e Miguel Bravo pela ajuda e camaradagem.

Ao meu colega e amigo José Maria Guedes, com quem partilhei esta investigação, não só pelo apoio durante a fase de ensaios, mas também pelo companheirismo demonstrados ao longo deste trabalho de investigação.

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

Aos meus amigos Francisco Matias, Jorge Filipe e Pedro Gonçalves, pela ajuda preciosa na elaboração desta investigação.

À Alexandra Silva, Bryan Pato, Carla Ferreira, Catarina Gomes, David Guerra, Duarte Castaño, Duarte Saraiva, Francisco Santos, Inês Carmona, Inês Fontinha, João Ferraz, João Pacheco, Leonor Rosa, Luísa Pena, Manuel Catarino, Manuel Henriques, Manuel Gonçalves, Margarida Quilhó, Paula Simas, Pedro Serrão, Rita Alves, Rui Vera-Cruz, Teresa Gomes, 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, Ana e Carlos, pela entrega e estímulo, pelo apoio, confiança e compreensão revelados ao longo destes meses. Acima de tudo, o meu especial e carinhoso agradecimento por nunca terem deixado de acreditar.

À minha Família, em particular ao meu avô Carlos, pela preocupação, carinho e apoio incondicional mostrados 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 pelo carinho demonstrados.

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

BHD - 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

BM - 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
Abreviaturas	iv
Índice geral	v
Índice de figuras	viii
Índice de quadros	xi
1. Introdução	1.1
1.1. Considerações iniciais	1.1
1.2. Objectivos	1.2
1.3. Metodologia e organização da dissertação	1.3
2. Estado da arte	2.1
2.1. Introdução	2.1
2.2. Propriedades dos agregados leves	2.1
2.2.1. Forma	2.2
2.2.2. Massa volúmica e baridade	2.4
2.2.3. Absorção de água	2.6
2.3. Propriedades dos agregados leves reciclados	2.7
2.3.1. Forma	2.8
2.3.2. Massa volúmica e baridade	2.9
2.3.3. Absorção de água	2.10
2.4. Propriedades dos betões com agregados leves	2.13
2.4.1. Trabalhabilidade	2.13
2.4.2. Massa volúmica	2.13
2.4.3. Retracção	2.14
2.4.4. Absorção de água	2.15
2.4.5. Resistência à carbonatação	2.17
2.4.6. Resistência à penetração de cloretos	2.18
2.5. Propriedades dos betões com agregados leves reciclados	2.18
2.5.1. Trabalhabilidade	2.19
2.5.2. Massa volúmica	2.20
2.5.3. Retracção	2.21
2.5.4. Absorção de água	2.22
2.5.5. Resistência à carbonatação	2.23

2.5.6. Resistência à penetração de cloretos	2.24
3. Descrição da campanha experimental	3.1
3.1. Introdução	3.1
3.2. Planeamento da campanha experimental	3.1
3.3. Produção do material reciclado	3.2
3.3.1. Betões de origem	3.3
3.3.2. Britagem	3.5
3.4. Formulação do betão	3.6
3.4.1. Betões de referência	3.6
3.4.2. Formulação dos betões com agregados leves reciclados	3.13
3.4.3. Composição dos betões	3.13
3.5. Produção dos betões	3.15
3.5.1. Processo	3.15
3.6. Ensaio de caracterização dos agregados	3.17
3.6.1. Análise granulométrica	3.18
3.6.2. Massa volúmica e absorção de água	3.20
3.6.3. Massa volúmica aparente	3.24
3.6.4. Resistência ao esmagamento	3.25
3.6.5. Teor em água	3.26
3.6.6. Índice de forma	3.28
3.6.7. Evolução da absorção de água	3.29
3.7. Ensaio do betão no estado fresco	3.31
3.7.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)	3.31
3.7.2. Massa volúmica	3.32
3.8. Ensaio do betão no estado endurecido	3.33
3.8.1. Retracção	3.34
3.8.2. Absorção de água	3.35
3.8.2.1. Absorção de água por capilaridade	3.35
3.8.2.2. Absorção de água por imersão	3.37
3.8.3. Resistência à carbonatação	3.38
3.8.4. Resistência à penetração de cloretos	3.40
4. Apresentação e análise dos resultados da campanha experimental	4.1
4.1. Introdução	4.1
4.2. Ensaio de identificação de agregados	4.1
4.2.1. Análise granulométrica	4.1
4.2.2. Massa volúmica e absorção de água	4.8
4.2.3. Massa volúmica aparente	4.10
4.2.4. Resistência ao esmagamento	4.10
4.2.5. Teor em água	4.11
4.2.6. Índice de forma	4.11

4.2.7. Evolução da absorção de água	4.12
4.3. Ensaio do betão no estado fresco	4.15
4.3.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)	4.15
4.3.2. Massa volúmica	4.16
4.4. Ensaio do betão no estado endurecido	4.18
4.4.1. Resistência à compressão aos 28 dias e massa volúmica no estado endurecido	4.19
4.4.2. Retracção	4.20
4.4.3. Absorção de água	4.27
4.4.3.1. Absorção de água por capilaridade	4.27
4.4.3.2. Absorção de água por imersão	4.33
4.4.4. Resistência à carbonatação	4.38
4.4.5. Resistência à penetração de cloretos	4.47
5. Conclusões	5.1
5.1. Considerações finais	5.1
5.2. Conclusões gerais	5.1
5.3. Propostas de desenvolvimento futuro	5.4
Bibliografia	6.1
Livros, textos e dissertações	6.1
Normas	6.5
Anexo A: Composições dos betões	A.1
Anexo B: Fichas técnicas dos materiais	B.1
Anexo C: Análise granulométrica	C.1
Anexo D: Massa volúmica e absorção de água	D.1
Anexo E: Massa volúmica aparente	E.1
Anexo F: Resistência ao esmagamento	F.1
Anexo G: Resistência ao esmagamento	G.1
Anexo H: Teor em água	H.1
Anexo I: Índice de forma	I.1
Anexo J: Evolução da absorção de água	J.1
Anexo K: Resistência à compressão	K.1
Anexo L: Massa volúmica no estado endurecido	L.1
Anexo M: Retracção	M.1
Anexo N: Absorção de água	N.1
Anexo O: Resistência à carbonatação	O.1
Anexo P: Resistência à penetração de cloretos	P.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação dos agregados leves	2.2
Figura 2.2 - Forma e partículas de Leca	2.3
Figura 2.3 - Estrutura das partículas de Leca	2.3
Figura 2.4 - Estrutura dos agregados expandidos de origem vulcânica	2.4
Figura 2.5 - Baridade em função da fracção granulométrica	2.5
Figura 2.6 - Tipos de poros nos agregados leves	2.6
Figura 2.7 - Modelo de um agregado reciclado	2.7
Figura 2.8 - Agregado reciclado de betão leve com vidro expandido	2.8
Figura 2.9 - Estrutura interna das partículas de espuma de poliuretano reciclado	2.9
Figura 2.10 - Relação entre a absorção de água e o tipo de agregado	2.11
Figura 2.11 - Curva de absorção dos agregados finos reciclados	2.11
Figura 2.12 - Curva de absorção dos agregados grossos reciclados	2.12
Figura 2.13 - Evolução da absorção de água em agregados grossos reciclados	2.12
Figura 2.14 - Relação entre a retracção e a compacidade da pasta (relação a/c)	2.15
Figura 2.15 - Absorção de água por capilaridade	2.16
Figura 2.16 - Absorção de água por imersão	2.16
Figura 2.17 - Mecanismo de absorção de água de betão leve com argila expandida	2.16
Figura 2.18 - Valores de abaixamento em betões com agregados de borracha	2.20
Figura 2.19 - Retracção dos provetes aos 28 dias	2.22
Figura 2.20 - Retracção dos provetes aos 120 dias	2.22
Figura 2.21 - Absorção de água	2.23
Figura 2.22 - Profundidade de carbonatação	2.24
Figura 2.23 - Relação entre a difusão de cloretos e a absorção de água por imersão	2.25
Figura 3.1 - Cofragem em contraplacado marítimo	3.3
Figura 3.2 - Pormenor do preenchimento da cofragem	3.3
Figura 3.3 - Britadeira de maxilas	3.5
Figura 3.4 - Material reciclado RLHD	3.5
Figura 3.5 - Material reciclado RLM	3.5
Figura 3.6 - Curva de Faury com e sem cimento	3.12
Figura 3.7 - Método gráfico	3.12
Figura 3.8 - Betoneira de eixo basculante	3.15
Figura 3.9 - Moldes após colocação do betão	3.16
Figura 3.10 - Provetes em ambiente de cura	3.17
Figura 3.11 - Peneiros da série 933-2 e máquina de peneirar	3.19
Figura 3.12 - Amostra imersa em água	3.21
Figura 3.13 - Indicações da norma NP EN 1097-6 para determinação do estado saturado com superfície seca em agregados finos	3.21
Figura 3.14 - Recipiente metálico para ensaio de esmagamento	3.26

Figura 3.15 - Estufa ventilada	3.27
Figura 3.16 - Pesagem do conjunto agregado + picnómetro	3.30
Figura 3.17 - Ensaio de abaixamento	3.32
Figura 3.18 - Formas de abaixamento	3.32
Figura 3.19 - Pesagem do betão no estado fresco	3.33
Figura 3.20 - Pastilhas metálicas colocadas no provete	3.35
Figura 3.21 - Provetes no interior da câmpanula	3.36
Figura 3.22 - Provetes imersos a 1/3 da sua altura	3.38
Figura 3.23 - Provetes após pintura do topo e da base com borracha líquida	3.39
Figura 3.24 - Profundidade de carbonatação	3.40
Figura 3.25 - Provetes no interior da bomba de vácuo	3.41
Figura 3.26 - Solução anódica e catódica	3.41
Figura 3.27 - Equipamento de ensaio para a resistência à compressão	3.43
Figura 3.28 - Equipamento de ensaio para a resistência à compressão	3.43
Figura 3.29 - Profundidade de penetração de iões coreto	3.43
Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina	4.2
Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia grossa	4.3
Figura 4.3 - Curva granulométrica da Leca HD	4.4
Figura 4.4 - Curva granulométrica da Leca M	4.5
Figura 4.5 - Curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com Leca HD	4.6
Figura 4.6 - Curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com Leca M	4.7
Figura 4.7 - Valores das massas volúmicas de cada material	4.8
Figura 4.8 - Absorção de água às 24h dos agregados leves e reciclados	4.9
Figura 4.9 - Evolução da absorção de água dos agregados primários	4.13
Figura 4.10 - Evolução da absorção de água dos agregados reciclados	4.14
Figura 4.11 - Valores de abaixamento	4.15
Figura 4.12 - Massa volúmica fresca das composições com RLHD	4.17
Figura 4.13 - Massa volúmica fresca das composições com RLM	4.18
Figura 4.14 - Massa volúmica no estado endurecido das composições com RLHD	4.20
Figura 4.15 - Massa volúmica no estado endurecido das composições com RLM	4.20
Figura 4.16 - Relação entre a retracção aos 91 dias e a taxa de incorporação de RLHD	4.21
Figura 4.17 - Relação entre a retracção aos 91 dias e a taxa de incorporação de RLM	4.22
Figura 4.18 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BHDRHD	4.23
Figura 4.19 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BHDRHD	4.23
Figura 4.20 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BMRHD	4.24
Figura 4.21 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BMRHD	4.24
Figura 4.22 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BHDRM	4.25
Figura 4.23 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BHDRM	4.25
Figura 4.24 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BMRM	4.26
Figura 4.25 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BMRM	4.26

Figura 4.26 - Evolução da absorção capilar nas composições BHDRHD	4.28
Figura 4.27 - Evolução da absorção capilar nas composições BMRHD	4.29
Figura 4.28 - Evolução da absorção capilar nas composições BHDRM	4.29
Figura 4.29 - Evolução da absorção capilar nas composições BHDRM	4.30
Figura 4.30 - Coeficiente de absorção nas composições BHDRHD	4.30
Figura 4.31 - Coeficiente de absorção nas composições BMRHD	4.31
Figura 4.32 - Coeficiente de absorção nas composições BHDRM	4.31
Figura 4.33 - Coeficiente de absorção nas composições BMRM	4.32
Figura 4.34 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, composições com RLHD	4.33
Figura 4.35 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, composições com RLM	4.33
Figura 4.36 - Relação da absorção por imersão entre as composições com RLHD e os betões de referência	4.35
Figura 4.37 - Relação da absorção por imersão entre as composições com RLM e os betões de referência	4.35
Figura 4.38 - Relação entre a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, composições com RLHD	4.36
Figura 4.39 - Relação entre a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, composições com RLM	4.36
Figura 4.40 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água por imersão, composições com RLHD	4.37
Figura 4.41 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água por imersão, composições com RLM	4.37
Figura 4.42 - Evolução da profundidade de carbonatação nas composições BHDRHD	4.39
Figura 4.43 - Coeficiente de carbonatação, composição BHDRHD	4.40
Figura 4.44 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRHD	4.40
Figura 4.45 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRHD	4.41
Figura 4.46 - Evolução da profundidade de carbonatação nas composições BMRHD	4.41
Figura 4.47 - Coeficiente de carbonatação, composição BMRHD	4.41
Figura 4.48- Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BMRHD	4.42
Figura 4.49 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BMRHD	4.42
Figura 4.50 - Evolução da profundidade de carbonatação nas composições BHDRM	4.43
Figura 4.51 - Coeficiente de carbonatação, composição BHDRM	4.43
Figura 4.52- Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRM	4.44

Figura 4.53 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRM	4.44
Figura 4.54 - Evolução da profundidade de carbonatação nas composições BMRM	4.45
Figura 4.55 - Coeficiente de carbonatação, composição BMRM	4.45
Figura 4.56 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BMRM	4.46
Figura 4.57 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação, composições com RLHD	4.46
Figura 4.58 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação, composições com RLM	4.47
Figura 4.59 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BHDRHD	4.48
Figura 4.60 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BMRHD	4.49
Figura 4.61 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BHDRM	4.50
Figura 4.62 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BMRM	4.50
Figura 4.63 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias, composições com RLHD	4.51
Figura 4.64 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias, composições com RLHD	4.51

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resumo das principais características dos materiais de argila expandida	2.3
Quadro 2.2 - Agregados leves em função da baridade	2.5
Quadro 2.3 - Valores de massa volúmica de agregados leves obtidos em diversas campanhas	2.5
Quadro 2.4 - Valores de absorção de água obtidos em diversas investigações	2.6
Quadro 2.5 - Massa volúmica e baridade de agregados reciclados	2.9
Quadro 2.6 - Valores de massa volúmica de agregados leves reciclados	2.10
Quadro 2.7 - Valores de absorção de água em agregados reciclados	2.13
Quadro 2.8 - Valores de massa volúmica de betão leve	2.14
Quadro 2.9 - Resistência à compressão de betão leve com agregados leves de betão leve	2.19
Quadro 2.10 - Valores de abaixamento de betão com agregados plásticos reciclados	2.20
Quadro 3.1 - Ensaio a agregados grossos	3.2
Quadro 3.2 - Ensaio a agregados finos	3.2
Quadro 3.3 - Ensaio ao betão no estado fresco	3.2
Quadro 3.4 - Ensaio ao betão no estado endurecido	3.2
Quadro 3.5 - Composição dos betões leves de origem	3.4
Quadro 3.6 - Valores característicos dos betões de origem	3.4
Quadro 3.7 - Valores médios do volume de vazios	3.8
Quadro 3.8 - Classificação da trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes	3.9

Quadro 3.9 - Valores de K e K'	3.9
Quadro 3.10 - Valores de A e B da curva de Faury	3.11
Quadro 3.11 - Valores a curva de Faury	3.11
Quadro 3.12 - Valores da curva de Faury sem cimento	3.11
Quadro 3.13 - Percentagem dos componentes sólidos do betão	3.12
Quadro 3.14 - Rácio entre as percentagens das curvas granulométricas por peneiro	3.13
Quadro 3.15 - Composições finais dos diversos betões produzidos	3.14
Quadro 3.16 - Procedimentos de cura em função de cada ensaio	3.17
Quadro 3.17 - Ensaio aos agregados	3.18
Quadro 3.18 - Massa mínima dos provetes	3.19
Quadro 3.19 - Massa mínima dos provetes	3.23
Quadro 3.20 - Volume mínimo do recipiente a ensaiar	3.24
Quadro 3.21 - Massa mínima dos provetes	3.28
Quadro 3.22 - Correção da voltagem	3.42
Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina	4.2
Quadro 4.2 - Análise granulométrica da areia grossa	4.3
Quadro 4.3 - Análise granulométrica da Leca HD	4.4
Quadro 4.4 - Análise granulométrica da Leca M	4.5
Quadro 4.5 - Análise granulométrica do RLHD	4.6
Quadro 4.6 - Análise granulométrica do RLM	4.7
Quadro 4.7 - Resultados obtidos para a massa volúmica e absorção de água	4.8
Quadro 4.8 - Resultados obtidos para a massa volúmica aparente	4.10
Quadro 4.9 - Resultados obtidos para a resistência ao esmagamento	4.11
Quadro 4.10 - Resultados médios obtidos para o teor em água	4.11
Quadro 4.11 - Resultados obtidos para o índice de forma	4.12
Quadro 4.12 - Evolução da absorção de água dos agregados primários	4.13
Quadro 4.13 - Evolução da absorção de água dos agregados reciclados	4.14
Quadro 4.14 - Valores de abaixamento e relação a/c	4.15
Quadro 4.15 - Massa volúmica no estado fresco	4.16
Quadro 4.16 - Massa volúmica e variação de massa nas composições com RLHD	4.17
Quadro 4.17 - Massa volúmica e variação de massa nas composições com RLM	4.18
Quadro 4.18 - Resistência média à compressão aos 28 dias e massa volúmica no estado endurecido	4.19
Quadro 4.19 - Retracção registados aos 91 dias	4.21
Quadro 4.20 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, nas composições com RLHD	4.27
Quadro 4.21 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, nas composições com RLM	4.28
Quadro 4.22 - Absorção de água por imersão	4.34
Quadro 4.23 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias de ensaio	4.38
Quadro 4.24 - Coeficientes de difusão de cloretos	4.47

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Num Mundo que procura, cada vez mais, dar resposta a problemas ambientais, nomeadamente, ao nível da poluição e do consumo excessivo de recursos, torna-se essencial que a indústria da construção se preocupe com uma construção sustentável. De acordo com Ortiz *et al.* (2007), um empreendimento, de forma a ser sustentável, tem que ser: ecologicamente correcto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceite. Este tema tem sido alvo de grande atenção e debate na área da Engenharia Civil. Da mesma forma, Zordan (1997) refere que os resíduos da construção são vistos, cada vez mais, como uma boa alternativa de matéria-prima quando reutilizados.

A reutilização de resíduos da construção é uma solução que tem vindo a evoluir ao longo do tempo, sendo cada vez mais utilizada em todo o mundo. O Reino Unido, a Bélgica e a Alemanha são alguns países onde o processo da reciclagem e a aplicação dos agregados reciclados na produção de betões são correntes. Pelo contrário, em países como Espanha e França, apenas se utilizam os resíduos da construção civil para a produção de material de enchimento.

Por outro lado, este processo, para além de ser utilizado nos EUA para a obtenção de material de enchimento, é essencialmente usado na aplicação das camadas de base e sub base em estradas (Gonçalves, 2000).

Em Portugal, nota-se uma clara evolução neste capítulo. Gonçalves (2000) refere que no ano 2000 ainda não existia qualquer tipo de legislação para o uso de agregados reciclados. Porém, mais tarde, em Setembro de 2006, o LNEC publica a norma E-471 “Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos” que define a classificação dos agregados reciclados e estabelece requisitos mínimos para a utilização dos mesmos (Gonçalves, 2007).

O betão é, hoje em dia, o material mais utilizado na indústria da construção. No entanto, existe uma preocupação em encontrar novas variantes de betão que possam oferecer mais vantagens.

O elevado peso das estruturas em betão condiciona, de certo modo, o custo da obra, sendo que uma redução do peso próprio através da diminuição da massa volúmica do betão é uma das formas de otimizar a economia das construções, sendo esta uma das principais causas para o aparecimento dos betões leves estruturais que se caracterizam por ter massas volúmicas inferiores a 2000 kg/m³ (NP EN 206). Neste aspecto, a utilização deste tipo de betão é bastante vantajosa, pois permite soluções construtivas mais esbeltas, menores solicitações nos elementos verticais e melhores alternativas em soluções de reabilitação.

Para além da redução da massa volúmica e da redução de esforços nos elementos estruturais, os BAL apresentam outras vantagens, tais como (Bogas, 2010) (Silva, 2007) (Chandra, 2003):

- permitir soluções arquitectónicas mais arrojadas;
- menor custo e maior facilidade de transporte, dependendo dos locais de fornecimento;
- melhoria no isolamento térmico;

- redução da acção sísmica através do aumento da capacidade de dissipação de energia (maior capacidade de deformação);
- melhoria no comportamento ao fogo.

De acordo com Silva *et al.* (2004), por este tipo de betão ser leve e apresentar um conjunto de características interessantes, é cada vez mais utilizado em Portugal, proporcionando a redução dos esforços nos elementos estruturais e conduzindo a uma redução de custos. Nos estudos em curso, os resultados já obtidos permitem concluir que é possível realizar com o uso de agregados de argila expandida um betão leve com características de resistência semelhantes aos betões correntemente utilizados.

O progresso científico permite, hoje em dia, que este material esteja cada vez mais desenvolvido. Nos dias de hoje, é possível utilizar agregados leves em todo o tipo de construções, tais como pontes, edifícios ou plataformas petrolíferas. No entanto, a utilização mais comum do betão leve passa por aplicações não estruturais, nomeadamente em elementos de enchimento e pavimentos, devido às suas características de leveza e isolamento térmico e acústico.

Em Portugal, a utilização de betão com agregados leves ainda não tem a expressão desejada. Porém, uma das mais belas obras de engenharia actuais foi realizada com este tipo de betão, a pala do Pavilhão de Portugal na EXPO 98.

1.2. OBJECTIVOS

A dissertação apresentada de seguida, desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, pretende aprofundar os conhecimentos existentes no domínio da gestão e reutilização dos RCD, de modo a reduzir o impacte ambiental provocado por estes e diminuir a utilização de recursos naturais, normalmente consumidos na produção de betões. Deste modo, avaliou-se o desempenho em termos de durabilidade de betões produzidos com ALBR, para diferentes taxas de substituição (20, 50 e 100%) de AL por ALBR e comparou-se os resultados obtidos com os de dois betões de referência compostos, apenas, por AL. Assim, é possível avaliar a influência que os ALBR têm na produção de novos betões.

Para tal, fabricou-se um total de 12 betões com diversas composições, alternando, entre eles, as taxas de substituição de dois tipos de agregado leve (Leca M e Leca HD) por agregados de betão leve reciclado, e, posteriormente, analisou-se os resultados obtidos em termos de durabilidade. Os 12 betões designam-se por:

- **BM** - betão leve de referência com leca M;
- **BHD** - betão leve de referência com 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;
- **BM20RHD** - betão de leca M com 20% de reciclados de leca HD;
- **BM50RHD** - betão de leca M com 50% de reciclados de leca HD;
- **B100RHD** - betão com 100% 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.
- **BM20RM** - betão de leca M com 20% de reciclados de leca M;
- **BM50RM** - betão de leca M com 50% de reciclados de leca M;
- **B100RM** - betão com 100% de reciclados de leca M.

Neste trabalho, serão ensaiados provetes para verificar o comportamento do betão leve quanto à retracção, absorção de água (por imersão e por capilaridade), carbonatação e penetração de cloretos.

A par desta dissertação, foi realizada uma outra, que trata o “Desempenho mecânico de betões de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve”, por José Maria Guedes, do Instituto Superior Técnico.

1.3. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A metodologia seguida ao longo da realização desta investigação pode ser dividida em quatro etapas. A primeira consistiu na pesquisa, recolha e tratamento de referências bibliográficas a nível nacional e internacional. Esta etapa teve como principal objectivo a aquisição dos conhecimentos para a planificação e construção da campanha experimental.

Na segunda etapa, procedeu-se à preparação de um plano para a realização das betonagens e dos ensaios normalizados aos agregados e aos betões. Neste plano, foram ainda incluídas as quantidades de recursos e equipamentos necessárias para a realização da campanha experimental.

A terceira etapa consistiu na execução da campanha experimental, onde, em primeiro lugar, se realizaram diversos ensaios de caracterização dos agregados. A segunda fase abrangeu os ensaios aos betões no estado fresco. Por fim, a última fase da campanha experimental consistiu na produção e na realização de ensaios de durabilidade dos diversos betões.

Na quarta etapa, procedeu-se à discussão dos resultados obtidos para os diferentes tipos de betão, analisando as diferenças de desempenho entre os betões com ALBR e os betões de referência.

Na redacção da presente dissertação, pretendeu-se compilar e organizar todas as informações, análises, discussões e conclusões. Este documento encontra-se estruturado em capítulos organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 1** - neste capítulo, são apresentadas algumas notas introdutórias e os objectivos que motivaram a realização da presente dissertação, ao mesmo tempo que se pretende enquadrar a investigação realizada com o desenvolvimento sustentável;
- **Capítulo 2** - neste capítulo, realizou-se um levantamento do conhecimento com a descrição e análise crítica dos resultados obtidos noutras investigações com relevância para este trabalho;
- **Capítulo 3** - neste capítulo, é apresentada toda a campanha experimental com a ilustração e descrição dos ensaios realizados sobre os agregados, betão no estado fresco e no estado

endurecido. Apresentam-se, ainda, os cálculos da composição do betão, assim como a definição do processo de amassadura dos betões e das condições de cura;

- **Capítulo 4** - este capítulo contempla a apresentação e análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental, estando dividido em três partes: a primeira é constituída por uma apresentação e análise dos resultados obtidos sobre as propriedades dos agregados utilizados na produção dos betões; na segunda, apresentam-se e os resultados obtidos nos ensaios aos betões no estado fresco; na última, são analisados os resultados obtidos relativos às propriedades do betão no estado endurecido, em termos de durabilidade;
- **Capítulo 5** - neste capítulo, são resumidas as principais conclusões resultantes da análise dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental, destacando o desempenho dos betões produzidos com ALBR, em termos de durabilidade. Procede-se, ainda, à apresentação de algumas propostas de investigações a realizar futuramente, com o objectivo de se esclarecerem dúvidas pendentes na área da utilização de ALBR em betões.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho e os anexos referenciados ao longo da dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Esta parte da dissertação procura fazer uma abordagem ao actual estado da arte no que se refere à utilização de agregados leves reciclados na produção de betões leves estruturais (BEAL), mais concretamente no que diz respeito ao seu comportamento em termos de durabilidade. Apesar de existir um grande número de investigações sobre a incorporação de material reciclado no betão, o mesmo não sucede quando o material reciclado é obtido a partir de betões com agregados leves.

No entanto, Reinhardt e Kummel (1999) afirmam ser possível produzir betão leve com agregados reciclados de betão leve de argila expandida. Mais recentemente, Kralj (2009) apresenta resultados obtidos em betões leves com agregados reciclados de betão leve com vidro expandido.

Por outro lado, Al-Sibahy e Edwards (2011) referem que é possível produzir betões leves estruturais com agregados reciclados de vidro. Da mesma forma, Lima *et al.* (2010) concluem ser possível diminuir a massa volúmica do betão, usando agregados reciclados da indústria de sapatos.

Estas investigações têm particular interesse, uma vez que, nos dias de hoje, a utilização do betão leve é cada vez mais usual. Em países como a Alemanha, Holanda e Noruega, os betões leves têm sido intensivamente utilizados para a construção ou reabilitação de pontes de grandes dimensões. Outras aplicações correntes dos betões leves passam pela reabilitação de edifícios antigos e monumentos. São usados, essencialmente, como enchimento de lajes, colaborando também na melhoria do isolamento térmico e resistência ao fogo.

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. No ANEXO B, são apresentadas as fichas técnicas destes dois materiais.

Numa primeira fase, são analisadas as propriedades dos agregados a utilizar (agregados leves e reciclados), seguida de uma análise ao desempenho em termos de durabilidade de betões com este tipo de agregados.

2.2. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES

De acordo com as normas EN 13055-1 (2002) e NP EN 206-1 (2005), os agregados leves (AL) são caracterizados por apresentarem uma massa volúmica menor ou igual a 2000 kg/m^3 ou uma baridade inferior a 1200 kg/m^3 .

Em geral, as matérias-primas mais utilizadas na produção de agregados leves, nomeadamente destinados à produção de betões com características estruturais, são rochas vulcânicas ou sedimentares, como a pedra-pomes, a escória, a argila, o xisto, a ardósia, a perlite e a vermiculite (Mueller *et al.*, 2007) ou ainda a cinza volante resultante dos resíduos de combustão das centrais termoeléctricas.

No entanto, existem outros tipos de agregado leve consoante a sua natureza e processo de produção, como por exemplo partículas de madeira ou granulados de cortiça (Figura 2.1).

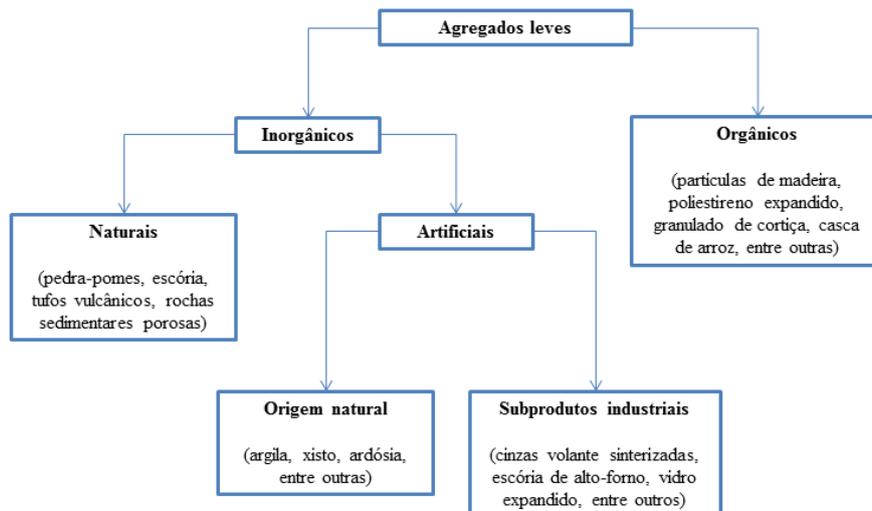


Figura 2.1 - Classificação dos agregados leves (adaptado de Bogas, 2011)

Citando Bogas (2011), apenas os agregados leves inorgânicos são geralmente capazes de produzir betões leves de características estruturais.

Na execução desta dissertação, foram utilizados agregados de argila expandida nacionais, designados comercialmente por Leca. No entanto, são analisados neste capítulo outros tipos de agregados leves usados em diferentes investigações.

2.2.1. Forma

A forma dos agregados tem uma grande influência sobre algumas propriedades do betão, tais como a trabalhabilidade, a compacidade e, em última análise, todas as que dependem da quantidade de água na amassadura (Coutinho, 1988).

A forma e a textura dos agregados leves podem diferir dependendo do modo de produção (de Gennaro *et al.*, 2003) (Rossignolo, 2003) (Bogas, 2011). A sua forma pode variar de esférica e regular a angular e achatada e a textura pode variar de rugosa a macroscopicamente lisa (ACI213R, 2003).

Segundo Bogas (2011), as partículas de leca apresentam uma superfície exterior com aspecto compacto e coloração acastanhada, contrastando com o interior, constituído por uma estrutura alveolar porosa, de cor acinzentada (Figura 2.2). Estas partículas apresentam uma forma esférica e uma superfície praticamente lisa, que, no entanto, possui microrugosidade e microporosidade suficientes para garantir uma adequada ligação entre o agregado e a pasta no betão (Zhang e Gjorv, 1989) (Vavsburd, 1992) (Chandra e Berntsson, 2003).

Na Figura 2.3, são apresentadas imagens recolhidas do microscópio de varrimento electrónico, onde é possível observar a estrutura interna alveolar do agregado que é rodeada por uma parede mais compacta com cerca de 200 µm de espessura.



Figura 2.2 - Forma e textura das partículas de Leca



Figura 2.3 - Estrutura das partículas de Leca (Bogas, 2011)

São apresentadas, no Quadro 2.1, algumas características gerais dos agregados leves de argila expandida analisados durante a campanha de Bogas (2011). Conforme se constata, este tipo de agregados pode variar bastante em termos de forma, textura e microestrutura, consoante a matéria-prima utilizada e o processo de fabrico.

Quadro 2.1 - Resumo das principais características dos materiais de argila expandida (Bogas, 2011)

Propriedades	Leca	Arlita	Argex
Cor exterior	Avermelhado / acastanhado	Creme	Creme
Cor interior	Cinzento claro a escuro	Cinzento claro a escuro	Cinzento claro a escuro
Forma das partículas	Esférica a elipsoidal	Esférica	Cilíndrica a alongada
Superfície e textura	Ligeira porosidade e fissuração	Pouco fissurada e compacta	Porosa e fissurada
Estrutura interna	Porosidade grosseira	Estrutura concêntrica com porosidade refinada	Porosidade grosseira

Da mesma forma, de Gennaro *et al.* (2003), ao estudarem a possibilidade de usar rochas vulcânicas Italianas na produção de agregados leves para betão, realçam o contraste entre a presença de uma parede exterior mais compacta e o interior caracterizado por uma estrutura alveolar de porosidade mais grosseira (Figura 2.4).

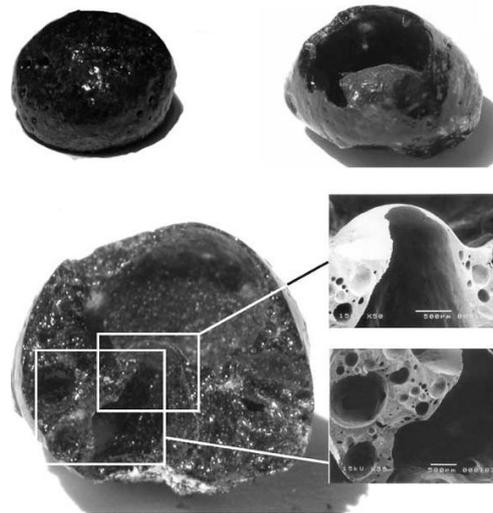


Figura 2.4 - Estrutura dos agregados expandidos de origem vulcânica (de Gennaro *et al.*, 2003)

A porosidade destes agregados resulta do aquecimento destes materiais a elevadas temperaturas, durante uma fase em que estes adquirem propriedades pirolásticas, ocorrendo uma importante expansão que permite que estes agregados adquiram uma baixa massa volúmica. Após este processo, induz-se um arrefecimento no material, desenvolvendo, deste modo, uma película compacta de maior resistência mecânica (de Gennaro *et al.*, 2003) (Mueller *et al.*, 2007).

2.2.2. Massa volúmica e baridade

A massa volúmica do agregado é definida como a relação entre a massa das partículas e o seu volume e a baridade ou massa volúmica aparente é definida pela relação entre a massa de agregado e o volume que este ocupa, incluindo os vazios entre partículas (NPEN1097-3 2000).

Os agregados têm uma influência significativa na massa volúmica do betão, dado que ocupam cerca de 70% do seu volume. Os agregados utilizados na produção de betões leves distinguem-se por possuir massas volúmicas e baridades bastante inferiores às dos agregados convencionais. Este facto deve-se, essencialmente, à estrutura interna porosa destes agregados.

Os AL podem dividir-se em dois grupos, consoante a sua baridade e aplicação. No Quadro 2.2, são apresentados alguns tipos de agregados leves consoante a sua baridade e aplicação.

A massa volúmica do agregado leve é um factor bastante importante na formulação dos betões leves estruturais, sendo expectável que, quanto maior a massa volúmica de um dado betão, maior será a sua capacidade resistente.

No Quadro 2.3, é possível observar os valores obtidos em algumas investigações realizadas.

Em geral, a massa volúmica dos agregados leves tende a diminuir nas partículas de maiores dimensões, dado que estas estão associadas a um aumento de porosidade resultante da maior expansão a que são sujeitas durante o processo de queima.

Quadro 2.2 - Agregados leves em função da baridade (adaptado de Bogas, 2011)

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

Quadro 2.3 - Valores de massa volúmica de agregados leves obtidos em diversas campanhas

Campanha	Material	Massa volúmica (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)
<i>Bogas, 2011</i>	argila expandida - Leca	1060	613
	argila expandida - Arlita	1290	738
	argila expandida - Argex	705	397
<i>Nawel et al., 2011</i>	argila expandida - Tunísia	1519	840
<i>Rossignolo, 2004</i>	argila expandida - Cinepax	1305	480
<i>de Gennaro et al., 2003</i>	rocha vulcânica expandida - Itália	1025	725

Bogas (2011) confirma a variação da massa volúmica das partículas em função da sua granulometria, especialmente no caso da Leca, onde as partículas mais pequenas, com uma massa volúmica de 1309 kg/m³, contrastam com as partículas de maior dimensão, com 1008 kg/m³. Constatações semelhantes foram obtidas por de Gennaro *et al.* (2003) (Figura 2.5).

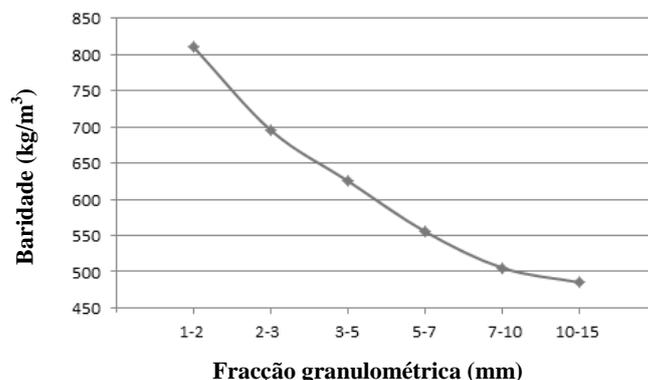


Figura 2.5 - Baridade em função da fracção granulométrica (de Gennaro *et al.*, 2004)

2.2.3. Absorção de água

De acordo com a EN 13055-1 (2002), a absorção de água nos agregados pode ser definida como a quantidade de água que penetra nas partículas após um dado período de tempo, estabelecida em termos da percentagem de massa seca do agregado. A elevada porosidade e absorção dos agregados leves vai ter influência na amassadura, transporte, colocação e compactação do betão, podendo afectar as características mecânicas e a durabilidade dos betões leves estruturais (Bogas, 2011).

A absorção de água dos agregados varia com a porosidade, assumindo um papel muito importante nas características mecânicas e de durabilidade dos betões produzidos (Bravo, 2009). Como referido, os agregados leves são bastante porosos no interior, sendo rodeados por uma parede exterior mais compacta. Esta parede assume um papel importante na atenuação da absorção de água, visto que retarda a entrada de água no interior do material.

Deste modo, a absorção de água depende, essencialmente, do volume e diâmetro dos poros interconectados ao exterior. O volume total da porosidade de um dado agregado pode ser estimado a partir da sua massa volúmica. Porém, apenas parte da porosidade é aberta, existindo poros que se encontram isolados (Figura 2.6), ou seja, não estabelecem contacto com o exterior da partícula (EuroLightCon R7, 2000).

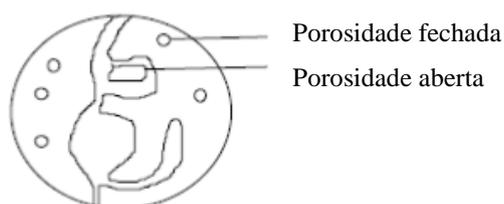


Figura 2.6 - Tipos de poros nos agregados leves (EuroLightCon R7, 2000)

Bogas (2011) observou maiores absorções de água em agregados de menor massa volúmica, justificando esse facto pela maior porosidade e fissuração na película exterior do agregado de menor massa volúmica. No entanto, nem sempre essa tendência é válida, podendo existir agregados nos quais, apesar de possuírem menor massa volúmica, a porosidade aberta é inferior ou menos acessível.

Quadro 2.4 - Valores de absorção de água obtidos em diversas investigações

Campanha	Material	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção aos 30 min (%)	Absorção às 24 horas (%)
Bogas, 2011	argila expandida Leca	1060	-	12,3
	argila expandida Arlita	1290	-	12,1
	argila expandida Argex	705	-	23,3
Rossignolo, 2004	argila expandida	1305	2,6	7,2
de Gennaro et al., 2003	rocha vulcânica expandida	1025	2,4	3,7
EuroLightCon R7, 2000	argila expandida Leca	1136	-	12,5
EuroLightCon R7, 2000	Pedra-pomes	565	37,6	-

De Gennaro *et al.* (2003) observam absorções bastante menores do que as obtidas em outros agregados de massa volúmica semelhante (Quadro 2.4). O autor explica que tal ocorre devido à estrutura mais compacta e pouco fissurada da película exterior do agregado.

A campanha de Mueller *et al.* (2007) vem confirmar os resultados obtidos por de Gennaro *et al.* (2003), ao alcançar valores de absorção de água baixos em agregados semelhantes com uma película exterior mais regular.

2.3. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Os agregados reciclados têm propriedades bastante próprias, uma vez que dependem fortemente do tipo de material que os origina e do processo para a obtenção dos mesmos, como por exemplo o tipo de britador (Figura 2.7).

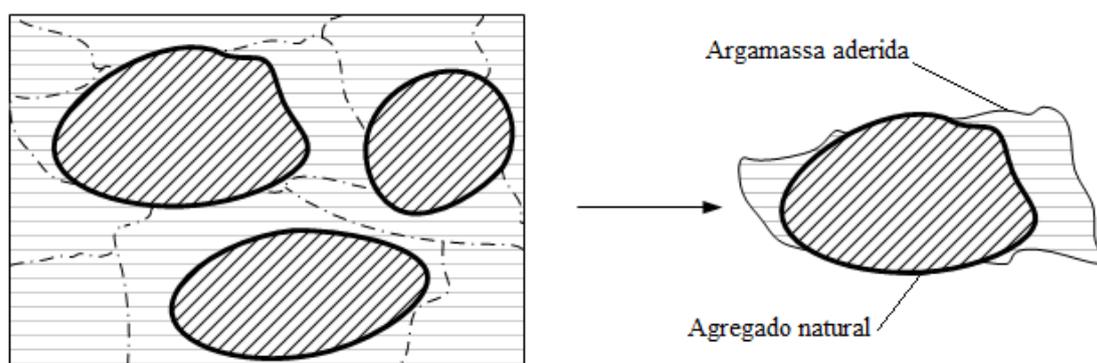


Figura 2.7 - Modelo de um agregado reciclado de betão

Zordan (1997) refere que o uso de material reciclado na construção ainda necessita de muita pesquisa e testes para melhorar o conhecimento deste material, visto ser um assunto relativamente recente na história da construção. No entanto, o mesmo autor conclui que este material pode trazer inúmeras vantagens tanto à construção como ao ambiente.

O presente capítulo visa apenas a análise de investigações realizadas no estudo de agregados leves reciclados face a agregados reciclados convencionais (RCD's), apesar de não existirem grandes estudos nesta área.

De acordo com Malesev *et al.* (2010), a argamassa aderida ao agregado, após a britagem dos blocos de betão, é a principal razão para as diferenças entre os agregados reciclados e os agregados naturais.

No presente trabalho, é estudada a utilização de agregados de betão leve reciclado na produção de betão. Existe uma grande probabilidade de se obterem taxas de absorção muito elevadas neste material, pois, após a trituração do betão, a percentagem de agregados leves partidos tende a aumentar consideravelmente.

Apesar de serem escassos os trabalhos publicados sobre o uso de agregados de betão leve reciclado, alguns investigadores apresentam resultados com outros tipos de agregados leves reciclados, tais como os provenientes de plásticos (Kuo *et al.*, 2008) (Akçaozoglul *et al.*, 2009) (Silva, 2011), espuma

de poliuretano (Gadea *et al.*, 2010) (Fraj *et al.*, 2010) (Junco *et al.*, 2012) e borracha (Bravo e Valadares, 2009) (Marques, 2010).

2.3.1. Forma

Como referido, a forma dos agregados é um factor importante na formulação e produção de um betão.

Quando comparados com os agregados convencionais, os agregados reciclados distinguem-se por apresentarem superfícies mais rugosas e formas mais alongadas (Brito, 2005). De facto, a argamassa que envolve o agregado reciclado confere uma maior rugosidade às partículas, especialmente nos agregados reciclados de betão. Por outro lado, tanto a sua textura mais rugosa, como a sua forma mais alongada (maior área específica) colaboram positivamente para a aderência pasta / agregado (Leite, 2001).

Desta forma, é expectável que os agregados de betão leve reciclado apresentem formas e texturas semelhantes às dos agregados reciclados de betão convencional, uma vez que estes materiais apenas podem ser obtidos pela demolição de uma estrutura de betão leve e dependem fortemente do tipo de britadeira usada e do nível de separação em classes granulométricas (EuroLightCon R26, 2000).

Kralj (2009) estudou a produção de betões a partir de agregados leves resultantes da reciclagem de betões produzidos com vidro expandido. Na Figura 2.8, é possível identificar partículas bastante angulosas de cor acinzentada, características deste tipo de agregado.

Fraj *et al.* (2010), ao estudarem as propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade de betões com agregados leves de espuma de poliuretano reciclada, salientam a forma cúbica e pouco angulosa destes agregados.



Figura 2.8 - Agregado reciclado de betão leve com vidro expandido (Kralj, 2009)

Na Figura 2.9, é possível observar a microestrutura porosa de partículas de espuma de poliuretano reciclado.

Akçaozoglul *et al.* (2009) observam que os agregados obtidos a partir da trituração de garrafas de plástico apresentam uma forma pouco angulosa e uma superfície bastante regular e suave.

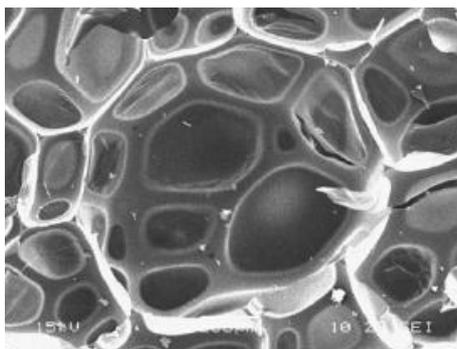


Figura 2.9 - Estrutura interna das partículas de espuma de poliuretano reciclado (Junco et al., 2011)

2.3.2. Massa volúmica e baridade

Segundo Hansen (1992), citado por Evangelista (2007), é consensual que a massa volúmica e a baridade dos agregados reciclados de betão são menores do que as dos agregados naturais. Isso resulta dos primeiros conterem argamassa que, possui geralmente menor massa volúmica do que os agregados pétreos mais correntes.

Tal pressuposto é comprovado na campanha de Fonseca (2008), onde o autor, ao analisar agregados reciclados de betão, apresenta valores de massa volúmica e baridade inferiores à dos agregados naturais. No Quadro 2.5, são apresentados os valores registados na campanha de Fonseca (2008), bem como os resultados de outras investigações semelhantes.

No entanto, não é expectável que tal pressuposto ocorra em agregados de betão leve reciclado. O material leve, por si só, já possui baixa massa volúmica. Logo, o facto de entrar em contacto com a argamassa, em geral com massas volúmicas superiores, pode conduzir ao aumento da massa volúmica do agregado reciclado. Este factor adquire grande importância, uma vez que o aumento da massa volúmica do agregado provoca um aumento da massa volúmica do betão produzido, podendo deixar de ser considerado leve, segundo a principal normalização.

Quadro 2.5 - Massa volúmica e baridade de agregados reciclados

<i>Campanha</i>	<i>Material</i>	<i>Massa volúmica (kg/dm³)</i>	<i>Baridade (kg/dm³)</i>
	Brita2	2,61	1,44
<i>Fonseca, 2009</i>	Brita1	2,55	1,46
	ABR	2,45	1,17
<i>Evangelista, 2007</i>	AFN	2,56	1,52
	AFR	2,17	1,23
	Brita2	2,66	-
<i>Rocha, 2004</i>	Brita1	2,63	-
	ABR1	2,32	-
	ABR2	2,33	-
<i>Leite, 2001</i>	AN	3,09	1,61
	ABR	2,51	1,12

Os agregados de betão leve com vidro expandido usados na campanha de Kralj (2009) apresentam uma massa volúmica perto de 400 kg/m³ e uma baridade de cerca de 225 kg/m³. O autor

confirma ainda que, tal como previsto, a massa volúmica do material reciclado é maior do que a do agregado natural.

Por outro lado, o mesmo autor observa que, à semelhança de outros agregados leves, a massa volúmica e a baridade diminuem consoante o aumento da dimensão das partículas. Tal facto já era esperado, uma vez que em grande parte dos agregados leves existe um aumento da porosidade interna nas partículas de maior dimensão.

Da mesma forma, Reinhardt e Kummel (1999) verificam que a massa volúmica das partículas de betão leve reciclado com argila expandida se encontra entre 1640 e 1700 kg/m³, valor claramente superior em relação à massa volúmica das partículas de argila expandida, reforçando, assim, o pressuposto de que, ao contrário dos ABR, os ALBR tendem a registar massa volúmica superior aos seus homólogos naturais.

No Quadro 2.6, são apresentados os valores obtidos em várias investigações, onde se recorreu à reutilização de materiais orgânicos, tais como plástico e espuma de poliuretano, numa tentativa de produzir betões e argamassas leves.

Quadro 2.6 - Valores de massa volúmica e baridade de agregados leves reciclados

<i>Campanha</i>	<i>Material</i>	<i>Massa volúmica (kg/m³)</i>	<i>Baridade (kg/m³)</i>
<i>Junco et al., 2012</i>	Espuma de poliuretano expandida - indústria de refrigeração	-	43
<i>Gadea et al., 2010</i>	Espuma de poliuretano expandida - indústria automóvel	-	26
<i>Lima et al., 2010</i>	Borracha reciclada - indústria do calçado	240	100
<i>Akçaozoglul et al., 2009</i>	Plástico reciclado - garrafas de PET	1270	-
<i>Kou et al., 2008</i>	Plástico reciclado - tubos de PVC	1400	546

2.3.3. Absorção de água

Fonseca (2009), ao estudar a influência das condições de cura em betões com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão, conclui que a elevada porosidade destes agregados provoca um aumento significativo na absorção de água face a agregados convencionais. O mesmo autor refere, ainda, que esta é uma propriedade importante que contribui para as divergências existentes ao nível do desempenho mecânico e da durabilidade entre os betões estudados, assim como da trabalhabilidade dos mesmos.

A massa volúmica do agregado reciclado tem bastante influência na sua capacidade de absorção de água (Angulo, 2005). Um agregado de baixa massa volúmica deverá apresentar uma maior porosidade e, como tal, maior absorção de água (Figura 2.10).

A absorção de água será maior nos agregados finos reciclados do que nos agregados grossos, uma vez que aumenta com a superfície específica das partículas e esta aumenta com a diminuição da sua granulometria. Este efeito será ainda potenciado pelo facto de o teor em cimento aumentar nos agregados finos em relação aos grossos. Assim, compreende-se facilmente a razão da absorção dos agregados finos reciclados poder atingir valores relativamente elevados (Brito, 2005).

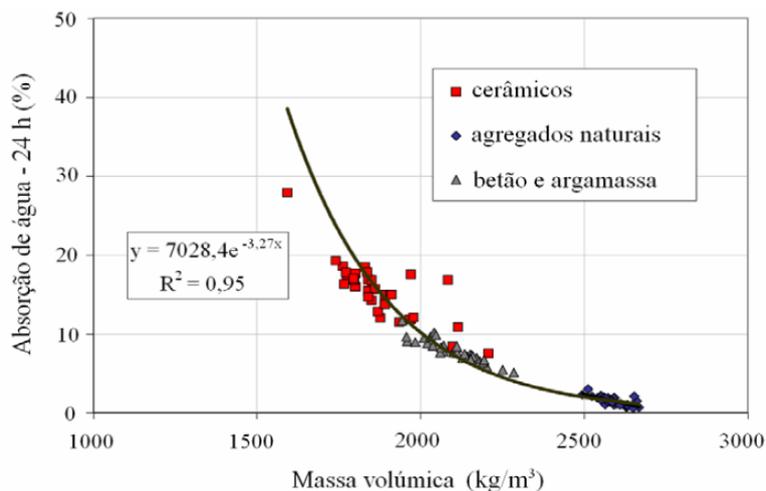


Figura 2.10 - Relação entre a absorção de água e o tipo de agregado (Angulo, 2005)

Zega *et al.* (2011), ao investigarem o comportamento em termos de durabilidade de betões com agregados finos reciclados provenientes da trituração de blocos de betão convencional, apresentam valores de absorção de água às 24 horas bastante superiores em comparação com os seus homólogos naturais, 8,5 e 0,9 %, respectivamente. Por sua vez, Fonseca (2009) chega a valores na ordem de 6% para agregados grossos reciclados, confirmando assim a tendência de a absorção de água ser superior nos agregados finos.

Tal facto foi confirmado por Leite (2001) ao registar uma absorção média bastante superior nos agregados finos reciclados do que nos agregados grossos, de 8,60 e 4,95%, respectivamente.

A absorção de água dos agregados reciclados é muito importante quando se estuda o seu uso na produção de betão, pois esta interfere directamente na relação a/c total das misturas. Caso a absorção não seja considerada haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material (Leite, 2001). Deste modo, é importante quantificar a evolução da absorção de água nos agregados reciclados ao longo do tempo.

Leite (2001), verifica que tanto os agregados finos como os agregados grossos absorvem, durante os primeiros 30 minutos, cerca de 50% da sua capacidade total de absorção de água. Outro aspecto interessante passa pelas divergências verificadas entre os dois tipos de agregado, ou seja, nota-se claramente, por análise das Figuras 2.11 e 2.12, que os agregados finos reciclados apresentam uma absorção mais intensa nos primeiros 5 minutos e, após este período, a absorção tende a ser mais lenta. Tal não se verifica nos agregados grossos, que apresentam uma absorção mais uniforme ao longo do tempo.

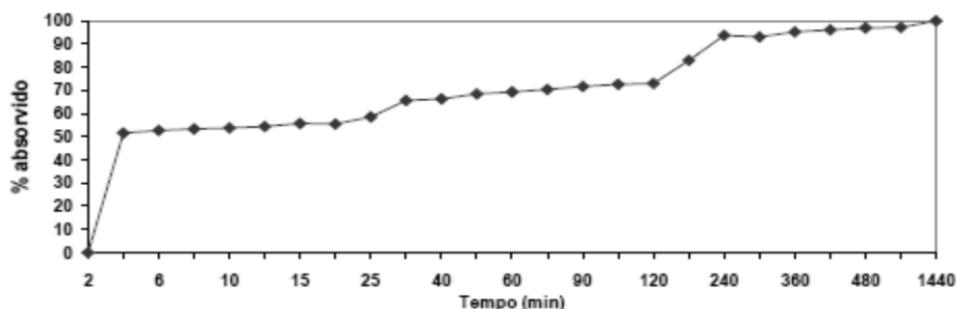


Figura 2.11 - Curva de absorção dos agregados finos reciclados (Leite, 2001)

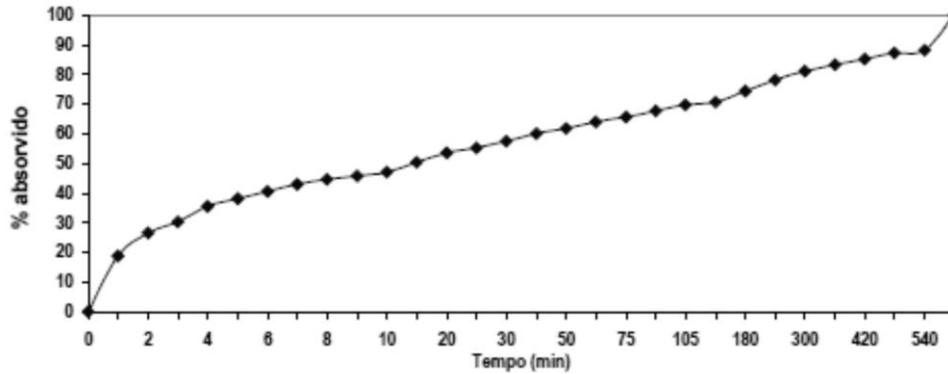


Figura 2.12 - Curva de absorção dos agregados grossos reciclados (Leite, 2001)

Por outro lado, Fonseca (2009) conclui que cerca de 80% da capacidade total de absorção de água nos agregados grossos reciclados ocorre no primeiro minuto de exposição, atingindo 90% ao fim de 5 minutos (Figura 2.13), contrastando com os valores registados por Leite (2001). O autor refere ainda que, após este período, a absorção tende a ser mais lenta e praticamente desprezável.

Como se verifica, o material reciclado tem forte tendência para absorver água. Este factor tem uma grande importância para a presente investigação, pois, como referido, existe uma grande possibilidade de se obterem taxas de absorção muito elevadas, uma vez que, após a trituração do betão leve, a percentagem de agregados leves partidos aumenta. Isso implica a perda parcial da parede exterior dos agregados, expondo assim a estrutura interna de porosidade mais grosseira.

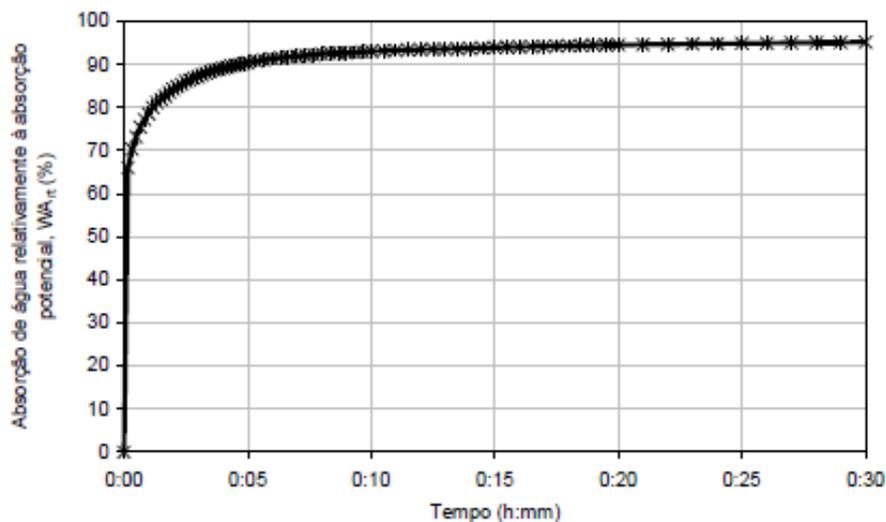


Figura 2.13 - Evolução da absorção de água em agregados grossos reciclados (Fonseca, 2009)

No Quadro 2.7, é apresentado um levantamento bibliográfico efectuado neste domínio.

Quadro 2.7 - Valores de absorção de água em agregados reciclados

<i>Campanha</i>	<i>Material</i>	<i>Absorção de água (%)</i>
<i>Pereira, 2010</i>	AFR	10,89
<i>Fonseca, 2009</i>	ABR	6,1
<i>Evangelista, 2007</i>	AFR	13,1
<i>Rocha, 2004</i>	ABR1	5,9
	ABR2	5,02
<i>Leite, 2001</i>	ABR	4,95

2.4. PROPRIEDADES DOS BETÕES COM AGREGADOS LEVES

Em seguida, apresenta-se um pequeno resumo das principais propriedades dos betões leves, mais relevantes para a investigação em curso.

2.4.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade fundamental para distinguir betões com diferentes aplicações e quantificar os limites que os tornam comparáveis. Desta forma, é indispensável determinar esta característica quando se pretende avaliar a influência da introdução de materiais não correntes no betão.

O abaixamento dos betões leves é, em geral, menor do que o obtido nos betões de massa volúmica normal, tendo em conta idênticas composições. Este aspecto é explicado pela menor massa volúmica dos agregados que constituem o betão (Rossignolo, 2003) (EuroLightCon R12, 2000).

De acordo com a EuroLightCon R12 (2000), devido à maior porosidade dos agregados leves, as pequenas variações na trabalhabilidade podem ser causadas pelo aumento de absorção de água, o que provoca uma diminuição da trabalhabilidade face aos betões tradicionais.

Segundo Bogas (2011), basta uma pequena variação no teor em água dos agregados para conduzir a variabilidades elevadas no ensaio de abaixamento. De facto, o mesmo autor, ao estudar diferentes condições de aplicação dos agregados leves, constata que o uso de agregados secos ou pré-molhados aumenta a variabilidade dos resultados, uma vez que é mais difícil estimar os níveis de absorção de água durante a mistura.

2.4.2. Massa volúmica

A massa volúmica de um betão está directamente relacionada com a massa volúmica dos agregados que o constituem. Assim, esta é uma das principais características que distingue os betões leves dos betões convencionais.

Bogas (2011) observou reduções de cerca de 20 a 30% na massa volúmica de betões produzidos com agregados leves similares aos utilizados no presente trabalho.

Por sua vez, Rossignolo (2003) verificou reduções de 40% na massa volúmica de betões produzidos com outro tipo de agregados leves de argila expandida.

Branco *et al.* (2004) produziram betões com massa volúmica inferior a 2000 kg/m³ recorrendo à substituição total de agregados de massa volúmica normal (AN) por cortiça.

Embora dependa do tipo de agregado leve, são comuns nos betões leves estruturais reduções de massa volúmica entre 20 e 40% em relação a betões convencionais. No Quadro 2.8, são apresentados valores de massa volúmica do betão obtidos noutros estudos com betões leves.

Quadro 2.8 - Valores de massa volúmica de betão leve

<i>Campanha</i>	<i>Betão</i>	<i>Massa volúmica (kg/m³)</i>	
		<i>Estado fresco</i>	<i>Aos 28 dias</i>
<i>De Gennaro et al. (2003)</i>	CLS1	1715	1559
	CLS2	1738	1603
<i>Haque et al. (2002)</i>	LWC35	1795	-
	LWC50	1815	-
<i>Liu et al. (2009)</i>	LC1	1900	-
	LC2	1860	-
	LC3	1740	-

2.4.3. Retracção

Em geral, betões com agregados de maior rigidez, menores relações a/c, menores quantidades de água e menores dosagens de cimento apresentam valores de retracção menores.

Segundo o CEB-FIP (1978), a retracção dos betões leves pode ser cerca de 50% superior à dos betões comuns, dependendo do teor em água, quantidade de cimento, dosagem de agregado leve e ainda da forma e textura dos agregados. Devido ao maior volume de pasta, a retracção nos betões leves pode ser ligeiramente superior à dos betões convencionais, quando comparados com betões de igual resistência (ACI213R, 2003).

Por outro lado, como os agregados leves apresentam uma rigidez inferior à dos agregados convencionais, é previsível que a retracção seja superior nos betões leves.

No entanto, o teor em água nos agregados leves, devido à sua elevada absorção, pode ter uma grande influência no atraso da retracção (EuroLightCon R31, 2000), pois num período inicial a evaporação de água do betão acaba por ser compensada pela água existente no interior dos agregados. Esta redução inicial da retracção pode trazer grandes vantagens, uma vez que reduz o risco de fendilhação no betão.

Zhang *et al.* (2005) concluem que a retracção nos betões leves foi inferior à dos betões convencionais, para betões de idêntica composição. Os autores relatam que a grande capacidade dos agregados leves em reter a água presente na mistura foi benéfica para a diminuição da retracção inicial, uma vez que a água retida nos agregados acabou por compensar a água perdida por evaporação. Contudo, os mesmos autores confirmam que a menor rigidez dos agregados leves provoca uma maior retracção do betão a longo prazo.

De acordo com o EuroLightCon R31 (2000), apesar de os betões com agregados leves apresentarem retracções menores numa fase inicial (90 dias), é expectável que tal não se verifique em idades mais longas.

Tal como outros autores, também Bogas (2011) conclui que os betões leves tendem a apresentar retracções inferiores aos betões convencionais numa fase inicial e superiores a longo prazo.

Bogas (2011) afirma que a retracção aumenta com a relação a/c do betão (Figura 2.14). O mesmo autor confirma ainda que, para betões com igual relação a/c, a retracção aumenta com o aumento do volume de pasta.

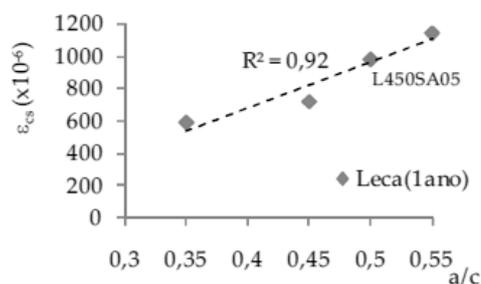


Figura 2.14 - Relação entre a retracção e compacidade da pasta (relação a/c) (Bogas, 2011)

No entanto, Melo (2000) conclui que, aos 28 dias de idade, o betão leve apresenta cerca de 90% da sua retracção total, o que indicia uma elevada retracção inicial, contrariamente aos resultados apresentados por outros autores. O mesmo autor afirma que os valores de retracção tendem a aumentar com a redução da massa volúmica do betão e que esta está directamente ligada com o volume de argila expandida no betão.

2.4.4. Absorção de água

O estudo da absorção de água de um betão permite avaliar indirectamente a maior ou menor facilidade de penetração de agentes agressivos no seu interior. Consideram-se dois tipos de absorção de água: por imersão, relacionada com a porosidade aberta do betão, e por capilaridade, que consiste na absorção decorrente da diferença de pressão entre a superfície livre dos líquidos existentes junto às faces do betão e a superfície livre dos líquidos nos capilares do mesmo (Coutinho, 1997).

É expectável que a absorção de água seja superior nos betões leves, devido à maior porosidade dos agregados leves, conforme referido em 2.2.3.

De facto, Melo (2000) vem confirmar este pressuposto. O autor, ao estudar a aplicação de agregados de argila expandida no betão, conclui que, tanto a absorção capilar como a absorção por imersão, tendem a aumentar com a quantidade de agregado leve utilizado na mistura (Figuras 2.15 e 2.16).

O aumento da absorção capilar nos betões com agregados leves é igualmente referido no EuroLightCon R8 (2000). No entanto, estes apresentam coeficientes de absorção semelhantes aos dos betões de referência (betões com agregados naturais), o que indica a boa qualidade do betão produzido.

Liu *et al.* (2011), que estudou o comportamento desta propriedade em betões com agregados leves de igual relação a/c, determinaram que, em geral, a absorção inicial dos betões leves é superior à dos betões com agregados naturais. Este facto pode ser explicado pelo próprio ensaio, onde o corte dos espécimes de ensaio pode provocar a exposição da porosidade dos agregados, acelerando a absorção inicial.

De facto, dado que a generalidade destes ensaios é realizada em provetes cortados, as partículas junto à superfície têm uma participação activa neste efeito. Uma vez que a altura de água se encontra 5 mm acima da base do provete e que as partículas superficiais dos agregados sofrem um preenchimento

rápido, ocorre assim um aumento da absorção inicial. De facto, as partículas vão funcionar como uma fonte de penetração de água, ao contrário dos agregados naturais (Bogas, 2011). Na Figura 2.17, é apresentado o mecanismo relativo a este efeito.

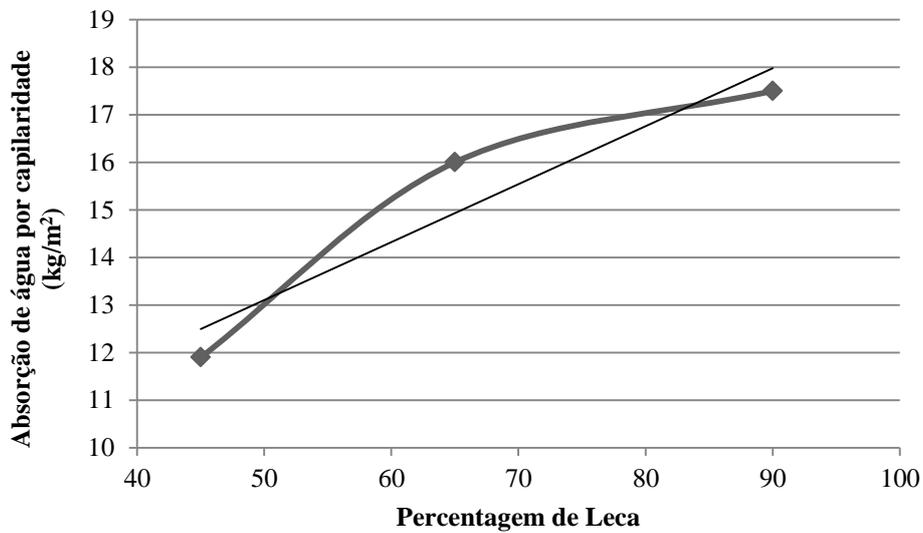


Figura 2.15 - Absorção de água por capilaridade (Melo, 2000)

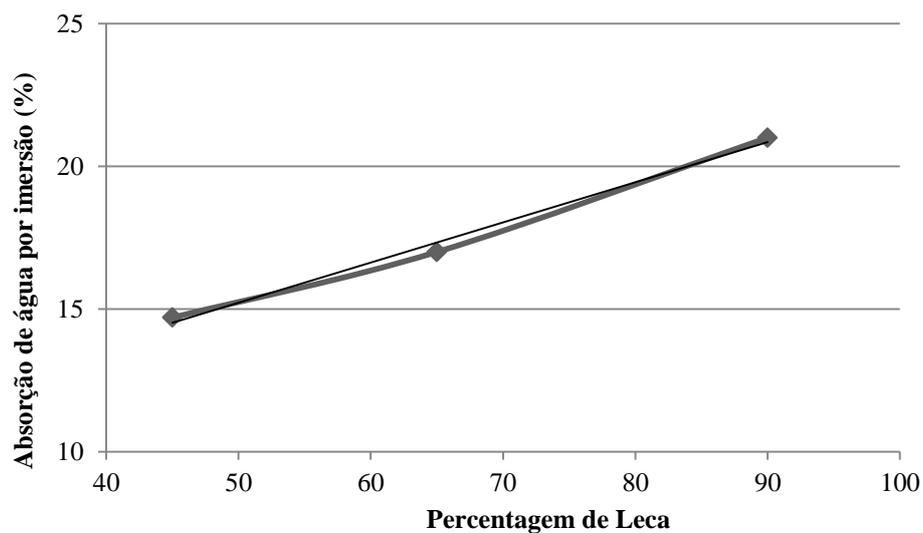


Figura 2.16 - Absorção de água por imersão (Melo, 2000)

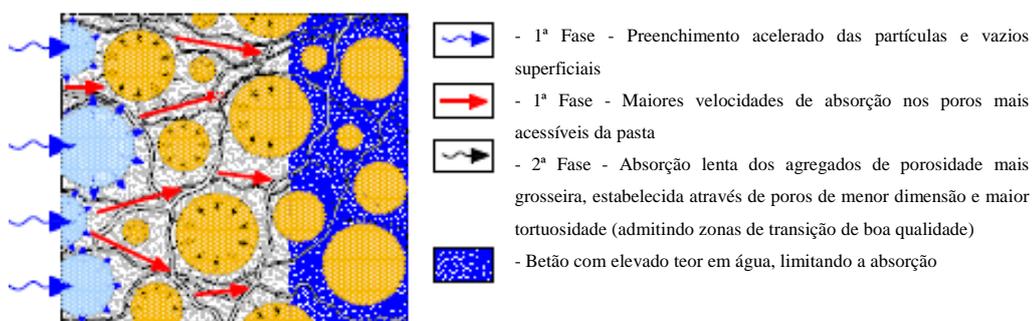


Figura 2.17 - Mecanismo de absorção de água do betão leve com argila expandida (adaptado de Bogas, 2011)

Assim, é natural que, à medida que se substitui os agregados naturais por agregados leves, a absorção capilar inicial aumente. Este efeito tende a diminuir com o tamanho dos poros, ou seja, os poros com maiores dimensões têm menor contribuição para a absorção capilar (Liu *et al.*, 2011).

Segundo Bogas (2011), para betões produzidos com agregados leves de menor porosidade, os coeficientes de absorção são semelhantes aos registados nos betões com agregados correntes, independentemente do grau de secagem e das relações a/c usadas.

O mesmo autor, tal como Liu *et al.* (2011), salientam a menor acção capilar das partículas com poros de maior dimensão, mesmo considerando estruturas com porosidade aberta.

2.4.5 Resistência à carbonatação

A carbonatação consiste na reacção do dióxido de carbono presente na atmosfera com o hidróxido de cálcio do cimento hidratado. Este fenómeno não provoca a deterioração directa do betão, mas os seus efeitos são de grande importância, uma vez que a sua acção pode conduzir à despassivação da armadura no seu interior. A carbonatação é um processo bastante lento e exige longos tempos de exposição em atmosfera normal (Bogas, 2011)

A porosidade do betão tem uma grande importância neste fenómeno, dado que o dióxido de carbono difunde-se através dos poros do betão. Deste modo, será de esperar que um betão com agregados leves apresente profundidades de carbonatação superiores a um betão convencional (EuroLightCon R18, 2000).

No entanto, uma boa distribuição dos agregados leves numa pasta de alta qualidade pode reduzir a penetração de dióxido de carbono para níveis semelhantes aos dos betões com agregados de massa volumica normal (Clarke, 1993). Por outras palavras, a boa distribuição do agregado na pasta vai impedir a formação de pontes de difusão, visto que a difusão de dióxido de carbono tende a ser inferior na pasta de cimento.

De facto, Bogas (2011) conclui que, para betões de elevada compacidade, o efeito da carbonatação pode ser desprezado, sendo semelhante ao de betões convencionais de igual composição. Por outro, tal não se verifica em betões de menor compacidade, onde o autor refere a participação activa dos agregados leves na difusão do dióxido de carbono, sendo maior nos agregados de maior porosidade, provocando uma redução na resistência à carbonatação em cerca de 50 a 70% em relação a betões convencionais.

O agregado grosso junto à superfície do betão tem uma participação mais activa na difusão de gases para o interior do betão, pois, ao se encontrarem mais próximos do exterior, funcionam como uma entrada privilegiada para a penetração de gases, podendo assim provocar um aumento da profundidade do betão afectado (Bandyopadhyay, 1975).

Haque *et al.* (2002) referem o aumento da profundidade de carbonatação em betões com areias leves. Este efeito poderá ser explicado pela porosidade aberta característica dos agregados finos leves. Da mesma forma, Bogas (2011) relata uma pequena redução na resistência à carbonatação na substituição de areias naturais por areias leves.

2.4.6. Resistência à penetração de cloretos

A par da carbonatação, o ataque dos iões cloreto no betão pode provocar sérias consequências na durabilidade deste, uma vez que a penetração dos iões Cl^- vai provocar a quebra da película protectora da armadura. Assim, torna-se importante estudar a resistência deste tipo de betões a esta acção.

Haque *et al.* (2002) concluem que a concentração de iões Cl^- nos betões leves é ligeiramente superior à dos betões comuns. No entanto, os autores salientam que, apesar de a concentração de iões ser mais elevada, a profundidade de penetração é bastante reduzida.

Liu *et al.* (2011) verificam que a difusão dos iões é superior nos betões leves, sobretudo quando o agregado leve é muito poroso. No entanto, para agregados menos porosos, foi possível produzir betões com difusões de iões Cl^- idêntico às dos betões convencionais. Os mesmos autores referem, ainda, que a qualidade da pasta tem um papel determinante no controlo da penetração dos iões, independentemente do tipo de agregado usado.

De facto, os betões com agregados mais porosos tendem a apresentar coeficientes de difusão superiores, em cerca de 20% face aos betões normais, uma vez que os agregados, ao se encontrarem saturados, permitem uma maior difusão dos iões. No entanto, em agregados menos porosos, esta tendência não é tão evidente, sendo possível obter resultados semelhantes ao dos betões convencionais (Bogas, 2011).

Por outro lado, Bogas (2011) refere que, independentemente do tipo de agregado e para a mesma classe de resistência, os betões com agregados leves, para valores de a/c inferiores a 0,4, apresentam um melhor desempenho do que os betões de massa volúmica normal. Tal como Liu *et al.* (2011), o autor conclui que a qualidade da pasta assume um papel mais importante na resistência à penetração de cloretos do que o tipo de agregado, diminuindo essa importância consoante o aumento da relação a/c .

2.5. PROPRIEDADES DOS BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS

Neste capítulo, são apresentadas algumas das propriedades de betões com agregados reciclados, com especial enfoque em betões constituídos por agregados reciclados ou reutilizados de baixa massa volúmica. É necessário salientar que existem escassos trabalhos desenvolvidos nesta área, nomeadamente no que se refere a agregados reciclados de betão leve e as poucas investigações existentes dão preferência às características mecânicas dos betões produzidos (Reinhardt e Kummel, 1999; EuroLightCon R26, 2000; Kralj, 2009). Deste modo, considerou-se útil a análise de betões com agregados leves reciclados provenientes de outros materiais, tais como plásticos ou borracha. Na generalidade, estas propriedades variam bastante consoante o tipo de agregado reciclado utilizado.

Reinhardt e Kummel (1999), ao estudarem a retração em betões com agregados reciclados de betão leve de argila expandida, concluem ser possível produzir betões com boa resistência à compressão, quando se incorporam agregados grossos de betão leve reciclado. No entanto, os autores observam que esta diminui à medida que se incorporam agregados finos de betão leve reciclado.

Da mesma forma, o projecto EuroLightCon (2000) conclui que a incorporação de betão leve reciclado (mistura cerâmica com betão) provoca uma diminuição na resistência do betão. Contudo, o betão produzido apresenta boa capacidade resistente.

Kralj (2009) refere que a utilização de agregados reciclados de betão leve afecta a resistência à compressão do betão. O autor observa uma diminuição da resistência em comparação a betões sem

agregados reciclados. No entanto, Kralj (2009) afirma que esta solução poderá ser vantajosa para betões sem aplicação estrutural devido às propriedades de isolamento destes betões.

No Quadro 2.9, são apresentados os resultados obtidos nas investigações analisadas.

Quadro 2.9 - Resistência à compressão de betão leve com agregados reciclados de betão leve

<i>Investigação</i>	<i>Tipo de betão</i>	<i>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)</i>
<i>Reinhardt e Kummel, 1999</i>	Betão leve com AGR de betão leve	37,6
	Betão leve com 100% de agregados reciclados de betão leve (finos e grossos)	30,6
<i>EuroLightCon, 2000</i>	Betão corrente	49,1
	Betão leve	52,0
	Betão leve com AGR de betão leve	44,0
<i>Kralj, 2009</i>	Betão leve	44,9
	Betão leve com AGR de betão leve	36,0

2.5.1. Trabalhabilidade

Ao analisar duas composições de betão, uma constituída unicamente por agregados naturais e outra com agregados reciclados, verifica-se uma trabalhabilidade inferior do segundo betão. A elevada absorção de água, característica dos agregados reciclados, exige proceder-se à sua compensação de modo a não afectar prejudicialmente a trabalhabilidade (Brito, 2005).

Deste modo, pode recorrer-se à pré-saturação dos agregados ou adicionar-se água durante a amassadura (Fonseca, 2009).

A forma dos agregados assume grande importância. Silva (2011), em betões com agregados reciclados de plástico fino arredondado, verifica que a trabalhabilidade aumenta.

Por outro lado, o mesmo autor refere que, no caso dos agregados laminares de plástico, ocorre o inverso. A forma mais angular e pouco uniforme destes agregados contribui para uma diminuição da fluidez e compacidade do betão e, por consequência, diminui a trabalhabilidade deste.

Da mesma forma, Bravo e Valadares (2009) apresentam resultados semelhantes ao usarem agregados triturados de pneus (borracha), concluindo que será necessário aumentar a relação a/c nas composições com maiores percentagens de agregados de borracha para se atingirem índices de trabalhabilidade adequados.

No entanto, Marques (2010), ao estudar a incorporação de reciclados de borracha no betão, afirma ter conseguido chegar à trabalhabilidade pretendida sem a necessidade de modificar a relação a/c nos betões com maior percentagem de agregados de borracha (Figura 2.18).

Kou *et al.* (2008) concluem que se torna necessário o aumento da dosagem de superplastificante quando se incorpora agregados de PVC no betão para se atingir trabalhabilidades idênticas à do betão de referência (Quadro 2.10). Os autores referem que as formas mais angulares e a dimensão das partículas, em comparação com a areia natural, são os principais responsáveis por esse fenómeno.

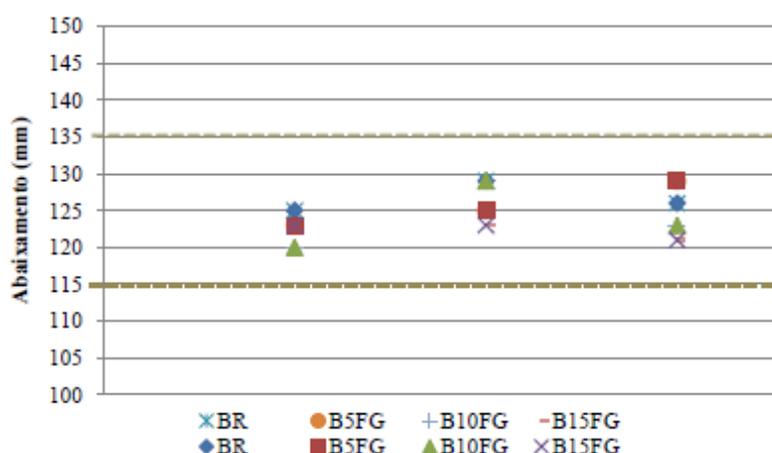


Figura 2.18 - Valores de abaixamento em betões com agregados de borracha (Marques, 2010)

Quadro 2.10 - Valores de abaixamento de betão com agregados plásticos reciclados (Kou *et al.*, 2008)

Betão	SP (l/m^3)	Agregado natural (kg/m^3)	Agregado plástico (kg/m^3)	Abaixamento (mm)
P0	2,05	850	0	175
P5	2,05	805	15	175
P15	2,1	720	45	170
P30	2,3	595	90	175
P45	2,7	470	135	170

2.5.2. Massa volúmica

A massa volúmica do betão fresco depende da massa volúmica de cada um dos seus constituintes e do seu grau de compactação. Em betões com igual granulometria, trabalhabilidade e compactação, a diferença de massa volúmica fresca entre um betão com agregados reciclados e o respectivo betão convencional, é aproximadamente igual à diferença de massa volúmica entre os agregados reciclados e os agregados convencionais correspondentes (Brito, 2005).

De facto, como referido em 3.3.2., os agregados reciclados têm tendência a apresentar massas volúmicas inferiores às dos seus homólogos naturais, devido à maior porosidade presente neste tipo de agregado (Leite, 2001). Assim, de acordo com Brito (2005), é esperado que os betões com agregados reciclados apresentem, também, massas volúmicas inferiores à dos betões convencionais.

Tal como em outras investigações realizadas com a incorporação de agregados reciclados de betão, vários autores confirmam a diminuição da massa volúmica do betão à medida que se incorporam agregados reciclados leves, Al-Sibahy *et al.* (2011), ao estudarem as propriedades mecânicas e térmicas de betão leve com agregados reciclados de vidro, concluem que é possível produzir betão estrutural com uma massa volúmica de 1600 kg/m^3 , cerca de 6% mais baixa do que a dos betões com agregados leves de referência. Kou *et al.* (2008), Lima *et al.* (2009), Akcaozoglu *et al.* (2009) e Silva (2012) são autores que, ao incorporarem material leve reciclado, apresentam conclusões semelhantes.

No entanto, o mesmo efeito não é esperado em betões com agregados reciclados de betão leve, tal como referido em 2.3.2. De facto, uma vez que estes agregados podem apresentar massa volúmica

superior à dos agregados leves naturais, é natural que os betões com eles constituídos apresentem maior massa volúmica.

Kralj (2009) confirma este pressuposto ao verificar um aumento da massa volúmica do betão, à medida que incorpora partículas recicladas de betão leve com vidro expandido.

2.5.3. Retracção

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados pode conduzir a um aumento da retracção do betão endurecido. Este comportamento pode ser explicado pelo menor módulo de elasticidade dos agregados reciclados relativamente aos agregados convencionais, uma vez que, devido à maior quantidade de pasta de cimento endurecida e às próprias características dos materiais, os agregados reciclados apresentam uma menor rigidez e, conseqüentemente, menor capacidade de oposição ao fenómeno de retracção (Brito, 2005) (Robles, 2007).

Buttler (2003) já tinha identificado tal facto, ao analisar a retracção em betões com agregados reciclados, afirmando que a incorporação de material reciclado no betão aumenta significativamente a retracção. O autor aponta como principal explicação para este facto o menor módulo de deformação do agregado reciclado e o aumento da relação a/c da mistura.

Por outro lado, Evangelista (2007) relata que a forte capacidade dos agregados finos reciclados de betão em reter água pode ser benéfica, pois fornece água à estrutura do betão e garante, desta forma, a continuação das reacções de hidratação da pasta de cimento.

Citando o mesmo autor, Hansen e Boegh (1985) determinaram que a retracção de betões com agregados grossos reciclados e finos é cerca de 70% superior à dos betões convencionais.

De acordo com Reinhardt e Kummel (1999), a retracção aumenta à medida que se incorporam ARBL no betão. Este aumento é de cerca de 50% quando se compara a composição com 54% de ARBL com a composição com 100% de material reciclado. No entanto, os autores salientam que, numa fase inicial do ensaio, a retracção dos betões com agregados reciclados é retardada. Os autores atribuem esse facto à forte capacidade em absorver água por parte dos ARBL, sugerindo que esta pode ser benéfica, ao ponto de compensar a maior capacidade de deformação da pasta aderida ao agregado.

Akçaozoglu *et al.* (2009) verificam que a incorporação de agregados reciclados de plástico PET resulta num aumento da retracção. Os autores concluem tal facto ao observar valores de retracção superiores em argamassas constituídas apenas por este material do que em argamassas com apenas agregados naturais. Como se pode verificar na Figura 2.19, as amassaduras M1 e M2 (constituídas apenas por PET) apresentam valores de retracção bastante superiores às restantes amassaduras.

No entanto, Kou *et al.* (2009) observam que a incorporação de agregados reciclados de PVC provoca um efeito contrário ao esperado, acabando por resultar numa diminuição da retracção do betão. Como se pode observar pela Figura 2.20, o betão com maior incorporação de PVC é o que regista menor retracção. Os autores afirmam que a fraca capacidade deste material em absorver água tem um papel preponderante na diminuição da retracção, uma vez que teve de se recorrer ao uso de superplastificantes, reduzindo assim a relação a/c da amassadura que, por sua vez, diminui a evaporação de água no betão, levando, desta forma, a menores valores de retracção. Os mesmos autores citam Soroushian (1999), referindo que este autor sugere o uso de material plástico para reduzir o efeito da retracção.

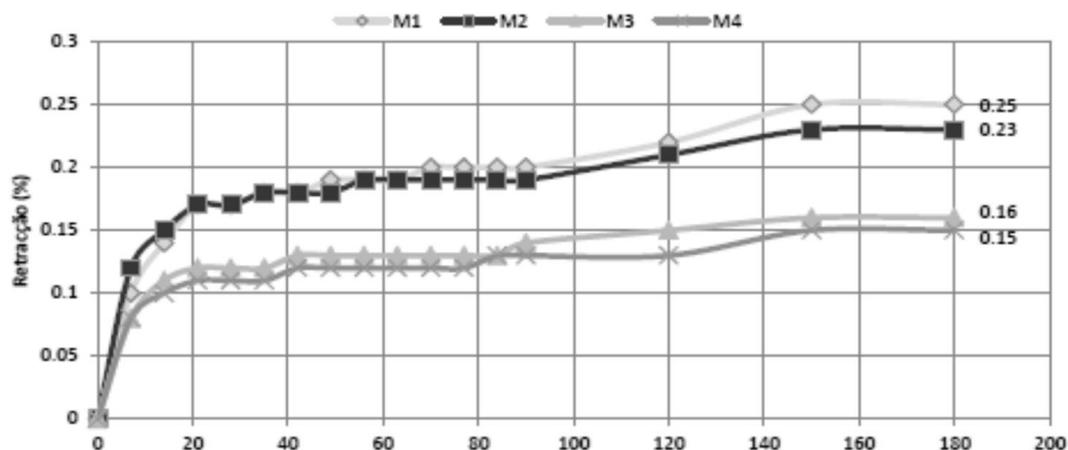


Figura 2.19 - Retracção dos provetes aos 28 dias (Akçaozoglul et al., 2009)

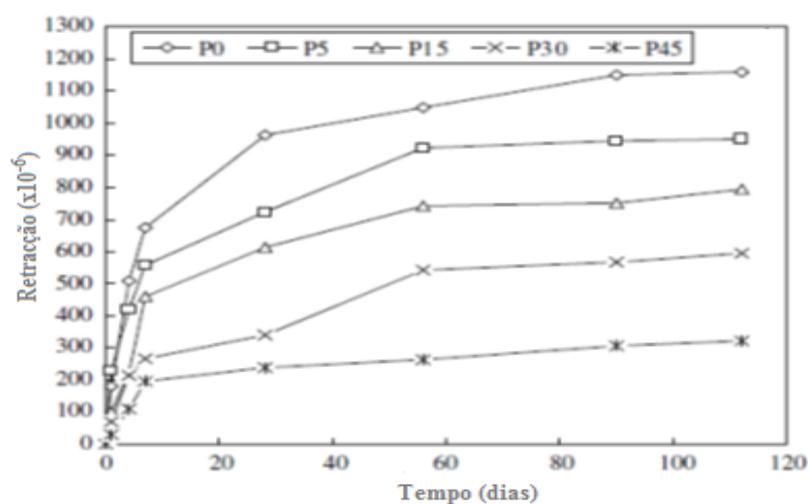


Figura 2.20 - Retracção dos provetes aos 120 dias (Kou et al., 2009)

Silva (2012) apresenta resultados semelhantes a Kou *et al.* (2009), confirmando que a incorporação de material plástico reciclado pode ser benéfico para o fenómeno de retração.

Por seu lado, Sukontasukkul *et al.* (2010), ao estudarem a retração em betões com agregados reciclados de borracha, concluem que, tal como previsto, os níveis de retração aumentam consoante a substituição de agregados natural por partículas de borracha. Os autores referem a menor resistência e o menor módulo de elasticidade do agregado como as principais causas no aumento da retração, uma vez que permitem maiores deformações no betão.

2.5.4. Absorção de água

A capacidade de absorção de água do betão no estado endurecido é uma propriedade importante no estudo de durabilidade do mesmo, uma vez que avalia a maior ou menor dificuldade de penetração de agentes agressivos que contribuem para a deterioração do betão (Robles, 2007).

É expectável que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados conduza a um aumento da absorção de água do betão. Mais uma vez, este efeito justifica-se pela maior porosidade na

estrutura do agregado reciclado ou pelas próprias características dos materiais reciclados usados e será também previsível que este efeito aumente com a taxa de substituição.

Buttler (2003) conclui que os betões com agregados reciclados apresentam uma absorção de água cerca de 40% superior à dos betões com agregados correntes. O autor aponta o maior índice de vazios dos betões reciclados como a principal causa para tal efeito. De facto, Buttler (2003) refere que obtém maiores valores de absorção em betões cuja porosidade dos agregados é superior.

Por sua vez, Kwan *et al.* (2010) também chegaram a resultados semelhantes, ao concluir que os níveis de absorção de água do betão aumentam à medida que se incorpora material reciclado. No entanto, obtiveram valores de absorção mais baixos em comparação com a campanha de Buttler (2003) (Figura 2.21).

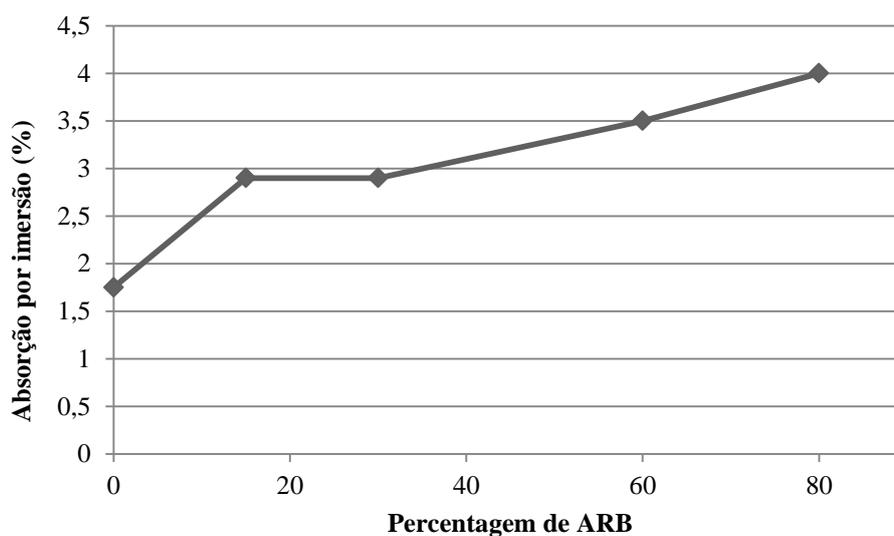


Figura 2.21 - Absorção de água (Kwan *et al.*, 2010)

Akçaozoglu *et al.* (2009), ao usarem material reciclado PET, proveniente da trituração de garrafas de plástico, obtiveram valores de absorção mais altos em misturas com 100% de PET reciclado do que em misturas com agregados reciclados e agregados naturais. No entanto, os mesmos autores obtêm níveis de porosidade inferiores em amassaduras com 100% de material reciclado.

2.5.5. Resistência à carbonatação

Esta propriedade depende de factores idênticos aos da absorção de água, pelo que será esperado que os resultados sejam semelhantes. Deste modo, como os betões reciclados apresentam maior porosidade e maior tendência em absorver água, é previsível que estes betões apresentem menor resistência à carbonatação (Brito, 2005).

A substituição de agregados naturais por reciclados conduz a uma diminuição da resistência à carbonatação, que se caracteriza pelo aumento da profundidade deste fenómeno. Este comportamento justifica-se, fundamentalmente, pela maior porosidade dos agregados reciclados relativamente aos naturais, facilitando a penetração de agentes exteriores no interior do betão (Robles, 2007).

Levy (2001) afirma que, em betões com agregados reciclados, a carbonatação está muito mais relacionada com a relação a/c e com o consumo de cimento do que com o tipo de agregado reciclado.

Evangelista (2007) conclui que a incorporação de material fino reciclado de betão em novo betão reduz a resistência à carbonatação em cerca de 65%, mostrando, assim, o fraco desempenho destes betões face a este fenómeno (Figura 2.22).

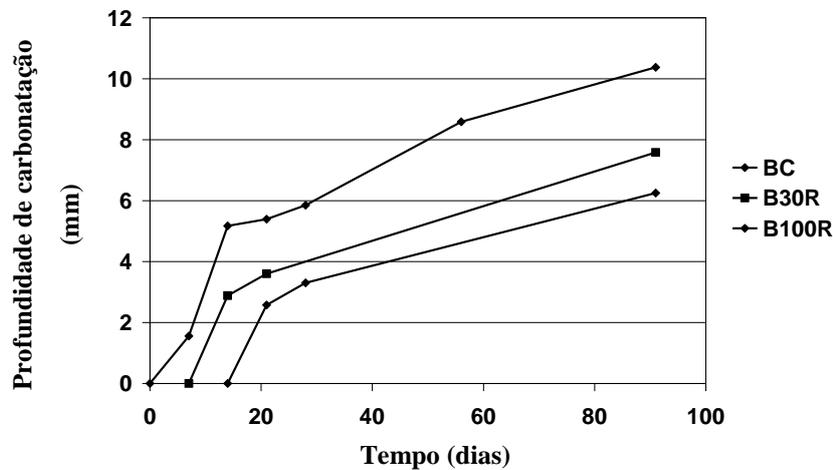


Figura 2.22 - Profundidade de carbonatação (Evangelista, 2007)

Amorim (2007) também apresenta resultados que demonstram a pior resistência à carbonatação dos betões reciclados. O autor refere uma redução de cerca de 30% face aos betões convencionais.

Será previsível que a resistência à carbonatação seja ainda menor com a incorporação de agregados leves reciclados, pois, conforme referido em 2.4.4., os betões com agregados leves têm tendência a apresentar menor resistência à carbonatação, tal como os betões com agregados reciclados. No entanto, vários autores referem que a resistência à carbonatação poderá estar mais ligada à qualidade da pasta envolvente do que, propriamente, ao tipo de agregado (Clark, 1993) (Levy, 2001) (Robles, 2007) (Bogas, 2011).

Akçaozogl *et al.* (2009) observam que as misturas com areia e PET reciclado (agregado leve de plástico reciclado) apresentaram profundidades de carbonatação ligeiramente maiores do que as misturas apenas com PET reciclado. Desta forma, os autores concluem que a mistura de PET com areia provocou uma curva granulométrica descontínua, aumentando a porosidade do betão, o que resulta numa maior difusão de CO₂.

2.5.6. Resistência à penetração de cloretos

À semelhança da carbonatação, também esta propriedade depende da porosidade dos betões. Assim sendo, como os betões produzidos com agregados reciclados apresentam piores características de porosidade e de absorção, é de esperar que apresentem piores desempenhos na resistência à penetração de cloretos (Brito, 2005).

Levy (2001), ao estudar a durabilidade dos betões com agregados de betão reciclado, observa um aumento de cerca de 36% na concentração de iões Cl⁻ face aos betões correntes, confirmando, desta forma, que esta propriedade tende também a piorar nos betões com agregados reciclados. Da mesma forma, Evangelista (2007) obtém resultados semelhantes, à medida que incorpora agregados finos reciclados de betão, concluindo, assim, que os betões com agregados finos reciclados desempenham um

pior papel na resistência à penetração de cloretos face aos seus equivalentes com agregados naturais, uma vez mais, como em quase todos os ensaios de durabilidade, devido à maior porosidade apresentada. O autor refere ainda que é evidente a existência de uma relação linear entre o decréscimo de resistência à penetração dos cloretos nos betões com agregados finos reciclados e a percentagem da absorção de água dos mesmos (Figura 2.23).

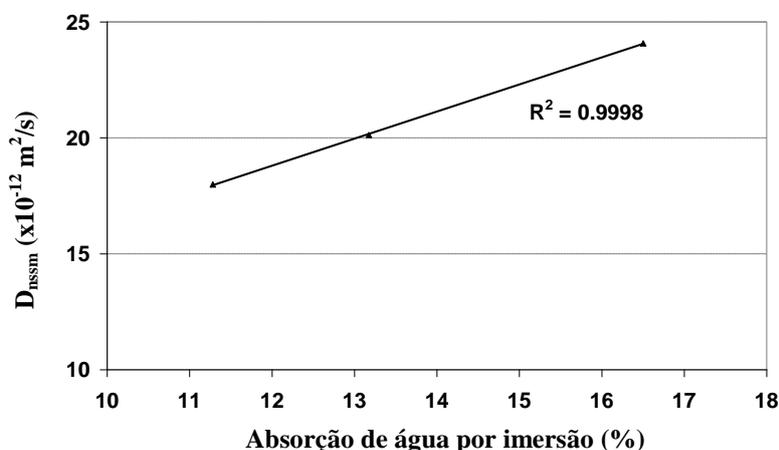


Figura 2.23 - Relação entre a difusão de cloretos e a absorção de água por imersão (Evangelista, 2007)

Mais uma vez, será previsível que a incorporação de agregados de betão leve reciclado acompanhe a mesma tendência dos agregados reciclados de betão comum, devido à maior porosidade observada nos agregados leves.

No entanto, Kou *et al.* (2009) constatam que a resistência à penetração de cloretos em betões com agregados plásticos reciclados (PVC) aumenta à medida que se incorpora este material no betão, em comparação com os betões convencionais. Os autores chegam a apresentar aumentos de 36% na resistência ao ataque de cloretos e atribuem esta característica à fraca absorção de água do agregado de PVC, revelando, assim, a forte ligação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água do agregado em causa.

3. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Esta campanha experimental pretende avaliar o comportamento em termos mecânicos e de durabilidade de betões de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve.

Neste capítulo, procura-se expor as diferentes fases da campanha, bem como os ensaios realizados aos agregados (naturais e reciclados) e aos betões produzidos. Deste modo, torna-se essencial que, para além da referência às normas utilizadas, seja feita uma descrição sucinta dos vários procedimentos experimentais.

No que diz respeito à análise dos constituintes do betão, estes incidiram, apenas, nos agregados naturais, reciclados e finos. O restante constituinte (cimento) não foi alvo de estudo, uma vez que a sua composição se mantém constante em todas as misturas, bem como o facto de este material ser controlado durante a sua produção e caracterizado pelo fabricante, Secil.

No presente capítulo, são também apresentados os cálculos referentes à formulação das diferentes composições de betão.

Toda a campanha foi realizada no Laboratório de Construção, no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico (IST).

3.2. PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental encontra-se dividida em três fases distintas.

3.2.1. 1ª Fase

Esta primeira fase tem como objectivo 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. Para o cálculo de quantidades, foi tomada como referência a curva granulométrica da leca HD.

Todos os volumes planeados 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.

3.2.2. 2ª Fase

Após obter todos os materiais necessários para o desenvolvimento desta dissertação, foi feita uma análise aos agregados a incorporar nos provetes de betão a ensaiar ao longo desta fase, bem como a produção dos betões de origem, com leca HD e leca M, para, posterior trituração e utilização como agregado reciclado. Após a trituração dos betões de origem, foram também ensaiados os agregados reciclados. Nos Quadros 3.1 e 3.2, são indicados os ensaios a realizar nos agregados.

Quadro 3.1 - Ensaios a agregados grossos

<i>Ensaios</i>	<i>Normas</i>
<i>Análise granulométrica</i>	NP EN933-1
<i>Massa volúmica e absorção de água</i>	NP EN1097-6
<i>Baridade</i>	NP EN1097-3
<i>Resistência ao esmagamento</i>	NP EN13055-1
<i>Teor de água total e superficial</i>	NP EN1097-5
<i>Índice de forma</i>	NP EN933-4

Quadro 3.2 - Ensaios a agregados finos

<i>Ensaios</i>	<i>Normas</i>
<i>Análise granulométrica</i>	NP EN933-1 / NP EN933-2
<i>Massa volúmica e absorção de água</i>	NP EN1097-6

3.2.3. 3ª Fase

Esta fase consiste na betonagem de todos os provetes a serem ensaiados, bem como a análise do betão fresco e endurecido. Os ensaios a realizar são listados nos Quadros 3.3. e 3.4.

Quadro 3.3 - Ensaios ao betão no estado fresco

<i>Ensaios</i>	<i>Normas</i>
<i>Abaixamento</i>	NP EN12350-2
<i>Massa volúmica</i>	NP EN12350-6

Quadro 3.4 - Ensaios ao betão no estado endurecido

<i>Ensaios</i>	<i>Normas</i>
<i>Retracção</i>	LNEC E398
<i>Absorção por imersão</i>	LNEC E394
<i>Absorção por capilaridade</i>	LNEC E393
<i>Resistência à carbonatação</i>	LNEC E391
<i>Resistência à penetração de cloretos</i>	Nordtest NT Build 492

3.3. PRODUÇÃO DO MATERIAL RECICLADO

Devido à não existência de material leve reciclado, foi necessária a sua produção durante a investigação. Assim, foram formulados e produzidos dois betões, um estrutural com leca HD (BOHD) e um não estrutural (BOM) com leca M.

Desta forma, a produção do material reciclado desenvolve-se a partir da posterior britagem destes betões em diferentes fracções granulométricas.

3.3.1. Betões de origem

Como referido, o dimensionamento destes dois betões deve-se, essencialmente, à produção de material para posterior reciclagem.

Uma vez desconhecidos os volumes de betão necessários para a produção do material reciclado, foram realizadas amassaduras experimentais para estes dois betões, obtendo-se uma pequena amostra, que, após a britagem, foi alvo de uma análise granulometria.

A partir da comparação entre a granulometria do material reciclado e da granulometria da leca HD, verificou-se que seria necessária a produção de cerca de 4 vezes mais material reciclado, de forma a obter uma curva granulométrica semelhante à da Leca HD, uma vez que esta foi tomada como curva de referência para os agregados grossos.

Assim, foi fabricada uma cofragem em contraplacado marítimo, Figuras 3.1 e 3.2, com as dimensões 2,5 x 2,5 m² de forma a ser preenchida com 0,75 m³ de betão produzido no laboratório de construção do Instituto Superior Técnico. O betão foi moldado em blocos com as dimensões 0,35 x 0,15 x 0,15 m³, devido ao condicionamento da câmara da britadeira, cerca de 0,4 x 0,3 m².



Figura 3.1 - Cofragem em contraplacado marítimo



Figura 3.2 - Pormenor do preenchimento da cofragem

Em resumo, os betões foram produzidos com as seguintes características:

BOHD:

- **classe de resistência:** LC35/38
- **classe de consistência:** S3 (100 a 150 mm);
- **ligante:** CEM I 42,5 R, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal;
- **água de amassadura:** potável, da rede de abastecimento pública;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico;
- **tipo de agregado:** Argila expandida (Leca HD®).
- **adjuvantes:** nenhum;
- **adições:** nenhuma.

Este betão foi dimensionado de forma semelhante aos betões de referência, como descrito no capítulo 3.4.1.

BOM:

- **classe de massa volúmica:** D1,0
- **ligante:** CEM I 42,5 R, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal;
- **água de amassadura:** potável, da rede de abastecimento pública;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico;
- **tipo de agregado:** Argila expandida (Leca M[®]).
- **adjuvantes:** nenhum;
- **adições:** nenhuma.

Dado tratar-se de um betão não estrutural e devido à escassa informação disponível sobre este tipo de betão, foi necessário contactar a empresa fornecedora de modo a serem facultadas dosagens usuais para este tipo de betão. Desta forma, foram facultados os dados que constam do Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Composição dos betões leves de origem

Materiais	BOHD	BOM (dados do fabricante)
<i>Areia (l/m³)</i>	313,25	-
<i>Leca HD (l/m³)</i>	350	-
<i>Leca M (l/m³)</i>	-	630
<i>Cimento (kg/m³)</i>	350	150
<i>Água (l/m³)</i>	192,5	90

Com o intuito de caracterizar os betões produzidos, foram preparados 6 provetes cúbicos (0,15 x 0,15 x 0,15 m³) para serem ensaiados à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Os provetes foram curados em câmara húmida, a temperatura constante, até à idade de ensaio. Todos os provetes foram pesados antes de serem ensaiados e determinada a sua massa volúmica. Os resultados são apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6- Valores característicos dos betões de origem

Betão	7 dias			28 dias		
	<i>Força (kN)</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Força (kN)</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Tensão (MPa)</i>
BOHD	737,1	6143	32,8	867,8	6219	38,6
	766,3	6063	34,1	807,5	6190	35,9
	800,4	6219	35,6	835,4	6208	37,1
BOM	16,8	1913	0,6	12,8	1937	0,6
	13,4	1909	0,6	14,8	1982	0,7
	19,6	1946	0,9	14,3	1947	0,6

3.3.2. Britagem

Após o período de cura, 28 dias, procedeu-se à britagem dos blocos do BO através da britadeira de maxilas do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico. O processo de britagem consiste numa trituração primária dos blocos de betão, que atravessam a britadeira (Figura 3.3) e dão origem a agregados reciclados através do choque entre as maxilas.



Figura 3.3 - Britadeira de maxilas

Dado a abertura das maxilas ser o maior condicionante para as dimensões do agregado, foi definida a abertura mínima entre as maxilas, de modo a obter a granulometria mais adequada (agregado de dimensão máxima inferior a cerca de 11,2 mm).

Uma vez produzidos os agregados reciclados (Figuras 3.4 e 3.5), estes foram separados em fracções granulométricas, de modo a, poderem ser melhor ajustados a uma curva granulométrica de referência.



Figura 3.4 - Material reciclado RHD



Figura 3.5 - Material reciclado RM

3.4. FORMULAÇÃO DO BETÃO

O betão é composto por agregados, finos e grossos, cimento, água e eventuais aditivos e adjuvantes. Na formulação dos betões, foi utilizado o método de Faury para optimização da compacidade granular da mistura

A curva granulométrica da leca HD foi utilizada como referência do agregado grosso.

3.4.1. Betões de referência

Foram formulados dois betões de referência, um com leca HD (BHD) e um com leca M (BM).

De acordo com o especificado nas normas NP EN 206-1 (2005) e LNEC E 464 (2007), pretendeu-se obter betões estruturais de aplicação corrente.

O BM ao ser produzido com agregado leve de reduzida massa volúmica (leca M) é menos adequado para betões estruturais. Porém, considerou-se importante a sua utilização, visto que este material tem maior expressão na construção existente.

Em resumo, os betões de referência deverão possuir as seguintes características:

BHD

- **classe de consistência:** S3 (100 a 150 mm);
- **classe de resistência:** LC35/38
- **ligante:** CEM I 42,5 R, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal;
- **água de amassadura:** potável, da rede de abastecimento pública;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico;
- **tipo de agregado:** Argila expandida (Leca HD[®]);
- **adjuvantes:** nenhum;
- **adições:** nenhuma.

BM

- **classe de consistência:** S3 (100 a 150 mm);
- **ligante:** CEM I 42,5 R, em sacos de 50 kg da cimenteira SECIL, da central de Outão, Setúbal;
- **água de amassadura:** potável, da rede de abastecimento pública;
- **local de fabrico:** Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico;
- **tipo de agregado:** Argila expandida (Leca M[®]);
- **adjuvantes:** nenhum;
- **adições:** nenhuma.

Foram considerados os seguintes parâmetros relevantes na formulação do betão:

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

3.4.1.1. Determinação da máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$)

A máxima dimensão do agregado influencia o desempenho mecânico dos betões, ou seja, quanto maior o agregado, maior o efeito de parede e maior a dificuldade de vibração do betão e, por sua vez, menor é o índice de vazios.

De acordo com o método de Faury, desde que a máxima dimensão ($D_{máx}$) do agregado não ultrapasse cerca de 33% do raio médio do molde (R), pode ignorar-se o efeito de parede, conforme a seguinte equação (3.1):

$$D \leq \frac{4}{3} \times R \quad (3.1)$$

Onde R é dado por:

$$R = \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante desse volume de betão}} \quad (3.2)$$

Durante a investigação, foram utilizados moldes cúbicos, com dimensões de 0,15 m para os ensaios de compressão e com 0,10 m nos ensaios de desgaste a abrasão e absorção de água por imersão.

Deste modo, tem-se:

- Moldes cúbicos com 0,15 m de aresta

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

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

- Moldes cúbicos com 0,10 m de aresta

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

$$D \leq \frac{4}{3} \times 16,7 = 22,2 \text{ mm}$$

Uma vez que a dimensão máxima utilizada durante a investigação é de 11,2 mm, valor definido a partir da curva de referência da leca HD, pode ser desprezado o efeito de parede.

- Moldes cúbicos com 0,15 m de aresta

$$D_{máx} = 11,2 < \frac{4}{3} \times 25 = 33,3 \text{ mm}$$

- Moldes cúbicos com 0,10 m de aresta

$$D_{m\acute{a}x} = 11,2 < \frac{4}{3} \times 16,7 = 22,2 \text{ mm}$$

3.4.1.2. Dosagem de cimento (C)

No presente trabalho, foi utilizado cimento Portland tipo CEM I 42,5R. Este cimento caracteriza-se por apresentar um valor característico da resistência à compressão aos 28 dias superior a 42,5 MPa e a sua ficha técnica é apresentada no ANEXO B.

No início da investigação optou-se por fixar o valor da dosagem de cimento nas composições, ficando, assim, definida uma dosagem de 350 kg/m³, por ser uma dosagem habitualmente usada para este tipo de betões.

3.4.1.3. Volume de vazios (V_v)

A determinação deste parâmetro apenas é possível através de métodos de ensaio directos, o que o torna um dos parâmetros de mais difícil estimativa. No entanto, tanto a norma 613 do American Concrete Institute como Coutinho (1997) sugerem a utilização de valores médios do volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado. Estes valores são apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Valores médios do volume de vazios

<i>Máxima dimensão do agregado (D_{máx}) (mm)</i>	<i>Volume de vazios (V_v) (l/m³)</i>
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,5	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Desta forma,

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

$$\frac{(9,5-11,2)}{(30-V_{v(11,2)})} = \frac{(9,5-12,7)}{(30-25)} \Leftrightarrow V_{v(11,2)} = 29,89 \cong 30 \text{ l/m}^3 \quad (3.3)$$

3.4.1.4. Índice de vazios (I_v)

Este parâmetro corresponde ao valor da soma entre o volume de vazios e o volume ocupado por água por unidade de volume de betão, ou seja, o volume de material não sólido no betão. De acordo com Faury, este valor pode ser estimado através da seguinte equação:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{D - 0,75} \quad (3.4)$$

onde,

- **K e K'**, correspondem a parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e do meio de colocação utilizado (Quadros 3.8 e 3.9);
- **R**, define o raio médio do molde, em mm;
- **D**, corresponde à máxima dimensão do agregado, em mm.

Quadro 3.8 - Classificação da trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Método de medição da trabalhabilidade	
		Graus Vêbê	Abaixamento do cone de Abrams, cm
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	> 30	-
Seca	Vibração potente	30 a 10	-
Plástica	Vibração média	12 a 2	0 a 4
Mole	Apiloamento	-	4 a 15
Fluida	Sem nada	-	> 15

Quadro 3.9 - Valores de K e K' (Faury)

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

Como se pode verificar nas tabelas acima e observando tanto a natureza dos agregados, como a classe de trabalhabilidade pretendida, pode-se concluir os seguintes valores:

- trabalhabilidade - mole;
- $K = 0,34$;
- $K' = 0,003$;
- $D_{\text{máx}} = 11,2 \text{ mm}$;
- $R = D_{\text{máx}}$.

Substituindo os valores, tem-se:

$$I_v = \frac{0,34}{\sqrt[5]{D_{11,2}}} + \frac{0,003}{\frac{11,2}{11,2} - 0,75} = 222 \text{ l/m}^3 \quad (3.5)$$

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

A dosagem de água da amassadura pode ser dada pela diferença entre o índice de vazios com o volume de vazios:

$$A = I_v - V_v \quad (3.6)$$

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

Uma vez determinada a dosagem de água da amassadura, é possível determinar a relação água/cimento da amassadura. Assim,

$$a/c = \frac{\text{dosagem de água}}{\text{dosagem de cimento}} = \frac{192}{350} = 0,55 \quad (3.7)$$

3.4.1.6. Volume de partículas de cimento (V_c)

Este parâmetro é dado por unidade de volume de betão e determinado pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{\text{dosagem de cimento}}{\text{massa volúmica do cimento}} = \frac{350}{3150} = 0,111 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.8)$$

3.4.1.7. Volume de partículas sólidas (V_s)

Sendo o volume de partículas sólidas o volume ocupado por agregados e cimento e uma vez calculado o índice de vazios, é possível determinar este parâmetro, através da seguinte expressão:

$$V_s = 1 - I_v \quad (3.9)$$

Substituindo os valores, tem-se:

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

3.4.1.8. Percentagem do volume de cimento em relação ao volume de partículas sólidas (C%)

De forma a quantificar a dosagem dos agregados na mistura, é necessário perceber o volume relativo das partículas de cimento presentes na amassadura. Este valor pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 = \frac{0,111}{0,778} \times 100 = 14,3\% \quad (3.10)$$

3.4.1.9. Curva de referência de Faury

Este método consiste na determinação de dois segmentos de recta que se apresentam num gráfico, onde as abcissas representam a dimensão das partículas e a ordenadas representam a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros. As dimensões das partículas são apresentadas numa escala proporcional à raiz quinta das dimensões, sendo o menor valor equivalente a 0,0065 mm (dimensão mínima conhecida) e o maior correspondente à máxima dimensão de agregado utilizado. Por outro lado, a percentagem de material, que passa em cada peneiro, segue uma escala linear de 0 a 100 %.

Apresenta-se, em seguida os valores calculados:

Ponto 1

Abcissa: 0,0065 mm

Ordenada: 0%

Ponto 2

Abcissa:

Desempenho em termos de durabilidade de betões de agregados leves provenientes da trituração de pisos de betão leve

$$\frac{D_{max}}{2} = \frac{11,2}{2} = 5,6 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Ordenada:

$$P_{D/2} = A + 17 \times \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} = 28 + 17 \times \sqrt[5]{11,2} + \frac{2}{\frac{11,2}{11,2} - 0,75} = 63,6\% \quad (3.12)$$

Os valores de A e B dependem da consistência e meio de compactação do betão e podem ser consultados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 - Valores de A e B da curva de Faury

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

Ponto 3

Abcissa: 11,2 mm

Ordenada: 100%

Quadro 3.11 - Valores da curva de Faury

Abcissa (mm)	11,2	5,6	0,0065
$\sqrt[5]{D}$	1,621	1,411	0,365
Ordenada (%)	100	63,6	0

Através destes três pontos, é possível determinar a curva de Faury. No entanto, é necessário extrair a percentagem de cimento (14,3%) na curva e determinar uma curva equivalente sem cimento.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 - Valores da curva de Faury sem cimento

Abcissa (mm)	11,2	5,6	0,25
$\sqrt[5]{D}$	1,621	1,411	0,758
Ordenada (%)	100	63,6	23,9
Ordenada sem percentagem de cimento (%)	85,7	49,3	9,6
Nova ordenada (%)	100	57,5	11,2

Do mesmo modo, unindo os três pontos calculados é possível chegar à nova curva de Faury (Figura 3.6). Após traçar uma linha vertical que divida duas curvas granulométricas, de modo a que as

áreas adjacentes intersectadas sejam iguais para as duas curvas, é possível determinar a proporção de cada material a incorporar no betão, a partir da diferença entre as ordenadas dos pontos onde as linhas verticais cruzam a curva de Faury.

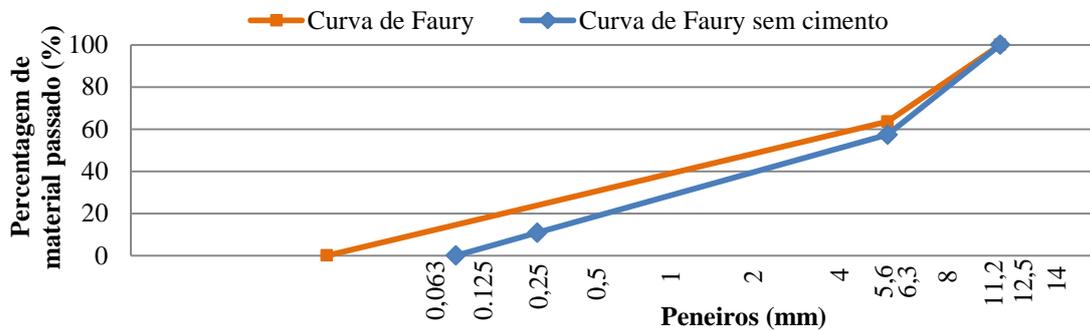


Figura 3.6 - Curva de Faury com e sem cimento

A dosagem de cada material é dada pela seguinte expressão:

$$V_i = pp_i \times V_s \quad (3.13)$$

onde,

- V_i - dosagem de cada partícula;
- pp_i - percentagem de cada partícula;
- V_s - volume de partículas sólidas.

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 3.13, com base na Figura 3.7.

Quadro 3.13 - Percentagem dos componentes sólidos do betão

Material	Percentagem (%)	Volume utilizado (l/m^3)
Leca	53	350,0
Areia grossa	32	216,5
Areia fina	15	99,9

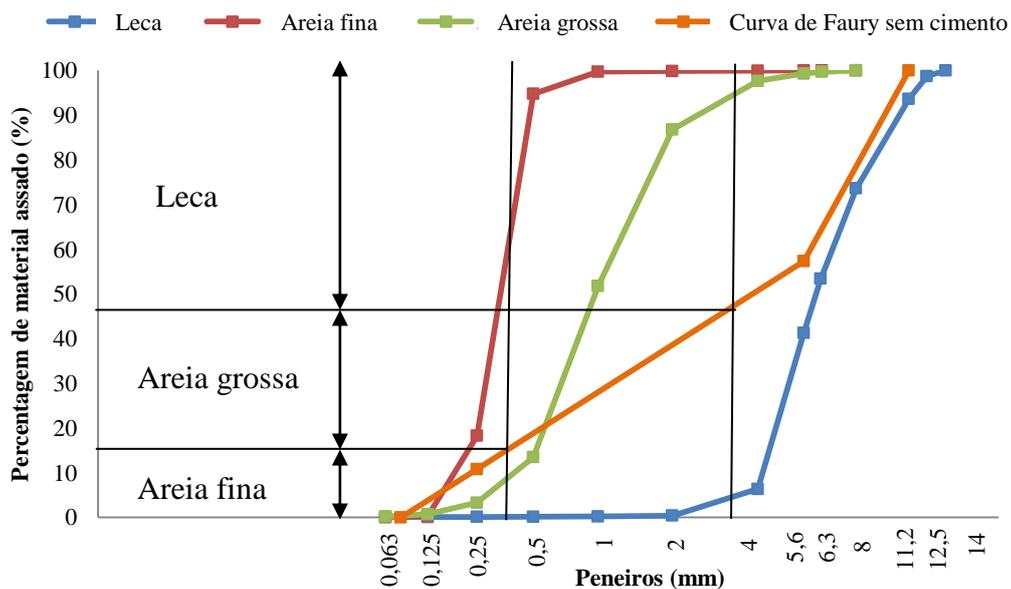


Figura 3.7 - Método gráfico

3.4.2. Formulação dos betões com agregados leves reciclados

Após a britagem dos betões de origem e respectiva separação de material por fracções granulométricas, foi possível formular os betões com ALR.

Conforme referido, as curvas granulométricas dos ALR foram aproximadas à curva da leca HD (curva de referência). Assim, todo o processo de formulação deste tipo de betão é semelhante ao utilizado nos betões de referência, sendo a única diferença a substituição dos agregados leves convencionais por agregados leves reciclados em taxas de 20, 50 e 100%.

Para tal, foi efectuado um rácio entre as curvas granulométricas dos dois materiais, de forma a definir a percentagem a substituir em cada fracção de material. Este valores que podem ser deduzidos a partir das seguintes fórmulas:

$$V_{AL} = \frac{Pral_i}{100} \times dlhd \times (1 - tx_j) \quad (3.14)$$

$$V_{ALR} = \frac{Pralr_i}{100} \times dlhd \times tx_j \times \nabla_i \quad (3.15)$$

com,

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 retido por peneiro i ;

$dlhd$ - dosagem de leca HD = 350 l/m³;

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

∇_i - rácio entre a percentagem das curvas granulométricas por peneiro i (Quadro 3.14).

Quadro 3.14 - Rácio entre as percentagens das curvas granulométricas por peneiro

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

3.4.3. Composição dos betões

No Quadro 3.15, são apresentadas as composições finais para cada betão

Quadro 3.15 - Composições finais dos diversos betões produzidos, valores por m³ de betão

Abaix. (mm)	Leca M (kg)	Leca HD (kg)	Areia grossa (kg)	Areia fina (kg)	RLM (kg)	RLHD (kg)	Relação (a/c)	Água (l)	Cimento (kg)	Taxa de incorporação de reciclados
130	0	380,70	564,99	260,32	0	0	0,55	192,5	350	0%
125	207,45	0	564,99	260,32	0	0	0,55	192,5	350	0%
120	0	304,53	564,99	260,32	0	120,96	0,55	192,5	350	20% RHD
130	165,93	0	564,99	260,32	0	120,96	0,55	192,5	350	20% RHD
130	0	190,35	564,99	260,32	0	302,42	0,55	192,5	350	50% RHD
125	103,90	0	564,99	260,32	0	302,42	0,55	192,5	350	50% RHD
125	0	0	564,99	260,32	0	604,85	0,55	192,5	350	100% RHD
125	0	304,53	564,99	260,32	61,18	0	0,55	192,5	350	20% RM
130	165,93	0	564,99	260,32	61,18	0	0,55	192,5	350	20% RM
135	0	190,35	564,99	260,32	152,96	0	0,55	192,5	350	50% RM
130	103,90	0	564,99	260,32	152,96	0	0,55	192,5	350	50% RM
125	0	0	564,99	260,32	305,92	0	0,55	192,5	350	100% RM

3.5. PRODUÇÃO DOS BETÕES

3.5.1. Processo

A produção dos betões tem por base o procedimento de amassadura utilizado por Bogas (2011) em betões com agregados leves de argila expandida, visando minimizar o efeito da elevada absorção de água deste tipo de material.

Este processo pode dividir-se em quatro fases distintas: pesagem; betonagem; moldagem e compactação; cura.

3.5.1.1. Fase 1 - Pesagem dos agregados

Dado que não foi possível efectuar a seca prévia do agregado, houve necessidade de se proceder à determinação do seu teor em água. Posteriormente, foi realizado o devido acerto em relação à quantidade de material necessária.

Por outro lado, houve ainda necessidade de corrigir a quantidade de água de amassadura, de modo a ter em conta a absorção dos agregados durante a mistura. Desta forma, foi feito um balanço entre a humidade relativa e a absorção de água ao fim de 30 minutos para cada um destes materiais, permitindo, assim, realizar um acerto à quantidade de água a utilizar e, deste modo, manter a relação a/c pretendida ao longo de todo processo.

Uma vez feito este acerto, é possível ter a certeza de que todas as dosagens estão a ser bem efectuadas.

3.5.1.2. Fase 2 - Betonagem

Após a pesagem dos constituintes, procedeu-se à betonagem. Neste processo, foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado basculante (Figura 3.7), com uma capacidade total para 80 litros.



Figura 3.8 - Betoneira de eixo basculante

Iniciou-se o processo com a molhagem prévia da betoneira e, após escorrer a água e com a betoneira em funcionamento, colocou-se o agregado leve com cerca de 60% da água prevista para a mistura. De seguida, deixou-se a betoneira em funcionamento durante cerca de 1 minuto e, após este período, manteve-se o equipamento em repouso durante mais 1 minuto, remexendo o material com uma colher de pedreiro, de modo a garantir uma boa pré-molhagem do agregado.

Depois, colocou-se o material fino (areia grossa e fina) na betoneira e deixou-se a misturar durante 2 minutos. Colocou-se, em seguida, o cimento e, aos poucos, os restantes 40% de água, até se obter uma mistura homogênea. Esta parte final do processo teve uma duração de pelo menos 4 minutos.

Após a mistura, analisou-se a consistência da mistura através do ensaio de abaixamento (conforme 3.7.1). Todas as betonagens foram alvo do mesmo processo e, em todas, se verificou um abaixamento dentro do expectável, ou seja, valores dentro do intervalo de 125 ± 10 mm.

3.5.1.3. Fase 3 - Moldagem e compactação

Terminado o processo de betonagem, determinou-se a massa volúmica do betão fresco de acordo com 3.7.2.

Após a colocação do betão nos moldes, procedeu-se à vibração / compactação do betão de acordo com a norma NPEN12390-2 (2000), que define que a colocação e vibração devem ser feitas numa única camada em provetes com uma altura inferior a 10 cm. Este processo é bastante importante, pois permite expulsar o excesso de ar que se acumula no interior do betão, após a colocação no molde.

Dado que no betão de menor massa volúmica existe um maior risco de segregação e subida do agregado, o tempo de vibração foi limitado a cerca 10 segundos, sem no entanto comprometer a compacidade da mistura. Após a vibração, a superfície dos moldes foi alisada, recorrendo ao uso de uma colher de pedreiro.

Os provetes permaneceram no interior dos moldes (Figura 3.9) durante um período de 24 ± 2 horas, tapados por uma película de plástico de modo a impedir a perda excessiva de água e por consequência retrações indesejáveis.



Figura 3.9 - Moldes após a colocação do betão

3.5.1.4. Fase 4 - Cura

Por fim, após a desmoldagem, os provetes foram identificados e colocados em cura (Figura 3.10). Devido à especificidade de cada ensaio, nem todos os provetes foram sujeitos às mesmas condições de cura. No Quadro 3.16 são resumidos os procedimentos de cura utilizados para cada ensaio.



Figura 3.10 - Provete em ambiente de cura

Quadro 3.16 - Procedimentos de cura em função de cada ensaio

<i>Ensaio</i>	<i>Tipo de molde</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Dimensões do provete (cm)</i>	<i>Processo de cura</i>
Retracção	Prisma metálico	2	15 x 15 x 60	Cura em câmara seca com temperatura a 22 ± 2 °C e humidade relativa a $50 \pm 5\%$
Absorção de água - capilaridade	Cilindro plástico	1	15 x 30	Cura durante 14 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95% e restantes dias na estufa a 50 °C
Absorção de água - imersão	Cubo plástico	3	10 x 10 x 10	Cura em câmara húmida com humidade relativa a 95%
Resistência à carbonatação	Cilindro em PVC	2	10 x 20	Cura durante 7 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95% e restantes dias em câmara seca com temperatura a 22 ± 2 °C e humidade relativa a $50 \pm 5\%$
Resistencia à penetração de cloretos	Cilindro em PVC	2	10 x 20	Cura durante 28 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95%

3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Para uma boa caracterização do betão em estudo, é fundamental conhecer as características dos agregados que o constituem. Assim, foram realizados diversos ensaios, de modo a avaliar as propriedades geométricas e físicas dos diversos agregados.

Coutinho (1997) sugere que para uma boa caracterização do betão se deve conhecer a massa volúmica, baridade, humidade, porosidade e absorção dos diferentes agregados que o constituem.

Neste trabalho, foram efectuados os ensaios (Quadro 3.17) que permitem avaliar estas características.

Quadro 3.17 - Ensaios aos agregados

<i>Agregados finos</i>	
Ensaio	Norma
<i>Análise granulométrica Massa volúmica e absorção de água</i>	NP EN933-1 / NP EN933-2 NP EN1097-6
<i>Agregados grossos</i>	
Ensaio	Norma
<i>Análise granulométrica Massa volúmica e absorção de água Baridade Resistência ao esmagamento Teor de água total e superficial Índice de forma</i>	NP EN933-1 NP EN1097-6 NP EN1097-3 NP EN13055-1 NP EN1097-5 NP EN933-4

3.6.1. Análise granulométrica

3.6.1.1. Objectivo do ensaio

A análise granulométrica é fundamental na formulação e maximização da compacidade de um betão, e tem por objectivo quantificar estatisticamente as diferentes dimensões e correspondentes fracções das partículas constituintes de cada um dos tipos de agregados a utilizar.

3.6.1.2. Norma do ensaio

Foi adoptado o procedimento de ensaio especificado na norma NP EN 933-1 (2000) “*Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*”. Associada a esta norma, encontra-se a NP EN 933-2 (1999), onde são especificadas as dimensões nominais das aberturas, formato da tela de arame e chapas perfuradas dos peneiros de ensaio.

3.6.1.3. Aparelhos e utensílios

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

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiros de ensaio;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar.

3.6.1.4. Amostra

A norma NP EN 933-1 refere que a massa de amostra mínima para ensaio deve ser quantificada de acordo com a máxima dimensão do agregado, pelo que, após secagem, o provete deverá possuir massa superior ao indicado no Quadro 3.18.

Quadro 3.18 - Massa mínima dos provetes (NP EN 933-1, 2000)

<i>Dimensão máxima do agregado (mm)</i>	<i>Massa mínima dos provetes (kg)</i>
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

3.6.1.5. Procedimento de ensaio

Após a preparação da amostra, adoptou-se o seguinte procedimento:

- seca-se a amostra em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até se atingir massa constante e regista-se o seu valor,
- de seguida, coloca-se directamente o provete de ensaio na coluna de peneiros, correctamente ordenados, com fundo e tampa, e procede-se à peneiração mecânica (Figura 3.11);
- retira-se cada peneiro individualmente e certifica-se, através de agitação manual com tampa e fundo, que não existe perda de material;
- o processo de peneiração termina quando, após 1 minuto de peneiração manual, a massa do material retido não sofre alterações superiores 1,0%;
- seguidamente, pesa-se o material retido no peneiro de maior dimensão nominal e regista-se a sua massa;
- repete-se os pontos atrás para os restantes peneiros, registando-se a massa das diferentes fracções;
- por fim, pesa-se o material retido no fundo (resíduo).



Figura 3.11 - Peneiros da serie 933-2 e máquina de peneirar

3.6.1.6. Resultados do ensaio

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

$$\%_{ri} = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad (3.16)$$

onde,

$\%_{r_i}$ - percentagem de material retido em cada peneiro,

M_1 - massa da amostra seca,

M_2 - massa de material retido em cada peneiro.

O ensaio é considerado inválido quando a soma das massas M_2 e resíduo difira mais do que 1% da massa M_1 .

A percentagem de material passado acumulado corresponde à soma entre a percentagem do material retido no peneiro em causa e as do material retido em todos os peneiros de abertura maior e subtrai-se de 100 ao valor assim obtido.

A curva granulométrica de um dado agregado resulta da união dos pontos formados pela percentagem de material passado acumulado (ordenadas) e pelas malhas da série de peneiros (abcissas).

3.6.2. Massa volúmica e absorção de água

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

A determinação da massa volúmica dos agregados é um dado fundamental para um bom cálculo da composição do betão, uma vez que é mais simples dosar os materiais por pesagem do que por volumetria.

Por outro lado, em condições ideais, os agregados deviam ser incorporados na mistura saturados com superfície seca. No entanto, é bastante improvável que tal aconteça. Deste modo, é também fundamental saber o teor de humidade e a absorção de água nos agregados, permitindo, assim, efectuar as devidas correcções na quantidade de água a utilizar.

3.6.2.2. Norma do ensaio

Foi utilizada a metodologia de ensaio descrita pela norma NP EN 1097-6 (2003) “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*”.

3.6.2.3. Aplicação do ensaio em agregados finos

3.6.2.3.1. Aparelhos e utensílios

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

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiros de ensaio, com as seguintes aberturas: 0,063 / 4,0;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- termómetro graduado;
- cone troncocónico e pilão metálico;
- colher de pedreiro
- balão graduado com 500 cm³.

3.6.2.3.2. Amostra

De acordo com a norma NP EN 1097-6, a preparação do provete tem o seguinte procedimento:

- seleccionada uma amostra com cerca de 1kg, passa-se a amostra pelo peneiro de 4 mm (rejeitando qualquer material que fique retido) e pelo peneiro de 0,063 mm e coloca-se na estufa a secar até se atingir massa constante;
- imerge-se a amostra seca em água à temperatura ambiente (Figura 3.12), durante 24 ± 4 horas e remexe-se o material com ajuda de uma colher de pedreiro, de modo a garantir que todos os grãos fiquem saturados;



Figura 3.12 - Amostra imersa em água

- após este período de tempo, retira-se a água e deixa-se o material em secagem lenta; mais uma vez, remexe-se o material com ajuda de uma colher de pedreiro, garantindo uma secagem uniforme;
- com o auxílio de um cone metálico e um pilão, verifica-se se a amostra se encontra saturada com a superfície seca; para tal, coloca-se uma porção da amostra no cone metálico e, com a ajuda do pilão, compacta-se o material com 25 pancadas.
- o provete diz-se saturado com superfície seca, quando, ao retirar o cone metálico, o material se deforma sem desagregar (Figura 3.13); caso contrário, adiciona-se uma porção de água, leva-se o material a nova secagem lenta e repete-se o processo.

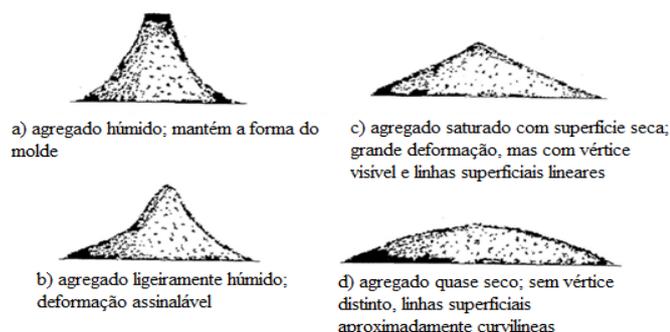


Figura 3.13 - Indicações da norma NP EN 1097-6 para a determinação do estado saturado com superfície seca em agregados finos

3.6.2.3.3. Procedimento de ensaio

Após preparado o provete, a norma sugere o seguinte procedimento:

- retira-se cerca de 500g do material preparado e regista-se o seu peso;
- coloca-se o material num balão com 500 cm³ e adiciona-se água até ao topo; no final, agita-se o balão, de forma a libertar o ar retido; regista-se o peso do conjunto *água+proвете+balão*;
- retira-se o material do balão, enche-se o balão com água e regista-se o peso do conjunto *água+balão*; por fim, coloca-se o material num tabuleiro metálico e leva-se a secar na estufa até se atingir massa constante; regista-se o peso do material seco.

3.6.2.3.4. Resultados do ensaio

Os resultados são dados pelas seguintes equações:

1. Massa volúmica do material impermeável (3.17):

$$\frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2}$$

2. Massa volúmica das partículas saturadas (3.18):

$$\frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2}$$

3. Massa volúmica das partículas secas (3.19):

$$\frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2}$$

4. Absorção de água (3.20):

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100$$

com,

m_1 - massa do provete saturado com superfície seca;

m_2 - massa do conjunto *água+proвете+balão*;

m_3 - massa do provete seco;

m_4 - massa do conjunto *água+balão*.

3.6.2.4. Aplicação do ensaio em agregados grossos

3.6.2.4.1. Aparelhos e utensílios

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

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiro de ensaio, com a seguinte abertura: 4,0 mm;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;

- termómetro graduado;
- picnómetro.

3.6.2.4.2. Amostra

De acordo com a norma NP EN 1097-6, a preparação do provete passa por recolher uma amostra com cerca de 1 kg de massa (de acordo com o Quadro 3.19), constituída por partículas que se encontrem no intervalo de grandeza entre $D_{\text{máx}}$ e 4 mm.

Quadro 3.19 - Massa mínima dos provetes (NP EN 1097-6, 2003)

<i>Dimensão máxima (mm)</i>	<i>Massa mínima do provete (kg)</i>
31,5	5
16,0	2
8,0	1

3.6.2.4.3. Procedimento de ensaio

Após preparado o provete, a norma sugere o seguinte procedimento:

- começa-se por lavar a amostra, de modo a retirar partículas e poeiras indesejáveis e coloca-se a amostra num picnómetro; de seguida, enche-se o picnómetro com água, de forma a pré-saturar os agregados, durante um período de tempo nunca inferior a 24 horas;
- após o período de tempo referido, regista-se o peso do conjunto *proвете+água+picnómetro*;
- seguidamente, retira-se o provete do picnómetro e procede-se à secagem manual do mesmo, com o objectivo de retirar a água superficial; regista-se, depois, o peso da amostra saturada com a superfície seca;
- enche-se o picnómetro com água e regista-se o peso do conjunto *água+picnómetro*;
- por fim, leva-se a secar o material em estufa ventilada a 105 °C até se atingir massa constante e regista-se o peso do material seco.

3.6.2.4.4. Resultados do ensaio

Os resultados são dados pelas seguintes equações:

1. Massa volúmica do material impermeável:

$$\frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2}$$

2. Massa volúmica das partículas saturadas:

$$\frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2}$$

3. Massa volúmica das partículas secas:

$$\frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2}$$

4. Absorção de água:

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100$$

com,

m_1 - massa do provete saturado com superfície seca;

m_2 - massa do conjunto *água+provetete+picnómetro*;

m_3 - massa do provete seco;

m_4 - massa do conjunto *água+picnómetro*.

3.6.3. Massa volúmica aparente

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

A baridade, ou massa volúmica aparente, corresponde à massa por unidade de volume aparente de um dado agregado, ou seja, tem em conta o volume de agregados e o volume de vazios entre os agregados.

3.6.2.2. Norma do ensaio

Foi seguida a metodologia de ensaio especificada pela norma NP EN 1097-3 (2000) “*Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios*”.

3.6.2.3. Aparelhos e utensílios

Foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- balança de precisão de $\pm 0,1$ % da massa a determinar;
- varão metálico;
- recipiente cilíndrico estanque em aço inoxidável, com 3 l de volume.

3.6.2.4. Amostra

A norma NP EN 1097-3 define que o ensaio deve ser realizado no mínimo para três amostras por agregado. Cada amostra deve ser seca em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até se atingir massa constante. A quantidade de material a utilizar por amostra depende da máxima dimensão do agregado em causa (Quadro 3.20).

Quadro 3.20 - Volume mínimo do recipiente a ensaiar (NP EN 1097-3, 2000)

<i>Dimensão máxima (mm)</i>	<i>Volume mínimo do recipiente (l)</i>
63	20
32	10
16	5
8	3
≤ 4	1

Para a realização deste ensaio, foi definido um volume do recipiente igual a 3 l.

3.6.2.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo os seguintes pontos:

- após a preparação da amostra, pesa-se o recipiente vazio e limpo e regista-se a sua massa;
- de seguida, enche-se cuidadosamente o recipiente, sem qualquer compactação, até transbordar;
- com o auxílio do varão de aço, remove-se o material em excesso à superfície sem compactar o agregado;
- finalmente, regista-se a massa do conjunto “recipiente+agregado” e repete-se o procedimento para as restantes amostras.

3.6.2.6. Resultados do ensaio

A baridade de cada amostra é dada por:

$$b_i = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.21)$$

onde,

b_i - baridade de cada amostra;

M_1 - massa do recipiente;

M_2 - massa do conjunto “recipiente+agregado”;

V - volume do recipiente.

Deste modo, a baridade do agregado é dada pela média das três amostras.

$$b = \frac{\sum b_i}{3} \quad (3.22)$$

3.6.4. Resistência ao esmagamento

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio destina-se a determinar a força necessária que é necessário exercer, para comprimir a até uma certa profundidade, os agregados contidos num dado recipiente.

3.6.2.2. Norma do ensaio

Foi seguida a metodologia de ensaio especificada pela norma NP EN 13055-1 (2002) “Agregados leve - Parte 1: Agregados leves para betão e argamassas”.

3.6.2.3. Aparelhos e utensílios

Foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- mesa de vibração;
- recipiente metálico de acordo com a NP EN 13055-1;
- prensa.

3.6.2.4. Amostra

A norma sugere que o ensaio deverá ser realizado para três amostras, tendo o cuidado de remover as partículas cuja dimensão é maior ou igual a abertura do peneiro no qual passa 90% ou mais material e as partículas cuja dimensão é menor ou igual à abertura onde passa 15% ou menos material.

3.6.2.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- começa-se por colocar o recipiente metálico (Figura 3.14) sobre a mesa de vibração e procede-se ao seu enchimento;
- de seguida, liga-se a máquina de vibração, de modo a vibrar o recipiente durante 3 a 60 segundos; regista-se o tempo de vibração e volta-se a encher o recipiente;
- procede-se a nova vibração durante 3 a 60 segundos;
- após a vibração, enche-se, novamente, o recipiente e instala-se o êmbolo no topo do dispositivo;
- de seguida, coloca-se o conjunto na prensa e exerce-se uma força de forma a se atingir uma profundidade de 20 mm em aproximadamente 100 s;
- finalmente, regista-se o valor da força.



Figura 3.14 - Recipiente metálico para ensaio de esmagamento.

3.6.2.6. Resultados do ensaio

O resultado é dado pela média da tensão exercida no êmbolo e dado em N/mm^2 :

$$R = \frac{F}{A} \quad (3.23)$$

onde,

F - força exercida (N);

A - área do êmbolo (mm^2).

3.6.5. Teor em água

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio consiste na determinação do teor de humidade nos agregados. Este ensaio revelou ter grande importância na quantificação de água a usar durante as betonagens, como referido em 3.5.1.1.

3.6.2.2. Norma do ensaio

Foi seguida a metodologia de ensaio especificada pela 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*”.

3.6.2.3. Aparelhos e utensílios

Neste ensaio, foram utilizados os seguintes aparelhos:

- estufa ventilada a temperatura de 110 ± 5 °C;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar.

3.6.2.4. Amostra

Neste ensaio, foram recolhidas duas amostras por agregado com um peso nunca inferior a 500 g.

3.6.2.5. Procedimento de ensaio

O procedimento foi executado segundo os seguintes pontos:

- começa-se por pesar a amostra e registar a sua massa;
- de seguida, leva-se a amostra a secar em estufa ventilada a 110 ± 5 °C (Figura 3.15) até massa constante;
- por fim, pesa-se o provete e regista-se a sua massa.



Figura 3.15 - Estufa ventilada

3.6.2.6. Resultados do ensaio

O teor de humidade de cada amostra de agregado é então dado por:

$$W_i\% = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (3.24)$$

onde,

$W_i\%$ - teor de humidade de cada amostra por agregado, em percentagem;

M_1 - massa inicial da amostra;

M_2 - massa da amostra seca.

O valor final é dado pela média das duas amostras.

$$W\% = \frac{\sum W_i\%}{2} \quad (3.25)$$

3.6.6. Índice de forma

3.6.2.1. Objectivo do ensaio

O índice de forma permite caracterizar os agregados como partículas cúbicas ou não-cúbicas. Este parâmetro possibilita antever o efeito dos agregados no desempenho mecânico do betão, através da compacidade da mistura, ou na trabalhabilidade, afectando a quantidade de água necessária para manter o abaixamento do betão.

3.6.2.2. Norma do ensaio

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

3.6.2.3. Aparelhos e utensílios

Foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- estufa ventilada a temperatura de 110 ± 5 °C;
- peneiros de ensaio;
- máquina de peneirar;
- balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- paquímetro.

3.6.2.4. Amostra

A norma sugere que as amostras sejam secas em estufa ventilada a 110 ± 5 °C até atingirem massa constante. Após secagem, as amostras são divididas nas fracções granulométricas indicadas pela norma NP EN 933-2 compreendidas entre os peneiros de malha 4 e 63 mm. Qualquer material exterior a esse intervalo é rejeitado.

A massa do provete de agregado deve ser superior aos valores apresentados no Quadro 3.21.

Quadro 3.21 - Massa mínima dos provetes (NP EN 933-4, 2002)

<i>Dimensão máxima (mm)</i>	<i>Massa mínima dos provetes (kg)</i>
63	45
32	6
16	1
8	0,1

3.6.2.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- começa por registar-se a massa de cada fracção granulométrica e determina-se a sua percentagem face à massa do provete de ensaio; no entanto, não se consideram as fracções granulométricas que representem menos de 10% da massa do provete;

- de seguida, e através do paquímetro, mede-se o comprimento e a espessura de cada partícula, e filtram-se as partículas não-cúbicas, ou seja, partículas com uma relação dimensional comprimento / espessura > 3;
- por fim, regista-se a massa de partículas não-cúbicas de cada fracção granulométrica.

3.6.2.6. Resultados do ensaio

Os resultados são dados pela seguinte expressão:

$$IF = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad (3.26)$$

onde,

IF - 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.

3.6.7. Evolução da absorção de água

3.6.7.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio tem como base entender a evolução da absorção de água dos agregados leves e reciclados ao longo do tempo. Este ensaio tem uma grande importância neste estudo, pois permite avaliar, previamente, a quantidade de água necessária na amassadura, já que tanto os agregados leves como os reciclados apresentam grande porosidade.

3.6.7.2. Norma do ensaio

Não foi definida nenhuma norma para este ensaio. No entanto, tomou-se como base o ensaio realizado na campanha de Bogas (2011).

3.6.7.3. Aparelhos e utensílios

Foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- 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.

3.6.7.4. Amostra

Bogas (2011) sugere que se recolha uma pequena amostra de agregado que seja suficiente para preencher cerca de $\frac{3}{4}$ do volume total do picnómetro. De seguida, leva-se o material a secar em estufa ventilada a 105 °C até se atingir massa constante.

3.6.7.5. Procedimento de ensaio

Após preparado o provete, seguiu-se o seguinte procedimento:

- coloca-se o material no picnómetro e regista-se o peso do conjunto;
- de seguida, enche-se o picnómetro até a marca assinalada no tubo superior do recipiente e agita-se de modo a expulsar o ar que se possa acumular durante o enchimento do picnómetro;
- após um período de 3 minutos, regista-se o peso, Figura 3.16;
- este processo repete-se ao fim de 5, 10, 20, 30, 60 e 120 minutos e ao fim de 24 horas, adicionando a água necessária (até a marca assinalada no picnómetro) antes de cada pesagem;
- após a última pesagem, seca-se a superfície do agregado e regista-se o peso do material saturado com a superfície seca.

Nota: Uma vez que os agregados leves podem ter massas volúmicas inferiores à da água, utilizou-se uma rede metálica no interior do picnómetro, garantindo-se assim, que todas as partículas se encontram imersas durante o ensaio.



Figura 3.16 - Pesagem do conjunto agregado + picnómetro

3.6.7.6. Resultados do ensaio

Os resultados são então dados pelas seguintes expressões:

$$abs_f = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \quad (3.27)$$

$$abs_i = \frac{M_{24h} - M_i}{M_i} \times 100 \quad (3.28)$$

onde,

abs_f - absorção final, %;

abs_i - absorção em cada instante i , %;

M_{sat} - 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.

3.7. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Os ensaios do betão em estado fresco têm como objectivo a avaliação de algumas propriedades importantes para uma boa aplicação do betão em obra, bem como a avaliação de parâmetros que possam estimar a qualidade desses mesmos betões após endurecimento.

3.7.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

3.7.1.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio tem como principal objectivo determinar a trabalhabilidade do betão em estudo. Como referido no capítulo 3.4., pretende-se obter um betão S3 fixando um abaixamento de 125 ± 10 mm.

3.7.1.2. Norma do ensaio

Foi adoptado o procedimento de ensaio especificada pela norma NP EN 12350-2 (2002) “Ensaio do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento”.

3.7.1.3. Aparelhos e utensílios

Foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- 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 o constitui deve ser resistente à pasta de cimento e o seu interior deve ser perfeitamente liso, sem rebites ou mossas; deverá dispor de duas pegas junto ao topo e de elementos de fixação ou abas junto à base;
- varão de compactação com extremidades arredondadas, com um diâmetro de 16 ± 1 mm e um comprimento de 600 ± 5 mm;
- funil que permita ser acoplado ao topo do molde tronco-cónico;
- régua com uma precisão maior ou igual a 5 mm;
- placa metálica, lisa, rígida e plana;
- colher de pedreiro.

3.7.1.4. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- o ensaio inicia-se com uma molhagem prévia do molde troncocónico e a placa metálica, deixando-se, de seguida, escorrer a água;
- após a pré-molhagem do material, preenche-se o molde com a amostra recolhida; o enchimento deve ser realizado em três camadas iguais a sensivelmente um terço da altura do molde; após o enchimento de cada camada, compacta-se a amostra com 25 pancadas verticais com o auxílio do varão de compactação (Figura 3.17); durante todo o processo, deve manter-se fixo o molde contra a placa com os pés sobre as abas;
- retira-se o funil e rasa-se a superfície de betão com uma colher de pedreiro; de seguida, elimina-se o excesso de betão da placa;

- remove-se cuidadosamente o molde, levantando-o na vertical; a operação de desmoldagem deverá ser executada através de um deslocamento único e firme, sem transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional;
- por fim, regista-se o abaixamento, com o auxílio de uma régua.



Figura 3.17 - Ensaio de abaixamento

3.7.1.5. Resultados do ensaio

O abaixamento do cone de Abrams é dado pela diferença entre a altura do cone e o ponto mais alto do provete que sofreu abaixamento, medido em duas direcções. O ensaio é considerado válido quando se obtém um abaixamento verdadeiro, ou seja, com o betão substancialmente intacto e simétrico (Figura 3.18).

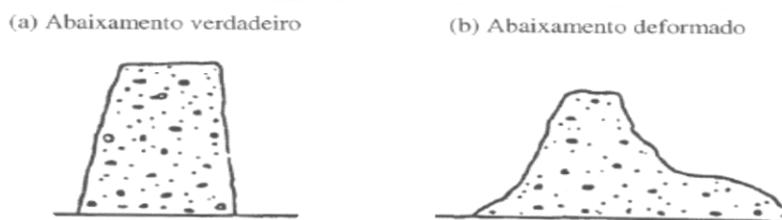


Figura 3.18 - Formas de abaixamento: (a) válido, (b) inválido

3.7.2. Massa volúmica

3.7.2.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão no estado fresco tem por objectivo medir a compacidade que o betão possui, permitindo estimar a sua porosidade futura, após endurecimento.

3.7.2.2. Norma do ensaio

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

3.7.2.3. Aparelhos e utensílios

Na realização deste ensaio, foram usados os seguintes aparelhos e utensílios:

- recipiente em aço, cilíndrico e estanque, com 10 l de volume;
- agulha vibratória;
- balança de precisão superior ou igual a $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;

- colher de pedreiro;

3.7.2.4. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- começa por pesar-se o recipiente vazio e registar a sua massa;
- de seguida, enche-se o recipiente com a amostra recolhida em duas camadas; após preencher cada camada, compacta-se o betão com a agulha vibratória, mantendo-a numa posição vertical e sem tocar nas extremidade do recipiente; o período de compactação deve ser adequado de modo a prevenir quaisquer indícios de segregação ou exsudação;
- após o enchimento total do recipiente, alisa-se a superfície com recurso à colher de pedreiro;
- elimina-se o excesso de betão no exterior do recipiente;
- finalmente, pesa-se o recipiente com o betão fresco e regista-se a sua massa (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Pesagem do betão no estado fresco

3.7.2.5. Resultados do ensaio

A massa volúmica do betão no estado fresco é dada pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.29)$$

em que,

ρ - massa volúmica do betão fresco;

M_1 - massa do recipiente;

M_2 - massa do conjunto “recipiente+betão”;

V - volume do recipiente.

3.8. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Estes ensaios permitem avaliar o comportamento que os betões irão ter em condições de serviço, ou seja, quando estiverem a desempenhar as funções para as quais foram produzidos. As propriedades do betão endurecido são separáveis em dois grandes grupos: propriedades mecânicas e propriedades de durabilidade.

O presente trabalho visa a análise das propriedades de durabilidade dos betões em estudo.

3.8.1. Retracção

3.8.1.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de retracção pretende estabelecer qual a variação de volume que os elementos de betão sofrem, devido a uma série de factores internos de natureza físico-química.

3.8.1.2. Norma do ensaio

Para o ensaio em causa, adoptou-se o procedimento apresentado pela especificação LNEC E398 (1993) “*Determinação da retracção e da expansão*”.

3.8.1.3. Aparelhos e utensílios

A norma estabelece o uso de um equipamento capaz de medir a extensão/retracção com uma precisão de 5×10^{-6} .

3.8.1.4. Amostra

A norma refere que se deve analisar pelo menos 2 provetes prismáticos de secção quadrada, devendo possuir uma relação altura / aresta da base de pelo menos 3. O processo de cura é feito em câmara seca com temperatura a 22 ± 2 °C e humidade relativa a $50 \pm 5\%$, afastados do solo para que o ar circule por todas as faces dos mesmos.

3.8.1.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- o processo inicia-se com a desmoldagem dos primas e colocação de duas pastilhas metálicas no topo do provete (pontos de referência) a 1/3 e 2/3 do comprimento de uma das faces mais longas do provete (Figura 3.20); este processo de desmoldagem deve ser efectuado numa idade de 24 horas após a colocação do betão nos moldes;
- após a colocação das pastilhas, mede-se a distância entre os dois pontos de referência;
- de seguida o provete é colocado em câmara seca com temperatura a 22 ± 2 °C e humidade relativa a $50 \pm 5\%$, onde é sujeito a leituras periódicas até à idade de 91 dias (Figura 3.21);
- no presente trabalho, foram realizadas leituras nas idades: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 45, 60, 75 e 91 dias.

3.8.1.6. Resultados de ensaio

Os resultados do ensaio são expressos em termos de retracção e dado por:

$$\epsilon_{CSi} = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \quad (3.30)$$

onde,

ϵ_{CSi} - retracção em cada período de leitura, em m/m;

d_1 - distância entre os pontos de referência no início do ensaio, em mm;

d_2 - distância entre os pontos de referência no período especificado, em mm.

O valor final, após 91 dias, é dado pela média das duas amostras.

$$\epsilon_{CS} = \frac{\sum \epsilon_{CSI}}{2} \quad (3.31)$$



Figura 3.20 - Pastilhas metálicas colocadas no provete

3.8.2. Absorção de água

3.8.2.1. Absorção de água por capilaridade

3.8.2.1.1. Objectivo do ensaio

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite medir a capacidade dos betões em absorver líquidos pelos seus vasos capilares, devido às diferenças de pressão entre a superfície livre dos líquidos e a superfície livre desses mesmos líquidos no interior dos vasos capilares.

3.8.2.1.2. Norma do ensaio

Para o ensaio em causa, adoptou-se o procedimento apresentado pela especificação LNEC E393 (1993) “*Determinação da absorção de água por capilaridade*”.

3.8.2.1.3. Aparelhos e utensílios

Na realização deste ensaio, foram usados os seguintes aparelhos e utensílios:

- estufa ventilada, com temperatura de 40 ± 5 °C;
- balança de precisão superior ou igual a $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- tabuleiro metálico com base não absorvente;
- campânula com abertura no topo.

3.8.2.1.4. Amostra

A norma prevê que a secção do provete deve ser quadrada ou circular, com uma base não inferior a 10000 mm^2 e uma altura de pelo menos o dobro da aresta ou diâmetro.

Nesta investigação, foram utilizados provetes cilíndricos com 10 cm de altura e 15 de diâmetro, obtidos a partir do corte de um cilindro moldados com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro. Um cilindro por composição.

O provete fica durante 14 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95% e os restantes 14 dias, o provete fica sujeito a secagem em estufa a 50 °C.

3.8.2.1.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- após a secagem do provete, registam-se os pesos dos provetes e colocam-se os suportes no fundo do tabuleiro, para garantir que a face inferior dos provetes se mantenha em contacto com a água;
- de seguida, colocam-se os provetes no tabuleiro à temperatura da sala;
- enche-se cuidadosamente o tabuleiro com água, até se atingir uma altura de água de 5 ± 1 mm acima da base do provete;
- finalmente, cobre-se o tabuleiro com a campânula e realizam-se leituras periódicas, registando-se o peso dos provetes e mantendo-se o nível da água constante até ao final do ensaio (Figura 3.21).

A norma sugere leituras nos tempos de 3, 6, 24 e 72 horas. No entanto, neste trabalho registaram-se leituras aos 0,25, 0,5, 1, 3, 6, 24 e 72 horas, devido à forte porosidade do agregado leve.



Figura 3.21 - Provetes no interior da câmpula

3.8.2.1.6. Resultados de ensaio

Os resultados são dados pela seguinte expressão:

$$A_c = \frac{M_0 - M_i}{A} \quad (3.32)$$

onde,

A_c - absorção por capilaridade, g/mm^2 ;

M_0 - massa inicial do provete, após secagem em estufa, g;

M_i - massa do provete em cada período i , g;

A - área da base do provete, mm^2 .

De forma a entender melhor estes resultados, é calculado também o coeficiente de absorção, dado por:

$$C = \frac{M_0 - M_i}{A \times \sqrt{t}} \quad (3.33)$$

Em que t corresponde ao tempo de ensaio, em horas.

3.8.2.2. Absorção de água por imersão

3.8.2.2.1. Objectivo do ensaio

Este ensaio permite calcular a absorção de água por imersão, determinando a diferença entre a massa do provete saturado com a massa do provete seco.

3.8.2.2.2. Norma do ensaio

Para o ensaio em causa, adoptou-se o procedimento apresentado pela especificação LNEC E394 (1993) “*Determinação da absorção de água por imersão*” e pela especificação LNEC E395 (1993) “*Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio de vácuo*”.

3.8.2.2.3. Aparelhos e utensílios

Na realização deste ensaio, foram usados os seguintes aparelhos e utensílios:

- estufa ventilada de 105 ± 5 °C;
- balança de precisão superior ou igual a $\pm 0,1\%$ da massa a determinar, tanto no ar como imerso em água;
- recipiente de plástico;
- pano absorvente.

3.8.2.2.4. Amostra

A norma utilizada sugere o uso de provetes com um volume mínimo de $0,001 \text{ m}^3$. No presente estudo, foram utilizados provetes cúbicos moldados com $0,001 \text{ m}^3$ de volume.

3.8.2.2.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- após o processo de cura do provete, colocam-se os suportes no fundo do recipiente, para garantir que a face inferior dos provetes se mantenha em contacto com a água;
- de seguida, colocam-se os provetes no recipiente e enche-se com água até 1/3 da altura do provete (Figura 3.22), deixa-se em repouso durante uma hora e volta-se a encher o recipiente com água até 2/3 da altura do provete e deixa-se, novamente, em repouso durante uma hora;
- após este período, enche-se o recipiente até uma altura de 20 mm acima da face superior do provete;
- mantêm-se os provetes imersos até se atingir massa constante, ou seja, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de 24 horas, seja inferior a 0,1% da média das duas leituras. Antes de cada pesagem, seca-se a superfície do provete com um pano absorvente;
- regista-se o peso do provete saturado e a sua massa hidrostática;
- após a pesagem, colocam-se os provetes a secar em estufa de 105 ± 5 °C até se atingir massa constante e regista-se o seu peso;
- finalmente e após a secagem do provete, volta-se a colocar o provete imerso até se atingir massa constante, período em geral de 7 dias, e regista-se o peso.

3.8.2.2.6. Resultados de ensaio

O ensaio permitiu calcular dois valores para a absorção por imersão, sendo bastante útil para uma posterior comparação. Os resultados são dados pelas seguintes expressões:

$$A_{1i} = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.34)$$

$$A_{2i} = \frac{m_4 - m_3}{m_4 - m_2} \times 100 \quad (3.35)$$

com,

A_i - absorção por imersão, %;

m_1 - massa do provete saturado, g;

m_2 - massa hidrostática do provete saturado, g;

m_3 - massa do provete seco, g;

m_4 - massa do provete saturados após secagem, g.



Figura 3.22 - Provetes imersos a 1/3 da sua altura

3.8.3. Resistência à carbonatação

3.8.3.1. Objectivo do ensaio

A determinação de resistência à carbonatação de um betão é de importância fundamental para verificar se esse betão é durável durante a vida útil da estrutura.

3.8.3.2. Norma do ensaio

Para o ensaio em causa, adoptou-se o procedimento apresentado pela especificação LNEC E391 (1993) “Avaliação da profundidade de carbonatação com base em solução de fenolftaleína”.

3.8.3.3. Aparelhos e utensílios

Na realização deste ensaio, foram usados os seguintes aparelhos e utensílios:

- câmara de carbonatação, com ambiente controlado, com 5% de CO₂, 60% de humidade relativa e 23 °C de temperatura;
- borracha líquida;
- escopro e martelo;
- solução alcoólica de fenolftaleína;
- craveira.

3.8.3.4. Amostra

A norma sugere o uso de provetes cilíndricos provenientes de carotes ou moldes.

Na presente investigação, foram utilizados dois cilindros moldados com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Após a betonagem, o provete deve permanecer em cura durante 7 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95%. Ao sétimo dia, o provete é cortado em bolachas de 40 mm, obtendo 5 bolachas por provete que se colocam em câmara seca com temperatura a 22 ± 2 °C e humidade relativa a 50 ± 5 % até à data do ensaio.

3.8.3.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- em primeiro lugar, aplica-se uma borracha líquida no topo e na base de cada bolacha, formando uma película impermeável, permitindo, assim, que o CO₂ apenas penetre pela superfície lateral do provete (Figura 3.23);
- após a borracha secar, colocam-se os provetes na câmara de carbonatação, com ambiente controlado, com 5% de CO₂, 60% de humidade relativa e 23 °C de temperatura; os provetes permanecem dentro da câmara até à data das medições;
- nas datas estabelecidas, retiram-se dois provetes de cada betão, partindo-os em 4 partes, com auxílio de um escopro e um martelo;
- finalmente, aplica-se a solução de fenolftaleína (solução que reage para condições de alcalinidade situadas entre 8 e 10) e regista-se a profundidade de penetração de CO₂.

Nesta investigação, foram realizadas medições aos 7, 28, 56 e 91 dias. No entanto, devido ao Laboratório de Construção se encontrar encerrado durante grande parte do mês de Agosto, foram realizadas medições aos 120 dias em vez de 91, permitindo assim que todos os provetes fossem analisados à mesma idade.

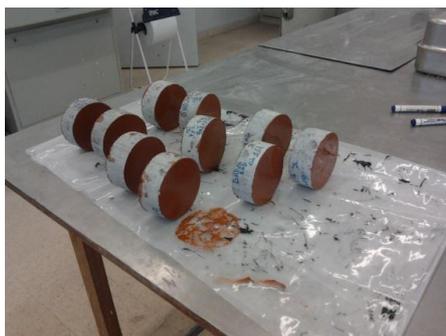


Figura 3.23 - Provetes após pintura do topo e da base com borracha líquida

3.8.3.6. Resultados de ensaio

Cerca de 30 minutos após pulverizar o provete com a solução de fenolftaleína, observa-se uma fronteira que indica até onde o betão está carbonatado. Com o auxílio de uma craveira, é possível obter a profundidade de carbonatação (Figura 3.24), sendo este valor dado pela média das leituras das 4 partes partidas de cada provete.



Figura 3.24 - Profundidade de carbonatação

3.8.4. Resistência à penetração de cloretos

3.8.4.1. Objectivo do ensaio

O presente ensaio tem por base determinar o coeficiente de difusão dos cloretos no betão, através do ensaio de migração em regime não estacionário.

Este ensaio é de grande importância visto que o ataque de cloretos ao betão acaba por despassivar as armaduras, com a agravante de instalar um potencial eléctrico, pela presença dos iões Cl^- , que irá acelerar o processo de corrosão.

3.8.4.2. Norma do ensaio

Para o ensaio em causa, adoptou-se o procedimento apresentado pela especificação LNEC E463 (2004) e Nordtest NT Build 492 (1999) “*Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*”.

3.8.4.3. Aparelhos e utensílios

Na realização deste ensaio, foram usados os seguintes aparelhos e utensílios:

- máquina de corte - serra de diamante arrefecida a água;
- câmara de vácuo, com capacidade para pelo menos três provetes;
- bomba de vácuo;
- manga de borracha de silicone;
- braçadeira metálica;
- reservatório de plástico;
- voltímetro;
- cátodo - placa de aço inoxidável;
- ânodo - rede de aço inoxidável;
- solução de $Ca(OH)_2$;
- solução catódica de $NaCl$;
- solução anódica de $NaOH$;
- nitrato de prata;
- escopro e martelo;
- craveira.

3.8.4.4. Amostra

A norma sugere o uso de provetes cilíndricos provenientes de carotes ou moldes.

Na presente investigação, foram utilizados cilindros moldados com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Após a betonagem, o provete deve permanecer em cura durante 28 dias em câmara húmida com humidade relativa a 95%.

3.8.4.5. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- após o período de cura, colocam-se os provetes dentro de uma câmara de vácuo, sujeitos a pressões entre 10 e 50 mbar, durante 3 horas;
- de seguida, introduz-se uma solução de hidróxido de cálcio na câmara, sem desligar a bomba de vácuo, até cobrir completamente os provetes (Figura 3.25); ao fim de 1 hora, desliga-se a bomba de vácuo e os provetes permanecem em contacto com a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante mais 18 ± 2 horas, à pressão atmosférica;
- retiram-se os provetes da câmara de vácuo e colocam-se as bandas de borracha e braçadeiras;
- prepara-se a solução anódica e catódica (Figura 3.26);
- dá-se, então, início ao ensaio, instalando uma corrente eléctrica, contínua de 30 V em cada célula (Figuras 3.27 e 3.28); com o auxílio de um multímetro, mede-se a intensidade de corrente que passa em cada célula; uma vez definida a intensidade de corrente, procede-se à correcção da voltagem de acordo com o Quadro 3.22 e mede-se a temperatura da solução anódica; através da consulta desse mesmo quadro, determina-se a duração do ensaio;
- após o final do ensaio, mede-se a temperatura da solução anódica e retiram-se os provetes das respectivas bandas;
- lavam-se os provetes com água corrente e retira-se o excesso de água com um pano húmido;
- finalmente, partem-se os provetes diametralmente, obtendo duas metades, que se fazem pulverizar por uma solução de nitrato de prata.



Figura 3.25 - Provetes no interior da bomba de vácuo



Figura 3.26 - Solução anódica e catódica

3.8.4.6. Resultados de ensaio

Cerca de 15 minutos após pulverizar o provete com a solução de nitrato de prata, observa-se uma fronteira clara que indica até onde migraram os iões cloreto. Com o auxílio de uma craveira, é possível obter a profundidade de penetração dos iões cloreto, dada pela média de 7 medições distanciadas de 10 mm desde o centro até aos bordos (Figura 3.29).

Por outro lado, o coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário é dado pela expressão:

$$D = \frac{0,0239 \times (273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times \left(x_d - 0,0238 \times \sqrt{\frac{(273+t) \times L \times x_d}{U-2}} \right) \quad (3.36)$$

onde,

D - coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

T - valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

L - espessura do provete, mm;

U - valor absoluto da voltagem aplicada, V;

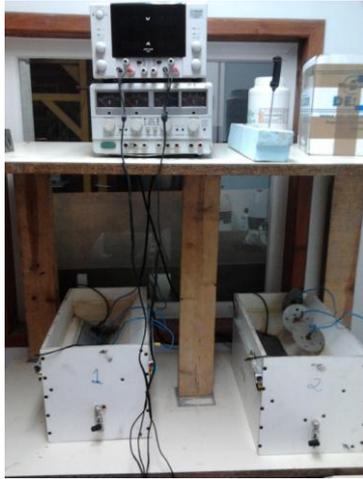
x_d - valor médio da profundidade de penetração, mm;

t - duração do ensaio, horas.

Quadro 3.22- Correção da voltagem

Intensidade de corrente inicial I_0, (com 30 V) (mA)	Voltagem aplicada (após ajuste) (V)	Intensidade de corrente inicial prevista após correção I_0 (mA)	Duração do ensaio, t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Desempenho em termos de durabilidade de betões de agregados
leves provenientes da trituração de pisos de betão leve



Figuras 3.27 e 3.28 - Equipamento para o ensaio de resistência à penetração de cloretos



Figura 3.29 - Profundidade de penetração de iões cloreto

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a campanha experimental e descritos no capítulo anterior.

O capítulo encontra-se organizado em três partes distintas. Em primeiro lugar, são analisados os ensaios correspondentes à caracterização dos agregados utilizados, de modo a compreender a influência que estes agregados podem ter nas das diversas composições do betão. Assim, são analisadas as seguintes propriedades: análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água, massa volúmica aparente, resistência ao esmagamento, teor em água, índice de forma e evolução da absorção de água ao longo do tempo.

A segunda fase corresponde à análise dos ensaios realizados ao betão no estado fresco, ensaio de abaixamento de Abrams e ensaio para a determinação da massa volúmica. Por último, são analisados os ensaios ao betão no estado endurecido, nomeadamente a retração e a durabilidade dos betões produzidos (absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à carbonatação e resistência à penetração de cloretos).

4.2. ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO DE AGREGADOS

Nesta primeira fase, são analisados os ensaios realizados aos agregados utilizados, tanto os naturais como os reciclados, procurando, sempre que possível, comparar com os resultados de outras investigações semelhantes.

4.2.1. Análise granulométrica

São apresentados, em seguida, os resultados das análises granulométricas efectuadas aos diferentes agregados. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000), conforme descrito em 3.6.1.

4.2.1.1. Areia fina

No Quadro 4.1, é apresentada a análise granulométrica da areia fina, bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.1, está representada a curva granulométrica da areia fina, numa escala logarítmica onde o eixo das abcissas representa o peneiro pelo qual passou o material e o eixo das ordenadas representa a percentagem de material passado em cada peneiro.

Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia fina

Peneiros (mm)	Areia fina		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	100,0	0,0
16	0,0	100,0	0,0
14	0,0	100,0	0,0
12,5	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	100,0	0,0
8	0,0	100,0	0,0
6,3	0,0	100,0	0,0
5,6	0,0	100,0	0,0
4	0,0	100,0	0,0
2	0,5	99,9	0,1
1	1,0	99,7	0,3
0,5	32,0	94,8	5,2
0,25	492,5	18,3	81,7
0,125	115,9	0,3	99,7
0,063	1,3	0,1	99,9
Refugo	0,5	-	-
	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)		0,5
	$D_{m\acute{i}n}$ (mm)		0,25
	M.F.		1,87

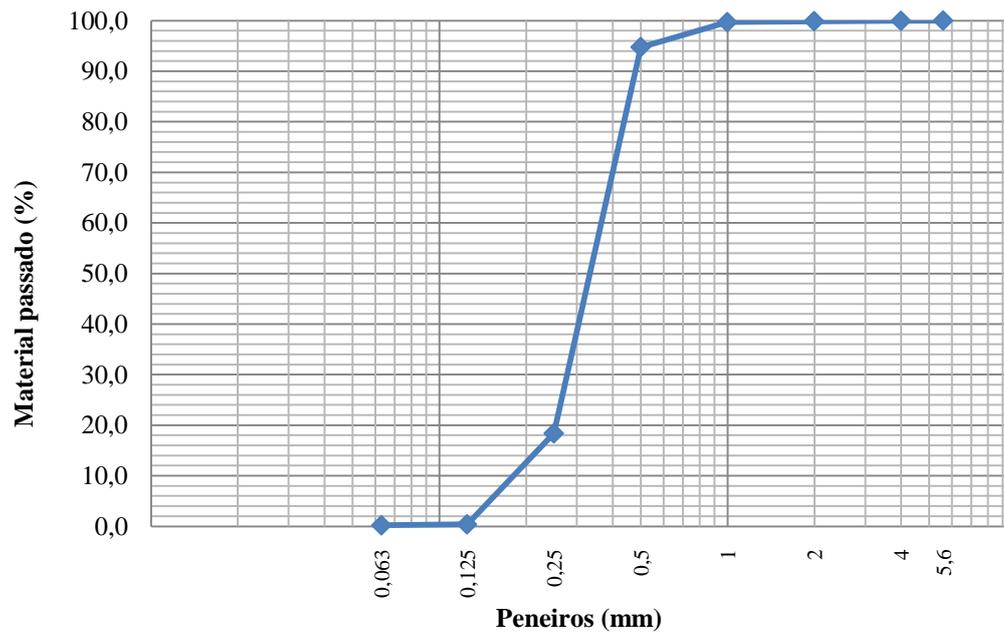


Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia fina

4.2.1.2. Areia grossa

No Quadro 4.2, é apresentada a análise granulométrica da areia grossa, bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.2, está representada a curva granulométrica da areia grossa.

Quadro 4.2 - Análise granulométrica da areia grossa

Peneiros (mm)	Areia grossa		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	100,0	0,0
16	0,0	100,0	0,0
14	0,0	100,0	0,0
12,5	0,0	100,0	0,0
11,2	0,0	100,0	0,0
8	0,0	100,0	0,0
6,3	2,2	99,7	0,3
5,6	3,1	99,3	0,7
4	12,2	97,7	2,3
2	81,0	86,8	13,2
1	261,2	51,8	48,2
0,5	285,7	13,5	86,5
0,25	76,0	3,3	96,7
0,125	19,1	0,7	99,3
0,063	4,1	0,2	99,8
Refugo	1,4	-	-
	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)		4
	$D_{m\acute{i}n}$ (mm)		0,5
	M.F.		3,47

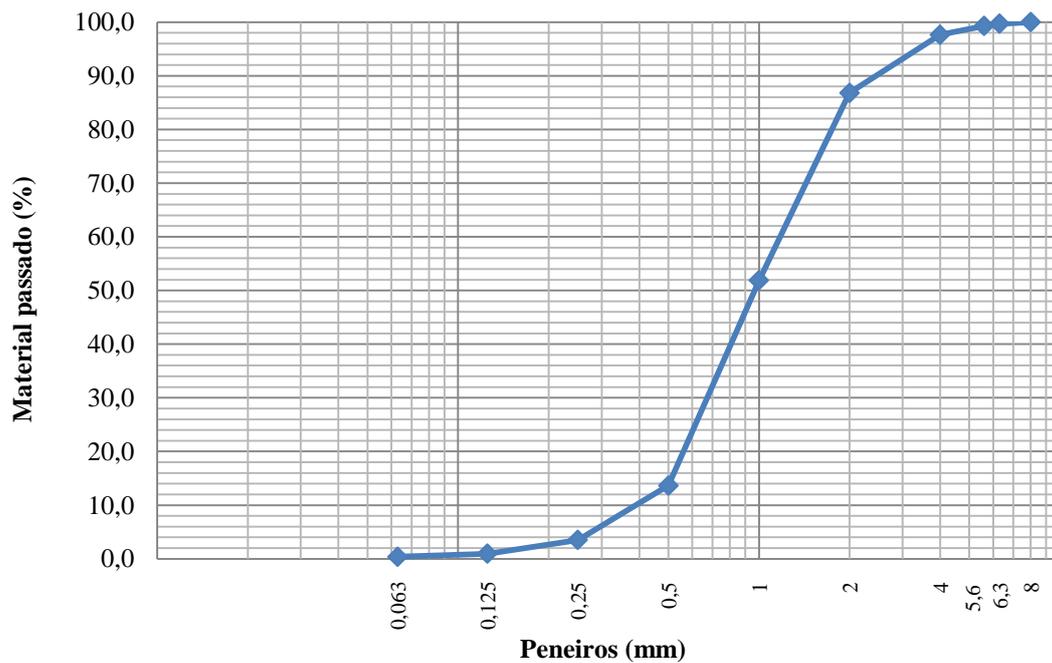


Figura 4.2 - Curva granulométrica da areia grossa

4.2.1.3. Leca HD

No Quadro 4.3, é apresentada a análise granulométrica da leca HD, bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.3, está representada a curva granulométrica da leca HD.

Quadro 4.3 - Análise granulométrica da Leca HD

Peneiros (mm)	Leca HD		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	100,0	0,0
16	0,0	100,0	0,0
14	0,0	100,0	0,0
12,5	17,1	98,7	1,3
11,2	69,2	93,6	6,4
8	272,3	73,6	26,4
6,3	274,5	53,4	46,6
5,6	164,7	41,3	58,7
4	474,9	6,4	93,6
2	81,2	0,4	99,6
1	2,3	0,2	99,8
0,5	1,0	0,2	99,8
0,25	0,4	0,1	99,9
0,125	0,5	0,1	99,9
0,063	0,8	0,1	99,9
Refugo	0,2	-	-
	$D_{máx}$ (mm)		11,2
	$D_{mín}$ (mm)		4
	M.F.		6,67

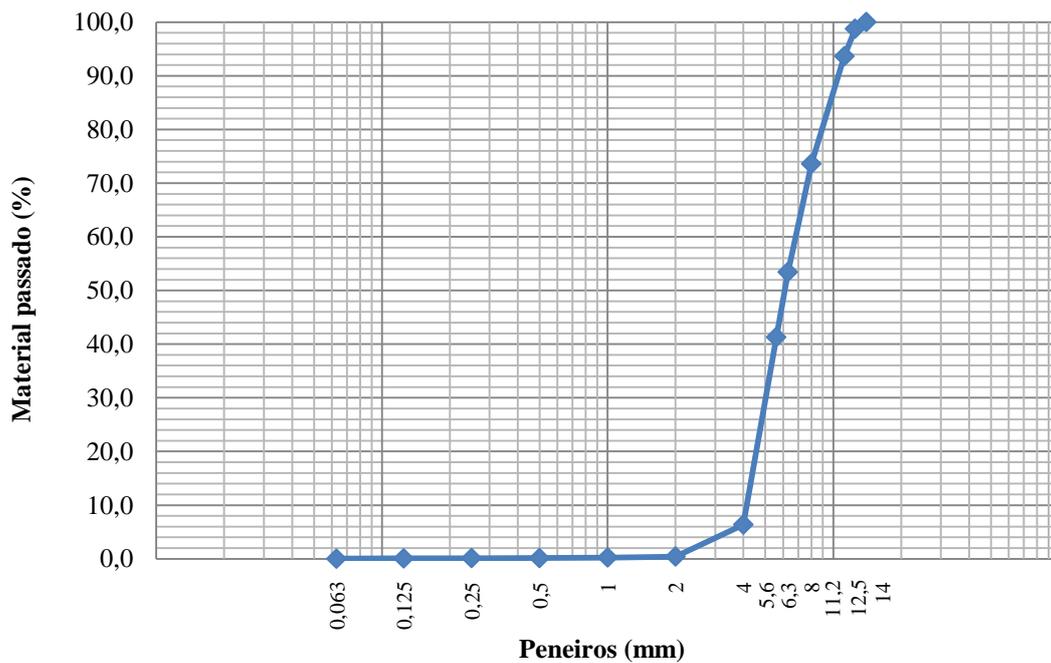


Figura 4.3 - Curva granulométrica da leca HD

4.2.1.4. Leca M

No Quadro 4.4, é apresentada a análise granulométrica da leca M, bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.4, está representada a curva granulométrica da leca M.

Quadro 4.4 - Análise granulométrica da leca M

Peneiros (mm)	Leca M		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	0,0	100,0	0,0
16	0,0	100,0	0,0
14	0,0	100,0	0,0
12,5	23,4	98,4	1,6
11,2	74,5	93,4	6,6
8	361,1	68,8	31,2
6,3	276,8	50,0	50,0
5,6	179,2	37,9	62,1
4	507,2	3,4	96,6
2	45,0	0,4	99,6
1	1,6	0,3	99,7
0,5	1,4	0,2	99,8
0,25	0,6	0,1	99,9
0,125	0,3	0,1	99,9
0,063	0,8	0,1	99,9
Refugo	0,7	-	-
	$D_{máx}$ (mm)		11,2
	$D_{mín}$ (mm)		4
	M.F.		6,78

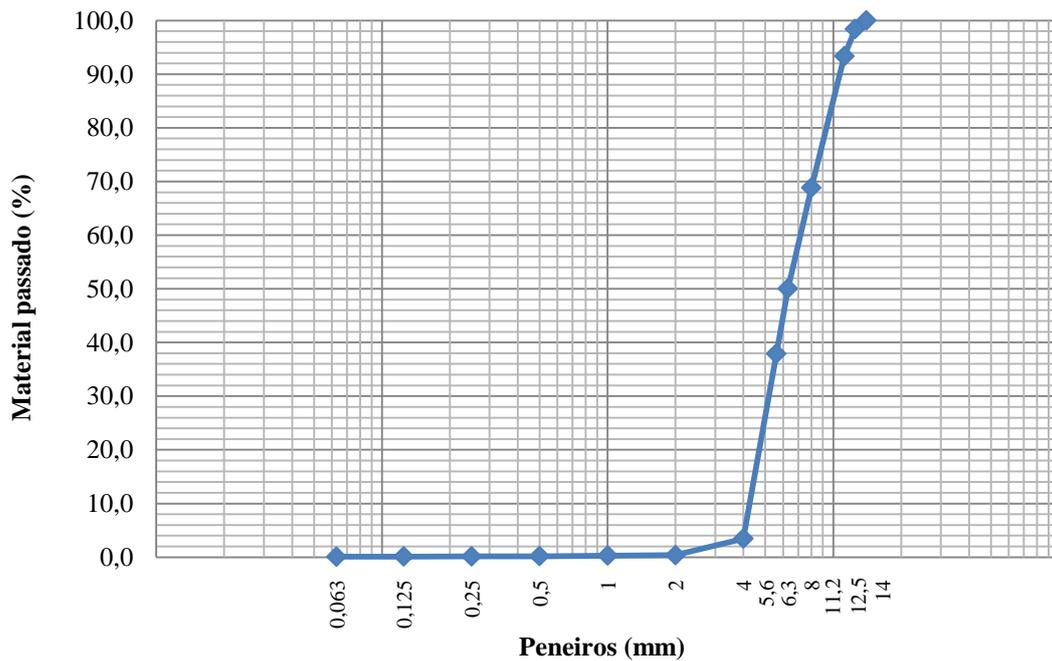


Figura 4.4 - Curva granulométrica da leca M

4.2.1.5. Reciclados de betão com leca HD

No Quadro 4.5, é apresentada a análise granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca HD (RLHD), bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.5, está representada a curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca HD.

Quadro 4.5 - Análise granulométrica de RLHD

Peneiros (mm)	RLHD		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	21,4	99,2	0,7
16	69,6	96,5	3,3
14	358,7	82,9	17,0
12,5	207,2	75,0	25,0
11,2	165,9	68,6	31,4
8	589,7	46,2	53,8
6,3	325,5	33,8	66,2
5,6	135,7	28,6	71,4
4	227,7	19,9	80,1
2	230,0	11,2	88,8
1	123,9	6,4	93,6
0,5	83,5	3,3	96,7
0,25	32,8	2,0	98,0
0,125	15,5	1,4	98,6
0,063	18,0	0,8	99,3
Refugo	19,0	-	-
	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)		16
	$D_{m\acute{i}n}$ (mm)		0,5
	M.F.		7,19

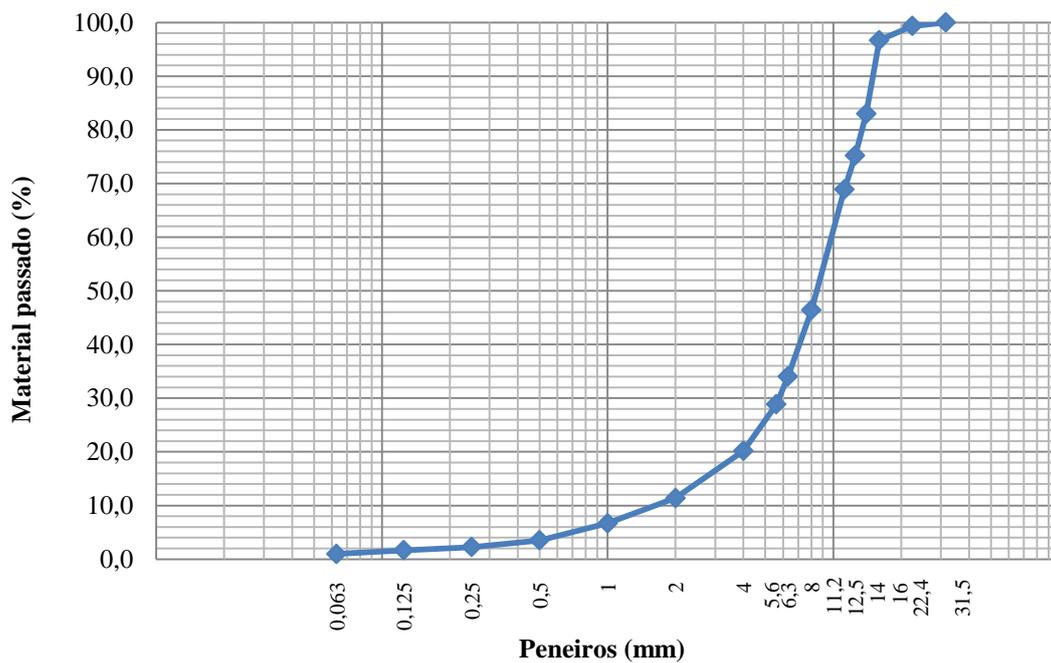


Figura 4.5 - Curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca HD

4.2.1.6. Reciclados de betão com leca M

No Quadro 4.6, é apresentada a análise granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca M (RLM), bem como as dimensões máximas e mínimas e o módulo de finura do agregado.

Na Figura 4.6, está representada a curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca M.

Quadro 4.6- Análise granulométrica de RLM

Peneiros (mm)	RLM		
	Resíduo (g)	Passado acumulado (%)	Retido acumulado (%)
31,5	0,0	100,0	0,0
22,4	11,6	99,6	0,4
16	55,4	97,4	2,6
14	357,6	83,7	16,3
12,5	242,9	74,4	25,6
11,2	182,0	67,5	32,5
8	380,8	52,9	47,1
6,3	247,9	43,4	56,6
5,6	92,6	39,8	60,2
4	203,9	32,0	68,0
2	313,2	20,0	80,0
1	234,9	11,0	89,0
0,5	111,6	6,7	93,3
0,25	75,8	3,8	96,2
0,125	41,1	2,2	97,8
0,063	34,4	0,9	99,1
Refugo	20,1	-	-
$D_{m\acute{a}x}$ (mm)			16
$D_{m\acute{i}n}$ (mm)			0,25
M.F.			6,72

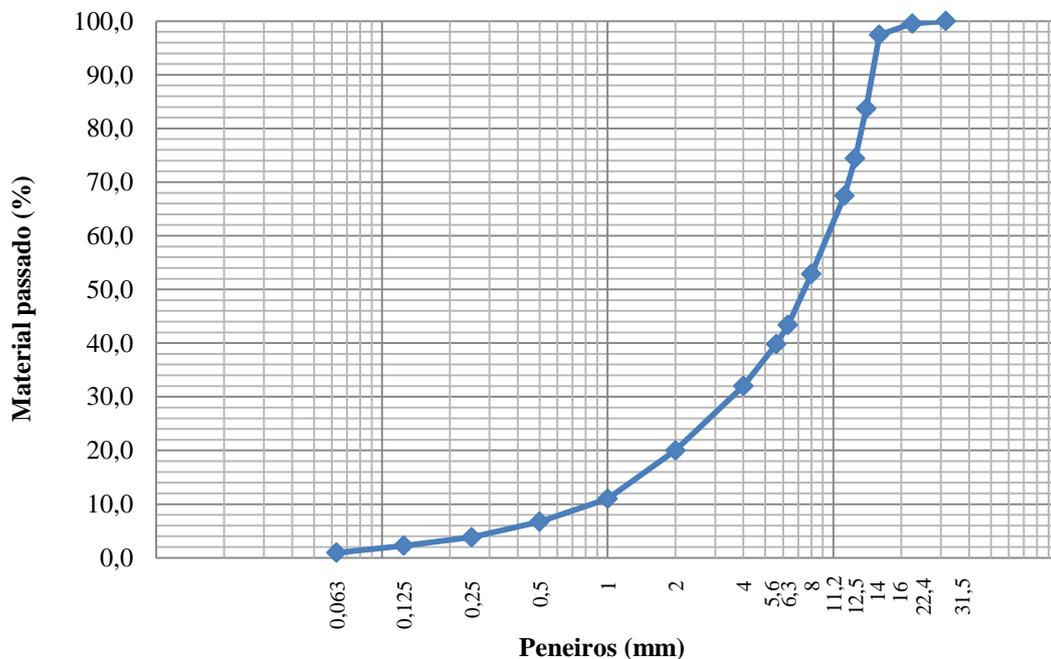


Figura 4.6 - Curva granulométrica dos agregados reciclados de betão com leca M.

4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

A determinação destas propriedades tem importância no controlo de trabalhabilidade e no cálculo da quantidade, em peso, dos agregados a incorporar no betão. O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.6.2. No Quadro 4.7, podem ser consultados os resultados obtidos para os diferentes agregados utilizados. No ANEXO D, são apresentados todos os cálculos efectuados.

Quadro 4.7 - Resultados obtidos para a massa volúmica e absorção de água

Material	Massa volúmica impermeável (kg/m ³)	Massa volúmica saturada (kg/m ³)	Massa volúmica seca (kg/m ³)	Absorção às 24 horas (%)
Areia fina	2617	2609	2604	0,2
Areia grossa	2625	2615	2610	0,2
Leca HD	1266	1229	1092	12,6
Leca M	690	732	595	23,2
RLHD	2385	2007	1735	15,7
RLM	1183	1136	878	29,4

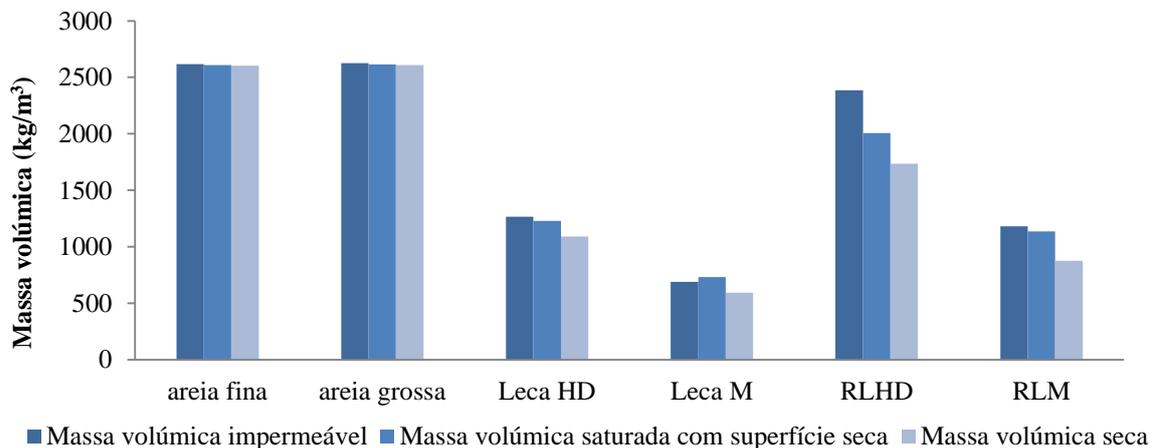


Figura 4.7 - Valores das massas volúmicas de cada material

No que se refere aos agregados leves de argila expandida, observa-se uma massa volúmica seca a rondar 1090 kg/m³ para a leca estrutural HD, de forma similar aos valores registados na campanha de Bogas (2011) e dentro dos valores facultados pelo fornecedor (1080 ± 150 kg/m³) e 595 kg/m³ para a leca M não estrutural que, igualmente, se encontra dentro do valor esperado 550 kg/m³ ± 15% (dados do fornecedor).

Por fim, pode verificar-se, tal como esperado, um aumento da massa volúmica seca por parte dos agregados reciclados de betão leve em cerca de 65%. Estes resultados estão de acordo com a campanha de Kralj (2009), na qual o autor verificou o aumento da massa volúmica dos agregados reciclados de betão com vidro expandido. De facto, a massa volúmica dos agregados reciclados corresponde à massa volúmica do betão de origem, que incorpora argamassa na sua constituição. Dado que o betão de origem com leca M foi produzido sem finos (betão de enchimento), as diferenças de massa volúmica entre o RLM e a leca M são inferiores às observadas entre o RLHD e a leca HD.

Como referido em 2.3.2, a principal razão para este fenómeno passa pela presença de pasta nos agregados reciclados, provocando assim um aumento significativo da sua massa. Este aspecto difere bastante dos agregados reciclados de massa volúmica normal, uma vez que estes tendem a apresentar massas volúmicas menores face aos agregados naturais, ou seja, seguem uma tendência contrária, pois os agregados naturais (brita) apresentam uma massa volúmica maior do que a argamassa que os envolve.

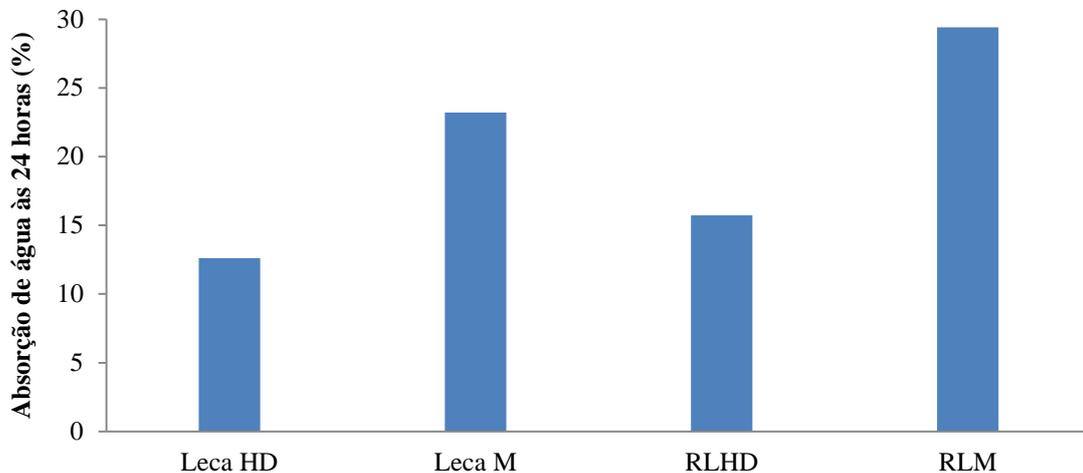


Figura 4.8 - Absorção de água às 24h dos agregados leves e reciclados

Na Figura 4.8, é possível observar e comparar os resultados obtidos na absorção de água às 24 horas por parte dos agregados leves e reciclados. Quanto aos agregados não reciclados, observa-se que a leca HD e a leca M apresentam valores de absorção de 12,61 e 23,22%, respectivamente. Estes valores estão, dentro dos valores registados nas fichas técnicas dos materiais em causa (ANEXO B). A absorção obtida para a leca estrutural está ainda de acordo com os valores documentados na campanha de Bogas (2011) e no projecto EuroLightCon R7 (2000), em agregados de idênticas características.

Tal como esperado, verifica-se que a absorção de água da leca estrutural é menor do que a da leca não estrutural. Esta diferença está directamente relacionada com a massa volúmica do agregado em causa, uma vez que o agregado com menor massa volúmica apresenta maior porosidade, o que conduz a um aumento da absorção de água.

No que se refere aos agregados reciclados, observa-se, tal como esperado, um aumento da absorção de água nos dois agregados. Este aumento foi de 3,11% no caso dos agregados reciclados de leca HD e 6,19% nos agregados reciclados de leca M. Estes aumentos da absorção devem-se não só à maior percentagem de agregados leves partidos, que expõem o interior bastante poroso dos agregados em causa, mas também devido à argamassa que envolve o agregado reciclado, que contribui para aumentar a absorção de água do agregado. Podia ser esperado um aumento semelhante da absorção por parte dos dois agregados reciclados face aos seus homólogos de origem. Uma possível justificação para tal não ocorrer poderá ser o aumento mais significativo da massa volúmica do agregado reciclado de betão com leca HD, o que se deve a uma maior taxa de incorporação de argamassa neste agregado reciclado.

4.2.3. Massa volúmica aparente

De acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.6.3, realizou-se o ensaio para a determinação da massa volúmica aparente (baridade) de cada agregado. No ANEXO E, apresentam-se de forma mais detalhada os ensaios realizados.

No Quadro 4.8, expõem-se os resultados obtidos.

Quadro 4.8 - Resultados obtidos para a massa volúmica aparente

Material	Massa volúmica aparente (kg/m³)
<i>Areia fina</i>	1494
<i>Areia grossa</i>	1493
<i>Leca HD</i>	681
<i>Leca M</i>	339
<i>RLHD</i>	1000
<i>RLM</i>	463

Pela análise dos resultados obtidos, observa-se uma grande semelhança na baridade dos agregados naturais finos, com ambos os valores perto de 1500 kg/m³.

Os agregados leves de leca HD e leca M apresentam baridades iguais a 681 e 339 kg/m³, respectivamente. Estes valores estão dentro da gama de valores esperados, como se pode consultar nas fichas técnicas dos produtos, facultadas pelo fornecedor.

Tal como no subcapítulo anterior (4.2.2.), verifica-se um aumento da massa volúmica aparente dos agregados reciclados, sendo mais evidente nos RLHD. Este aumento pode, novamente, ser justificado pelo facto de a argamassa aderida aos AL ter uma massa volúmica bastante superior à dos próprios AL.

Nota-se um aumento mais significativo por parte dos RLHD devido ao facto de este agregado apresentar uma percentagem de argamassa aderida superior em relação aos RLM (produzidos a partir de um betão de enchimento, sem finos).

No ANEXO F encontram-se todos os cálculos que permitiram estimar, de acordo com as Eq. 4.1 e 4.2, a percentagem de agregado leve original e percentagem de argamassa (RLHD) ou pasta (RLM) presentes nos agregados.

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

4.2.4. Resistência ao esmagamento

Nos betões leves, a rotura destes é geralmente afectada pela capacidade resistente dos agregados que o constituem. Assim, a resistência do agregado influencia a resistência.

A resistência ao esmagamento foi obtida de acordo com a norma EN 13055-1. No Quadro 4.9, são apresentados os resultados obtidos. No ANEXO G, encontram-se todos os valores obtidos para uma melhor análise do ensaio.

Quadro 4.9 - Resultados obtidos para a resistência ao esmagamento

Agregado	Resistência (MPa)
<i>Leca HD</i>	5,71
<i>Leca M</i>	1,20
<i>RLHD</i>	7,55
<i>RLM</i>	1,95

Pela análise dos resultados obtidos, verifica-se que, como esperado, o RLHD é o agregado que apresenta maior resistência ao esmagamento. A grande quantidade de argamassa aderida à leca HD aumenta a resistência do agregado, ao contrário do que se passa com os agregados reciclados de betão convencional, em que ocorre uma diminuição da resistência, devido à menor capacidade resistente da argamassa face aos agregados naturais (Amorim e Fonseca, 2008).

Da mesma forma, o RLM também regista maior resistência face à leca M. Uma vez mais, este fenómeno deve-se à pasta aderida ao agregado, que o confina e torna mais resistente.

4.2.5. Teor em água

Como referido, a determinação deste parâmetro é fundamental para perceber quais serão os acertos a efectuar durante a fase de betonagem, pois é necessário ter em conta a presença de água no interior dos agregados.

No Quadro 4.10, são apresentados os resultados médios obtidos depois do ensaio. No ANEXO H, encontram-se todos os dados obtidos para uma análise mais detalhada do ensaio.

Quadro 4.10 - Resultados médios obtidos para o teor em água

Material	Teor em água (%)
<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

Notou-se um elevado teor em água por parte dos AF quando foram fornecidos. Assim, torna-se necessário ter em conta o elevado teor de água destes materiais no cálculo da quantidade de água a utilizar na amassadura.

Tal como esperado, tanto os agregados leves como os reciclados apresentam elevados valores de teor em água, entre 4 e 6%. Assim, antes da realização de cada betonagem, procedeu-se ao controlo destes valores, de modo a prevenir o excesso de água na amassadura.

4.2.6. Índice de forma

O ensaio de índice de forma foi realizado de acordo com o exposto no subcapítulo 3.6.6. Este ensaio permite caracterizar a forma das partículas. Assim, pretende-se com este ensaio determinar a percentagem de partículas não cúbicas existentes no agregado.

De facto, uma elevada percentagem de partículas não cúbicas implica um arranjo mais deficiente por parte do agregado, o que pode provocar diferentes níveis de compactação e consistência no betão produzido.

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 4.11. No ANEXO I, são apresentados todos os valores obtidos para uma melhor análise do ensaio.

Não se efectuou o ensaio para os agregados de leca, uma vez que estes apresentam uma forma, essencialmente, arredondada, pelo que a percentagem de partículas não cúbicas nestes agregados é praticamente nula.

Quadro 4.11 - Resultados obtidos para o 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

Como se pode observar no Quadro 4.11, o RLHD apresenta um índice de forma superior ao RLM. O elevado índice de forma do RLHD deve-se à forma mais alongada deste agregado, que é característica dos agregados reciclados de betão, como se pode comprovar por outras investigações, tais como Brito e Matias (2005) e Amorim e Fonseca (2008).

Por outro lado, o facto de o RLM ser produzido a partir de uma betão de enchimento, ou seja, sem finos e com uma dosagem de cimento baixa, permite que este, ao ser triturado, se mantenha com uma forma semelhante ao agregado natural de leca M e, por consequência, apresente uma forma menos alongada do que o RLHD.

4.2.7. Evolução da absorção de água

É certo que uma das características associadas aos agregados leves e aos agregados reciclados é a absorção de água. Deste modo, torna-se necessário examinar com um maior detalhe a evolução da absorção nestes agregados.

O exposto no presente subcapítulo pretende analisar esta propriedade nos agregados em causa. Tal como descrito no subcapítulo 3.6.7, foi adoptado o ensaio realizado na campanha de Bogas (2011).

No ANEXO J, encontram-se todos os valores obtidos para uma melhor análise do ensaio.

4.2.7.1. Agregados não reciclados

No Quadro 4.12 e na Figura 4.9, encontram-se os resultados obtidos para os agregados não reciclados.

Como se pode verificar, a absorção de água inicial na leca HD (até cerca de 30 min) é bastante elevada e tende a ser mais lenta após este período. De facto pela análise do Quadro 4.11, aos 10 minutos, regista-se uma absorção de 7,19%, o que corresponde a mais de 50% da absorção total registada às 24 horas. Estes resultados estão de acordo com o esperado e a elevada absorção inicial prende-se, sobretudo, com a elevada porosidade características deste tipo de agregados.

Quadro 4.12 - Evolução da absorção de água dos agregados primários

Leitura (min)	Leca HD Absorção (%)	Leca M Absorção (%)
3	5,30	12,90
5	6,20	15,22
10	7,19	17,54
20	8,23	19,61
30	9,28	21,17
60	10,43	22,53
120	12,20	23,08
1440	12,67	23,39

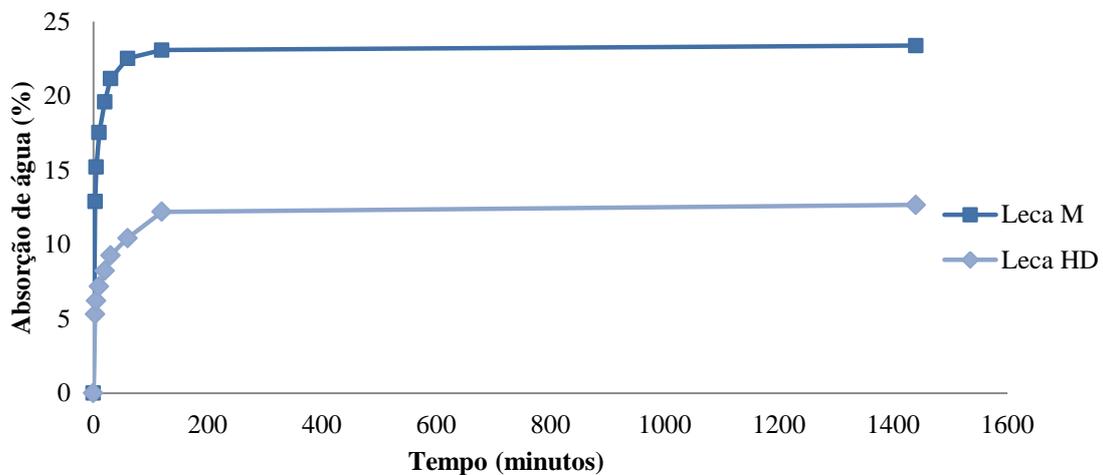


Figura 4.9 - Evolução da absorção de água dos agregados primários

A elevada porosidade na estrutura interior destes agregados poderia indicar uma absorção de água bastante superior à registada. Desta forma, fica comprovada a grande importância da película exterior que envolve o agregado, na redução da absorção de água.

Aos 30 minutos, verifica-se uma absorção de cerca 74% da absorção total e, a partir deste período de tempo, observa-se uma diminuição da absorção de água até à segunda hora de ensaio, a partir da qual a absorção é pouco significativa.

Os resultados obtidos são da mesma ordem dos resultados registados por Bogas (2011). O autor regista uma absorção às 24 horas de 12,3%.

A leca M, apesar de apresentar uma absorção final superior à leca HD, segue uma tendência semelhante, ou seja, observa-se uma absorção inicial elevada devido à porosidade presente no agregado (Figura 4.9). No entanto, observa-se uma absorção inicial ligeiramente superior, que pode ser explicada pela maior porosidade superficial deste agregado face à leca HD.

Como se pode verificar pelo Quadro 4.12 e pela Figura 4.9, aos 5 minutos, regista-se uma absorção de mais de 60% da absorção total às 24 horas, enquanto à meia hora de ensaio o agregado atinge cerca de 90% da absorção às 24 horas.

4.2.7.2. Agregados reciclados

No Quadro 4.13 e na Figura 4.10, encontram-se os resultados obtidos para os agregados reciclados.

Quadro 4.13 - Evolução da absorção de água dos agregados reciclados

Leitura (min)	RLHD Absorção (%)	RLM Absorção (%)
3	11,10	19,00
5	11,95	21,02
10	12,80	23,43
20	13,02	25,34
30	13,15	26,36
60	13,82	27,35
120	14,18	27,76
1440	14,36	28,05

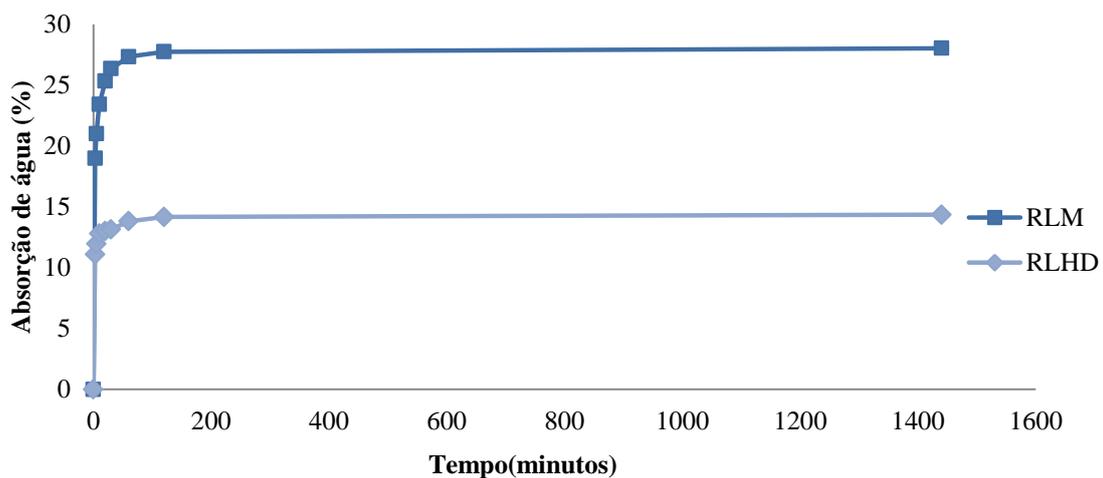


Figura 4.10 - Evolução da absorção de água dos agregados reciclados

Como se pode verificar uma vez mais, a absorção de água inicial no RLHD (até cerca de 30 min) é bastante elevada e tende a ser mais lenta após este período. De facto, pela análise do Quadro 4.13, logo aos 5 minutos, regista-se uma absorção de 11,95%, o que corresponde a mais de 80% da absorção total registada às 24 horas. Estes resultados estão de acordo com o esperado e a elevada absorção inicial prende-se, novamente, com a elevada porosidade características deste tipo de agregados.

Comparando estes resultados com aqueles obtidos para a leca HD, verifica-se que os agregados reciclados tendem em apresentar absorções iniciais mais elevadas. O elevado número de partículas partidas de leca, ou seja, partículas que perderam a película exterior durante o processo de britagem, em conjunto com a argamassa aderida, são os principais factores que justificam este fenómeno.

Estes resultados estão em conformidade com outros obtidos noutras investigações, em que se testou a incorporação de agregados reciclados no betão, tais como Leite (2001) e Amorim e Fonseca (2009), onde se observa uma absorção inicial bastante elevada por parte dos agregados reciclados de betão,

embora neste caso a absorção se deva, essencialmente, à quantidade de argamassa aderida ao agregado natural.

Tal como nos resultados obtidos para o RLHD, na Figura 4.10 regista-se uma absorção de água inicial (até cerca de 30 min) bastante elevada com tendência a ser mais lenta após este período, no RLM. Analisando o Quadro 4.13, é possível verificar que, aos 5 minutos, se regista uma absorção de 21,02%, que corresponde a cerca de 75% da absorção total registada às 24 horas e, aos 30 minutos, o agregado absorve cerca de 90% da sua capacidade total. Estes resultados estão de acordo com o esperado e a elevada absorção inicial prende-se, sobretudo, com a elevada porosidade característica deste tipo de agregados.

4.3. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Neste subcapítulo, é estudado o comportamento do betão produzido no estado fresco. Os ensaios realizados nesta fase da campanha correspondem à determinação da trabalhabilidade e da massa volúmica fresca do betão.

4.3.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

Conforme referido no subcapítulo 3.7.1, foi efectuado o ensaio de abaixamento, de modo a medir a trabalhabilidade dos betões produzidos. Com o objectivo de se atingir um betão de classe S3 de consistência, fixou-se um abaixamento de 125 ± 10 mm.

Na Figura 4.11 e no Quadro 4.14, são apresentados os resultados obtidos.

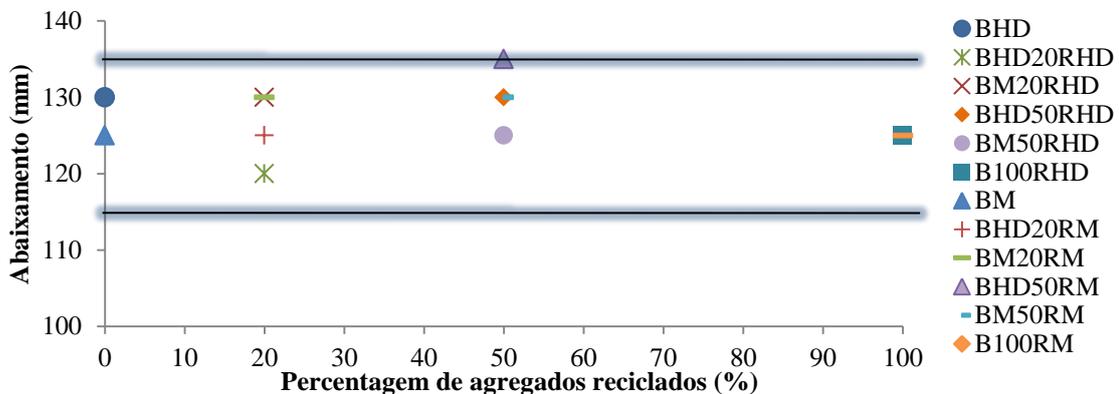


Figura 4.11 - Valores de abaixamento

Quadro 4.14 - Valores de abaixamento e relação a/c

Composição de betão	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Composição de betão	Abaixamento (mm)	Relação a/c
BHD	130	0,55	BM	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

Pela análise dos resultados, verifica-se que todas as amassaduras registaram um abaixamento dentro do intervalo definido, sem recorrer a eventuais correcções da relação a/c.

Apesar dos ensaios de controlo efectuados antes de cada betonagem (absorção aos 30 min e teor em água), é difícil prever com rigor a quantidade de água total, de modo a não afectar a relação a/c efectiva. Este poderá ser o principal factor para o valor um pouco mais elevado do abaixamento do betão BHD50RM.

Verifica-se, ainda, que o abaixamento é afectado pelas diferenças de massa volúmica dos betões. Ao observar as composições BHRHD, nota-se uma maior trabalhabilidade do betão de referência, com um abaixamento de 130 mm, em relação aos betões BHD20/50/100RHD, onde se obtêm abaixamentos semelhantes para massas volúmicas superiores.

Esta verificação está de acordo com os resultados do projecto EuroLightCon R12 (2000), que conclui que a absorção de água dos agregados leves pode provocar pequenas variações na trabalhabilidade do betão, bem como com a campanha de Bogas (2011).

4.3.2. Massa volúmica

A determinação da massa volúmica no estado fresco segue a metodologia referida em 3.7.2. No Quadro 4.15, são apresentados os resultados obtidos para as diversas composições produzidas.

Quadro 4.15 - Massa volúmica do estado fresco

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m³)	Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m³)
<i>BHD</i>	1896	<i>BM</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>	1896	<i>BM50RM</i>	1809
<i>B100RHD</i>	2092	<i>B100RM</i>	1842

Analisando os resultados obtidos, observa-se o aumento da massa volúmica à medida que se incorpora material reciclado. Este fenómeno era expectável, uma vez que a massa volúmica dos materiais reciclados é superior à dos agregados leves naturais.

Como se pode verificar pela Figura 4.12, existe uma tendência praticamente linear no aumento da massa volúmica fresca à medida que se substituem os agregados leves por agregados RLHD. Nota-se pelos declives das linhas de tendência que as composições com leca M apresentam um maior aumento de massa volúmica, facto justificável pela maior diferença entre a massa volúmica seca deste agregado e a do agregado reciclado RLHD (594 e 1735 kg/m³, respectivamente).

Por outro lado, as composições com leca HD, apesar de apresentarem um aumento menos significativo, registam massas volúmicas elevadas. Assim, pode concluir-se que a incorporação de RLHD no betão pode aumentar, em excesso, a massa volúmica do betão produzido. No entanto, a massa volúmica seca deste betão deverá estar dentro dos limites definidos na norma EN NP 206-1, conforme demonstram os valores de cálculo apresentados no ANEXO L.

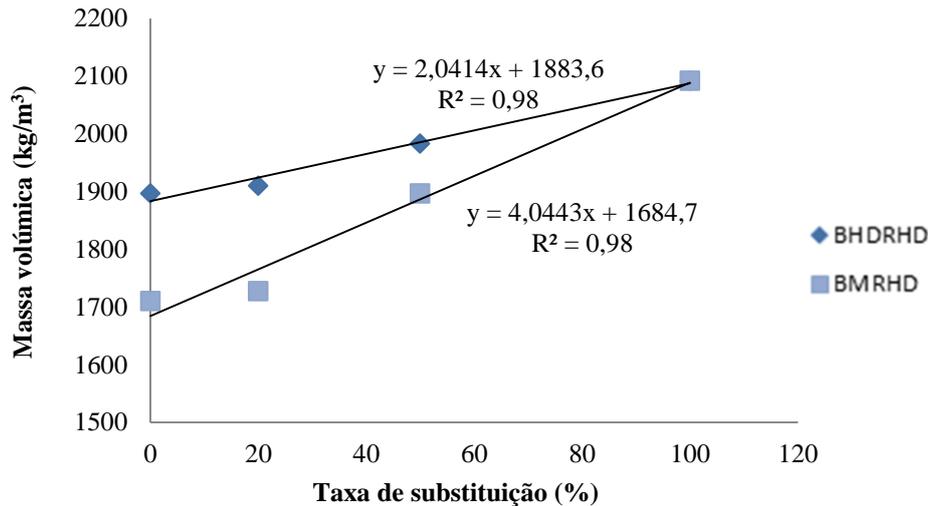


Figura 4.12 - Massa volúmica fresca das composições com RLHD

Quadro 4.16 - Massa volúmica e variação de massa nas composições com RLHD

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Taxa de incorporação de RLHD (%)	Variação de massa (%)
BHD	1896	0	0,0
BHD20RHD	1910	20	0,7
BHD50RHD	1983	50	4,6
B100RHD	2092	100	10,3
BM	1710	0	0,0
BM20RHD	1728	20	1,0
BM50RHD	1896	50	10,9
B100RHD	2092	100	22,3

No Quadro 4.16, apresenta-se a variação de massa volúmica consoante a taxa de substituição de RLHD em relação aos betões de origem BHD e BM, onde se pode verificar que a total substituição de RLHD no betão provoca um aumento de 22,3% em relação ao betão de referência BM, ao passo que, comparando com o BHD, esse aumento é de apenas 10,3%.

Na Figura 4.13, é possível observar, mais uma vez, o aumento da massa volúmica fresca à medida que se substituem os agregados leves de leca M por agregados RLM. A maior massa volúmica do agregado reciclado face ao agregado leve é a principal causa para este efeito. No entanto, o mesmo não sucede quando se substitui a leca HD. De facto, a leca HD apresenta uma massa volúmica superior à do RLM, pelo que, neste caso, esta propriedade tende a diminuir à medida que se incorpora o material reciclado.

Devido às massas volúmicas da leca HD (1092 kg/m³) e do RLM (877 kg/m³) serem semelhantes, não se verifica uma grande variação de massa volúmica do BHD para o B100RM (Quadro 4.17).

À excepção das composições em que se substituiu leca HD por RLM, todos os restantes resultados estão em conformidade com a campanha de Kralj (2009). O autor observa, igualmente, um aumento da massa volúmica dos betões à medida que incorpora material reciclado de betão leve.

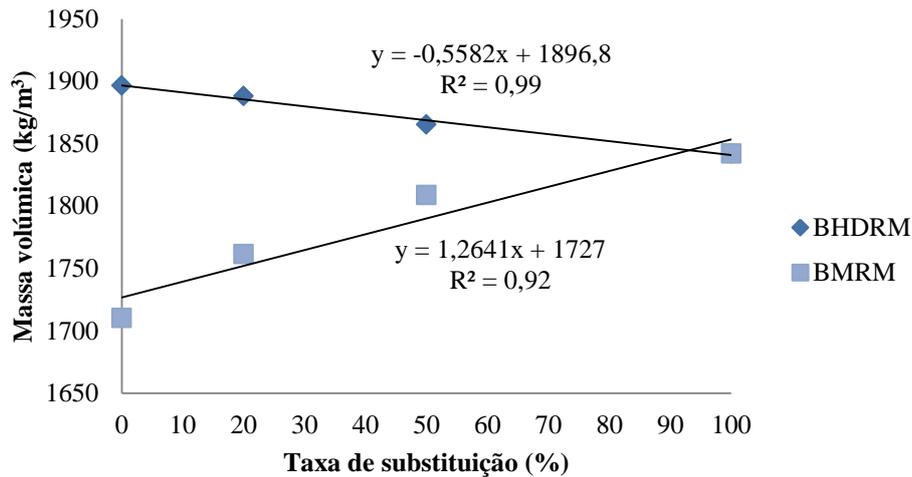


Figura 4.13 - Massa volúmica fresca das composições com RLM

Quadro 4.17 - Massa volúmica e variação de massa para betões com RLM

Composição de betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Taxa de incorporação de RLM (%)	Variação de massa (%)
<i>BHD</i>	1896	0	0,0
<i>BHD20RM</i>	1888	20	-0,4
<i>BHD50RM</i>	1866	50	-1,6
<i>B100RM</i>	1842	100	-2,9
<i>BM</i>	1710	0	0,0
<i>BM20RM</i>	1761	20	3,0
<i>BM50RM</i>	1809	50	5,8
<i>B100RM</i>	1842	100	7,7

Torna-se necessário referir que esta característica dos betões com ARBL difere bastante quando comparados com betões com agregados reciclados de betão de massa volúmica normal. De facto, o betão produzido com ARB tende a apresentar um decréscimo da massa volúmica à medida que a taxa de substituição de AN por ARB aumenta, conforme observado por Leite (2001), Matias e Brito (2005), Evangelista (2007), Fonseca e Amorim (2008).

Da mesma forma, a substituição de AN por agregados leves reciclados (ALR), como plástico ou borracha, também, segue uma tendência idêntica, contrariamente aos resultados obtidos na presente investigação (Kou *et al.*, 2008; Lima *et al.*, 2009; Akcaozoglu *et al.*, 2009; Bravo, 2009; Silva, 2012).

4.4. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Por fim, são analisados os ensaios dos betões no estado endurecido, procurando, sempre que possível, comparar os resultados com os de outras investigações semelhantes. As propriedades dos betões no estado endurecido a estudar são a retração, a absorção de água por capilaridade e por imersão, a resistência à carbonatação e, finalmente, a resistência à penetração de cloretos.

A análise destes resultados encontra-se dividida em duas fases. A primeira fase corresponde aos ensaios realizados sobre as composições de betão com agregados RLHD e a segunda fase às composições de betão com RLM.

Para futura comparação entre propriedades, achou-se conveniente a introdução dos valores de resistência à compressão aos 28 dias provenientes da dissertação paralela a esta, elaborada por José Maria Guedes, bem como os valores da massa volúmica no estado endurecido, aos 28 dias.

4.4.1. Resistência à compressão aos 28 dias e massa volúmica no estado endurecido

O ensaio da determinação da resistência à compressão foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 (2003).

Quadro 4.18 - Resistência média à compressão aos 28 dias e massa volúmica no estado endurecido

Composição de betão	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Variação (%)	Massa volúmica aos 28 dias (kg/m³)	Variação (%)	Taxa de incorporação de agregados reciclados (%)
<i>BHD</i>	38,4	0,0	1847	0,0	0
<i>BHD20RHD</i>	40,4	5,2	1891	2,4	20
<i>BHD50RHD</i>	43,1	12,2	1961	6,1	50
<i>B100RHD</i>	43,7	13,8	2024	9,6	100
<i>BM</i>	19,2	0,0	1605	0,0	0
<i>BM20RHD</i>	26,4	37,5	1688	5,1	20
<i>BM50RHD</i>	30,7	59,9	1834	14,3	50
<i>B100RHD</i>	43,7	127,6	2024	26,1	100
<i>BHD</i>	38,4	0,0	1847	0,0	0
<i>BHD20RM</i>	38,5	0,2	1842	-0,3	20
<i>BHD50RM</i>	36,3	-5,5	1817	-1,7	50
<i>B100RM</i>	33,4	-13,0	1768	-4,3	100
<i>BM</i>	19,2	0,0	1605	0,0	0
<i>BM20RM</i>	25,1	30,7	1667	3,8	20
<i>BM50RM</i>	27,7	44,3	1709	6,5	50
<i>B100RM</i>	33,4	74,0	1768	10,2	100

No ANEXO K, são apresentados os restantes valores de resistência à compressão, aos 7, 28 e 91 dias. No Quadro 4.18, são apresentados os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias e os valores da massa volúmica endurecida obtidos durante esta investigação, a partir de cinco espécimes de ensaio por cada composição.

Da mesma forma, considerou-se útil apresentar os valores da massa volúmica do betão no estado endurecido. Estes dados tornam-se úteis como objecto de comparação entre dos valores os resultados obtidos.

O ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 12390-7 (2003). No ANEXO L, encontram-se todos os valores obtidos, bem como, os valores de cálculo da massa volúmica seca.

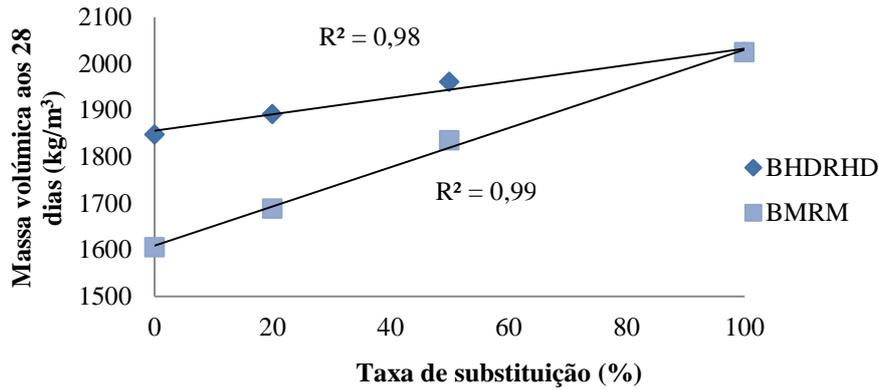


Figura 4.14 - Massa volúmica no estado endurecido das composições com RLHD

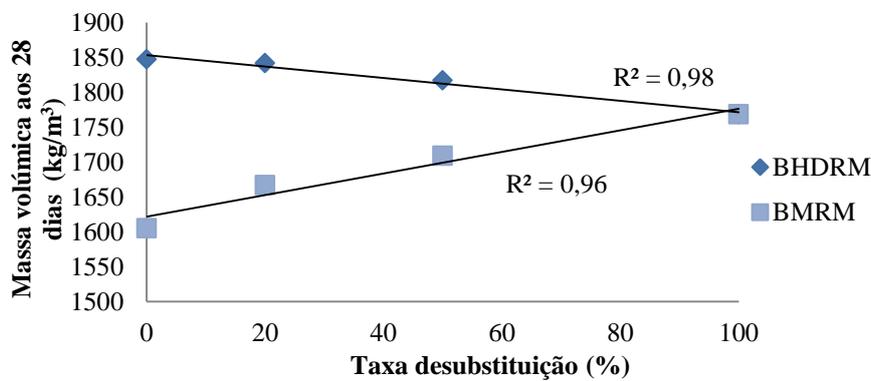


Figura 4.15 - Massa volúmica no estado endurecido das composições com RLM

Pela análise das Figuras 4.14 e 4.15, tal como esperado, estes resultados seguem uma tendência idêntica aos resultados obtidos no ensaio de determinação da massa volúmica, no estado fresco.

4.4.2. Retracção

O ensaio para a determinação da retracção sobre o betão no estado endurecido foi realizado em conformidade com a especificação LNEC E398 e tal como exposto no ponto 3.8.1.

Este ensaio permitiu avaliar uma das características mais relevantes do betão e que, segundo diversos autores, é a mais afectada pela incorporação de ARB. Os valores de retracção aos 91 dias para os diversos betões produzidos são apresentados no Quadro 4.19. No ANEXO M, encontram-se todos os valores registados ao longo do ensaio.

Pela análise da Figura 4.16, é possível observar que o betão com leca estrutural (leca HD) é mais influenciado pela incorporação de agregado reciclado. Como se pode verificar pela Figura 4.16, nota-se, claramente, uma tendência para a retracção aumentar com a incorporação de RLHD no betão. O aumento do volume de pasta, devido à argamassa aderida ao agregado reciclado, vai provocar um aumento da retracção do betão.

Quadro 4.19 - Retracção registados aos 91 dias

Composição de betão	Retracção aos 91 dias (m/m)	Desvio-padrão	Taxa de incorporação de reciclados (%)	Varição (%)
<i>BHD</i>	6,46E-04	2,58E-05	0	0,0
<i>BHD20RHD</i>	8,06E-04	5,15E-05	20	24,8
<i>BHD50RHD</i>	1,02E-03	2,29E-05	50	58,0
<i>B100RHD</i>	1,23E-03	5,73E-05	100	90,0
<i>BM</i>	9,48E-04	1,15E-04	0	0,0
<i>BM20RHD</i>	9,84E-04	6,87E-05	20	3,8
<i>BM50RHD</i>	1,12E-03	1,43E-05	50	18,2
<i>B100RHD</i>	1,23E-03	3,15E-05	100	29,5
<i>BHD</i>	6,46E-04	2,58E-05	0	0,0
<i>BHD20RM</i>	9,54E-04	8,30E-05	20	47,6
<i>BHD50RM</i>	1,06E-03	6,01E-05	50	63,3
<i>B100RM</i>	1,47E-03	5,73E-05	100	127,3
<i>BM</i>	9,48E-04	1,15E-04	0	0,0
<i>BM20RM</i>	1,01E-03	7,44E-05	20	6,4
<i>BM50RM</i>	1,08E-03	2,58E-05	50	13,5
<i>B100RM</i>	1,47E-03	3,15E-05	100	54,9

Observando os resultados obtidos para as composições com leca M, também se verifica uma tendência para um aumento da retracção à medida que se adicionam agregados reciclados. No entanto, verifica-se que estas composições apresentam valores de retracção mais próximos. Apesar do melhor desempenho mecânico do RLHD face à leca M, o RLHD apresenta uma grande quantidade de argamassa aderida, que ao retrair aumenta a retracção final do betão. Outro aspecto que pode influenciar estes resultados passa pela forte capacidade em reter água apresentada pela leca M, o que pode ser benéfico, pois, após a evaporação de água presente na pasta, esta acaba por ser compensada pela água presente no interior da leca M, durante as primeiras idades. A longo prazo, os resultados podem ser diferentes.

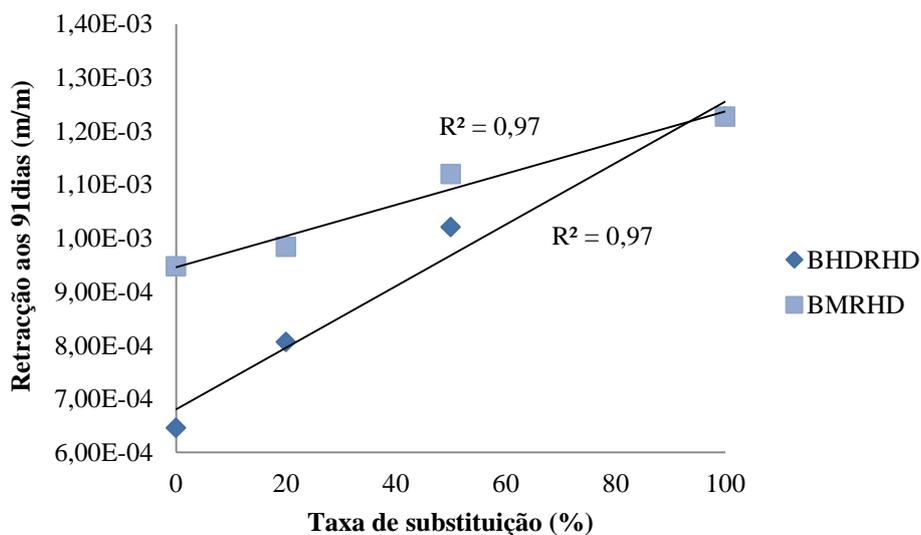


Figura 4.16 - Relação entre a retracção aos 91 dias e a taxa de incorporação de RLHD

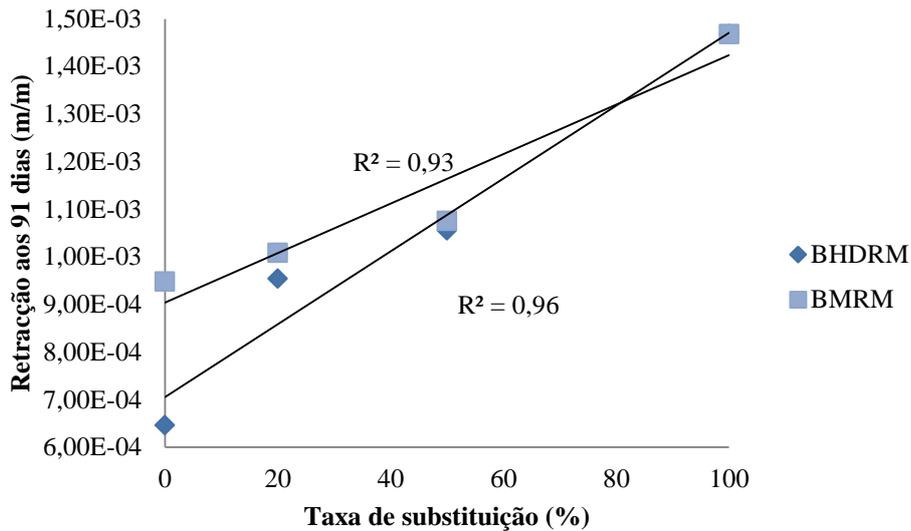


Figura 4.17 - Relação entre a retração aos 91 dias e a taxa de incorporação de RLM

Pela análise da Figura 4.17, é possível verificar, novamente, o aumento da retração com a incorporação de RLM nos betões de leca HD, com uma tendência bem definida ($R^2 = 0,96$). Assim, comprova-se que a incorporação de agregados reciclados no betão provoca um aumento da retração. À semelhança dos betões com leca HD, também, as composições com leca M apresentam uma tendência para um aumento da retração com a incorporação de RLM.

Comparando os dois agregados reciclados, observa-se que a incorporação de agregados RLM conduz a retrações superiores no betão face à incorporação de RLHD. Este fenómeno era expectável, uma vez que a rigidez do RLM é bastante inferior à do RLHD e, como tal, é menor a restrição imposta à retração do betão.

Na Figura 4.18, observa-se a evolução da retração ao longo do tempo para as composições BHDRHD. Como esperado, a retração tende a ser mais acentuada nas primeiras idades do betão.

Como referido, observa-se que a retração tende a aumentar, em todas as idades, com a incorporação do agregado reciclado RLHD. Apesar de o RLHD apresentar maior rigidez face à leca HD, esta característica acaba por não compensar a maior quantidade de argamassa aderida ao agregado leve, explicando-se, assim, a tendência para se obterem maiores retrações em betões com agregados reciclados. Por outras palavras, a quantidade total de pasta (Eq. 4.1 e 4.2), que é a maior fonte de retração, tende a aumentar nos betões reciclados conduzindo a maiores variações volumétricas.

Na Figura 4.19, analisa-se a fase inicial da retração. Observa-se que, no final da primeira semana de ensaio, se começa a notar a tendência para o aumento da retração em função da incorporação de RLHD. No entanto, nos primeiros dias de ensaio, as composições de 20, 50 e 100% de RLHD apresentam retrações inferiores ao BHD. A maior capacidade em reter água por parte do RLHD parece ser benéfica nesta fase inicial, onde a água retida nos agregados reciclados acaba por compensar a água evaporada. Zhang *et al.* (2005), o programa EuroLightCon R31 (2000) e Bogas (2011), apresentam conclusões semelhantes, verificando a menor retração inicial dos betões com agregados leves, devido à maior capacidade dos AL em absorver água.

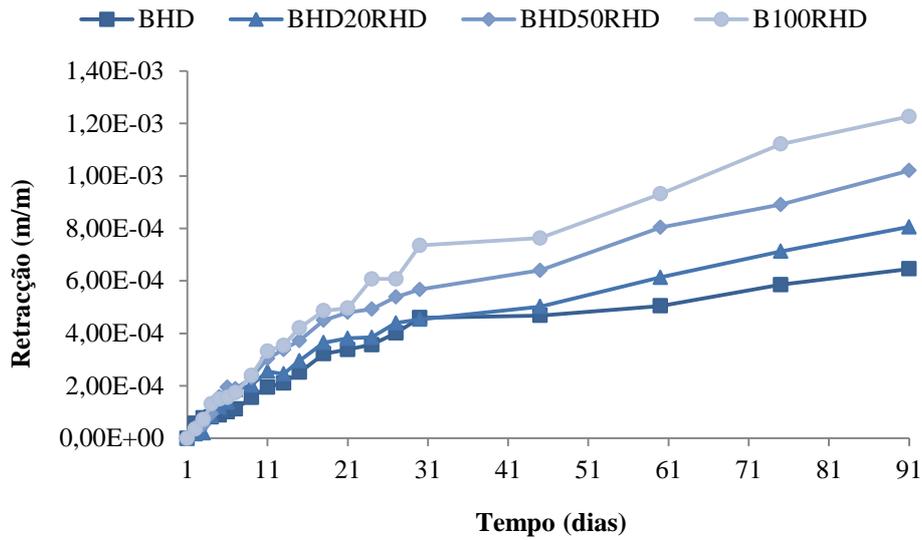


Figura 4.18 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BHDRHD

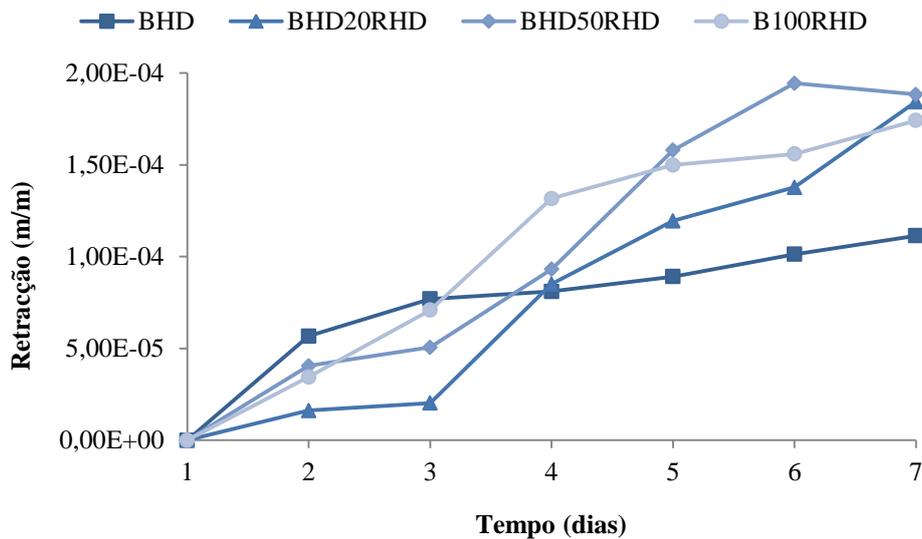


Figura 4.19 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BHDRHD

Analisando a Figura 4.20, verifica-se que ao longo do tempo as retracções da composição BMRHD aparentam ser semelhantes, apesar do ligeiro aumento verificado. Neste caso, a maior rigidez do RLHD parece não compensar o aumento do volume de pasta e a maior capacidade em absorver água da leca M.

Na Figura 4.21, observa-se a retracção durante a primeira semana de ensaio. Como é possível verificar, nota-se uma retracção semelhante no final da primeira semana de ensaio. Contudo, a composição com 100% de RLHD é a que apresenta menor retracção, podendo indicar que a maior rigidez do agregado RLHD face à leca M tem maior influência nesta fase inicial do ensaio. Outro facto que pode explicar este fenómeno passa pela quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado. Assim, a água que se liberta do agregado fica retida na argamassa que o envolve, retardando a retracção nesta fase inicial do ensaio. No

entanto, nos primeiros dias de ensaio (sensivelmente até ao quinto dia), o betão de referência BM é o que apresenta menor retracção. Este fenómeno pode ser explicado pela maior capacidade em absorver água por parte da leca M. Assim, a água evaporada é compensada pela água retida no agregado.

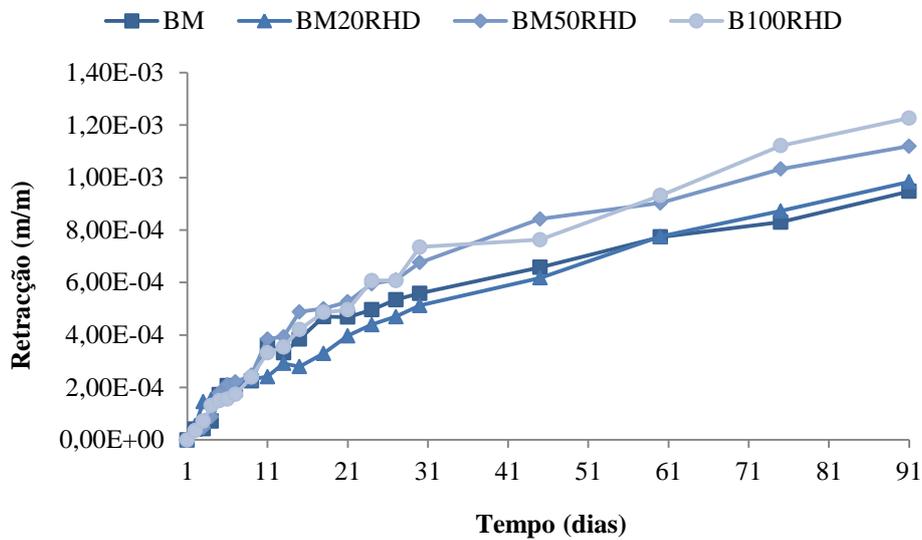


Figura 4.20 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BMRHD

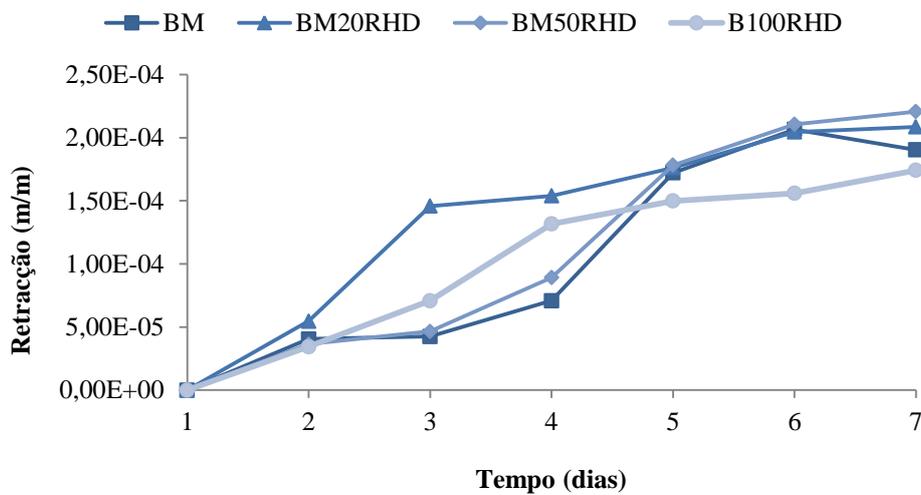


Figura 4.21 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BMRHD

Na Figura 4.22, constata-se a tendência para se atingirem maiores valores de retracção à medida que se incorpora RLM no betão. A composição com 100% de RLM apresenta uma grande variação em relação ao betão de referência BHD, valor bastante acima do esperado, contudo ao analisar individualmente cada provete (ANEXO M), não se observam grandes diferenças entre os dois provetes. Nas restantes composições, observa-se uma tendência para a retracção aumentar paralelamente, em relação ao BHD. Estes resultados encontram-se dentro do previsto, uma vez que o agregado reciclado, para além de apresentar uma rigidez inferior à da leca HD, também possui na sua estrutura pasta, que conduz a um aumento da retracção.

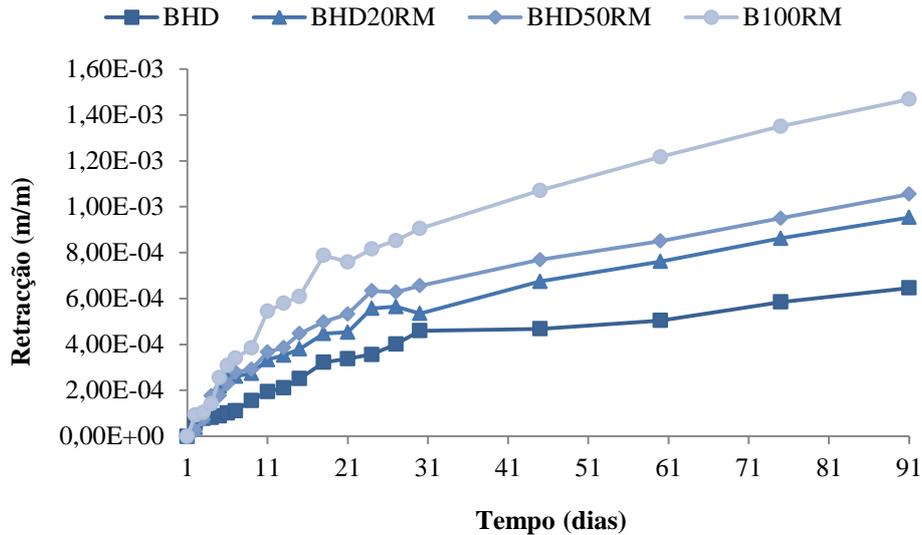


Figura 4.22 - Evolução da retracção até aos 91 dias nas composições BHDRM

Observando a fase inicial do ensaio (Figura 4.23), verifica-se que, nos primeiros 3 dias, o B100RM apresenta uma retracção mais elevada face às restantes composições. Assim, a fraca rigidez do RLM parece não compensar a maior capacidade em absorver água do agregado. No entanto, as composições de 20 e 50% de RLM, apresentam retracções inferiores ao BHD. Neste caso, a capacidade em absorver água do RLM acaba por ser preponderante sobre a perda de rigidez.

Por fim, na Figura 4.24, é apresentada a evolução da retracção ao longo do tempo nas composições de leca M com incorporação de RLM. Tal como nas restantes composições, observa-se uma retracção bastante acentuada nos primeiros dias de ensaio. À semelhança do que acontece com a incorporação de RLHD em betões não estruturais, verificam-se retracções semelhantes nas composições, à excepção do B100RM, que, como referido, apresenta uma retracção bastante superior ao esperado.

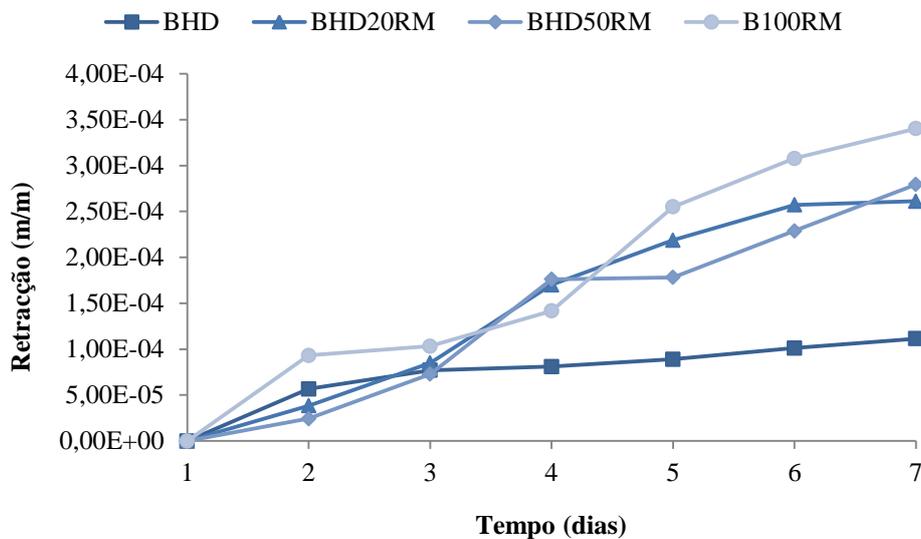


Figura 4.23 - Evolução da retracção até aos 7 dias nas composições BHDRM

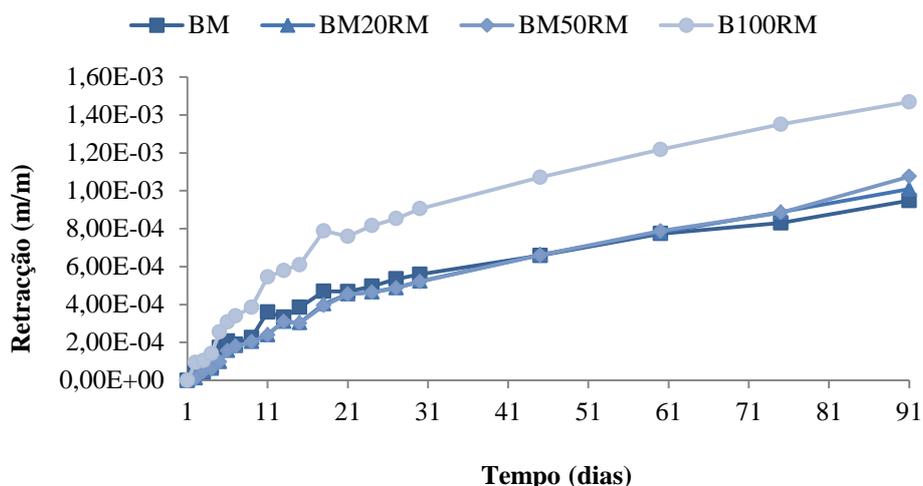


Figura 4.24 - Evolução da retração até aos 91 dias nas composições BMRM

Na Figura 4.25, são apresentados os resultados obtidos para a retração na primeira semana de ensaio. A pasta aderida ao agregado, principal fonte de retração, aumenta a capacidade de deformação no agregado, o que conduz a maiores retrações à medida que se incorpora este material no betão. As restantes composições apresentam retrações semelhantes ao longo da primeira semana de ensaio, com um ligeiro decréscimo nas composições de 20 e 50% de RLM. Este fenómeno pode, uma vez mais, ser explicado pela forte capacidade em reter água por parte do RLM que, como referido, aparenta ser benéfica na fase inicial do ensaio.

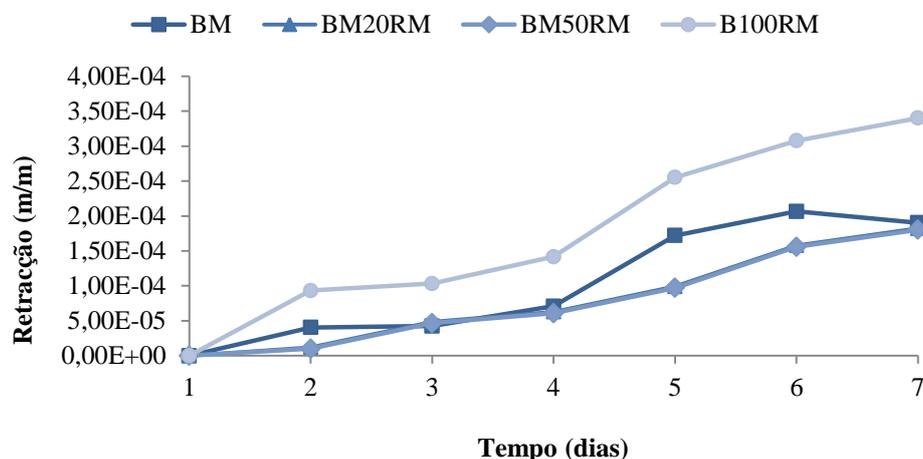


Figura 4.25 - Evolução da retração aos 7 dias nas composições BMRM

Como era de esperar, a incorporação de agregados reciclados de betão leve num novo betão aumenta os níveis de retração. Assim, estes resultados estão em conformidade com os de Reinhardt e Kummel (1999), que estudaram a evolução da retração em betões com agregados reciclados idênticos aos utilizados na presente investigação e concluem que, ao adicionar agregados de betão leve reciclado, a retração do betão aumenta, assim como com os resultados obtidos por outros autores que estudaram a influência da incorporação de ARB no betão (Buttler, 2003, Matias e Brito, 2005, Evangelista, 2007,

Robles, 2007; Fonseca e Amorim, 2008; Malesev *et al.*, 2010). No entanto, quando comparando estes resultados com os de outros agregados leves reciclados, como o plástico, observa-se que os agregados plásticos tendem a ser benéficos para diminuir a retracção (Kou *et al.* 2009; Silva, 2012).

Torna-se necessário, ainda, referir que os agregados reciclados utilizados na presente investigação provêm de betões que foram impedidos de secar totalmente até à data da sua utilização. Em agregados resultantes de betões sujeitos a secagem seriam previstos resultados diferentes.

4.4.3. Absorção de água

No presente subcapítulo, procede-se ao estudo das propriedades de absorção de água das diversas composições. Em primeiro lugar, é analisada a absorção de água por capilaridade e, depois, a absorção de água por imersão. No ANEXO N, encontram-se todos os valores obtidos para uma melhor análise dos ensaios.

4.4.3.1. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade segue a metodologia descrita no capítulo 3.7.3 segundo a especificação LNEC E-393 (1993).

No Quadro 4.20, são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade registados às 72 horas.

Pela análise dos Quadros 4.20 e 4.21, em geral, verifica-se um aumento da absorção de água capilar à medida que se incorpora o material reciclado. Confirmam-se os resultados obtidos em investigações semelhantes, onde se verifica que a incorporação de agregados reciclados de betão aumenta a absorção de água no betão (Matias e Brito, 2005; Evangelista, 2007, Ferreira, 2007; Amorim e Fonseca, 2008).

Quadro 4.20 - Absorção de água por capilaridade às 72 hora, nas composições com RLHD

Composição de betão	Absorção por capilaridade (10^{-3} g/mm²)	Desvio-padrão	Taxa de incorporação de reciclados (%)	Variação (%)
<i>BHD</i>	2,04	2,74E-04	0	0,0
<i>BHD20RHD</i>	2,96	1,99E-04	20	45,1
<i>BHD50RHD</i>	4,42	2,85E-04	50	116,7
<i>B100RHD</i>	4,44	1,36E-04	100	117,6
<i>BM</i>	3,50	9,88E-04	0	0,0
<i>BM20RHD</i>	3,71	6,16E-04	20	-8,6
<i>BM50RHD</i>	3,97	3,13E-04	50	-2,2
<i>B100RHD</i>	4,44	1,36E-04	100	9,4

O valor de absorção do BM é superior ao valor esperado, o que poderá indicar um resultado anómalo por parte do betão de referência. O facto de este ensaio ser efectuado em provetes seccionados, onde as partículas partidas dos agregados são expostas, pode justificar, em parte, a maior absorção inicial do BM (ver Figura 2.17).

Quadro 4.21 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, nas composições com RLM

Composição de betão	Absorção por capilaridade (10^{-3} g/mm ²)	Desvio-padrão	Taxa de incorporação de reciclados (%)	Varição (%)
BHD	2,04	2,74E-04	0	0,0
BHD20RM	3,29	1,17E-04	20	61,3
BHD50RM	3,60	1,08E-04	50	76,5
B100RM	4,20	6,84E-05	100	105,9
BM	3,50	9,88E-04	0	0,0
BM20RM	3,17	9,58E-05	20	-21,9
BM50RM	3,75	5,58E-05	50	-7,6
B100RM	4,20	6,84E-05	100	3,4

Nas Figuras 4.26 a 4.29, é possível observar a evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo. Verifica-se que, em todas as composições, a absorção é superior numa fase inicial do ensaio, sensivelmente até à terceira hora, após o início do ensaio. A partir deste período, nota-se uma evolução mais lenta dos níveis de absorção.

Na Figura 4.26, é possível observar que os níveis de absorção capilar aumentam à medida que se aumenta a taxa de agregados reciclados RLHD no betão. No entanto, verifica-se, contrariamente ao esperado, uma absorção semelhante por parte das composições com 50 e 100% de RLHD. O aumento da absorção à medida que se aumenta o agregado reciclado de betão com leca HD está relacionado com o aumento do volume de argamassa aderida ao agregado e ao facto de este agregado apresentar um elevado número de partículas partidas, ou seja, uma importante percentagem de partículas sem película exterior, o que pode facilitar a absorção capilar. No entanto, o aumento do volume de pasta parece ter um papel mais importante no aumento da absorção. Bogas (2011) apresenta conclusões semelhantes, demonstrando a menor importância da porosidade global do agregado na absorção capilar dos betões leves face ao aumento do volume de pasta.

Observa-se, ainda, que a absorção inicial aumenta proporcionalmente à percentagem de agregados reciclados, à excepção do betão com 20% de RLHD, onde se verifica uma absorção ligeiramente inferior, relativamente ao betão de referência BHD. Tal demonstra a importância do aumento de pasta nesta propriedade.

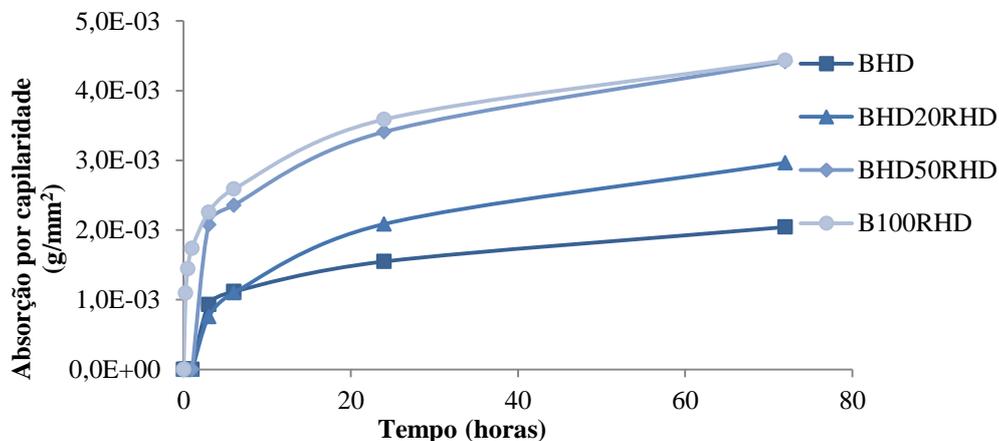


Figura 4.26 - Evolução da absorção capilar nas composições BHDRHD

O aumento da absorção à medida que se introduzem agregados reciclados no betão pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta, devido à argamassa aderida ao agregado leve de origem, que, em conjunto com o facto de estes agregados apresentarem maior porosidade aberta, vão provocar um aumento da absorção capilar.

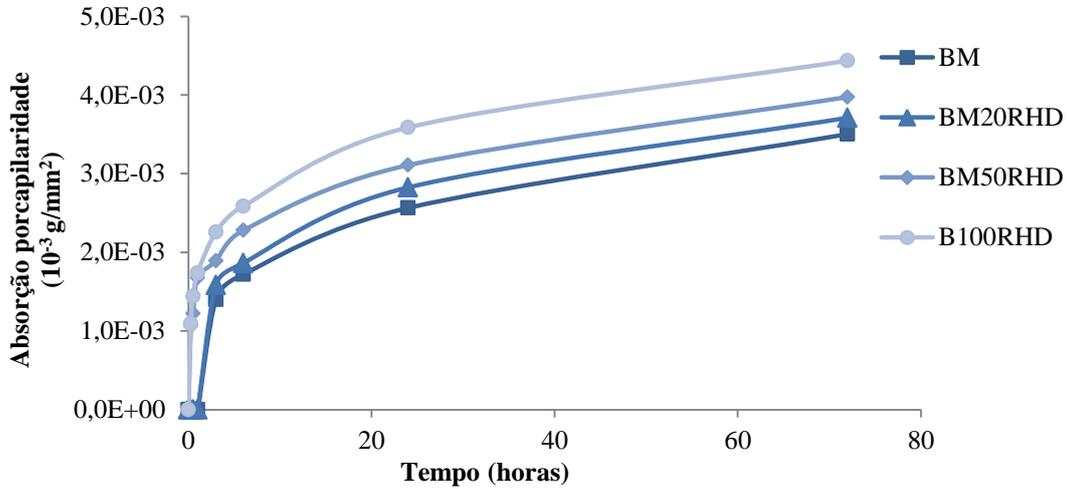


Figura 4.27 - Evolução da absorção capilar nas composições BMRHD

Na Figura 4.27, é possível observar que existe um aumento na absorção capilar à medida que se substitui leca M por RLHD. Assim, apesar de o RLHD apresentar menor porosidade acessível face à leca M, o maior volume de pasta por parte do RLHD contribui para o aumento da absorção capilar.

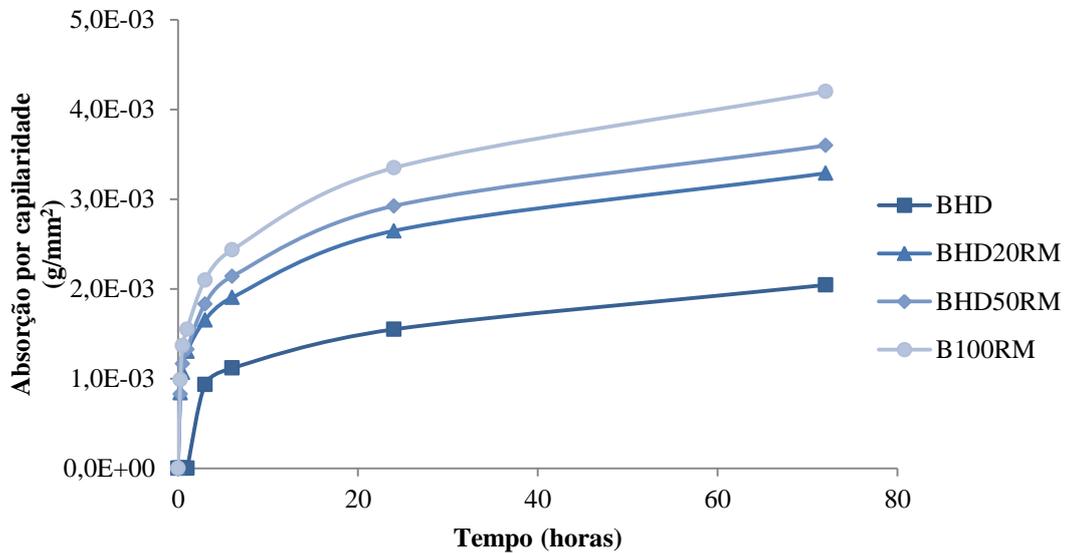


Figura 4.28 - Evolução da absorção capilar nas composições BHDRM

Na Figura 4.28, observa-se, tal como esperado, que a absorção capilar aumenta com a introdução de agregados reciclados RLM no betão. De facto, o RLM é um agregado mais poroso do que a leca HD e apresenta pasta a envolver o agregado. Assim, é normal observar esta tendência, pois a absorção capilar tende a aumentar para maiores níveis de porosidade e para maiores volumes de pasta.

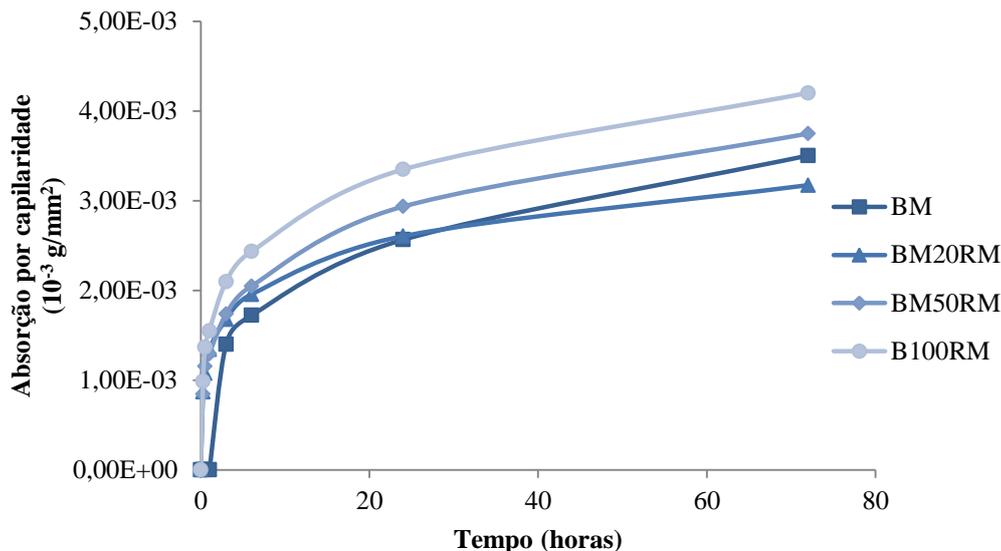


Figura 4.29 - Evolução da absorção capilar nas composições BMRM

À semelhança do que ocorre com a composição BMRHD, verifica-se que a introdução de agregados reciclados no betão provoca um aumento na absorção capilar do betão (Figura 4.29). No entanto, regista-se, o valor elevado do betão de referência BM, que aparenta ser anómalo.

Do mesmo modo, o aumento do volume de pasta, devido à argamassa aderida ao agregado reciclado, em conjunto com a maior porosidade acessível do RLM, parecem ser as principais razões para explicar esta tendência.

Nas Figuras 4.30 a 4.33, são apresentados os valores dos coeficientes de absorção para cada uma das composições testadas. Optou-se por definir um coeficiente de absorção correspondente ao valor do declive da recta de regressão linear da absorção entre a 1 hora e as 24 horas de ensaio, medidos em função de \sqrt{t} .

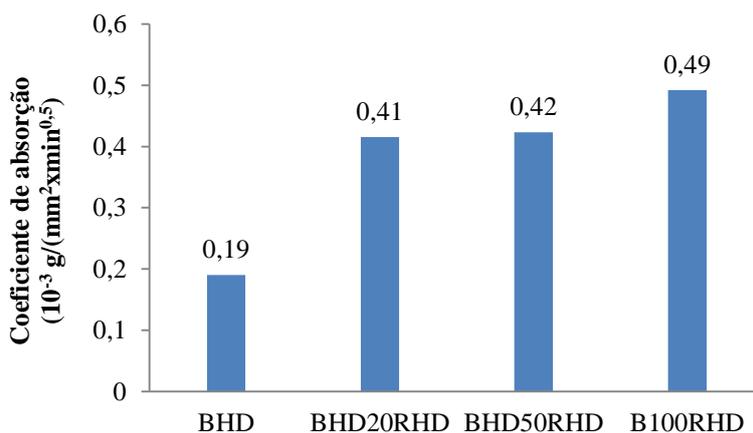


Figura 4.30 - Coeficiente de absorção nas composições BHDRHD

Pela análise da Figura 4.30, verifica-se uma tendência para se atingirem coeficientes de absorção mais elevados à medida que se incorporam agregados RLHD no betão. De facto, o coeficiente de absorção tende a aumentar com o volume de pasta. Uma vez que o RLHD apresenta argamassa aderida, os betões

com maior percentagem deste material vão apresentar um volume de pasta superior ao betão de referência, provocando, assim, um aumento do coeficiente de absorção.

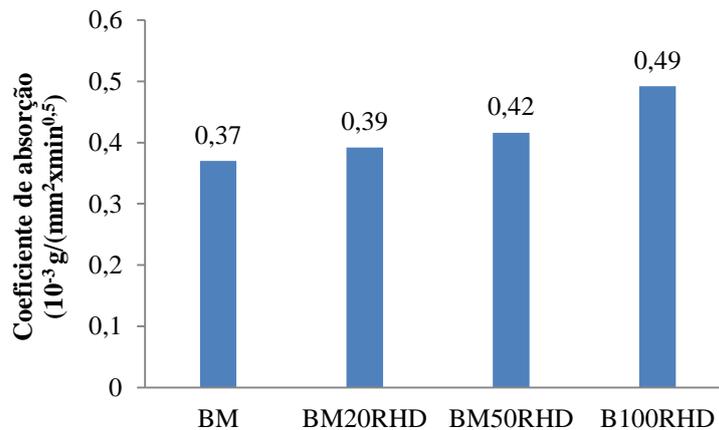


Figura 4.31 - Coeficiente de absorção nas composições BMRHD

Da mesma forma, o coeficiente de absorção aumenta com a incorporação de RLHD no betão com leca M (Figura 4.31). Novamente, o aumento do volume de pasta no betão, devido à argamassa aderida ao agregado reciclado, é a principal razão para tal suceder.

Comparando as Figuras 4.30 e 4.31, observa-se que a introdução de RLHD no betão provoca coeficientes de absorção semelhantes nas duas famílias de betão, o que pode comprovar que esta propriedade está mais ligada ao aumento do volume de pasta do que à porosidade acessível do agregado.

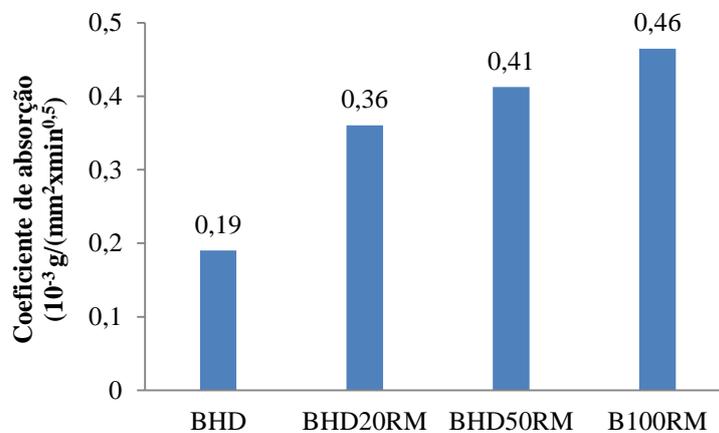


Figura 4.32 - Coeficiente de absorção nas composições BHDRM

No que diz respeito à incorporação de reciclado RLM no betão, pode verificar-se, pela análise de Figura 4.32, que existe uma tendência para se obter valores de absorção superiores em betões com maior taxa de substituição de agregados reciclados. Mais uma vez, este efeito deve-se a argamassa aderida ao agregado reciclado, que provoca um aumento do volume de pasta total no betão.

À semelhança das restantes composições, também os betões com leca M mostram a mesma tendência, ou seja, o coeficiente de absorção aumenta à medida que se incorpora RLM no betão.

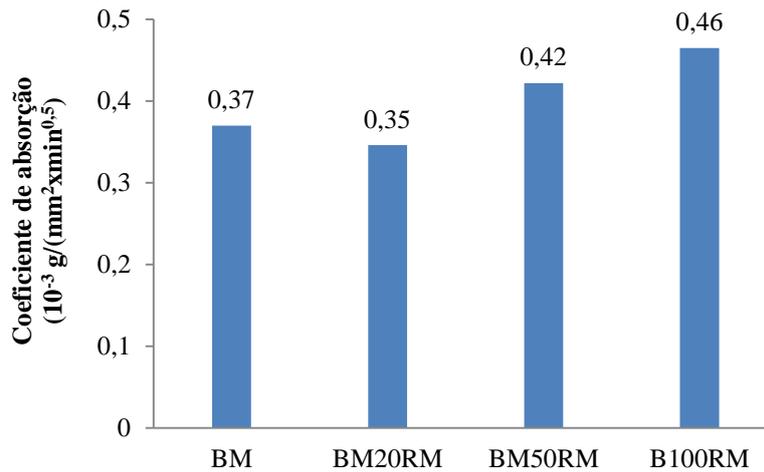


Figura 4.33 - Coeficiente de absorção nas composições BMRM

Comparando as Figuras 4.32 e 4.33, é possível verificar, novamente, que a absorção nos betões com RLM é idêntica nas duas composições. Deste modo, é possível verificar a maior importância do aumento de volume de pasta face à porosidade acessível do agregado em causa.

Por fim, comparando as composições B100RHD e B100RM, é possível observar um valor superior para o B100RHD comprovando, assim, que o coeficiente de absorção está mais dependente do volume de pasta do que da porosidade do agregado (ver Eq. 4.1 e 4.2 em 4.2.3.).

Os escassos estudos relativos a agregados reciclados de betão leve não permitem fazer uma comparação directa com outras investigações. No entanto, ao comparar estes resultados com investigações em que se estudou a influência de agregados reciclados de betão, é possível observar que, os betões com ABR e os betões com ALBR seguem uma tendência semelhante, ou seja registam maiores absorções à medida que aumenta a taxa de agregados reciclados. Deste modo, os presentes resultados vão ao encontro das investigações de Brito e Matias (2005), Evangelista (2007), Robles (2007); Ferreira (2007) e Fonseca e Amorim (2008), onde o aumento da porosidade do betão devido ao maior volume de pasta do agregado aparece como principal responsável por se atingirem maiores valores de absorção.

Apesar de se observarem tendências semelhantes entre os betões com ABR e os betões com ALBR, verifica-se que a absorção de água registada nesta investigação é bastante superior à registada em betões com ABR. De facto, os agregados leves, ao serem mais porosos do que os agregados convencionais, vão provocar níveis de absorção de água superiores no betão.

Por fim, analisa-se a relação entre esta propriedade e a resistência à compressão aos 28 dias (Figuras 4.34 e 4.35).

Pela análise das Figura 4.34, é possível observar que, tanto nas composições BHDRHD como nas BMRHD, existe uma tendência para se atingirem maiores valores de absorção de água por capilaridade com o aumento da resistência do betão. No entanto, ao analisar a Figura 4.35, verifica-se que a composição BHDRM segue uma tendência contrária, pelo que se pode concluir que estas duas propriedades não estão relacionadas. De facto, como comprovado, esta propriedade está mais ligada ao aumento do volume de pasta e do que ao agregado utilizado e, assim, é possível justificar a razão pela qual a absorção de água por

capilaridade tende a aumentar com a incorporação de agregados reciclados, independentemente do aumento ou diminuição da resistência dos betões estudados.

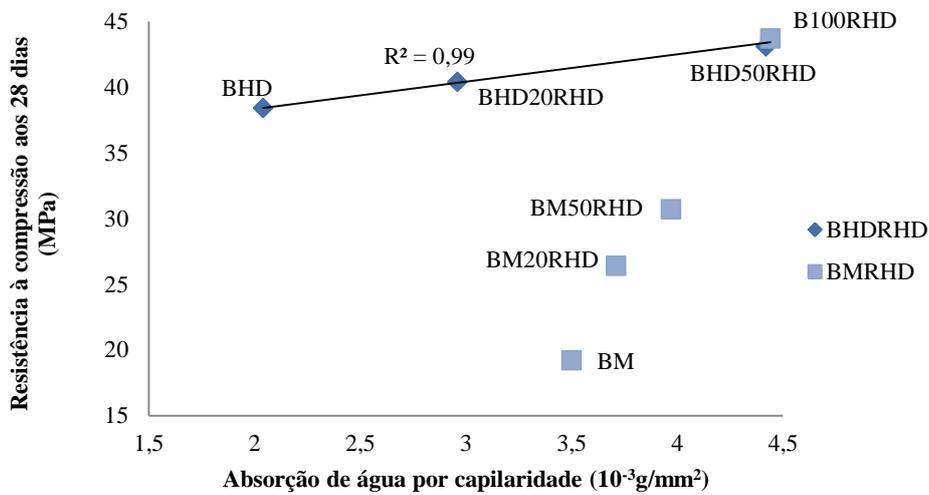


Figura 4.34 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, para as composições com RLHD

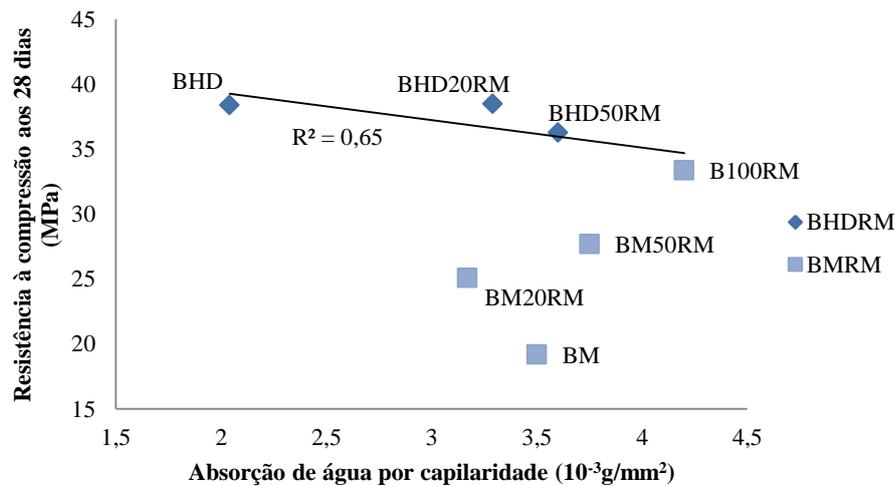


Figura 4.35 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, para as composições com RLM

4.4.3.2. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão segue a metodologia descrita no capítulo 3.7.3 segundo a especificação LNEC E-394 (1993). No ANEXO N, encontram-se todos os cálculos intermédios, bem como os resultados obtidos a partir da especificação LNEC E-395 (1993).

No Quadro 4.22, estão representados os valores de absorção de água por imersão.

Quadro 4.22 - Absorção de água por imersão.

Composição de betão	Absorção por imersão (%)	Desvio-padrão	Taxa de incorporação de reciclados (%)	Varição (%)
<i>BHD</i>	12,7	0,56	0	0,0
<i>BHD20RHD</i>	13,0	0,12	20	2,4
<i>BHD50RHD</i>	14,2	0,31	50	11,9
<i>B100RHD</i>	16,3	0,24	100	28,4
<i>BM</i>	20,3	0,73	0	0,0
<i>BM20RHD</i>	18,9	0,21	20	-6,6
<i>BM50RHD</i>	17,1	0,61	50	-15,9
<i>B100RHD</i>	16,3	0,24	100	-19,6
<i>BHD</i>	12,7	0,56	0	0,0
<i>BHD20RM</i>	15,0	1,32	20	18,3
<i>BHD50RM</i>	18,7	0,20	50	47,5
<i>B100RM</i>	25,1	0,18	100	97,3
<i>BM</i>	20,3	0,73	0	0,0
<i>BM20RM</i>	21,0	0,20	20	3,5
<i>BM50RM</i>	22,5	0,45	50	11,0
<i>B100RM</i>	25,1	0,18	100	23,5

Por análise do Quadro 4.22, é possível verificar o aumento da absorção à medida que se aumenta a taxa de agregados reciclados no betão. Verifica-se um aumento mais significativo da absorção nos betões com leca estrutural. Este fenómeno pode ser explicado pela maior porosidade dos agregados reciclados, o que aumenta a capacidade do betão em absorver água. No entanto, pode observar-se uma melhoria do desempenho do betão quando se substitui leca M por RLHD. Este fenómeno pode ser explicado pela menor capacidade em absorver água por parte do agregado reciclado (Figura 4.8).

Observa-se, ainda, que a substituição de agregados leves naturais por reciclados de betão leve de enchimento (RLM) facilita a absorção de água por parte do betão. É possível verificar um aumento superior a 90% na absorção, quando se substitui totalmente o agregado de leca estrutural. Mais uma vez, e visto que a absorção de água do betão está directamente ligada com a capacidade de absorção dos agregados que o constituem, a principal razão para este fenómeno passa pela grande diferença entre a capacidade de absorção dos dois agregados, 12,61 e 29,41% para a leca HD e RLM, respectivamente.

Por fim, verifica-se que, tal como esperado, o betão com 100% de RLM apresenta uma absorção 7,19% mais elevada do que a do betão com 100% de RLHD. Isto deve-se, essencialmente, à maior porosidade do RLM face ao RLHD.

Pela análise de Figura 4.36, é possível verificar que as duas composições seguem tendências contrárias. Assim, a influência da incorporação de RLHD piora o desempenho em betões estruturais, ao passo que parece diminuir a absorção total de água em betões não estruturais. De facto, era previsível que tal ocorresse, devido à maior porosidade apresentada pela leca M.

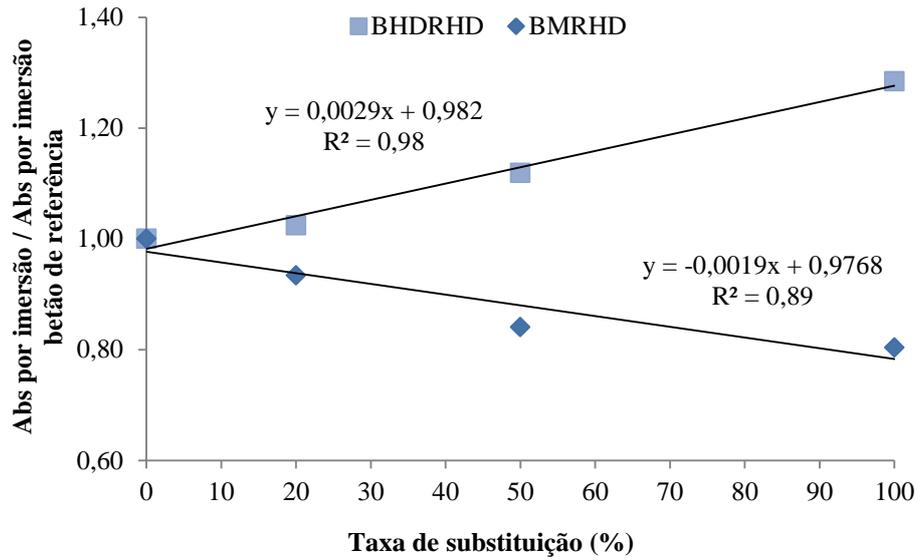


Figura 4.36 - Relação da absorção por imersão entre as composições com RLHD e os betões de referência

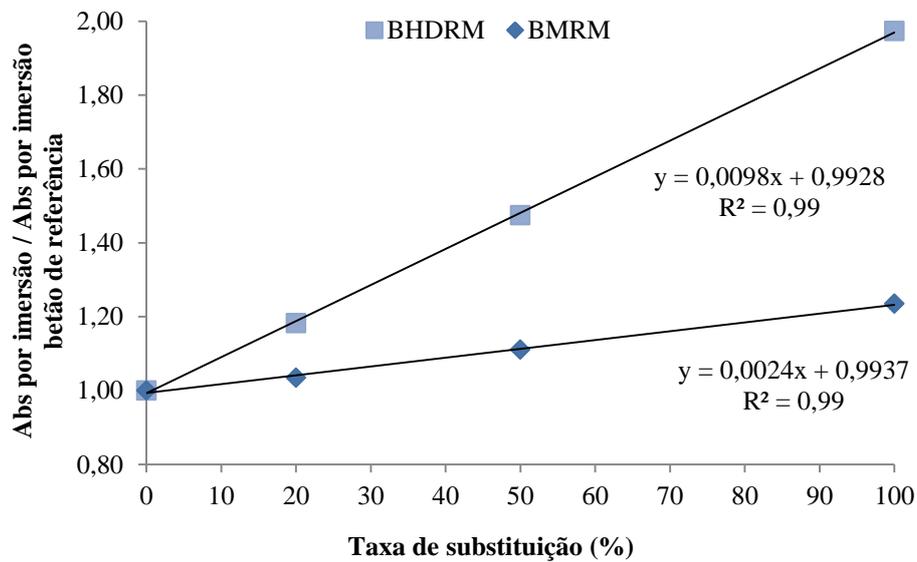


Figura 4.37 - Relação da absorção por imersão entre as composições com RLM e os betões de referência

Observando a Figura 4.37, é possível verificar que a absorção por imersão segue uma tendência linear à medida que se aumenta a incorporação de RLM no betão. Este agregado provoca piores desempenhos no betão, especialmente em betões estruturais, onde a total substituição de RLM por leca HD provoca uma variação bastante significativa em relação ao betão de referência BHD. Apesar de também piorar o desempenho das composições com leca M, a variação não é tão significativa, o que se deve às diferenças entre a capacidade em absorver água de cada agregado em causa.

Nas Figuras 4.38 e 4.39, é possível analisar a relação entre os dois tipos de absorção de água.

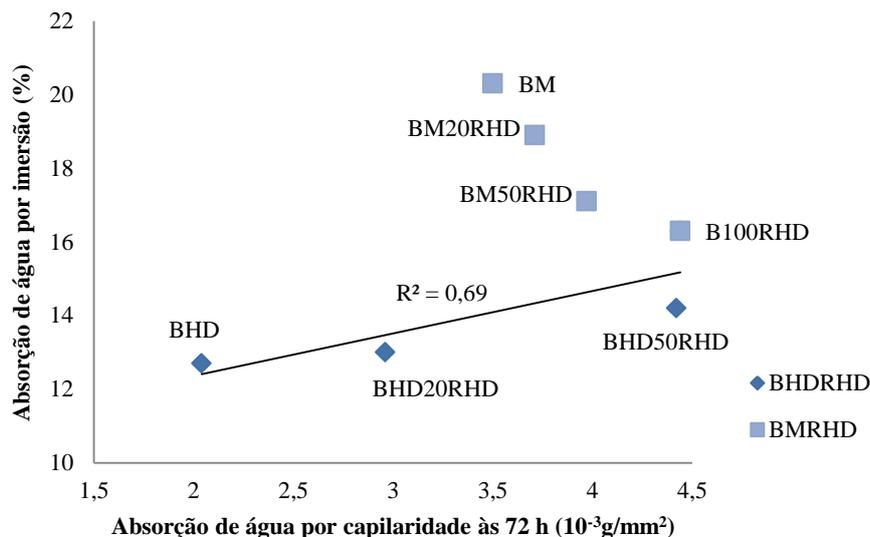


Figura 4.38 - Relação entre a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, para as composições com RLHD

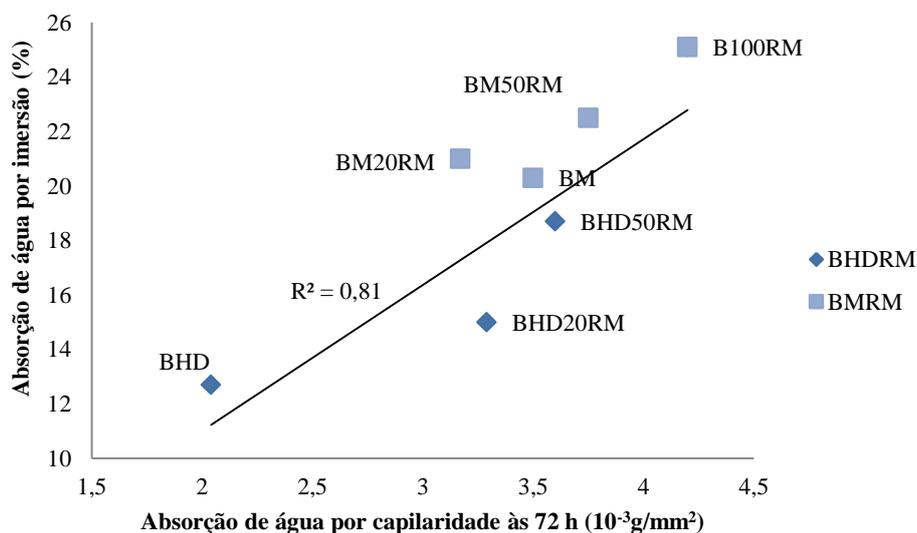


Figura 4.39 - Relação entre a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade às 72 horas, para as composições com RLM

Nas Figuras 4.38 e 4.39 não se verificam relações bem definidas e nem sempre se observa um aumento da absorção de água por imersão com o aumento da absorção de água por capilaridade, como se pode verificar pela composição BMRHD. Apesar de as duas propriedades estarem ligadas à porosidade do betão, a absorção por imersão está apenas ligada à porosidade aberta do betão ao passo que a absorção por capilaridade está ligada não só à porosidade do betão, mas também à capacidade que este tem em absorver líquidos pelos seus vasos capilares. Assim, e visto que a absorção por capilaridade está mais dependente do aumento e desenvolvimento dos vasos capilares (aumento do volume de pasta) do que da porosidade aberta do agregado, estas duas propriedades não são relacionáveis (exemplo, série BM na Fig. 4.38).

Por fim, nas Figuras 4.40 e 4.41, observa-se a relação entre esta propriedade e a resistência à compressão aos 28 dias.

Desempenho em termos de durabilidade de betões de agregados
leves provenientes da trituração de pisos de betão leve

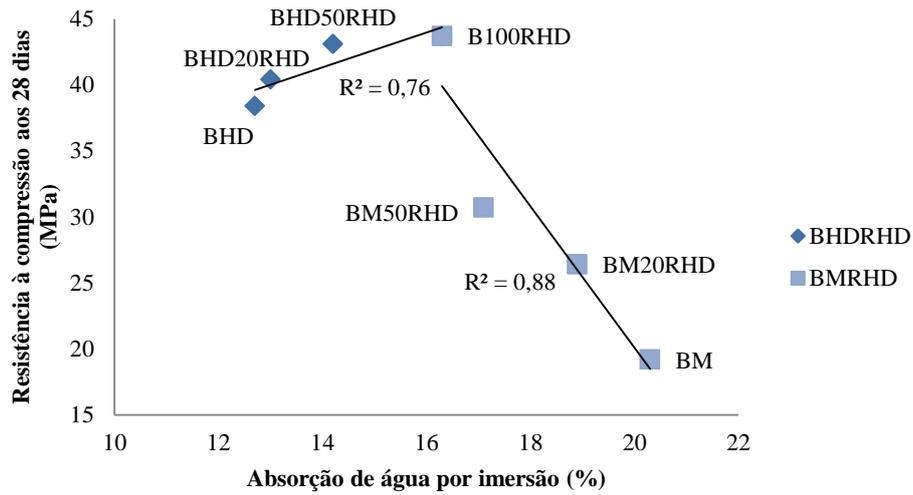


Figura 4.40 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão, para as composições com RLHD

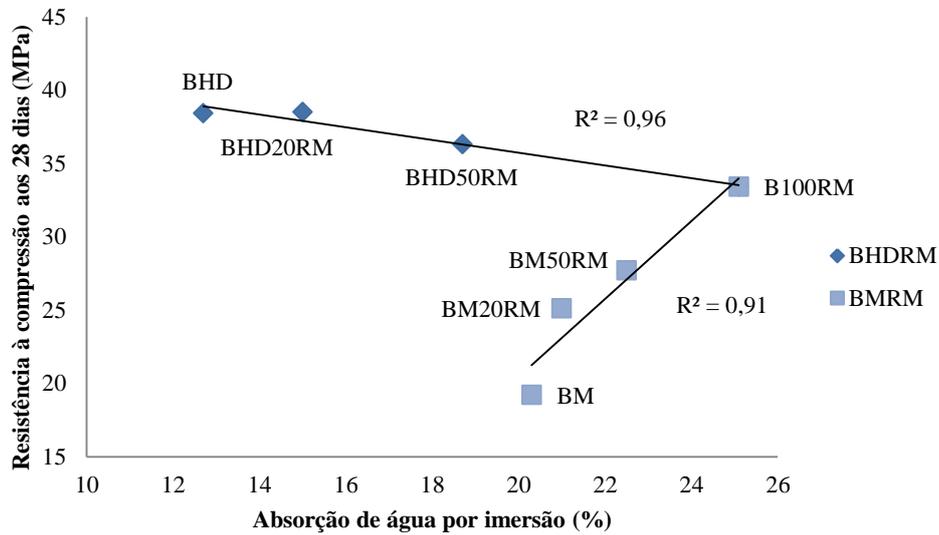


Figura 4.41 - Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão, para as composições com RLM

Pela análise das Figuras 4.40 e 4.41, não se verifica uma relação entre esta propriedade e a resistência mecânica, apesar dos elevados coeficientes de correlação obtidos tendo em conta um dado tipo de agregado. Nas composições BHDRHD, é possível observar o aumento da absorção de água com o aumento da resistência. No entanto, o mesmo não sucede com as composições BMRHD, onde se nota uma diminuição da absorção com o aumento da resistência, nem com as composições BHDRM, onde a diminuição da resistência é acompanhada de um aumento da absorção. Assim, pode-se concluir que estas propriedades não se encontram relacionadas, fenómeno que é facilmente explicado pelas características dos agregados utilizados.

4.4.4. Resistência à carbonatação

Os valores médios obtidos na fase final do ensaio, aos 120 dias, encontram-se no Quadro 4.23. No ANEXO O, são apresentados todos os valores registados durante o ensaio.

Como explicado no subcapítulo 3.4.3, devido ao Laboratório de Construção se encontrar encerrado durante o mês de Agosto, e, de forma a todos os provetes serem analisados na mesma idade, o último ensaio realizou-se para uma idade de 120 dias, em vez dos 91.

A porosidade do betão tem grande importância neste fenómeno, dado que afecta a difusão do dióxido de carbono no betão. Deste modo, será de esperar que um betão com agregados leves apresente profundidades de carbonatação superiores às de um betão comum (EuroLightCon R18, 2000).

Pela análise do Quadro 4.23, observa-se um aumento da profundidade de carbonatação à medida que se substitui leca estrutural por agregados reciclados. Este aumento é mais significativo quando se incorpora RLM, onde se verifica uma variação de cerca de 34% em relação ao betão de referência BHD. Assim, conclui-se que a inclusão de agregados reciclados em betão leve estrutural diminui a resistência à carbonatação. No entanto, observa-se que, para betões não estruturais, com leca M, esta tendência não se verifica. De facto, analisando novamente o Quadro 4.23, é possível observar uma redução na profundidade de carbonatação nesta gama de betões. Este fenómeno poderá indicar que a pasta aderida ao agregado leve permite retardar a difusão e contribui para a fixação do dióxido de carbono.

Quadro 4.23 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias de ensaio.

Composição de betão	Profundidade de carbonatação aos 120 dias (mm)	Variação (%)	Coefficiente de carbonatação K_c (mm/dia ^{0,5})	Taxa de incorporação de reciclados (%)
<i>BHD</i>	11,99	0,0	1,149	0
<i>BHD20RHD</i>	13,35	11,4	1,227	20
<i>BHD50RHD</i>	13,93	16,2	1,205	50
<i>B100RHD</i>	14,91	24,4	1,263	100
<i>BM</i>	28,06	0,0	2,431	0
<i>BM20RHD</i>	19,89	-29,1	1,716	20
<i>BM50RHD</i>	16,10	-42,6	1,319	50
<i>B100RHD</i>	14,91	-46,9	1,263	100
<i>BHD</i>	11,99	0,0	1,149	0
<i>BHD20RM</i>	14,16	18,1	1,304	20
<i>BHD50RM</i>	15,02	25,3	1,311	50
<i>B100RM</i>	16,03	33,7	1,384	100
<i>BM</i>	28,06	0,0	2,431	0
<i>BM20RM</i>	21,73	-22,6	1,859	20
<i>BM50RM</i>	18,05	-35,7	1,560	50
<i>B100RM</i>	16,03	-42,9	1,384	100

No Quadro 4.23, são, também apresentados os valores dos coeficientes de carbonatação, K_c . O coeficiente de carbonatação corresponde ao valor do declive da recta de regressão linear da profundidade de carbonatação, medidas em função de \sqrt{t} .

Comparando os dois betões de referência, observa-se que o BHD apresenta o menor valor de profundidade (11,99 mm), ao passo que o BM regista o valor máximo (28,06 mm).

Na Figura 4.42, são apresentados os valores médios obtidos, para as composições com BHDRHD, nas diferentes idades de ensaio, aos 7, 28, 56 e 120 dias.

Como se pode verificar pela Figura 4.42, a profundidade de carbonatação para as composições BHDRHD tende a aumentar com a percentagem de agregados reciclados incorporados e ao longo do tempo. Tal facto era previsível, uma vez que o agregado reciclado apresenta uma maior porosidade aberta, o que facilita a difusão de dióxido de carbono no betão.

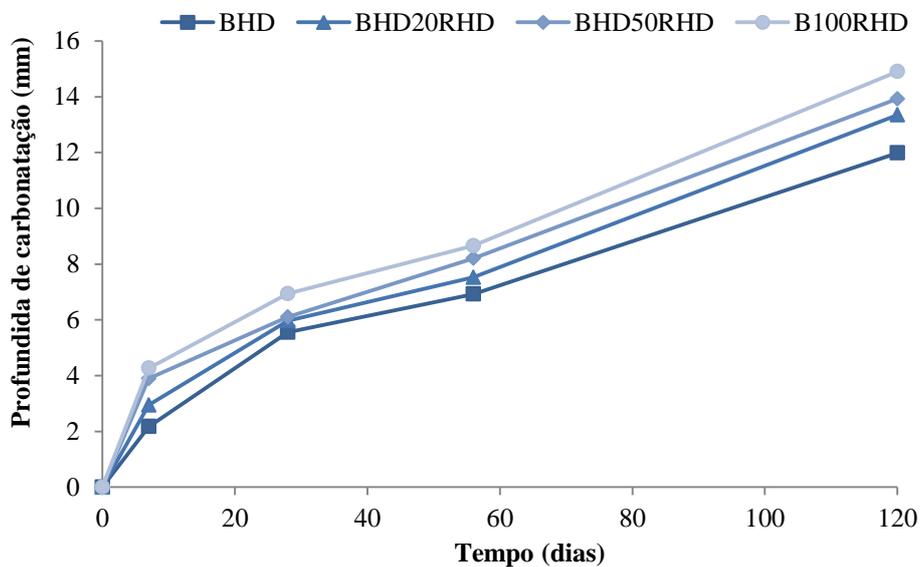


Figura 4.42 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo nas composições BHDRHD

Esta redução da resistência à carbonatação segue os pressupostos de Bogas (2011). O autor conclui que, em betões com a/c superior a 0,4, a resistência à carbonatação diminui devido à influência dos agregados de maiores dimensões que apresentam maior porosidade. Uma vez que os agregados reciclados apresentam maior porosidade, é normal que se atinjam reduções na resistência à carbonatação.

Na Figura 4.43, é possível verificar coeficientes de carbonatação semelhantes, apesar de se verificar um ligeiro aumento com a taxa de substituição, à medida que se incorpora material reciclado no betão. Assim, é possível comprovar que esta propriedade tende a piorar à medida que se incorpora material reciclado no betão. No entanto, o BHD50RHD apresenta um valor abaixo do expectável.

Na Figura 4.44, é possível comprovar a tendência linear entre a taxa de substituição de agregados reciclados e a profundidade de carbonatação registada para cada idade.

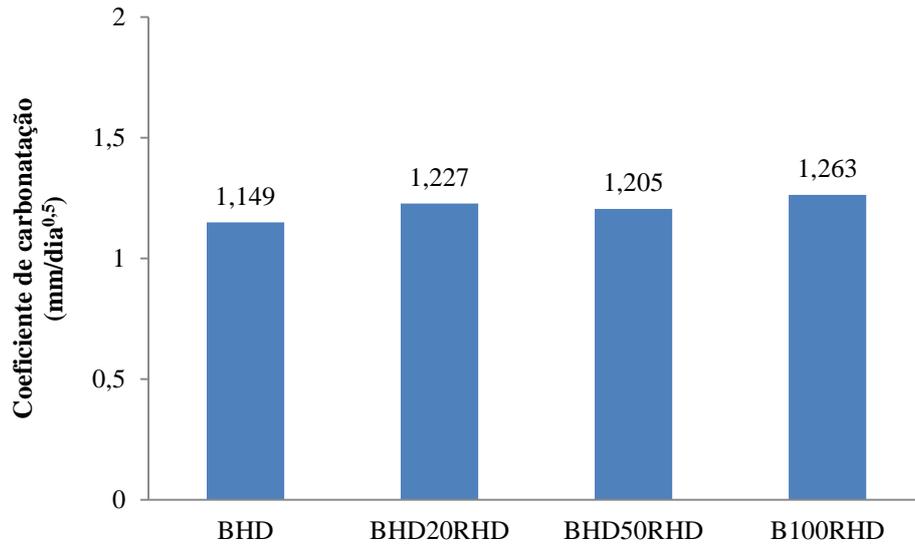


Figura 4.43 - Coeficiente de carbonatação, para as composições BHDRHD

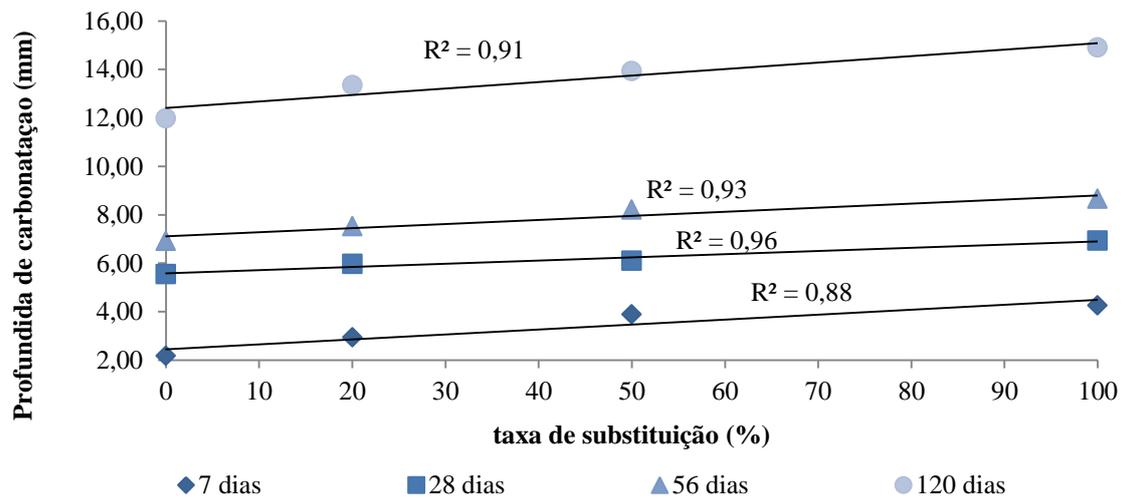


Figura 4.44 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRHD

Tal como previsto, o desempenho destes betões é semelhante ao da absorção por imersão, comprovando assim que a resistência do betão à carbonatação está relacionada com a sua porosidade aberta. Na Figura 4.45, é apresentada a relação entre estas duas propriedades.

No que se refere às composições BMRHD, verifica-se, através da Figura 4.46, uma redução da profundidade de carbonatação, ao contrário dos resultados obtidos para o betão de leca estrutural. Uma vez que todas as composições apresentam a mesma relação a/c, este fenómeno pode ser explicado devido ao agregado reciclado RLHD ser menos poroso do que a leca M (não estrutural). Assim, o agregado reciclado acaba por desempenhar um efeito positivo, pois, ao ser menos poroso, permite uma maior resistência à penetração de gases e, por consequência, um melhor desempenho à carbonatação. O aumento do volume de argamassa contribui, ainda, para uma maior fixação de CO₂, reduzindo a profundidade de carbonatação.

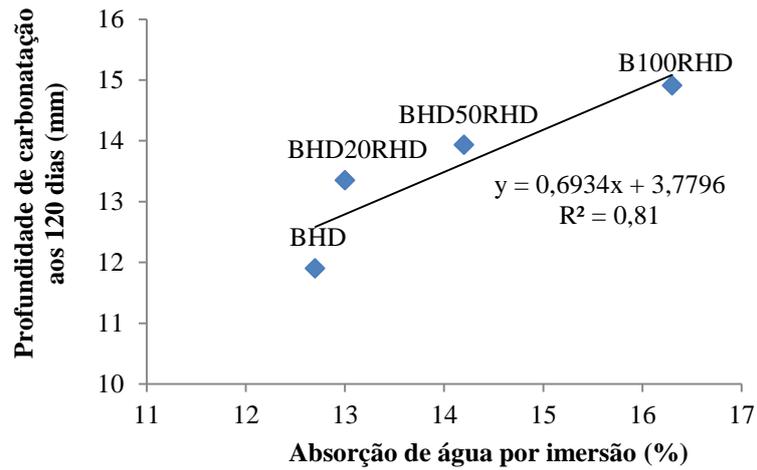


Figura 4.45 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRHD

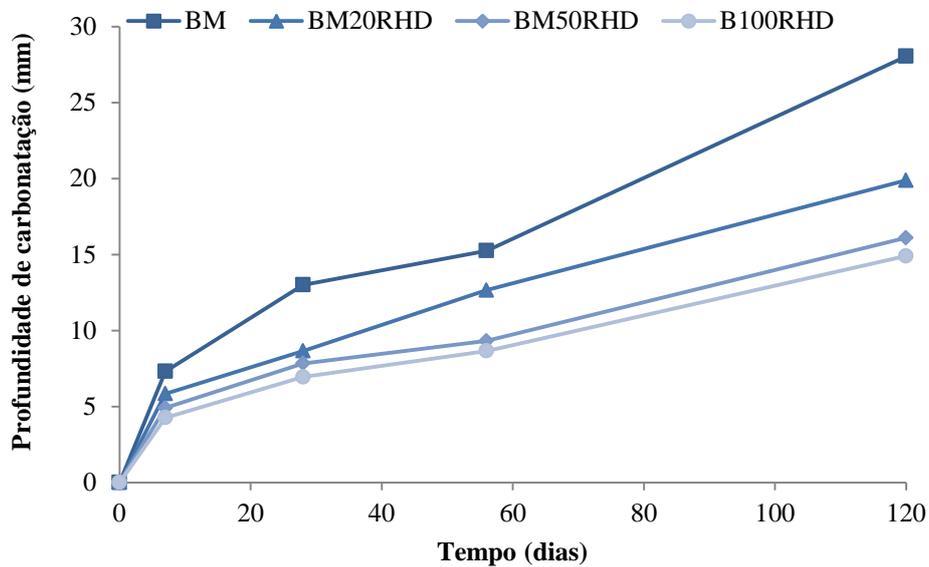


Figura 4.46 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo nas composições BMRHD

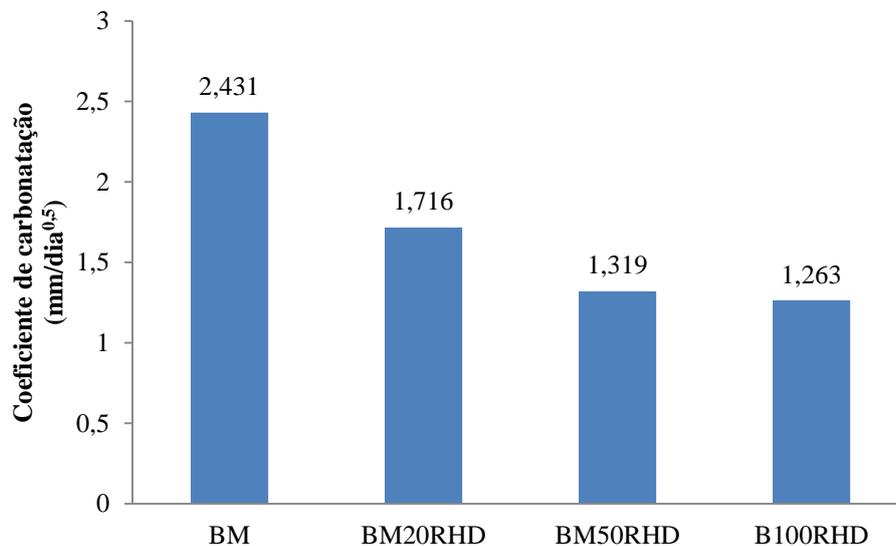


Figura 4.47 - Coeficiente de carbonatação, para as composições BMRHD

Da mesma forma, pela análise dos coeficientes de carbonatação (Figura 4.47), pode-se observar uma diminuição dos coeficientes à medida que se incorpora material reciclado no betão. Comprova-se assim, que a substituição de leca M por RLHD conduz a uma melhoria na resistência à carbonatação, facto que pode ser explicado pela menor porosidade do RLHD face à leca M e pelo aumento do volume de pasta que contribui para a fixação do dióxido de carbono.

Como se pode verificar na Figura 4.48, as tendências lineares registam coeficientes de correlação relativamente baixos.

Observa-se, ainda, uma boa relação entre este ensaio e o ensaio de absorção de água por imersão, onde se verifica um decréscimo da absorção de água à medida que se substitui leca M por RLHD. Este fenómeno era previsível, pois, se os dois ensaios dependem de características idênticas, tais como a porosidade do betão e do agregado, seria de esperar resultados semelhantes. Na Figura 4.49, é apresentada a relação entre estas duas propriedades.

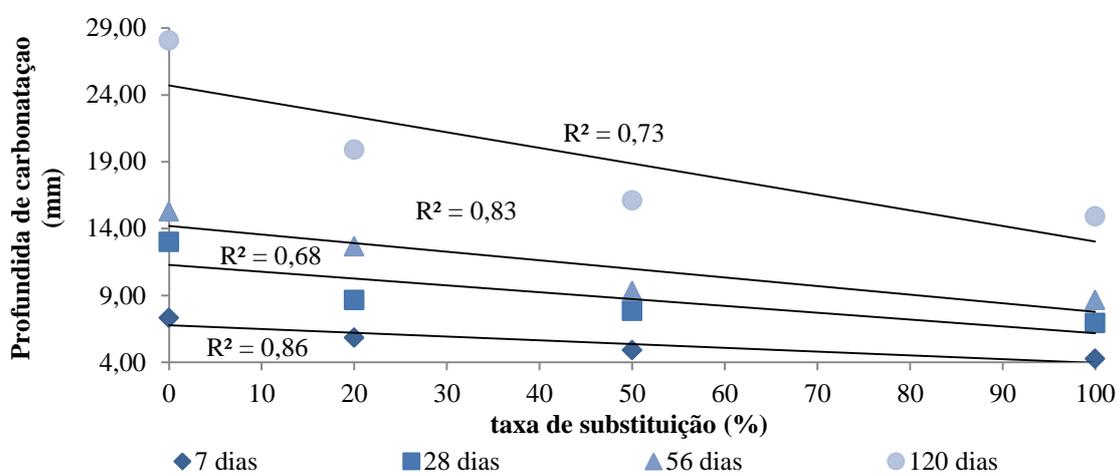


Figura 4.48 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BMRHD

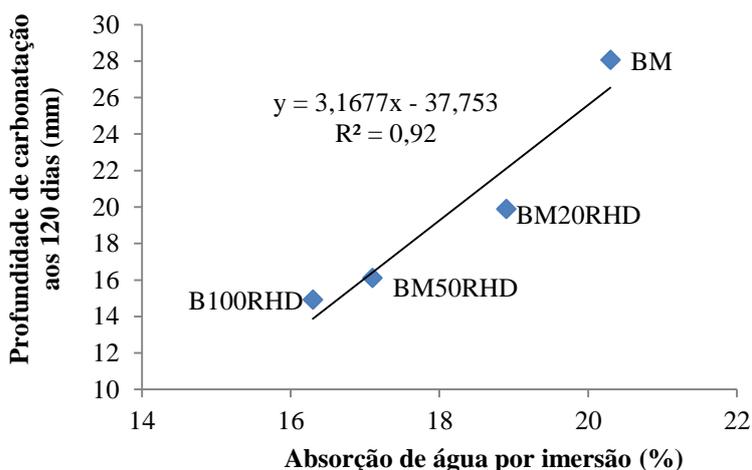


Figura 4.49 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BMRHD

Na Figura 4.50, são apresentados os valores médios obtidos, para as composições BHDRM, nas diferentes idades de ensaio, aos 7, 28, 56 e 120 dias.

Como se pode observar, verifica-se um aumento da profundidade de carbonatação ao longo do tempo e com o aumento da taxa de substituição de RLM. Tal como a incorporação de RLHD, também o RLM vai provocar um pior desempenho na resistência à carbonatação no betão. No entanto, verifica-se que a incorporação de RLM regista piores desempenhos face à incorporação de RLHD. A estrutura mais porosa do RLM é a principal causa para este fenómeno. Também a menor quantidade de pasta presente neste agregado (Eq. 4.1 e 4.2) contribui para uma menor fixação de CO₂.

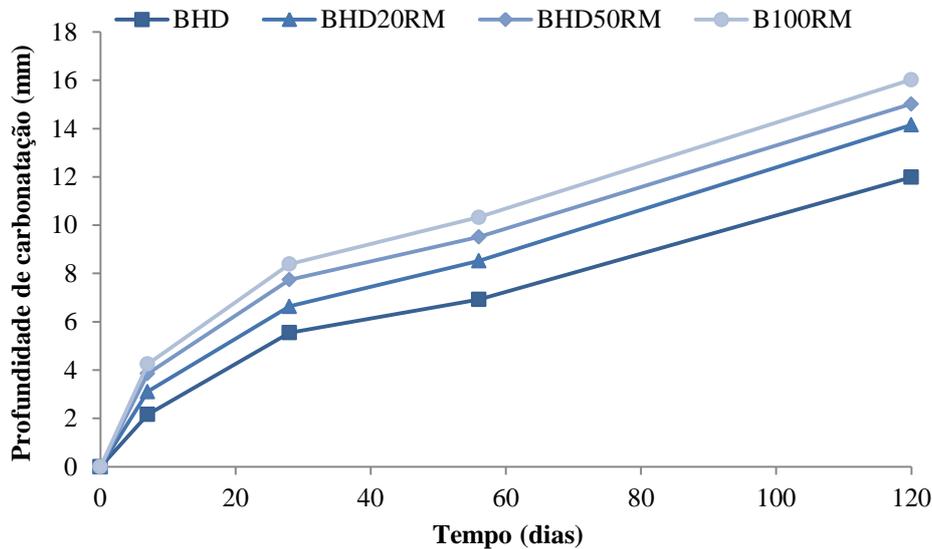


Figura 4.50 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo nas composições BHDRM

Na Figura 4.51, observa-se, tal como esperado, um aumento do coeficiente de carbonatação com a incorporação de RLM. No entanto, registam-se coeficientes de carbonatação semelhantes em todas as composições. Este fenómeno não era esperado, pois o RLM é um agregado com uma porosidade bastante superior à da leca HD. Uma explicação para este fenómeno passa pela baixa quantidade agregados partidos e pelo facto de a pasta aderida ao agregado funcionar como uma película exterior de protecção, o que pode dificultar a penetração de dióxido de carbono no betão, para além de contribuir para a sua fixação.

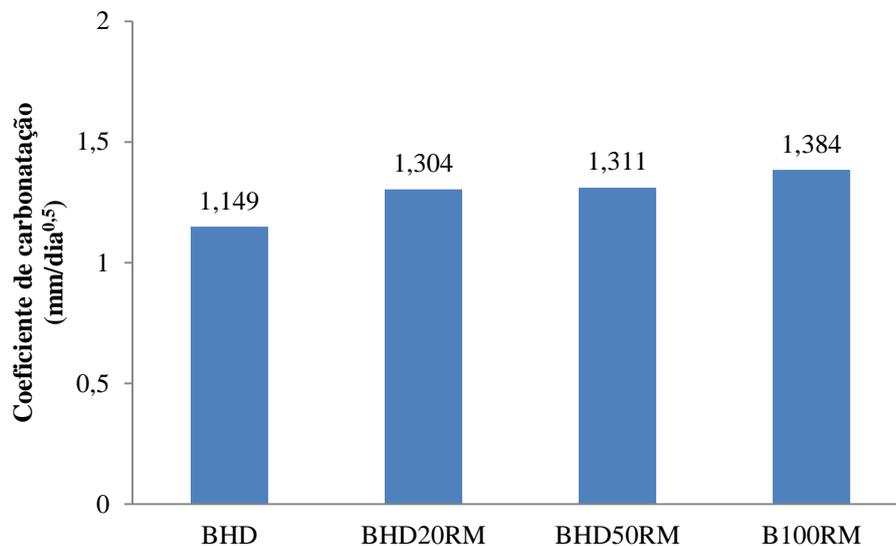


Figura 4.51 - Coeficiente de carbonatação, para as composições BHDRM

Observa-se, ainda, que a profundidade de carbonatação aumenta de forma mais acentuada nas primeiras idades de ensaio, até aos 28 dias. Após este período, a profundidade tende a aumentar de forma linear à medida que se incorpora RLM no betão, como se pode verificar na Figura 4.52.

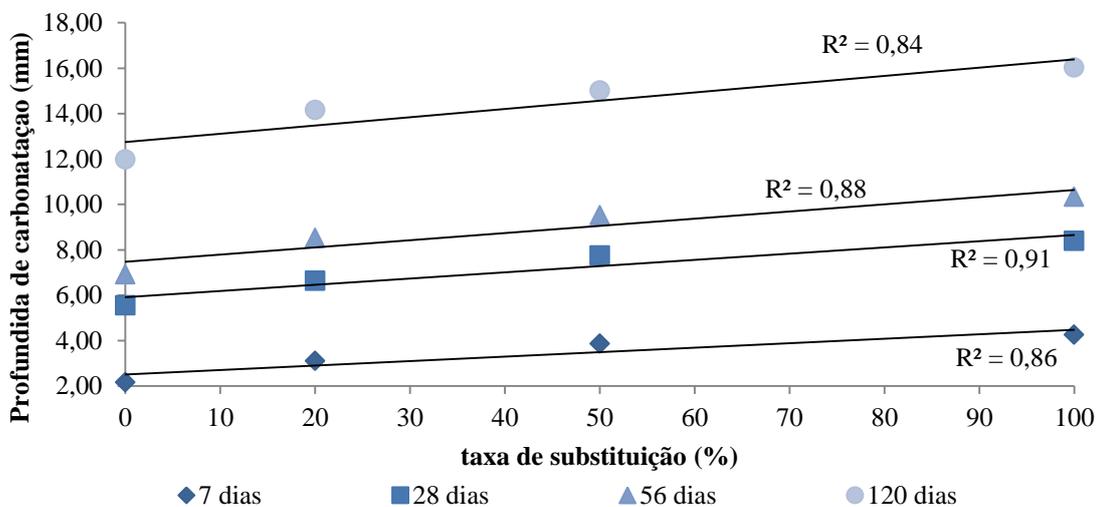


Figura 4.52 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRM

Comparando estes resultados com os resultados registados no ensaio de absorção de água por imersão (Figura 4.53), observa-se que tanto a profundidade de carbonatação como a absorção de água por imersão tendem a aumentar à medida que se incorpora material reciclado no betão.

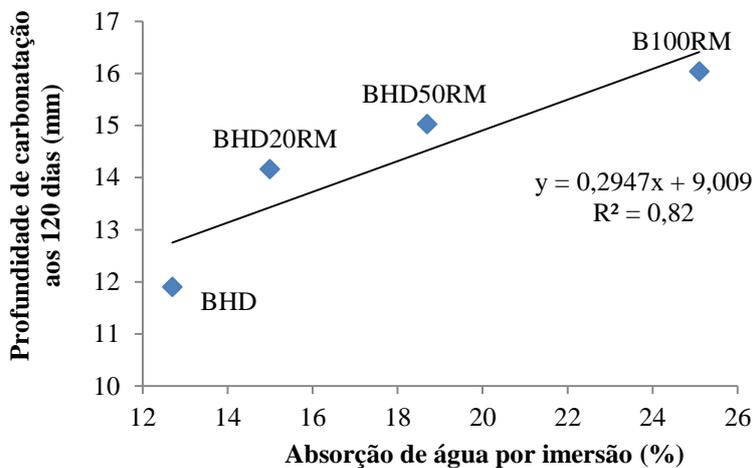


Figura 4.53 - Relação entre a absorção por imersão e a profundidade de carbonatação nas composições BHDRM

Na Figura 4.54, é possível observar a evolução da profundidade de carbonatação das composições BMRM ao longo do tempo. Como se pode verificar, à semelhança da composição BMRHD, existe um decréscimo da profundidade de carbonatação com o aumento da taxa de incorporação de RLM. Não era previsível que este fenómeno ocorresse, uma vez que o agregado RLM apresenta maiores níveis de absorção face à leca M. No entanto, este facto pode ser justificado pela composição do agregado reciclado. Uma vez que, após a trituração do betão de enchimento de origem, a percentagem de agregados intactos é

elevada, para granulometrias superiores a 4 mm, e a pasta aderida ao agregado funciona como uma película exterior protecção, o que pode dificultar a penetração de dióxido de carbono no betão, para além de contribuir para a sua fixação.

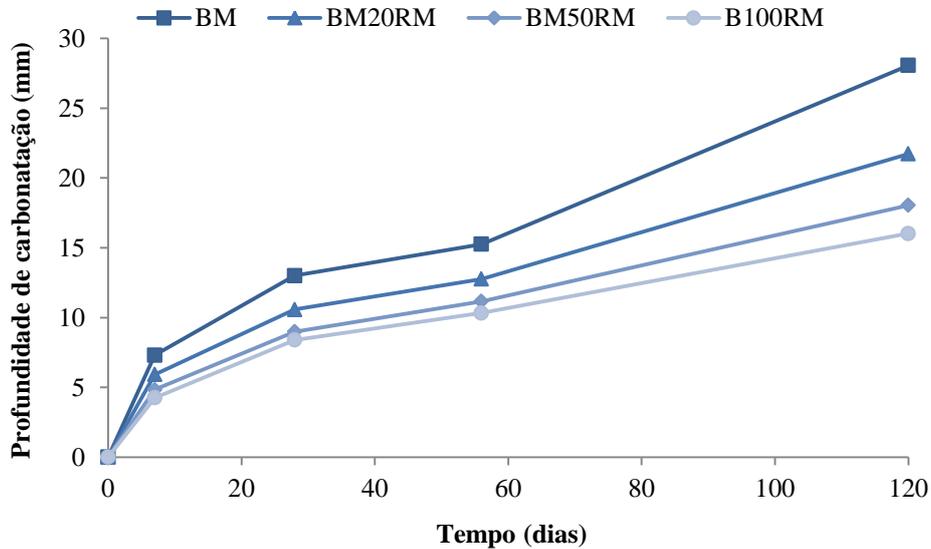


Figura 4.54 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo nas composições BMRM

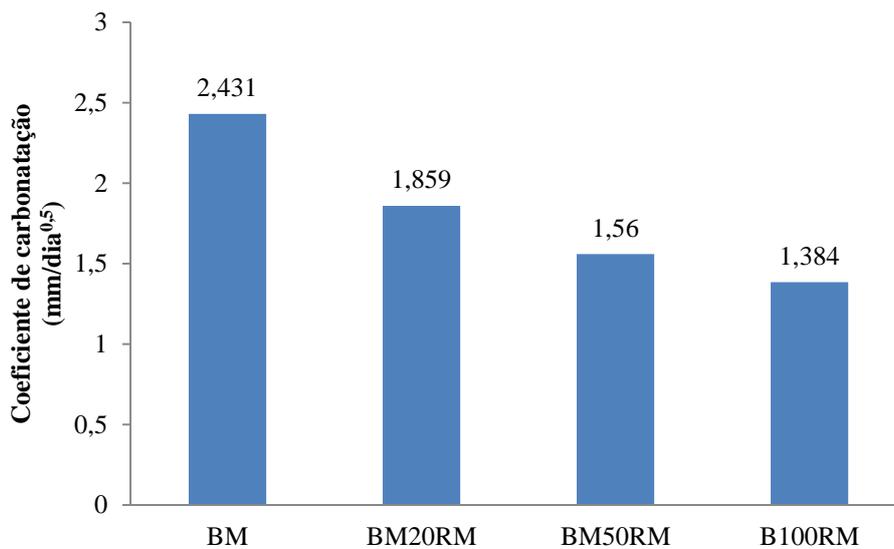


Figura 4.55 - Coeficiente de carbonatação, para as composições BMRM

Tal como na Figura 4.54, verifica-se, na Figura 4.55, uma diminuição dos coeficientes de carbonatação à medida que se substitui leca M por RLM. Este fenómeno, como referido, não era expectável, mas, apesar de o RLM ser um agregado mais poroso do que a leca M, a pasta aderida ao RLM dificulta a penetração de CO₂ no betão.

Analisando a Figura 4.56, pode-se observar que a profundidade de carbonatação tende a decrescer à medida que se incorpora RLM no betão.

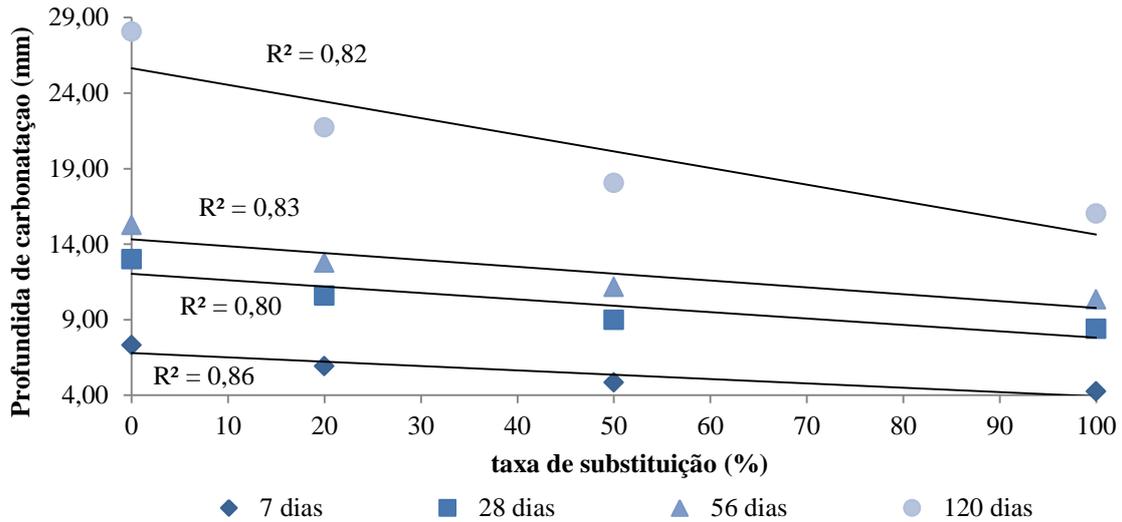


Figura 4.56 - Relação entre a taxa de substituição de agregado reciclado e a profundidade de carbonatação nas composições BMRM

Quando se compara estes resultados com os obtidos para a absorção de água por imersão, não se observa uma relação entre estes dois ensaios. Uma vez que os dois ensaios dependem de características idênticas, tais como a porosidade do betão e do agregado, seria de esperar resultados semelhantes. No entanto, verifica-se que os dois ensaios seguem tendências contrárias. Este facto justifica-se, pois a presença de pasta assume um papel diferente na absorção e na carbonatação.

Nas Figuras 4.57 e 4.58, é possível observar a relação entre esta propriedade e a resistência à compressão aos 28 dias.

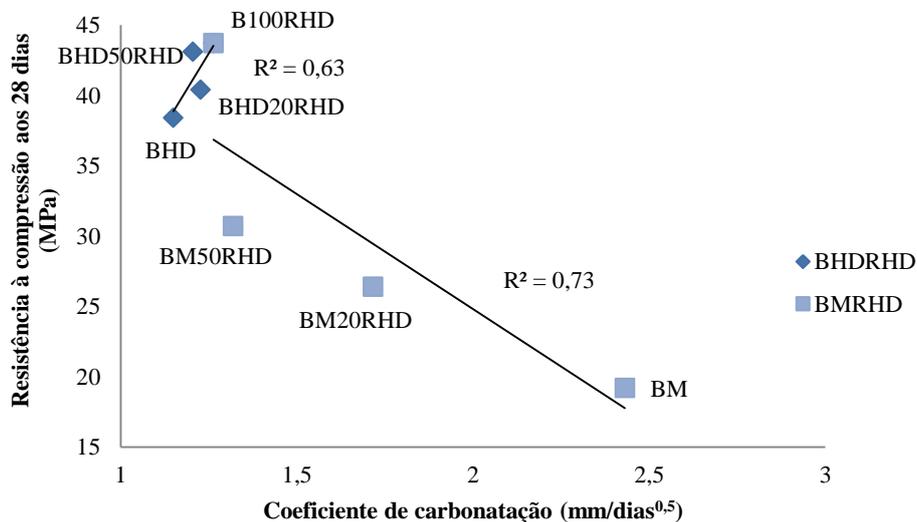


Figura 4.57 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de carbonatação, para as composições com RLHD

Como se pode observar pelas Figuras 4.57 e 4.58, observa-se uma possível relação entre as duas propriedades. Analisando as composições BMRHD e BMRM observa-se uma diminuição do coeficiente de carbonatação com o aumento da resistência do betão. Ao passo que, as composições BHDRM tendem a

apresentar coeficientes de carbonatação mais altos com a redução da resistência. No entanto, nas composições BHDRHD, observa-se um aumento do coeficiente de carbonatação com o aumento da resistência do betão. As duas propriedades dependem de factores diferentes e, apesar de os agregados reciclados exibirem uma rigidez superior face à dos agregados primários, apresentam maior porosidade.

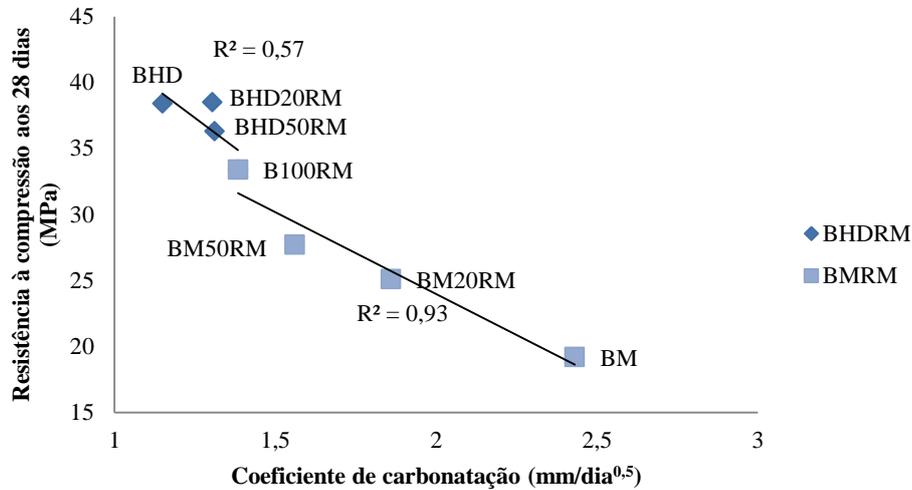


Figura 4.58 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de carbonatação, para as composições com RLM

4.4.5. Resistência à penetração de cloretos

Os ensaios para a determinação da penetração de cloretos foram realizados em conformidade com a norma Nordtest NT Build 492, tal como exposto no ponto 3.8.6.

Quadro 4.24 - Coeficientes de difusão de cloretos.

Composição de betão	Coeficiente de difusão aos 28 dias ($10^{-2}m^2/s$)	Variação (%)	Coeficiente de difusão aos 91 dias ($10^{-2}m^2/s$)	Variação (%)	Taxa de incorporação de reciclados (%)
BHD	13,87	0,0	10,36	0,0	0
BHD20RHD	15,13	9,1	13,09	26,3	20
BHD50RHD	15,34	10,6	14,27	37,7	50
B100RHD	16,67	20,2	16,19	56,3	100
BM	18,12	0,0	17,18	0,0	0
BM20RHD	14,03	-22,5	11,59	-32,6	20
BM50RHD	15,68	-13,4	14,45	-15,9	50
B100RHD	16,67	-8,0	16,19	-5,8	100
BHD	13,87	0,0	10,36	0,0	0
BHD20RM	11,94	-13,9	12,66	22,2	20
BHD50RM	13,50	-2,7	11,97	15,5	50
B100RM	15,82	14,0	13,30	28,3	100
BM	18,12	0,0	17,18	0,0	0
BM20RM	17,92	-1,1	14,67	-14,6	20
BM50RM	16,48	-9,0	12,37	-28,0	50
B100RM	15,82	-12,7	13,30	-22,6	100

A presença de iões cloretos é a principal causa para a despassivação das armaduras. A difusão dos iões cloretos no betão é um mecanismo que depende bastante da porosidade da matriz cimentícia.

No Quadro 4.24, são apresentados os resultados obtidos após a execução do ensaio. No ANEXO P, apresentam-se todos os valores registados durante o ensaio.

A introdução do agregado reciclado provoca o aparecimento de uma região de transição adicional que contribui para o aumento da porosidade do betão. Seria previsível que se registassem maiores difusões de cloretos em betões com maior taxa de incorporação de agregados reciclados. No entanto, pela breve análise do Quadro 4.24, nem sempre se verifica essa tendência.

Contudo, nas composições BHDRHD, é possível observar o pior desempenho em betões com maior taxa de ARBL. Este fenómeno poderá indicar que o aumento do volume de pasta provoca um aumento da difusão de cloretos no betão.

Os agregados apenas permitem a difusão de iões cloreto quando se encontram saturados (Bogas, 2011). Dado que os provetes se encontram saturados em hidróxido de sódio aquando do início do ensaio, será de prever que os agregados leves se encontrem parcialmente saturados, devido à sua elevada capacidade em reter água, e, conseqüentemente, sejam capazes de transportar iões Cl^- pelo betão.

Assim, o aumento do volume de pasta em conjunto com a possível saturação do agregado vai provocar um aumento da difusão de cloretos no betão, facto que se verifica em todas as composições produzidas à excepção da família de betões BMRM, em que se obteve um decréscimo da difusão à medida que se incorpora material reciclado, contrariamente ao esperado. Neste caso, a película de pasta aderida ao agregado parece ser benéfica, conferindo uma barreira à penetração de cloretos.

Como se pode observar, os betões com RLHD apresentam, em geral, maiores coeficientes de difusão do que os betões com RLM. Uma vez que o volume de pasta é sempre superior nos betões com RLHD face aos betões com RLM (ver Eq. 4.1 e 4.2), este factor parece ser a principal razão para este fenómeno ocorrer.

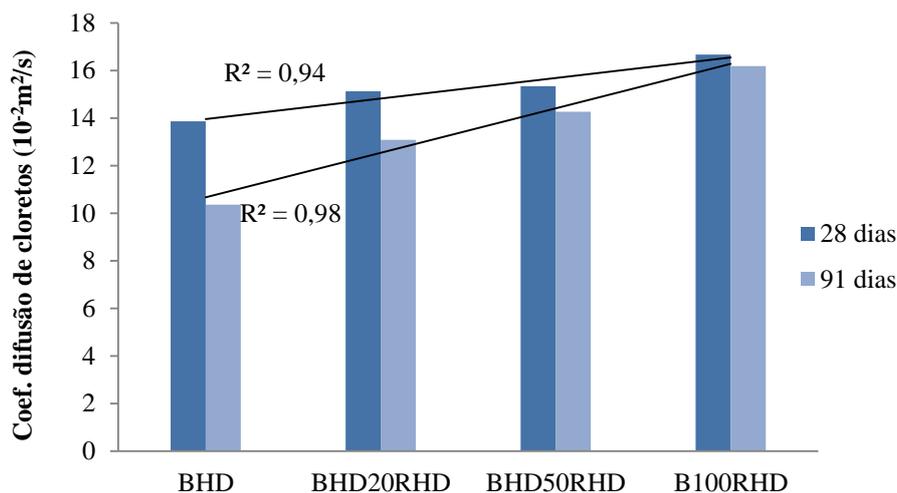


Figura 4.59 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BHDRHD

Ao analisar a Figura 4.59, é possível verificar um aumento do coeficiente de difusão à medida que se incorpora RLHD no betão, tanto aos 28 como aos 91 dias. De facto, era esperado que tal ocorresse, uma vez que o RLHD apresenta uma maior quantidade de partículas partidas, maior quantidade de argamassa

aderida e existem duas zonas de transição que, em conjunto com o agregado saturado, podem provocar um aumento da difusão de iões cloreto no betão.

Assim, registam-se valores de difusão altos em betões com maior porosidade, o que vai ao encontro da investigação de Liu *et al.* (2011), na qual o autor refere que, em betões leves, a difusão de iões Cl⁻ no betão pode ser elevada, sobretudo, quando o agregado é muito poroso.

Regista-se ainda que, aos 91 dias, os valores de difusão são menores do que aos 28 dias. Em parte, este fenómeno era expectável e pode ser explicado pela maior maturidade do betão (mais tempo de hidratação).

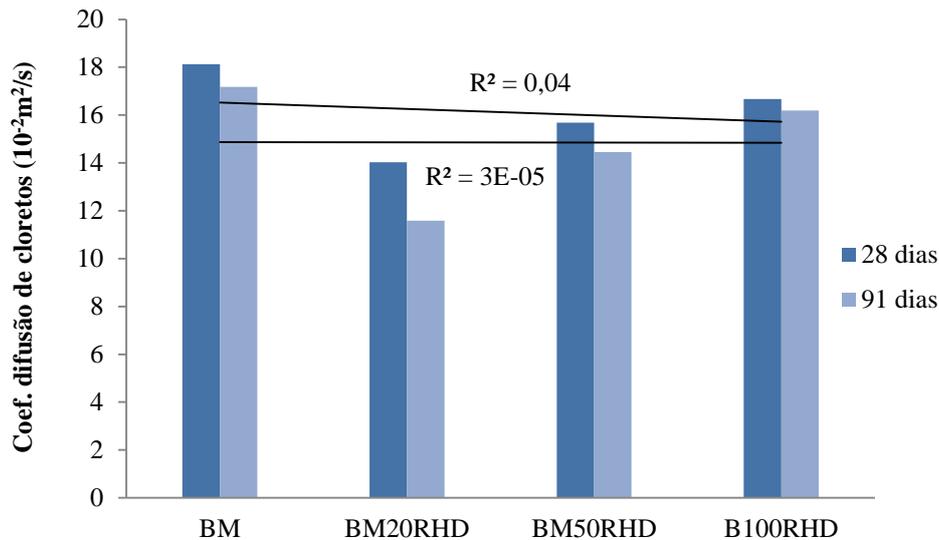


Figura 4.60 - Coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BMRHD

À semelhança do que ocorre com a família de betões BHRHD, também se verifica um aumento do coeficiente de difusão à medida que se substitui leca M por RLHD. À excepção dos valores de BM, que, como referido, aparentam ser anómalos, todas as composições apresentam coeficientes de difusão superiores à medida que se adiciona RLHD no betão, como se pode observar na Figura 4.60. Mais uma vez, o aumento do volume de pasta e eventual aumento de partículas partidas parecem ser os principais responsáveis por este fenómeno.

No que se refere às composições BHDRM, através da Figura 4.61, verifica-se uma ligeira tendência para se obterem valores de difusão superiores em betões com agregados reciclados RLM. A fraca tendência desta família de betões pode dever-se ao facto de o volume de pasta aderido ao agregado RLM não ser tão elevado como no RLHD, conferindo uma espécie de protecção ao agregado, uma vez que a quantidade de agregados leves não partidos é elevada. Este fenómeno parece compensar, em parte, a maior porosidade do RLM face à leca HD.

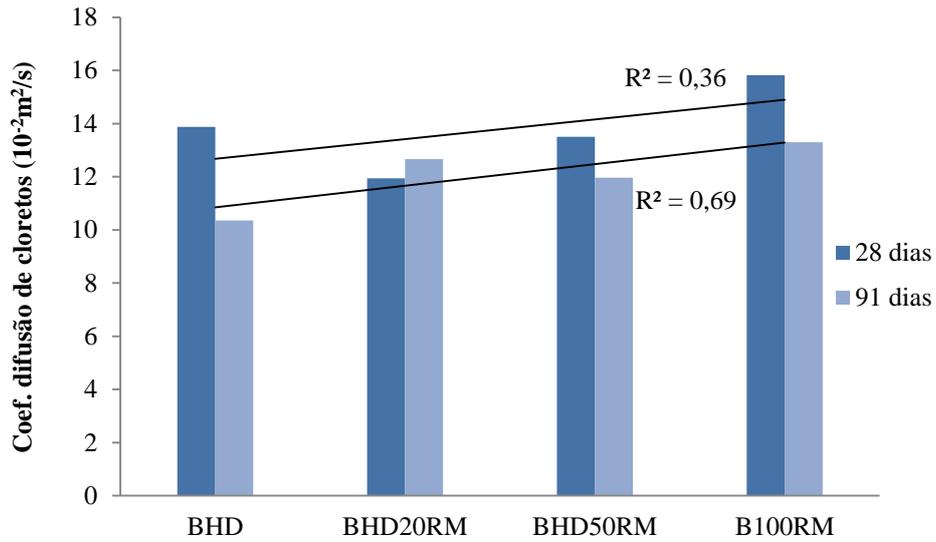


Figura 4.61 - Coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BHDRM

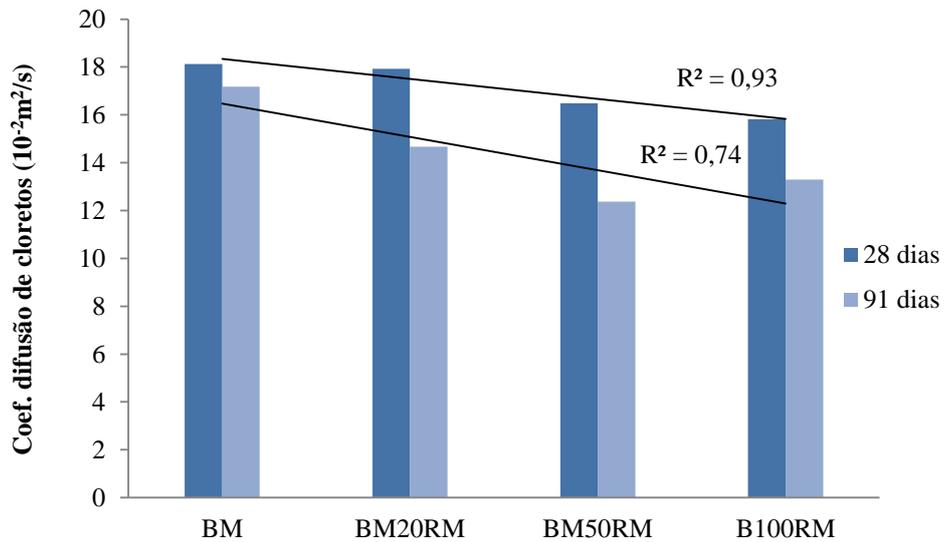


Figura 4.62 - Coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias nas composições BMRM

Por fim, pela análise da Figura 4.62, pode observar-se que, contrariamente ao esperado, existe uma ligeira tendência para a diminuição do coeficiente de difusão à medida que se incorpora RLM no betão. No entanto, o agregado RLM não apresenta tanta pasta aderida como o RLHD. Desta forma, o aumento do volume de pasta não vai ter tanta influência nestes betões, podendo até ser benéfica, no sentido em que protege o agregado.

Aos 91 dias, regista-se igual tendência e valores de difusão inferiores, o que comprova que a hidratação do betão tem importância na redução da penetração de cloretos no betão.

Desempenho em termos de durabilidade de betões de agregados
leves provenientes da trituração de pisos de betão leve

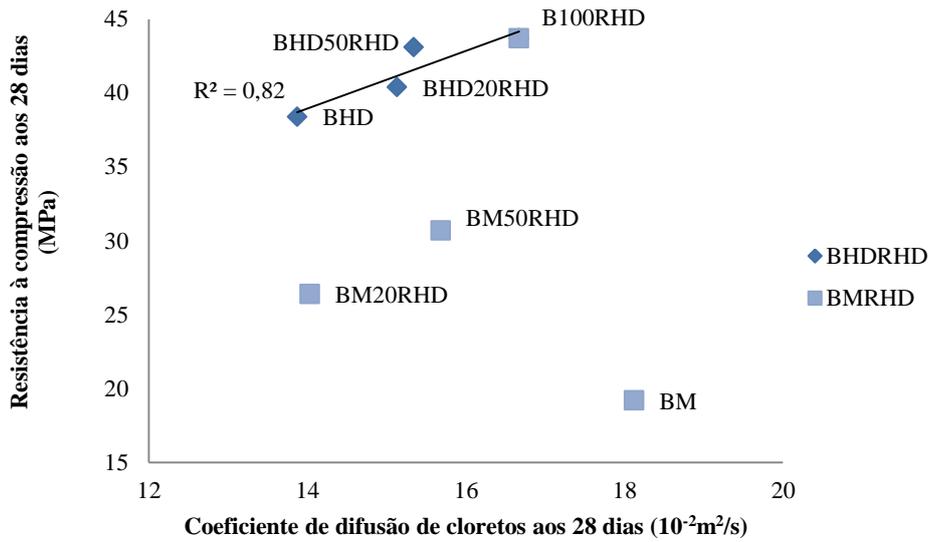


Figura 4.63 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias, para as composições com RLHD

Pela análise da Figura 4.63, desprezando o betão BM (devido aos resultados anómalos registados), verifica-se um ligeiro aumento da difusão dos cloretos à medida que a resistência à compressão aumenta. No entanto, não existe uma tendência clara entre estas propriedades que seja independente do tipo de agregado. Da mesma forma, verifica-se uma fraca relação entre a resistência à compressão do betão e a resistência à penetração de cloretos (Figura 4.64).

Mais uma vez, estando a resistência à penetração de cloretos mais ligada à porosidade e interconectividade dos agregados no betão do que à sua rigidez, existe uma fraca correlação entre estas duas propriedades.

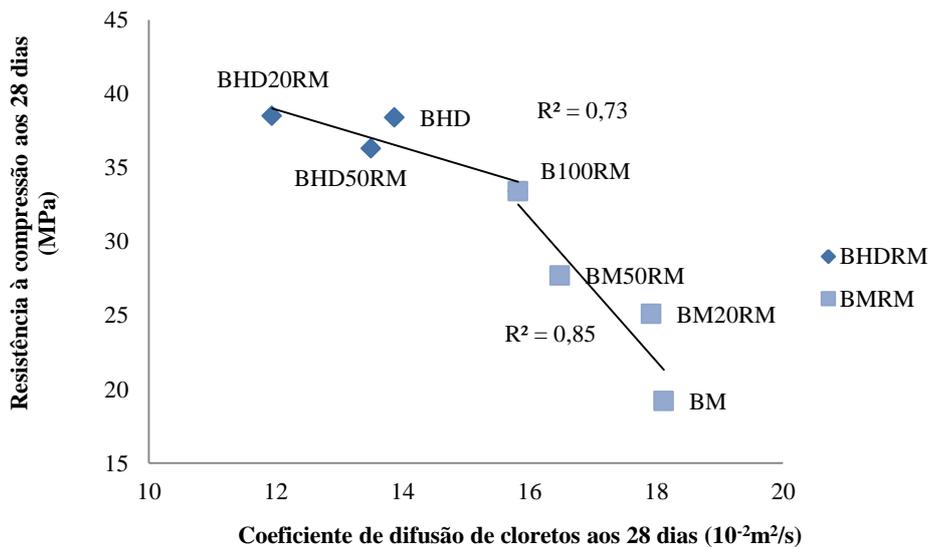


Figura 4.64 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias, para as composições com RLM

5. CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O elevado consumo de recursos naturais inculido pela actividade humana não é, de modo algum, sustentável, mais especificamente, na indústria da construção. Esta actividade não só consome grande parte destes recursos, como também os resíduos inerentes aos seus processos conduzem a graves consequências ambientais e económicas.

Desta forma, é necessária a procura de soluções alternativas que favoreçam a reutilização e reciclagem de recursos abundantes na construção que, de outro modo, resultariam em resíduos. A reutilização de agregados reciclados na produção de betões, particularmente em aplicações estruturais, evita o corrente processo de *downcycling* na reciclagem de resíduos.

De modo a que a utilização de agregados reciclados em betões estruturais se acentue na indústria da construção, torna-se fundamental compreender as suas características mecânicas e avaliar a sua durabilidade, tendo em conta os seus benefícios e limitações nas diversas condições de utilização. Assim, com esta dissertação, espera-se ter contribuído para o aprofundamento do conhecimento das propriedades dos betões com agregados reciclados de betão, nomeadamente betões com agregados de betão leve reciclado (ALBR) e a sua potencialidade em soluções estruturais.

5.2. CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos nesta investigação conduziram a algumas conclusões interessantes sobre a influência dos ALBR no desempenho em termos de durabilidade de betões estruturais. Este subcapítulo encontra-se organizado em três partes distintas. Em primeiro lugar, são apresentadas as conclusões mais relevantes das propriedades dos ALBR. Em segundo lugar, expõem-se as conclusões obtidas nos ensaios dos betões no estado fresco e, por fim, apresentam-se as conclusões resultantes dos ensaios de retracção e de durabilidade efectuados.

A massa volúmica dos agregados reciclados é uma das propriedades que mais difere em relação aos agregados primários. No entanto, contrariamente aos agregados reciclados de betão de massa volúmica normal, os ALBR apresentam uma massa volúmica cerca de 30% superior aos seus homólogos primários. Ao comparar a massa volúmica do agregado reciclado de leca estrutural (RLHD) com a leca estrutural (HD), observa-se um aumento de 37%, ao passo que o agregado reciclado de leca não estrutural (RLM) regista um aumento de 32% face à leca não estrutural (M). Deste modo, é possível concluir que a argamassa aderida ao agregado primário, após a britagem do betão reciclado, aumenta a massa volúmica do agregado. Porém, o aumento da massa volúmica não compromete a natureza “leve” dos agregados, de acordo com os limites especificados na EN 13055-1.

No que diz respeito à absorção de água dos agregados, os agregados reciclados apresentam valores de absorção superiores, devido ao volume de pasta aderida e à maior acessibilidade da porosidade aberta destes agregados.

No que se refere à resistência ao esmagamento dos agregados, verifica-se um aumento desta propriedade nos ALBR. No entanto, este incremento é mais significativo no RLM, representando cerca de 38% face à leca M. Neste caso, a pasta aderida ao agregado reciclado confere uma maior rigidez ao agregado, contrariamente ao que sucede com os ABR.

Tal como os agregados reciclados de betão de massa volúmica normal, também os ALBR apresentam formas mais alongadas do que os AL. No entanto, o RLHD regista uma forma mais alongada do que o RLM. Assim, é possível concluir que a reciclagem de betões de enchimento (sem finos) permite manter os agregados resultantes com uma forma mais semelhante à dos agregados originais.

No que se refere à massa volúmica do betão no estado fresco, observa-se a tendência para se registarem massas volúmicas superiores com a incorporação de ALBR. De facto, excepto nas composições BHDRM, a massa volúmica dos agregados reciclados é superior à dos AL. Devido à menor massa volúmica do RLM face à leca HD, regista-se uma diminuição da massa volúmica à medida que se adiciona RLM. Apesar de o betão com 100% de RLHD apresentar uma massa volúmica de 2092 kg/m^3 , a sua massa volúmica seca é inferior a 2000 kg/m^3 . Assim, pode concluir-se que é possível produzir betões leves utilizando ALBR.

Em termos de resistência à compressão aos 28 dias dos betões produzidos, verifica-se que esta tende a aumentar com a incorporação de ALBR, à excepção das composições BHDRM, onde a incorporação de RLM reduz significativamente a resistência do betão, o que pode ser justificado pela reduzida rigidez e resistência do RLM em comparação com a leca HD. Por outro lado, não se regista uma grande variação, cerca de 10%, no aumento da resistência dos betões em que se substituiu leca HD por RLHD. A composição de betões que apresenta maior variação nos valores de resistência é a BMRHD, onde se substituiu leca M por RLHD. De facto, a reduzida rigidez da leca M limita o desenvolvimento da resistência dos betões. Assim, e visto que nos betões leves a resistência é normalmente afectada pela resistência dos agregados, ao substituir um agregado de baixa resistência por um de melhor desempenho mecânico, é normal que se atinjam melhores resultados. Pode, deste modo, concluir-se que, em betões estruturais, a incorporação de ALBR provenientes de betões de enchimento (aplicação mais usual do betão leve) conduz a um decréscimo da resistência mecânica do betão. Por outro lado, tendo em conta as composições analisadas, a incorporação de ALBR provenientes de elementos estruturais provoca apenas um ligeiro aumento da resistência.

A massa volúmica do betão no estado endurecido regista a mesma tendência da massa volúmica no estado fresco. De notar, ainda, que esta é relacionável com a resistência mecânica do betão.

Constatou-se que a incorporação de ALBR no betão conduz ao aumento da retracção. Apesar de o agregado reciclado apresentar maior rigidez do que o agregado leve primário, a quantidade de argamassa aderida ao ALBR contribui para o aumento da deformação diferida. No entanto, a retracção inicial tende a diminuir com a capacidade em absorver água dos agregados, ou seja, numa fase inicial, a cura interna proporcionada pelos agregados reciclados compensa a água que é perdida na pasta, devido à evaporação. Devido à fraca rigidez do RLM, a incorporação deste agregado (proveniente de um betão de enchimento) reduz a capacidade de restrição da deformação do betão quando comparado com a

incorporação de RLHD. Verifica-se que, em betões estruturais, a incorporação de ALBR (tanto RLHD como RLM) pode piorar significativamente o desempenho do betão, com aumentos na retracção em cerca de 100%, ao passo que, em betões não estruturais (leca M), esta variação é menos significativa. Assim, para esta propriedade, o uso de ALBR em betões não estruturais não aparenta ser tão prejudicial quando comparado com a produção de betões estruturais com os mesmos agregados. No entanto, são de esperar melhores resultados, quando se tem em consideração agregados leves reciclados de estruturas com vários anos de idade.

No que se refere à absorção por capilaridade, observa-se um aumento da absorção de água em todas as composições produzidas com a incorporação de ALBR. As composições em que se substituiu leca HD por agregados reciclados são as que apresentam piores desempenhos face ao betão de referência BHD, onde a incorporação de RLHD é mais prejudicial do que a incorporação de RLM. Este fenómeno deve-se, essencialmente, à maior quantidade de argamassa aderida ao RLHD que, por sua vez, aumenta a capacidade de absorver água por capilaridade no betão. Apesar de não se verificarem grandes variações nas composições com leca M, o BM apresenta um valor de absorção superior ao esperado, pelo que se torna difícil concluir acerca do melhor ou pior desempenho dos ALBR face à leca M. Contudo, observa-se uma tendência semelhante à registada pelos betões de leca HD, onde a incorporação de RLM apresenta melhores desempenhos face ao RLHD. Os resultados obtidos indicam uma maior importância, na absorção capilar, da argamassa aderida aos agregados primários do que a porosidade global do agregado.

A absorção de água por imersão é, em geral, superior nos betões com maiores taxas de incorporação de agregados reciclados. Observa-se que as composições em que se incorporou RLM são as que apresentam piores desempenhos, sobretudo em betões em que se substituiu leca HD, onde se regista um aumento superior a 95% por parte do betão com 100% de RLM face ao BHD. No entanto, a incorporação de RLHD em betões com leca M reduz os níveis de absorção de água por imersão, devido à menor porosidade do agregado reciclado face à leca M. Assim, de um modo geral, pode concluir-se que a incorporação de ALBR, associados a maior porosidade, aumenta os níveis de absorção de água por imersão no betão.

No que se refere à resistência à carbonatação, a profundidade de carbonatação tende a aumentar quando se substituiu a leca HD por ALBR. De facto, a maior porosidade dos ALBR face à leca HD facilita a difusão de gases no betão. Assim, tal como na absorção de água por imersão, a incorporação de ALBR provoca piores desempenhos no betão, sendo esta evolução mais significativa quando se incorpora RLM. Tendo em conta as composições com leca M, observa-se uma melhoria com a incorporação de ALBR. De facto, era de esperar que tal sucedesse com a incorporação de RLHD, uma vez que este apresenta menos porosidade do que a leca M. No entanto, não era previsível que o mesmo se verificasse com a incorporação de RLM. Neste caso, apesar da maior porosidade do agregado reciclado, verificou-se que grande parte das partículas se encontrava intacta e envolvida numa película de pasta, o que poderá proteger o agregado, retardando a difusão do dióxido de carbono. Para tal contribui, igualmente, a maior capacidade de fixação de CO₂ por parte da pasta.

Por fim, apesar de se observarem valores aparentemente contraditórios, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à penetração de cloretos demonstram que a incorporação de ALBR no betão piora a resistência à penetração de iões Cl⁻. Em betões normais, esta propriedade está mais ligada à qualidade da

pasta, pois os agregados não permitem a difusão de cloretos. No entanto, nos betões leves, devido à porosidade dos agregados leves, a difusão através destes não pode ser desprezada, nomeadamente em condições saturadas, como sucede nos ensaios em que os provetes se encontram saturados em hidróxido de sódio. Assim, é possível que os agregados participem na difusão de cloretos, o que, em conjunto com o aumento da porosidade dos ALBR, vai provocar menores resistências à penetração de cloretos no betão. No entanto, esta redução não apresenta uma grande variação, cerca de 20%, face aos betões de referência, quando se analisa esta propriedade aos 28 dias. Em geral, obtiveram-se valores de difusão mais baixos aos 91 dias, facto que em parte pode ser explicado pela evolução da hidratação do betão.

Conclui-se, ainda, que as propriedades mecânicas nestes betões não se encontram relacionadas com as propriedades de durabilidade. De facto, neste tipo de betões, as características mecânicas estão mais ligadas à capacidade resistente dos agregados utilizados, pois a resistência dos betões leves depende da resistência do agregado. Ao passo que as propriedades de durabilidade estão mais ligadas não só com a porosidade dos agregados, mas também com a qualidade da pasta.

De uma forma geral, pode concluir-se que a incorporação de ALBR no betão piora o desempenho em termos de durabilidade, apesar de garantir maior eficiência mecânica, sobretudo nas composições com leca HD. No entanto, para betões com leca estrutural e incorporação de 20% de RLHD, o desempenho é relativamente semelhante ao dos betões sem agregado reciclado. Para taxas superiores, apesar da boa resistência mecânica dos betões, a redução ao nível do desempenho em termos de durabilidade pode comprometer a vida útil dos betões. No entanto, regista-se uma boa resistência à carbonatação. Desta forma, estes betões podem ser aplicados em ambientes pouco agressivos, dentro das seguintes classes de exposição: XC1, XC2, XD1 e XS1 (E 464-2007).

Por outro lado, o uso de RLM em betões com leca estrutural provoca um pior desempenho, tanto em termos mecânicos como na durabilidade do betão em comparação com o RLHD, pelo que não é aconselhável o uso deste agregado na produção de betões leves estruturais, pelo menos tendo em conta percentagens elevadas de substituição. No entanto, para matrizes correntes de menor compacidade, associadas a menores relações a/c , serão de esperar menores diferenças nos resultados entre os betões com agregados leves de origem e os betões com agregados leves reciclados.

No que se refere a betões com leca não estrutural, pode concluir-se que a incorporação de RLHD é benéfica, tanto em termos mecânicos, como em termos de durabilidade. Porém, pode provocar aumentos na massa volúmica que podem comprometer a sua utilização. Quanto à incorporação de RLM, observa-se um comportamento razoável, em geral, benéfico para todas as taxas de substituição.

5.3. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Com base em toda a informação recolhida ao longo desta dissertação, foi possível obter um conhecimento mais profundo sobre betões com agregados reciclados de betão leve. No entanto, existem muitas propriedades que poderão ser estudadas, com a utilização deste material como agregado. Nesse sentido, são mencionadas algumas propostas de desenvolvimento futuro que poderão ajudar a aperfeiçoar o conhecimento da utilização destes agregados:

- desempenho mecânico e de durabilidade em betões com ALBR, tendo em consideração outras composições, nomeadamente misturas de maior compacidade;
- desempenho mecânico e de durabilidade em betões com agregados finos reciclados de betão leve;
- avaliação da retracção tendo em conta betões produzidos com agregados leves reciclados provenientes de elementos estruturais sujeitos a secagem e com diferentes anos de idade;
- 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 duplas de transição pasta-pasta-ALBR;
- avaliação das características térmicas e acústicas de betões com ALBR;
- viabilidade na produção de betões não estruturais com agregados reciclados.

BIBLIOGRAFIA

LIVROS, DISSERTAÇÕES E TEXTOS

- **ACI213R (2003)** - *“Guide for structural Lightweight-Aggregate Concrete”*, American Concrete Institute, Detroit;
- **Akçaozoglu, S., Atis, C., Akçaozoglu, K. (2009)** - *“An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete”*, Waste Management, Vol. 30, Issue 2, pp. 285-290;
- **Al-Sibahy, A., Edwards, R. (2011)** - *“Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete containing recycled glass and metakaolin”*, Construction and Building Materials, Vol. 30, pp. 157-167;
- **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;
- **Amorim, P. (2008)** - *“Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Angulo, S. (1998)** - *“Produção de concretos de agregados reciclados”*, Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina;
- **Angulo, S. (2005)** - *“Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos”*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo;
- **Bandyopadhyay, A.K. e Swamy, R.N. (1975)** - *“Durability of steel embedded in structural lightweight concrete”*, Materials and Structures, Vol. 8, pp. 203-210;
- **Bogas, J. (2011)** - *“Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida”*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Branco, F., Reis, M., Tadeu, A. (2006)** - *“Utilização da cortiça como agregado em betões”*, Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção, Vol II, LNEC Lisboa, pp. 709-720;
- **Bravo, M. (2009)** - *“Desempenho em termos de durabilidade de betões estruturais com granulado de borracha proveniente de pneus usados”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Brito, J. de (2005)** - *“Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões”*, Lição de Síntese de Agregação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Buttler, A. (2003)** - *“Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados”*, Dissertação de

Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos;

- **CEB-FIP (1978)** - “*Model code for concrete structures*”, 3rd edition;
- **Chandra, S.; Berntsson, L. (2003)** - “*Lightweight concrete. Science, Technology and applications*”, Noyes publications-Wiliam Andrew Publishing, USA;
- **Clarke, J.L. (1993)** - “*Structural Lightweight Aggregate Concrete*”, Chapman & Hall;
- **Coutinho, A.; Gonçalves, A. (1997)** - “*Fabrico e propriedades do betão*”, Volume I, II e III, LNEC, Lisboa;
- **De Gennaro, R.; Cappelletti, P.; Cerri G.; de Gennaro, M.; Donde, M.; Langella, A.** - “*Neapolitan Yellow Tuff a raw material for lightweight aggregates in lightweight concrete production*”, Applied Clay Science, Vol. 28, Issues 1-4, pp. 309-319;
- **Evangelista, L. (2007)** - “*Betões executados com agregados finos reciclados de betão*”, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **EuroLightCon R7 (2000)** - “*Grading and composition of the aggregate*”, Project BE96-3942R7;
- **EuroLightCon R8(2000)** - “*Properties of lightweight concretes containing Lytag nd Liapor*”, Project BE96-3942R8;
- **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;
- **EuroLightCon R18 (2000)** - “*Durability of LWAC made with natural lightweight aggregates*”, Project BE96-3942R18;
- **EuroLightCon R26 (2000)** - “*Recycling lightweight aggregate concrete*”, Project BE96-3942R26;
- **EuroLightCon R31 (2000)** - “*Long-term effects in LWAC: Strength under sustained loading and Shrinkage of high strength LWAC*”, Project BE96-3942R31;
- **Ferreira, R. (2000)** - “*Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*”, Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães;
- **Fonseca, N. (2008)** - “*Influência das condições de cura no desempenho mecânico de betões com agregados reciclados de betão*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Fraj, A.B., Kismi, M., Mounabga, P. (2010)** - “*Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight concrete*”, Construction and Building Materials, Vol. 24, Issue 6, pp. 1069-1077;
- **Gadea, J., Rodriguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V. (2010)** - “*Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam*”, Cement & Concrete Compositions, Vol. 32, Issue 9, pp. 672-677;

- **Gonçalves, A. (2001)** - *“Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos da construção”*, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Gonçalves, P. (2007)** - *“Betões com agregados reciclados - Análise comentada da legislação existente”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Haque, M. N., Al-Khaiat, H., Kayali, O. (2002)** - *“Strength and durability of lightweight concrete”*, Cement & Concrete Composites, Vol. 26, Issue 4, pp. 307-314;
- **Junco, C., Gadea, J., Rodriguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V. (2012)** - *“Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam”*, Cement & Concrete Compositions, Vol. 34, Issue 10, pp. 1174-1179;
- **Kwan, W., Mahyuddin R., Kam K., Sulieman M. (2011)** - *“Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties”*, Construction and Building Materials, Vol. 26, Issue 1, pp 565-573;
- **Kralj, D. (2009)** - *“Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass”*, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 87, Issue 4, pp. 267-273;
- **Kou, S.C.; Lee, G.; Poon, C.S.; Lai, W.L. (2009)** - *“Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes”*. Waste Management, Vol. 29, Issue 2, pp. 621-628;
- **Leite, M. (2001)** - *“Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre;
- **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;
- **Lima, P., Leite, M., Santiago, E. (2010)** - *“Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW”*, Waste Management, Vol. 30, Issue 6, pp. 1107-1113;
- **Liu, X.; Chia K.; Zhang M. (2011)** - *“Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete”*, Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 1, pp. 335-343;
- **Malesev, M.; Radonjanin V.; Marinkovic S. (2010)** - *“Recycled concrete as aggregate for structural concrete production”*, Article, Departement for Civil Engineering, Faculty of Technical Sciences, Serbia, Faculty of Civil Engineering, Belgrade;
- **Marques, A. (2010)** - *“Comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **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;
- **Melo, A. (2000)** - *“Betões leves vibrocomprimidos com agregados de argila expandida”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto;

- **Muller, A.; Sokolova, S.N.; Vereshagin, V.I. (2007)** - “*Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials*”, Construction and Building Materials, Vol. 22, Issue 4, pp. 703-712;
- **Nawel, S., Mounir, L., Hedi, H. (2011)** - “*Study of mechanical behavior of lightweight aggregates concrete of Tunisian clay*”, Procedia Engineering, Vol. 10, pp. 936-941;
- **Nepomuceno, M. (1999)** - “*Estudo da composição de betões*”, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. Universidade da Beira Interior, Covilhã;
- **Ortiz, O.; Castells, F.; Sonnermann, G. (2007)** - “*Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*”, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 1, pp. 28-39;
- **Reinhardt, H. e Kummel, J. (1999)** - “*Some tests on creep and shrinkage of recycled lightweight concrete*”, Otto-Graf journal, Vol. 10
- **Robles, Ricardo. (2007)** - “*Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados - Levantamento do State-of-the-art experimental internacional*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- **Rocha, B. (2004)** - “*Propriedades de betões fabricados com agregados reciclados*”, Trabalho final de curso em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro;
- **Rossignolo, J. (2003)** - “*Concreto leve de alto desempenho modificado com sb para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura*”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- **Silva, Bruno. (2007)** - “*Betão leve estrutural com agregados de argila expandida*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.
- **Silva, R. (2012)** - “*Influência das condições de cura em termos de durabilidade de betões com agregados de resíduos plásticos seleccionados*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- **Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. (2012)** - “*Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size*”, Construction and Building Materials, Vol. 29, pp. 520-526;
- **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.
- **Zhang, Min-Hong e Odd E. Gjorv (1989)** - “*Characteristics of lightweight aggregates for high strength LWA concrete*”, Materialutvikling Hoyfast Betong, Report N° 2.2. STF70 A92022, 41 pp.
- **Zega, C., Di Maio, Á. (2011)** - “*Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements*”, Waste Management, Vol. 31, Issue 11, pp. 2336-2340;

- **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.

NORMAS

- **LNEC E 391** (1993) - *Betões: determinação da resistência à carbonatação, Lisboa;*
- **LNEC E 393** (1993) - *Betões: determinação da absorção da água por capilaridade, Lisboa;*
- **LNEC E 394** (1993) - *Betões: determinação da absorção da água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica, Lisboa;*
- **LNEC E 398** (1993) - *Betões: determinação da retracção e da expansão, Lisboa;*
- **LNEC E 464** (2007) - *Betões: metodologia prescritiva para uma vida útil de 50 e de 100 anos face às acções ambientais. Lisboa;*
- **Nordtest NT Build 492** (1999)- *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Norway;*
- **NP 956** (1973) - *Inertes para argamassas e betões. Determinação dos teores em água total e em água superficial, IPQ, Lisboa;*
- **NP EN 206-1** (2007) - *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, Lisboa;*
- **NP EN 933-1** (2000) - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: 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 determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: método para determinação da massa volúmica e dos vazios, IPQ, Lisboa;*
- **NP EN 1097-6** (2003) - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ, Lisboa;*
- **NP EN 13055-1** (2005) - *Agregados leves - Parte 1: Agregados leves para betão, argamassa, 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.*

ANEXO A

COMPOSIÇÕES DOS BETÕES

ANEXO A - COMPOSIÇÕES 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

BHD

Volume necessário: 222,8 dm³

Material	Tamanho (mm)			Massa volúmica (kg/m ³)	Volume de agregados (l/m ³)	Quantidade (l)	Massa (kg)
Leca HD	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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca M	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca HD	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		-	-	-
	RLHD	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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca HD	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		-	-	-
	RLHD	14	-		16	1735	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca M	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		-	-	-
	RLHD	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	247,808

Cimento: 77,98 kg

Água: 42,89 l

ANEXO A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca M	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		-	-	-
	RLHD	14	-		16	1735	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
RLHD	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca HD	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		-	-	-
	RLM	14	-		16	878	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca HD	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		-	-	-
	RLM	14	-		16	878	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca M	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		-	-	-
	RLM	14	-		16	878	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
Leca M	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		-	-	-
	RLM	14	-		16	878	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
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 A - COMPOSIÇÕES 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)
RLM	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
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 B

FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAL

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.

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.

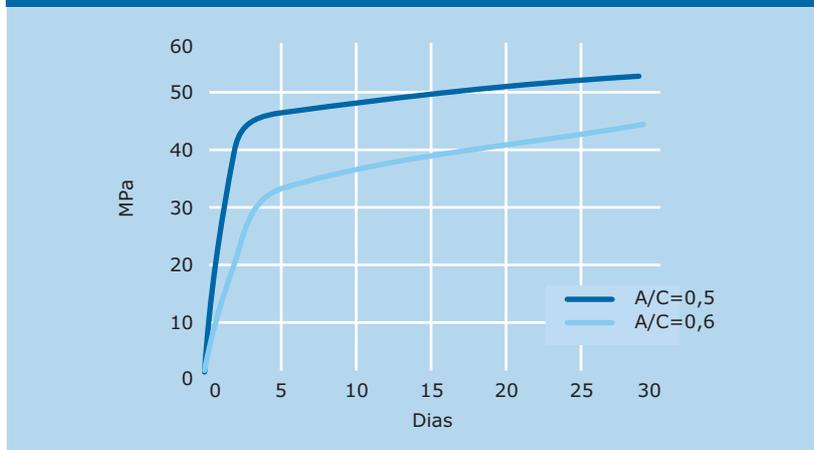
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

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



Produto:	Areia Lavada 0/2 Mesquita	Origem:	Herdade da Mesquita - Sesimbra
Aplicação:	Betão (NP EN 12620) e Misturas betuminosas (NP EN 13043)		
Tipo:	Quartzo, quartzito, feldspato (partículas subangulosas a subarredondadas)		

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

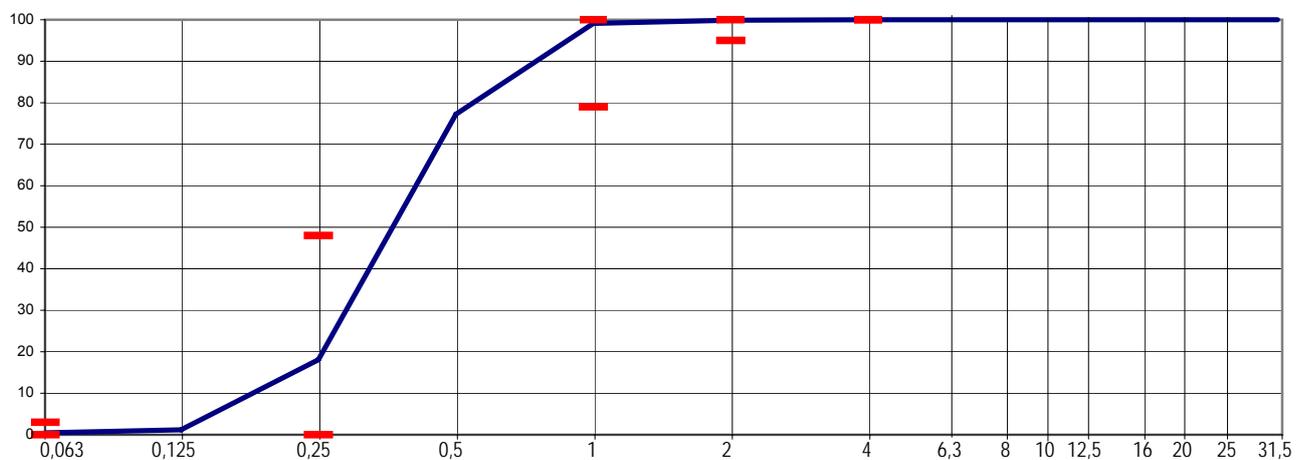
¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,03	1,53	2,53
CF	2,27	1,77	2,77

Outras características

Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/2	
Granulometria	G _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



Data: 03/11/2006

O Director Produção _____

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

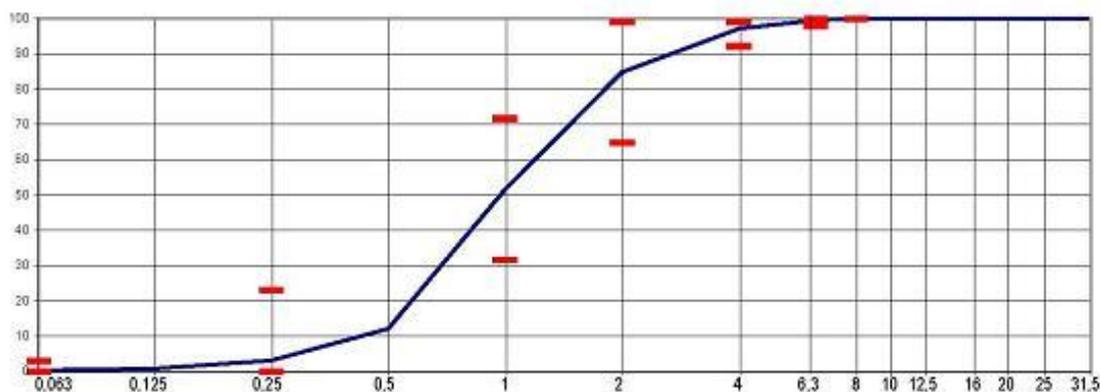
Controlo da produção

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 _{T0} 20
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	
Retracção por secagem	0,020%	
Teor de carbonato de cálcio	DND	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	DND	
Resistência choque térmico		DND

NA- Não aplicável DND-Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:





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.

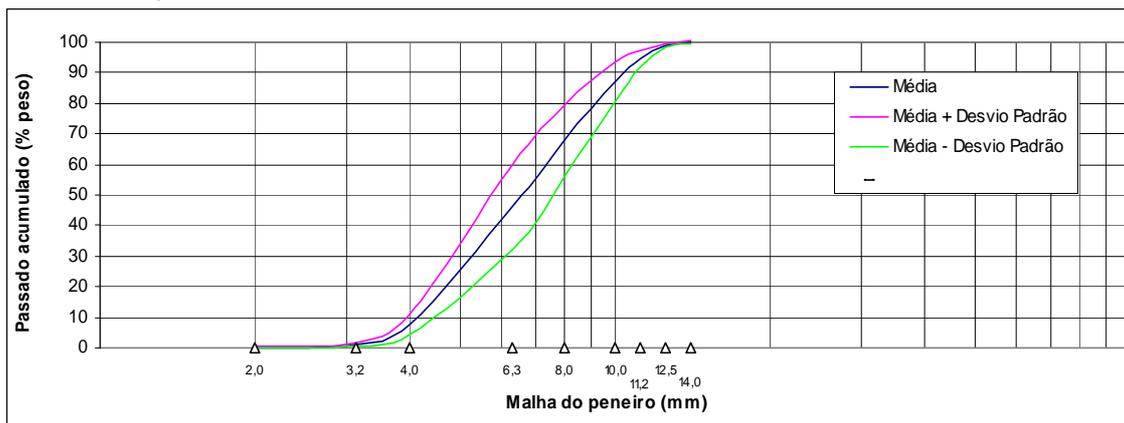
Embalagem

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					





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





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

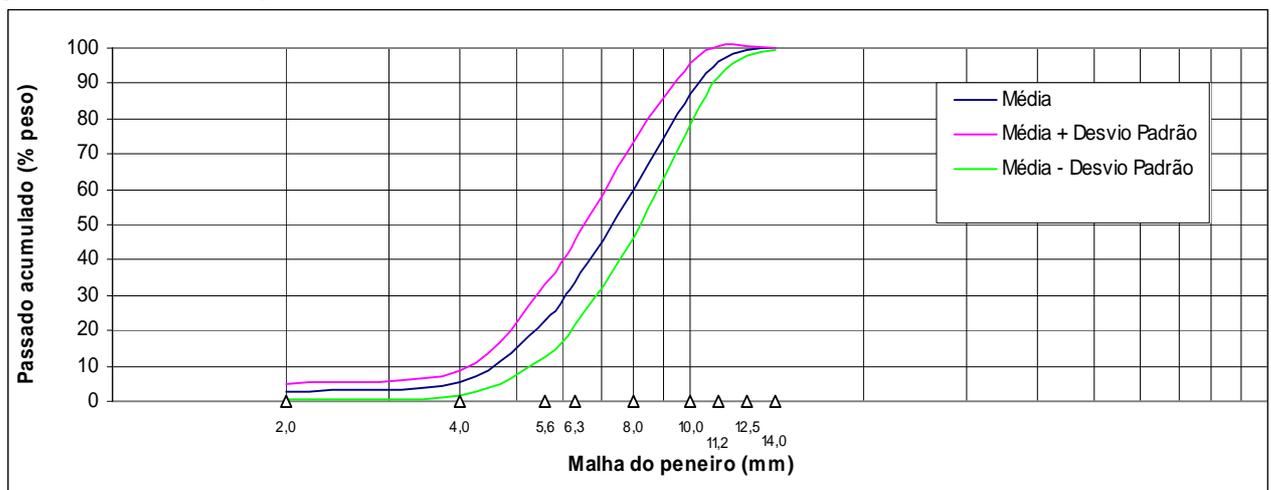
Isolamento de pisos térreos, coberturas e terraços, acessíveis ou não acessíveis; criação de pendentes; betões leves de enchimento e de isolamento; pré-fabricação; agricultura e floricultura.

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



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: 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



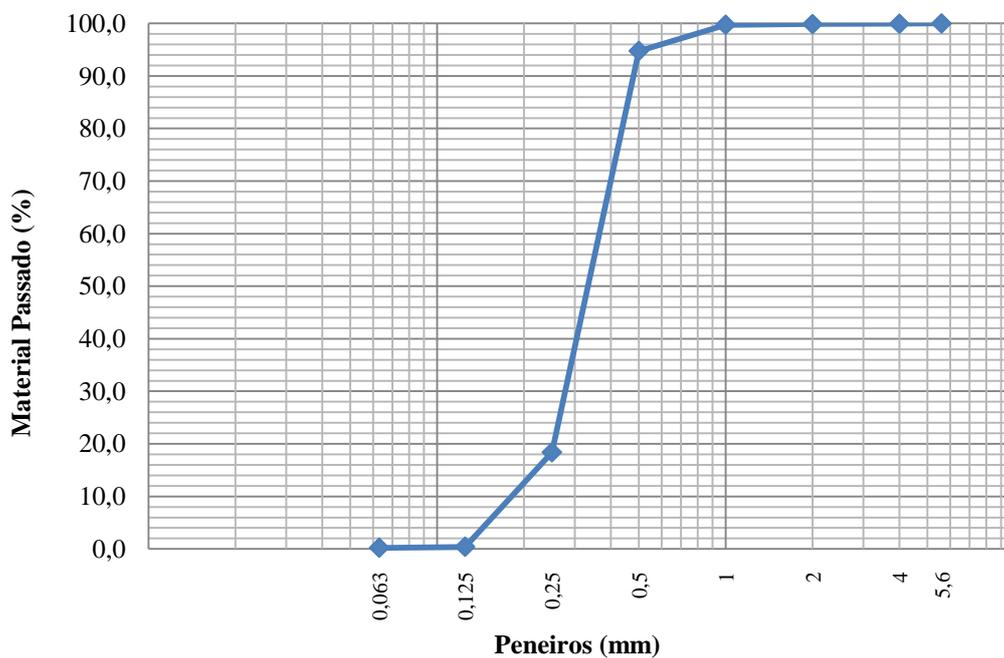
ANEXO C

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

AREIA FINA

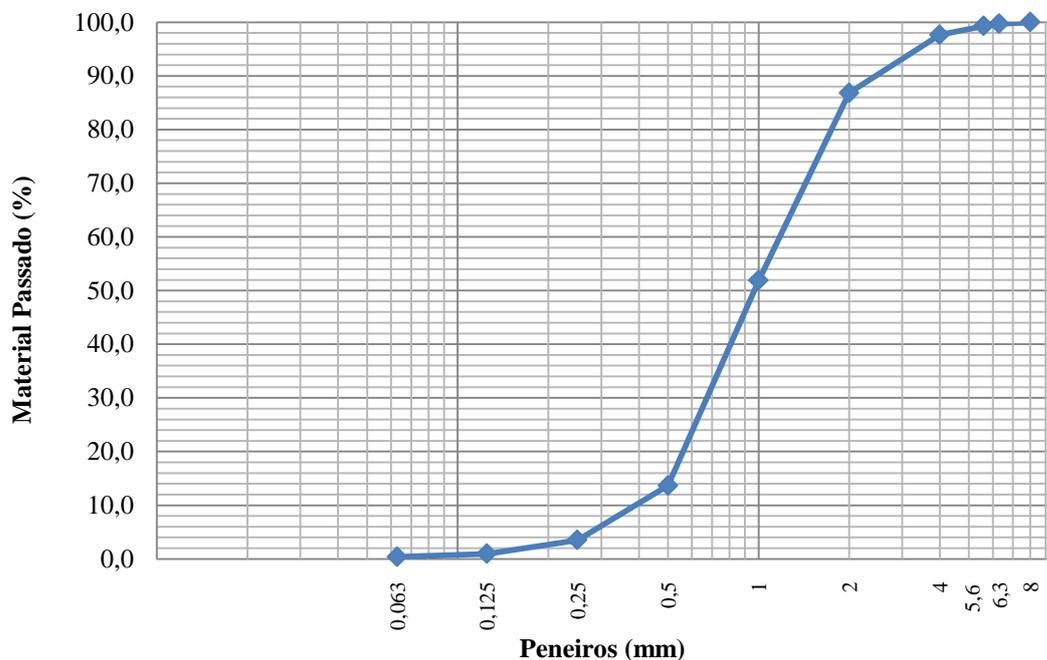
Peneiros (mm)	Areia fina			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
5,6	0	0,00	100,00	0,0
4	0,3	0,05	99,95	0,05
2	0,5	0,08	99,88	0,12
1	1	0,16	99,72	0,28
0,5	32	4,96	94,76	5,24
0,25	492,5	76,38	18,38	81,62
0,125	115,9	17,97	0,40	99,60
0,063	1,3	0,20	0,20	99,80
Resíduo	0,5	0,08	-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

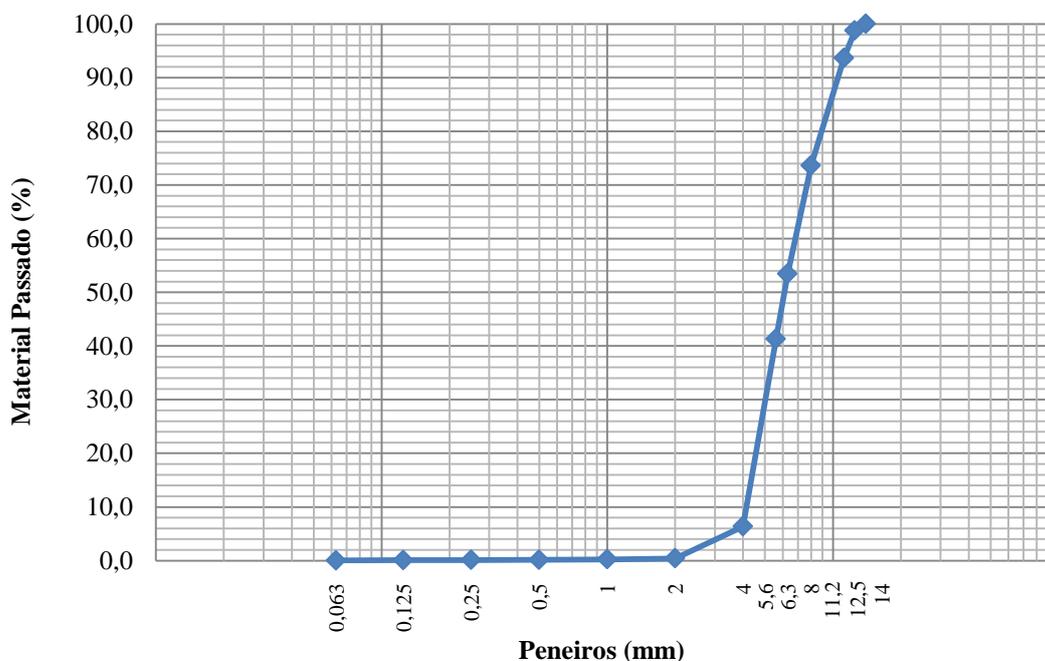
Peneiros (mm)	Areia grossa			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
8	0	0,00	100,0	0,0
6,3	2,2	0,29	99,7	0,3
5,6	3,1	0,41	99,3	0,7
4	12,2	1,63	97,7	2,3
2	81	10,84	86,8	13,2
1	261,2	34,94	51,9	48,1
0,5	285,7	38,22	13,7	86,3
0,25	76	10,17	3,5	96,5
0,125	19,1	2,56	0,9	99,1
0,063	4,1	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

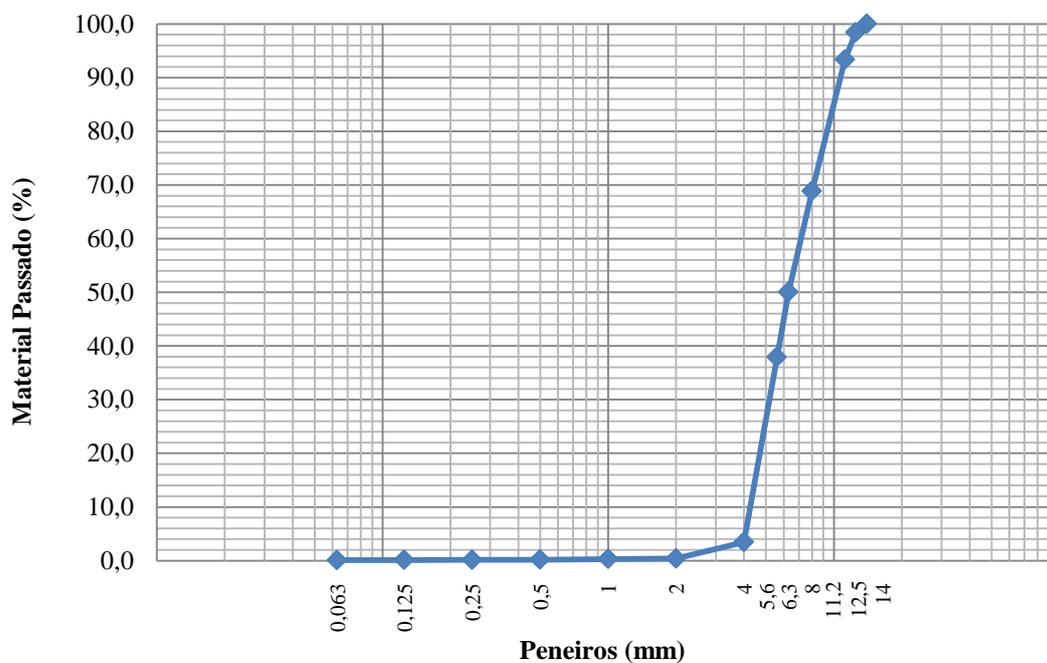
Peneiros (mm)	Leca HD			
	Resíduo		Resíduo acumulado	
	(g)	(%)	Passado (%)	Retido (%)
14	0,0	0	100	0
12,5	17,1	1,26	98,74	1,26
11,2	69,2	5,09	93,65	6,35
8	272,3	20,03	73,62	26,38
6,3	274,5	20,19	53,42	46,58
5,6	164,7	12,12	41,31	58,69
4	474,9	34,94	6,37	93,63
2	81,2	5,97	0,40	99,60
1	2,3	0,17	0,23	99,77
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

Peneiros (mm)	Leca M			
	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

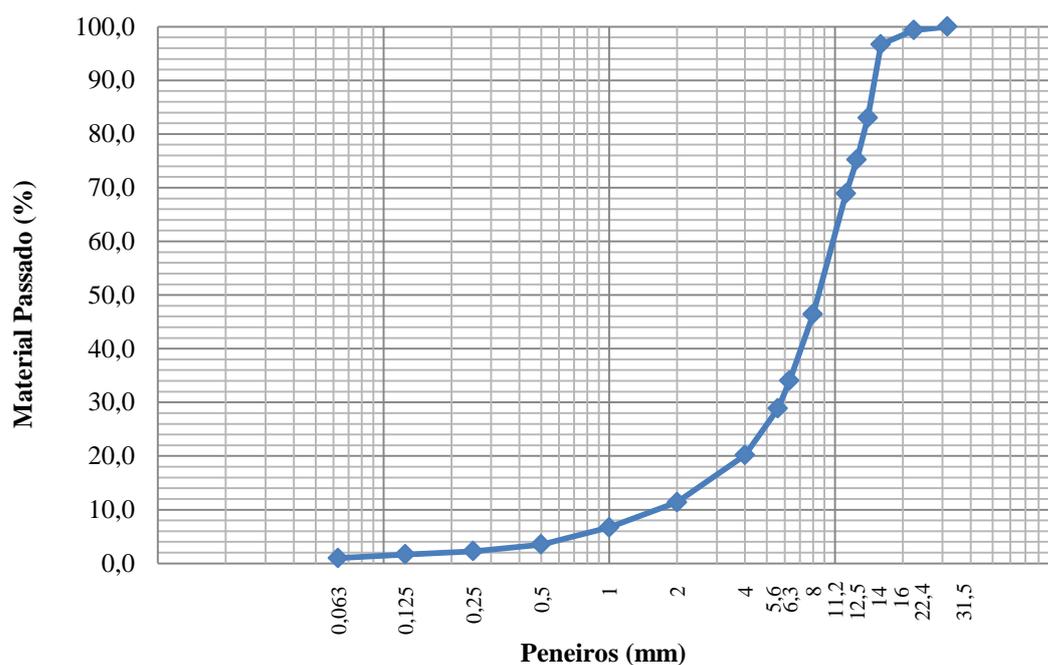


ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

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

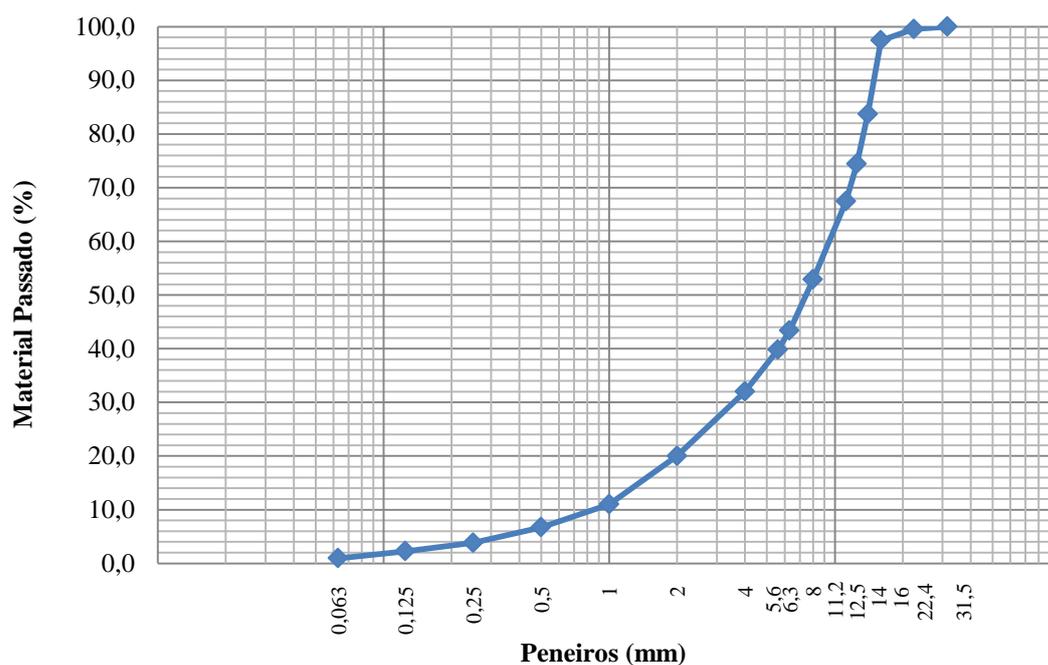


ANEXO C - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

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>	2617,4	2609,0	2603,8	0,2
<i>Areia Grossa</i>	2624,8	2615,4	2609,7	0,2
<i>Leca HD</i>	1265,9	1229,3	1091,6	12,6
<i>Leca M</i>	689,7	732,6	594,5	23,2
<i>RLHD</i>	2384,8	2007,2	1734,6	15,7
<i>RLM</i>	1182,8	1135,6	877,5	29,4

M₁ - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M₂ - massa do picnômetro, contendo o agregado saturado imerso em água (g);

M₃ - massa do provete de ensaio após secagem em estufa (g).

M₄ - massa do picnômetro 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

MASSA VOLÚMICA APARENTE

ANEXO E - MASSA VOLÚMICA APARENTE

Material	Amostra	M ₁ (kg)	M ₂ (g)	M _{prov} (kg)	V (m ³)	b _i (kg/m ³)	B (kg/m ³)
Areia Fina	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	
Areia Grossa	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	
Leca HD	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	
Leca M	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	
RLHD	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	
RLM	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

QUANTIDADES PERCENTUAIS DOS

AGREGADOS RECICLADOS

ANEXO F – QUANTIDADE 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);

$\rho_{\text{Leca HD}}$ - massa volúmica da Leca HD (kg/m³);

$M_{\text{argamassa} / \text{m}^3 \text{betão}}$ - massa de argamassa por metro cúbico de betão (kg/m³);

ANEXO F – QUANTIDADE PERCENTUAIS DOS AGREGADOS RECICLADOS

BOM

Material	Quantidades (kg/m ³ de betão)
Cimento	150
Água	90

Volume de pasta:

$$V_{\text{água}} + V_{\text{cimento}} = 90 + \frac{150}{3150} = 0,138 \text{ m}^3 \text{ de pasta}$$

Quantidade de pasta por metro cúbico de betão:

$$\frac{\alpha M_{\text{cimento}}}{\text{Volume de pasta}} = 1,25 \times 150 = 1362,5 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{RLM}} = x \cdot \rho_{\text{Leca M}} + (1 - x) \cdot M_{\text{pasta} / \text{m}^3 \text{betão}} \Leftrightarrow x = 0,63$$

$$\mathbf{RLHD = 63\% Leca HD + 37\% argamassa}$$

$V_{\text{água}}$ - volume de água (m³);

V_{cimento} - volume de cimento (m³);

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/m³);

$\rho_{\text{Leca M}}$ - massa volúmica da leca M (kg/m³);

$M_{\text{pasta} / \text{m}^3 \text{betão}}$ - massa de pasta por metro cúbico de betão (kg/m³).

ANEXO G

RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

ANEXO G - RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

Material	Amostra	F (N)	A (mm²)	σ_i (MPa)	σ (MPa)
<i>Leca HD</i>	1	77300	13273,23	5,82	5,71
	2	75400	13273,23	5,68	
	3	74700	13273,23	5,63	
<i>Leca M</i>	1	16100	13273,23	1,21	1,20
	2	15900	13273,23	1,20	
	3	15700	13273,23	1,18	
<i>RLHD</i>	1	97400	13273,23	7,34	7,55
	2	108300	13273,23	8,16	
	3	94900	13273,23	7,15	
<i>RLM</i>	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 H

TEOR EM ÁGUA

ANEXO H - TEOR EM ÁGUA

1ª Betonagem - BHD				2ª Betonagem - BM		
Material	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

3ª Betonagem – BHD20RHD				4ª Betonagem – BM20RHD		
Material	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

5ª Betonagem – BHD50RHD				6ª Betonagem – BM50RHD		
Material	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

7ª Betonagem – B100RHD				8ª Betonagem – BHD20RM		
Material	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

ANEXO H - TEOR EM ÁGUA

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

Material	11ª Betonagem – BM50RM			12ª Betonagem – B100RM		
	M_1 (g)	M_2 (g)	W (%)	M_1 (g)	M_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

M_1 - massa do provete de ensaio (g);

M_2 - 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 I

ÍNDICE DE FORMA

ANEXO I - 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 I - ÍNDICE DE FORMA

RLM

M₀ (g)	1402,7		
Peneiros (mm)	M₁ (g)	M₁/M₀ (%)	M₂ (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	-
		ΣM₁ (g)	998,6
		ΣM₂ (g)	87,4
		IF	8,75

M₀ - massa do provete de ensaio (g);

M₁ - massa das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M₂ - massa das partículas não cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

M₁/M₀ - percentagem da massa M₁ relativamente à massa M₀ do provete de ensaio (%).

ΣM₁ - somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

ΣM₂ - somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g).

IF - índice de forma.

ANEXO J

EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

ANEXO J - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

LECA HD

V (l)		2
M₁ (g)		388,7
M₂ (g)		345,0
WA₂₄ (%)		12,67
<hr/>		
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);

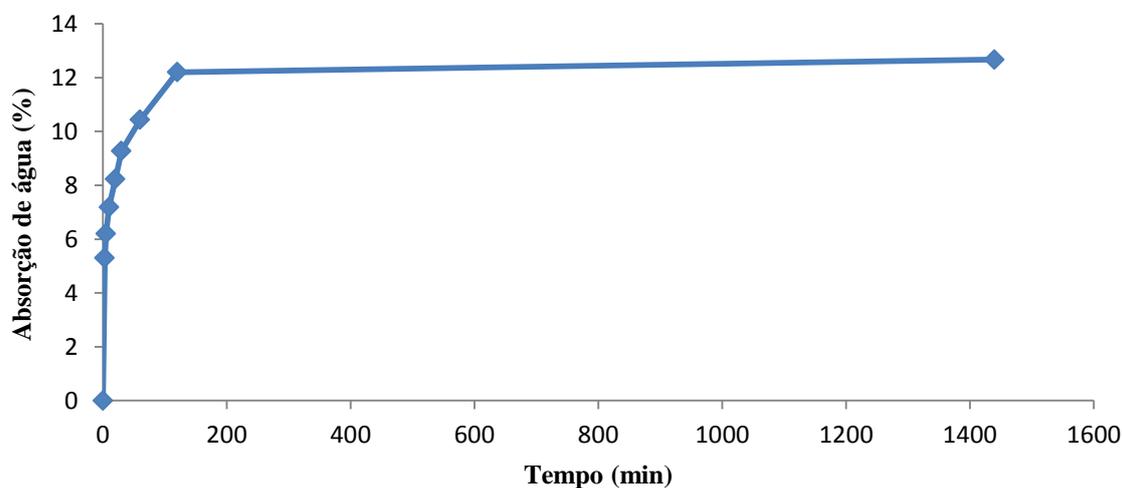
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

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 J - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

LECA M

V (l)	1	
M₁ (g)	244,8	
M₂ (g)	198,4	
WA₂₄ (%)	23,09	
Leitura (min)	M_i (g)	WA_i (%)
3	1560,1	12,90
5	1564,7	15,22
10	1569,3	17,54
20	1573,4	19,61
30	1576,5	21,17
60	1579,2	22,53
120	1580,3	23,08
1440	1580,9	23,39

V - capacidade do recipiente (l);

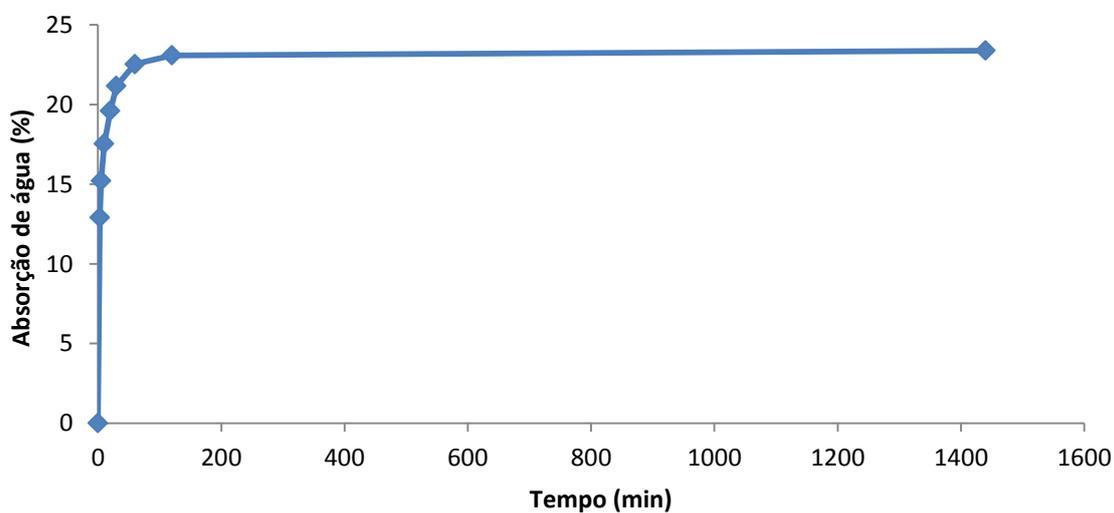
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

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 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

RLHD

V (l)	1
M₁ (g)	699,4
M₂ (g)	612,0
WA₂₄ (%)	14,36

Leitura (min)	M _i (g)	WA _i (%)
3	2015,6	11,10
5	2020,8	11,95
10	2026	12,80
20	2027,3	13,02
30	2028,1	13,15
60	2032,2	13,82
120	2034,4	14,18
1440	2035,5	14,36

V - capacidade do recipiente (l);

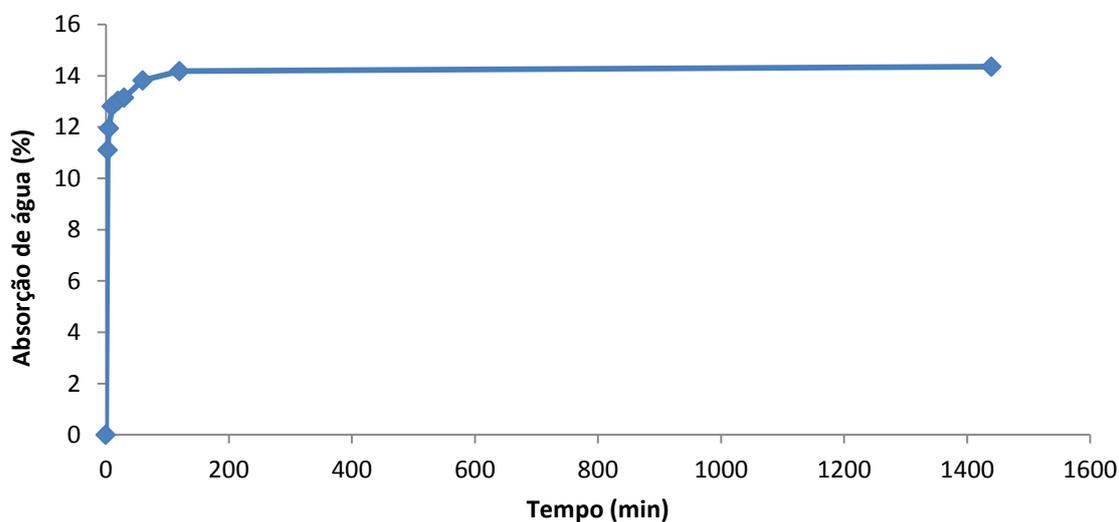
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

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 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

RLM

V (l)	1
M₁ (g)	349,7
M₂ (g)	273,1
WA₂₄ (%)	28,05

Leitura (min)	M _i (g)	WA _i (%)
3	1661,1	19,00
5	1666,6	21,02
10	1673,2	23,43
20	1678,4	25,34
30	1681,2	26,36
60	1683,9	27,35
120	1685	27,76
1440	1685,8	28,05

V - capacidade do recipiente (l);

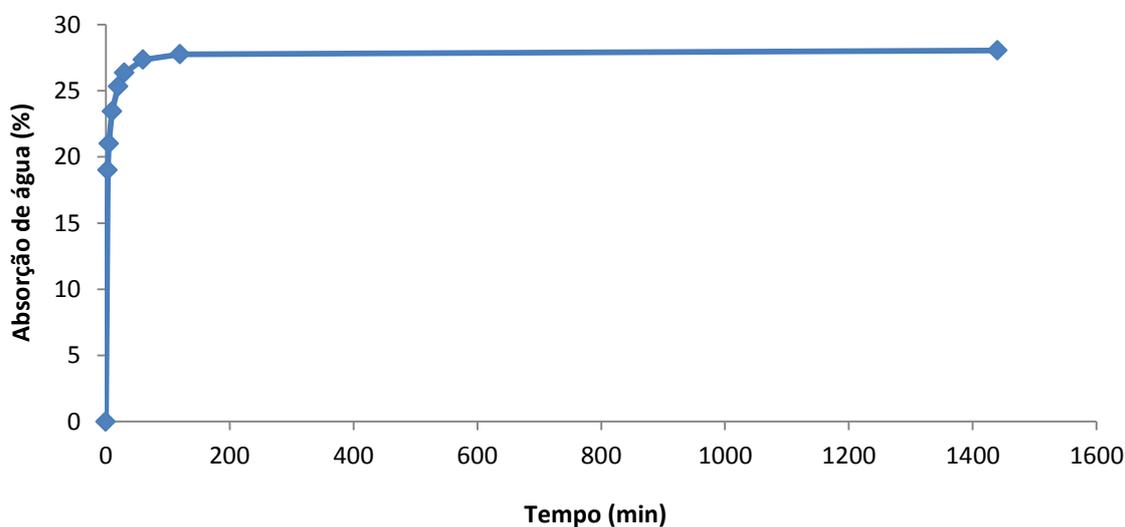
M₁ - massa da amostra saturada com superfície seca (g);

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 K

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Anexo K - Resistência à compressão

7 DIAS

Composição	M (g)	F (kN)	f_{ci} (MPa)	f_{cm} (MPa)
<i>BHD</i>	6211,0	745,8	33,1	32,8
	6086,5	706,9	31,4	
	6202,3	764,4	34,0	
<i>BM</i>	5424,1	395,4	17,6	16,0
	5160,7	328,7	14,6	
	5255,8	358,6	15,9	
<i>BHD20RHD</i>	6484,8	809,6	36,0	33,9
	6367,3	743,9	33,1	
	6407,8	732,8	32,6	
<i>BM20RHD</i>	6017,3	527,7	23,5	24,2
	6030,3	599,1	26,6	
	5812,0	507,5	22,6	
<i>BHD50RHD</i>	6731,9	837,0	37,2	36,1
	6694,3	803,0	35,7	
	6574,6	796,2	35,4	
<i>BM50RHD</i>	6357,8	495,4	22,0	22,6
	6372,0	522,2	23,2	
	6334,6	504,6	22,4	
<i>B100RHD</i>	7105,5	778,6	34,6	34,4
	7065,0	771,2	34,3	
	7081,9	770,4	34,2	
<i>BHD20RM</i>	6288,1	731,1	32,5	33,1
	6413,2	752,0	33,4	
	6340,1	751,6	33,4	
<i>BM20RM</i>	5998,4	476,4	21,2	21,6
	5871,7	465,2	20,7	
	6080,9	518,5	23,0	
<i>BHD50RM</i>	6379,3	722,0	32,1	32,2
	6337,1	703,5	31,3	
	6423,9	748,0	33,2	
<i>BM50RM</i>	6087,2	516,3	22,9	23,8
	6217,3	579,4	25,8	
	6112,3	510,0	22,7	
<i>B100RM</i>	6451,1	644,1	28,6	27,7
	6451,1	586,3	26,1	
	6432,4	638,7	28,4	

M - massa do provete (g);

f_{ci} - tensão de rotura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de rotura do betão (MPa).

Anexo K - Resistência à compressão

28 DIAS

Composição	M (g)	F (kN)	f_{ci} (MPa)	f_{cm} (MPa)
<i>BHD</i>	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	
<i>BM</i>	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	
<i>BHD20RHD</i>	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	
<i>BM20RHD</i>	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	
<i>BHD50RHD</i>	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	
<i>BM50RHD</i>	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	
<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	

Anexo K - Resistência à compressão

Composição	M (g)	F (kN)	f _{ci} (MPa)	f _{cm} (MPa)
<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 rotura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de rotura do betão (MPa).

Anexo K - Resistência à compressão

90 DIAS

Composição	M (g)	F (kN)	f_{ci} (MPa)	f_{cm} (MPa)
<i>BHD</i>	6154,9	930,2	41,3	39,3
	6140,3	839,0	37,3	
	6136,9	880,9	39,2	
<i>BM</i>	5362,8	478,7	21,3	20,7
	5280,9	450,5	20,0	
	5249,3	470,1	20,9	
<i>BHD20RHD</i>	6496,8	885,2	39,3	41,3
	6542,4	932,9	41,5	
	6536,4	969,8	43,1	
<i>BM20RHD</i>	5938,2	669,8	29,8	28,6
	5830,4	668,3	29,7	
	6008,4	590,9	26,3	
<i>BHD50RHD</i>	6660,6	1051,1	46,7	46,8
	6643,4	1052,0	46,8	
	6682,7	1058,0	47,0	
<i>BM50RHD</i>	6477,0	733,7	32,6	32,8
	6404,7	739,5	32,9	
	6442,2	742,2	33,0	
<i>B100RHD</i>	7156,0	1107,0	49,2	48,5
	7099,5	1074,0	47,7	
	7197,4	1090,0	48,4	
<i>BHD20RM</i>	6402,1	934,4	41,5	39,2
	6362,3	836,0	37,2	
	6403,5	878,9	39,1	
<i>BM20RM</i>	6058,0	603,6	26,8	26,5
	6024,2	603,3	26,8	
	5936,0	579,6	25,8	
<i>BHD50RM</i>	6395,9	878,5	39,0	38,7
	6444,7	895,6	39,8	
	6435,9	836,7	37,2	
<i>BM50RM</i>	6189,6	652,4	29,0	30,5
	6198,1	684,1	30,4	
	6237,8	720,7	32,0	
<i>B100RM</i>	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 rotura à compressão do provete *i* (MPa);

F - força aplicada (kN);

f_{cm} - tensão de rotura do betão (MPa).

ANEXO L

MASSA VOLÚMICA NO ESTADO

ENDURECIDO

ANEXO L – 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 M

RETRACÇÃO

ANEXO M - RETRACÇÃO

BHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	57	0	0	0
2	20	55	6,89E-05	4,46E-05	5,67E-05
3	20	51	1,05E-04	4,86E-05	7,70E-05
4	20	51	1,01E-04	6,08E-05	8,10E-05
5	20	55	1,05E-04	7,29E-05	8,91E-05
6	20	56	1,17E-04	8,51E-05	1,01E-04
7	20	56	1,26E-04	9,72E-05	1,11E-04
9	20	51	1,70E-04	1,42E-04	1,56E-04
11	20	56	2,23E-04	1,66E-04	1,94E-04
13	20	66	2,35E-04	1,86E-04	2,11E-04
15	20	66	2,67E-04	2,35E-04	2,51E-04
18	20	69	3,60E-04	2,84E-04	3,22E-04
21	20	57	3,65E-04	3,12E-04	3,38E-04
24	20	70	3,97E-04	3,16E-04	3,56E-04
27	20	66	4,25E-04	3,77E-04	4,01E-04
30	20	50	5,06E-04	4,13E-04	4,60E-04
45	20	57	5,10E-04	4,25E-04	4,68E-04
60	20	64	5,27E-04	4,82E-04	5,04E-04
75	20	75	5,95E-04	5,75E-04	5,85E-04
91	20	72	6,64E-04	6,28E-04	6,46E-04

BM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	66	0	0	0
2	20	60	3,65E-05	4,46E-05	4,05E-05
3	20	66	6,08E-05	2,43E-05	4,25E-05
4	20	66	9,72E-05	4,46E-05	7,09E-05
5	20	60	1,98E-04	1,46E-04	1,72E-04
6	20	61	2,19E-04	1,94E-04	2,07E-04
7	20	69	2,19E-04	1,62E-04	1,90E-04
9	20	69	2,71E-04	1,78E-04	2,25E-04
11	20	57	3,89E-04	3,32E-04	3,60E-04
13	20	70	3,56E-04	3,08E-04	3,32E-04
15	20	62	4,09E-04	3,60E-04	3,85E-04
18	20	51	4,98E-04	4,41E-04	4,70E-04
21	20	60	4,98E-04	4,37E-04	4,68E-04
24	20	63	5,39E-04	4,54E-04	4,96E-04
27	20	70	5,91E-04	4,78E-04	5,35E-04
30	20	72	6,16E-04	5,02E-04	5,59E-04
45	20	74	7,13E-04	6,03E-04	6,58E-04
60	20	70	8,38E-04	7,09E-04	7,74E-04
75	20	73	9,27E-04	7,33E-04	8,30E-04
91	20	50	1,03E-03	8,67E-04	9,48E-04

ANEXO M - RETRACÇÃO

BHD20RHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	51	0	0	0
2	20	55	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05
3	20	56	2,03E-05	2,03E-05	2,03E-05
4	20	56	6,08E-05	1,09E-04	8,51E-05
5	20	58	8,51E-05	1,54E-04	1,19E-04
6	20	56	1,26E-04	1,50E-04	1,38E-04
7	20	51	1,62E-04	2,07E-04	1,84E-04
9	20	51	1,78E-04	2,27E-04	2,03E-04
11	20	63	2,11E-04	3,00E-04	2,55E-04
13	20	66	2,11E-04	2,79E-04	2,45E-04
15	20	69	2,59E-04	3,32E-04	2,96E-04
18	20	57	3,36E-04	3,93E-04	3,65E-04
21	20	70	3,69E-04	3,93E-04	3,81E-04
24	20	66	3,85E-04	3,85E-04	3,85E-04
27	20	50	4,66E-04	4,13E-04	4,39E-04
30	20	57	4,74E-04	4,33E-04	4,54E-04
45	20	64	5,02E-04	5,02E-04	5,02E-04
60	20	75	5,47E-04	6,80E-04	6,14E-04
75	20	70	6,68E-04	7,57E-04	7,13E-04
91	20	70	7,70E-04	8,42E-04	8,06E-04

BM20RHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	51	0	0	0
2	20	50	4,86E-05	6,08E-05	5,47E-05
3	20	50	1,62E-04	1,30E-04	1,46E-04
4	20	50	1,66E-04	1,42E-04	1,54E-04
5	20	53	1,98E-04	1,54E-04	1,76E-04
6	20	53	2,27E-04	1,82E-04	2,05E-04
7	20	55	2,35E-04	1,82E-04	2,09E-04
9	20	57	2,51E-04	2,11E-04	2,31E-04
11	20	55	2,75E-04	2,07E-04	2,41E-04
13	20	51	3,24E-04	2,59E-04	2,92E-04
15	20	56	3,20E-04	2,39E-04	2,79E-04
18	20	58	3,77E-04	2,84E-04	3,30E-04
21	20	56	4,46E-04	3,48E-04	3,97E-04
24	20	63	4,90E-04	3,89E-04	4,39E-04
27	20	66	5,31E-04	4,09E-04	4,70E-04
30	20	70	5,67E-04	4,58E-04	5,12E-04
45	20	57	6,80E-04	5,55E-04	6,18E-04
60	20	67	8,30E-04	7,21E-04	7,76E-04
75	20	71	9,32E-04	8,14E-04	8,73E-04
91	20	59	1,03E-03	9,36E-04	9,84E-04

ANEXO M - RETRACÇÃO

BHD50RHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	66	0	0	0
2	20	63	2,03E-05	6,08E-05	4,05E-05
3	20	66	4,46E-05	5,67E-05	5,06E-05
4	20	60	7,70E-05	1,09E-04	9,32E-05
5	20	60	1,50E-04	1,66E-04	1,58E-04
6	20	61	1,82E-04	2,07E-04	1,94E-04
7	20	69	1,78E-04	1,98E-04	1,88E-04
9	20	65	2,07E-04	2,55E-04	2,31E-04
11	20	57	2,43E-04	3,65E-04	3,04E-04
13	20	70	3,00E-04	3,77E-04	3,38E-04
15	20	62	3,40E-04	4,05E-04	3,73E-04
18	20	51	4,17E-04	4,82E-04	4,50E-04
21	20	60	4,37E-04	5,22E-04	4,80E-04
24	20	64	4,58E-04	5,27E-04	4,92E-04
27	20	70	5,06E-04	5,71E-04	5,39E-04
30	20	64	5,43E-04	5,91E-04	5,67E-04
45	20	74	6,52E-04	6,28E-04	6,40E-04
60	20	70	7,86E-04	8,22E-04	8,04E-04
75	20	73	8,75E-04	9,07E-04	8,91E-04
91	20	50	1,00E-03	1,04E-03	1,02E-03

BM50RHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	66	0	0	0
2	20	63	2,03E-05	5,27E-05	3,65E-05
3	20	60	2,43E-05	6,89E-05	4,66E-05
4	20	60	3,24E-05	1,46E-04	8,91E-05
5	20	60	1,46E-04	2,11E-04	1,78E-04
6	20	61	1,82E-04	2,39E-04	2,11E-04
7	20	69	1,86E-04	2,55E-04	2,21E-04
9	20	69	2,31E-04	2,63E-04	2,47E-04
11	20	57	3,36E-04	4,33E-04	3,85E-04
13	20	62	3,32E-04	4,54E-04	3,93E-04
15	20	51	4,33E-04	5,43E-04	4,88E-04
18	20	60	4,50E-04	5,51E-04	5,00E-04
21	20	63	4,66E-04	5,87E-04	5,27E-04
24	20	70	5,51E-04	6,40E-04	5,95E-04
27	20	72	5,63E-04	6,56E-04	6,10E-04
30	20	74	6,24E-04	7,29E-04	6,76E-04
45	20	70	7,86E-04	8,99E-04	8,42E-04
60	20	73	8,55E-04	9,52E-04	9,03E-04
75	20	50	1,02E-03	1,04E-03	1,03E-03
91	20	65	1,11E-03	1,13E-03	1,12E-03

ANEXO M - RETRACÇÃO

B100RHD

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	53	0	0	0
2	20	57	6,08E-05	8,10E-06	3,44E-05
3	20	55	8,51E-05	5,67E-05	7,09E-05
4	20	51	1,42E-04	1,22E-04	1,32E-04
5	20	51	1,54E-04	1,46E-04	1,50E-04
6	20	55	1,82E-04	1,30E-04	1,56E-04
7	20	56	1,78E-04	1,70E-04	1,74E-04
9	20	58	2,51E-04	2,27E-04	2,39E-04
11	20	51	3,36E-04	3,28E-04	3,32E-04
13	20	57	3,56E-04	3,52E-04	3,54E-04
15	20	63	4,41E-04	4,01E-04	4,21E-04
18	20	60	4,90E-04	4,82E-04	4,86E-04
21	20	70	4,94E-04	4,98E-04	4,96E-04
24	20	57	5,83E-04	6,32E-04	6,08E-04
27	20	71	6,20E-04	5,95E-04	6,08E-04
30	20	50	8,63E-04	6,08E-04	7,35E-04
45	20	73	8,34E-04	6,93E-04	7,63E-04
60	20	74	1,03E-03	8,30E-04	9,32E-04
75	20	52	1,17E-03	1,07E-03	1,12E-03
91	20	72	1,27E-03	1,19E-03	1,23E-03

BHD20RM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	58	0	0	0
2	20	58	1,62E-05	6,08E-05	3,85E-05
3	20	56	6,48E-05	1,05E-04	8,51E-05
4	20	51	1,34E-04	2,07E-04	1,70E-04
5	20	57	1,86E-04	2,51E-04	2,19E-04
6	20	63	2,23E-04	2,92E-04	2,57E-04
7	20	66	2,27E-04	2,96E-04	2,61E-04
9	20	66	2,27E-04	3,20E-04	2,73E-04
11	20	61	3,08E-04	3,60E-04	3,34E-04
13	20	71	3,28E-04	3,77E-04	3,52E-04
15	20	57	3,56E-04	4,05E-04	3,81E-04
18	20	70	4,33E-04	4,62E-04	4,48E-04
21	20	66	4,29E-04	4,78E-04	4,54E-04
24	20	50	5,27E-04	5,87E-04	5,57E-04
27	20	57	5,43E-04	5,87E-04	5,65E-04
30	20	70	4,70E-04	5,99E-04	5,35E-04
45	20	70	6,28E-04	7,21E-04	6,74E-04
60	20	71	7,17E-04	8,06E-04	7,61E-04
75	20	70	8,10E-04	9,15E-04	8,63E-04
91	20	59	8,95E-04	1,01E-03	9,54E-04

ANEXO M - RETRACÇÃO

BM20RM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	57	0	0	0
2	20	66	1,62E-05	8,10E-06	1,22E-05
3	20	63	3,24E-05	6,48E-05	4,86E-05
4	20	66	3,65E-05	8,91E-05	6,28E-05
5	20	66	6,08E-05	1,38E-04	9,92E-05
6	20	60	1,22E-04	1,94E-04	1,58E-04
7	20	61	1,50E-04	2,15E-04	1,82E-04
9	20	71	1,66E-04	2,43E-04	2,05E-04
11	20	57	1,78E-04	3,04E-04	2,41E-04
13	20	54	2,47E-04	3,77E-04	3,12E-04
15	20	71	2,35E-04	3,73E-04	3,04E-04
18	20	50	3,28E-04	4,78E-04	4,03E-04
21	20	62	3,73E-04	5,39E-04	4,56E-04
24	20	69	3,81E-04	5,51E-04	4,66E-04
27	20	67	4,01E-04	5,75E-04	4,88E-04
30	20	72	4,37E-04	6,08E-04	5,22E-04
45	20	69	5,71E-04	7,53E-04	6,62E-04
60	20	58	6,97E-04	8,63E-04	7,80E-04
75	20	72	8,10E-04	9,64E-04	8,87E-04
91	20	52	9,56E-04	1,06E-03	1,01E-03

BHD50RM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	56	0	0	0
2	20	58	2,84E-05	2,03E-05	2,43E-05
3	20	56	7,29E-05	7,29E-05	7,29E-05
4	20	51	1,70E-04	1,82E-04	1,76E-04
5	20	56	1,30E-04	2,27E-04	1,78E-04
6	20	66	1,98E-04	2,59E-04	2,29E-04
7	20	63	2,43E-04	3,16E-04	2,79E-04
9	20	60	2,51E-04	3,32E-04	2,92E-04
11	20	61	3,28E-04	4,05E-04	3,67E-04
13	20	71	3,48E-04	4,25E-04	3,87E-04
15	20	57	4,33E-04	4,62E-04	4,48E-04
18	20	70	4,62E-04	5,35E-04	4,98E-04
21	20	66	4,94E-04	5,71E-04	5,33E-04
24	20	50	6,08E-04	6,60E-04	6,34E-04
27	20	57	5,87E-04	6,68E-04	6,28E-04
30	20	70	6,24E-04	6,89E-04	6,56E-04
45	20	70	7,17E-04	8,22E-04	7,70E-04
60	20	71	8,14E-04	8,87E-04	8,51E-04
75	20	70	9,19E-04	9,80E-04	9,50E-04
91	20	59	1,01E-03	1,10E-03	1,06E-03

ANEXO M - RETRACÇÃO

BM50RM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	57	0	0	0
2	20	66	1,62E-05	4,05E-06	1,01E-05
3	20	63	3,24E-05	6,08E-05	4,66E-05
4	20	66	3,65E-05	8,51E-05	6,08E-05
5	20	66	6,08E-05	1,34E-04	9,72E-05
6	20	60	1,22E-04	1,90E-04	1,56E-04
7	20	61	1,50E-04	2,11E-04	1,80E-04
9	20	71	1,66E-04	2,39E-04	2,03E-04
11	20	57	1,78E-04	3,00E-04	2,39E-04
13	20	54	2,47E-04	3,73E-04	3,10E-04
15	20	71	2,35E-04	3,69E-04	3,02E-04
18	20	50	3,16E-04	4,74E-04	3,95E-04
21	20	62	3,73E-04	5,35E-04	4,54E-04
24	20	69	3,81E-04	5,47E-04	4,64E-04
27	20	67	4,01E-04	5,71E-04	4,86E-04
30	20	72	4,37E-04	6,03E-04	5,20E-04
45	20	69	5,71E-04	7,49E-04	6,60E-04
60	20	58	6,97E-04	8,79E-04	7,88E-04
75	20	72	8,10E-04	9,60E-04	8,85E-04
91	20	52	1,09E-03	1,06E-03	1,08E-03

B100RM

Idade (dias)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Provete 1	Provete 2	Retracção
1	20	56	0	0	0
2	20	58	7,29E-05	1,13E-04	9,32E-05
3	20	56	7,70E-05	1,30E-04	1,03E-04
4	20	51	1,13E-04	1,70E-04	1,42E-04
5	20	56	2,07E-04	3,04E-04	2,55E-04
6	20	66	2,71E-04	3,44E-04	3,08E-04
7	20	63	3,16E-04	3,65E-04	3,40E-04
9	20	60	3,56E-04	4,13E-04	3,85E-04
11	20	61	5,10E-04	5,79E-04	5,45E-04
13	20	71	5,63E-04	5,95E-04	5,79E-04
15	20	57	5,87E-04	6,32E-04	6,10E-04
18	20	70	7,61E-04	8,14E-04	7,88E-04
21	20	60	7,41E-04	7,78E-04	7,59E-04
24	20	50	7,94E-04	8,38E-04	8,16E-04
27	20	57	8,34E-04	8,71E-04	8,53E-04
30	20	70	8,83E-04	9,27E-04	9,05E-04
45	20	70	1,06E-03	1,08E-03	1,07E-03
60	20	71	1,19E-03	1,24E-03	1,22E-03
75	20	70	1,34E-03	1,36E-03	1,35E-03
91	20	59	1,45E-03	1,49E-03	1,47E-03

ANEXO N

ABSORÇÃO DE ÁGUA

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Amostra	Peso (g)								Absorção capilar (10^{-3} g/mm ²)							
	0	0,25	0,5	1	3	6	24	72	0,25	0,5	1	3	6	24	72	
BHD	1	3156,7	-	-	-	3173,6	3176,2	3183,6	3192	-	-	-	0,956	1,103	1,522	1,998
	2	3070	-	-	-	3083,6	3086,8	3093,6	3101,7	-	-	-	0,770	0,951	1,335	1,794
	3	3092,9	-	-	-	3111,8	3115,8	3124,5	3134,2	-	-	-	1,070	1,296	1,788	2,337
	Média									-	-	-	0,932	1,117	1,549	2,043
BM	1	1802,8	-	-	-	1830	1836,4	1852,4	1871,3	-	-	-	1,539	1,901	2,807	3,876
	2	1718,5	-	-	-	1731,7	1735,5	1746,9	1760,6	-	-	-	0,747	0,962	1,607	2,382
	3	1765,1	-	-	-	1798,9	1805,8	1823,1	1840,2	-	-	-	1,913	2,303	3,282	4,250
	Média									-	-	-	1,726	2,102	3,044	4,063
BHD20RHD	1	3165,5	-	-	-	3178,9	3185,6	3201	3216,5	-	-	-	0,758	1,137	2,009	2,886
	2	3181,7	-	-	-	3194,6	3201,3	3221,3	3238,1	-	-	-	0,730	1,109	2,241	3,192
	3	3142,3	-	-	-	3156,1	3160,9	3177,8	3192,1	-	-	-	0,781	1,053	2,009	2,818
	Média									-	-	-	0,756	1,100	2,086	2,965
BM20RHD	1	2981,3	-	-	-	3004,8	3009,6	3025,1	3039,8	-	-	-	1,330	1,601	2,479	3,310
	2	2974,6	-	-	-	3009,7	3016	3035,1	3052,7	-	-	-	1,986	2,343	3,424	4,420
	3	3017,4	-	-	-	3042,8	3046,6	3062,9	3077,5	-	-	-	1,437	1,652	2,575	3,401
	Média									-	-	-	1,584	1,866	2,826	3,710

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Amostra	Peso (g)									Absorção capilar (10^{-3}g/mm^2)						
	0	0,25	0,5	1	3	6	24	72		0,25	0,5	1	3	6	24	72
BHD50RHD	1	3432,8	-	-	-	3465,6	3471,7	3488,6	3505,4	-	-	-	1,856	2,201	3,158	4,108
	2	3185,3	-	-	-	3223	3228	3246,3	3264,4	-	-	-	2,133	2,416	3,452	4,476
	3	3347,7	-	-	-	3387,2	3391,1	3411,6	3430,2	-	-	-	2,235	2,456	3,616	4,669
	Média									-	-	-	2,075	2,358	3,409	4,418
BM50RHD	1	3178,8	3196	3199,7	3207,4	3212,7	3219,4	3233,6	3245,5	0,973	1,183	1,618	1,918	2,297	3,101	3,774
	2	3126,6	3145,7	3148,5	3157,7	3161,8	3169,3	3185,6	3203,2	1,081	1,239	1,760	1,992	2,416	3,339	4,335
	3	3248,4	3268,5	3270,3	3277,6	3279,6	3286	3299,4	3315,8	1,137	1,239	1,652	1,766	2,128	2,886	3,814
	Média									1,064	1,220	1,677	1,892	2,281	3,109	3,974
B100RHD	1	3570,8	3589,3	3595,1	3599,5	3607,9	3614,4	3631,5	3646,8	1,047	1,375	1,624	2,099	2,467	3,435	4,301
	2	3463,3	3482,6	3488,9	3495,7	3504,4	3509,9	3526,6	3541,7	1,092	1,449	1,833	2,326	2,637	3,582	4,437
	3	3531,9	3552,1	3558,5	3563	3573,3	3578,9	3598,1	3612,7	1,143	1,505	1,760	2,343	2,660	3,746	4,572
	Média									1,094	1,443	1,739	2,256	2,588	3,588	4,437
BHD20RM	1	3056,8	3071,2	3074,4	3079,2	3085,1	3088,9	3102,5	3114,6	0,815	0,996	1,268	1,601	1,816	2,586	3,271
	2	3158	3173,1	3177,4	3180,7	3186	3190,9	3203	3214,2	0,854	1,098	1,285	1,584	1,862	2,546	3,180
	3	3098,9	3113,9	3118,6	3122,9	3130,2	3134,8	3148,5	3159,2	0,849	1,115	1,358	1,771	2,032	2,807	3,412
	Média									0,839	1,070	1,303	1,652	1,903	2,646	3,288
BM20RM	1	2975,8	2990,4	2993,9	2997,8	3003,6	3007,9	3019	3030	0,826	1,024	1,245	1,573	1,816	2,445	3,067
	2	2953,5	2968,6	2972,6	2977,8	2984,1	2989	3000,6	3010	0,854	1,081	1,375	1,732	2,009	2,665	3,197
	3	2929	2945,4	2948,8	2953,9	2959,6	2965,1	2976,8	2986,5	0,928	1,120	1,409	1,732	2,043	2,705	3,254
	Média									0,870	1,075	1,343	1,679	1,956	2,605	3,173

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Amostra	Peso (g)									Absorção capilar (10^{-3} g/mm ²)						
	0	0,25	0,5	1	3	6	24	72		0,25	0,5	1	3	6	24	72
BHD50RM	1	3046,5	3060,3	3065,9	3069	3078,4	3084,4	3098,2	3109,5	0,781	1,098	1,273	1,805	2,145	2,926	3,565
	2	3075,6	3090,3	3097,4	3099,8	3109,1	3114,3	3128,8	3141,3	0,832	1,234	1,369	1,896	2,190	3,011	3,718
	3	3205,7	3221,1	3226,3	3229,3	3237,4	3242,5	3255,8	3267,7	0,871	1,166	1,335	1,794	2,082	2,835	3,508
	Média									0,828	1,166	1,326	1,832	2,139	2,924	3,597
BM50RM	1	3072,9	3088,6	3094,1	3096,3	3104,5	3109,7	3125,6	3139,6	0,888	1,200	1,324	1,788	2,082	2,982	3,774
	2	3015	3029,7	3034,6	3037,5	3044,8	3050,4	3065,8	3080,1	0,832	1,109	1,273	1,686	2,003	2,875	3,684
	3	2997,4	3011,8	3017,7	3020	3028,1	3033,8	3049,5	3064,3	0,815	1,149	1,279	1,737	2,060	2,948	3,786
	Média									0,845	1,153	1,292	1,737	2,049	2,935	3,748
B100RM	1	3165,8	3183,1	3189,4	3192,6	3202,2	3208,5	3224,6	3239,6	0,979	1,335	1,517	2,060	2,416	3,327	4,176
	2	3261,4	3278,5	3285,2	3288,8	3298,2	3303,9	3319,9	3334,7	0,968	1,347	1,551	2,082	2,405	3,310	4,148
	3	3110,7	3128,6	3135,8	3138,7	3148,7	3154,5	3170,9	3186,3	1,013	1,420	1,584	2,150	2,479	3,407	4,278
	Média									0,987	1,368	1,551	2,098	2,433	3,348	4,201

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Composição	Coefficiente de absorção ($10^{-3}g/mm^2 \times min^{0,5}$)	Média	Composição	Coefficiente de absorção ($10^{-3}g/mm^2 \times min^{0,5}$)	Média	Composição	Coefficiente de absorção ($10^{-3}g/mm^2 \times min^{0,5}$)	Média
<i>BHD</i>	0,18	0,19	<i>BM</i>	0,39	0,37	<i>BHD20RHD</i>	0,38	0,42
	0,17			0,30			0,47	
	0,22			0,42			0,39	
<i>BM20RHD</i>	0,36	0,39	<i>BHD50RHD</i>	0,40	0,42	<i>BM50RHD</i>	0,42	0,42
	0,45			0,42			0,46	
	0,36			0,44			0,36	
<i>B100RHD</i>	0,48	0,49	<i>BHD20RM</i>	0,36	0,36	<i>BM20RM</i>	0,32	0,35
	0,48			0,34			0,36	
	0,52			0,39			0,36	
<i>BHD50RM</i>	0,43	0,41	<i>BM50RM</i>	0,42	0,42	<i>B100RM</i>	0,47	0,46
	0,42			0,42			0,46	
	0,39			0,43			0,46	

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ESPECIFICAÇÃO LNEC E394 (1993)

Composição	Amostra	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)	Média
<i>BHD</i>	1	1880,3	866,5	1746,6	13,2	12,7
	2	1864,4	845,8	1733,7	12,8	
	3	1951,0	893,1	1823,1	12,1	
<i>BM</i>	1	1686,9	668,4	1476,5	20,7	20,3
	2	1641,0	639,1	1432,9	20,8	
	3	1583,0	573,4	1386,6	19,5	
<i>BHD20RHD</i>	1	1936,9	893,4	1801,5	13,0	13,0
	2	1920,9	885,7	1787,2	12,9	
	3	1961,2	917,9	1824,0	13,2	
<i>BM20RHD</i>	1	1771,2	767,1	1580,1	19,0	18,9
	2	1768,8	758,5	1575,8	19,1	
	3	1779,0	763,0	1588,9	18,7	
<i>BHD50RHD</i>	1	2066,8	1054,3	1919,4	14,6	14,2
	2	2038,9	1031,9	1896,7	14,1	
	3	2088,7	1055,7	1944,4	14,0	
<i>BM50RHD</i>	1	1956,3	942,8	1789,1	16,5	17,1
	2	1939,3	933,3	1761,2	17,7	
	3	1964,6	949,5	1792,2	17,0	
<i>B100RHD</i>	1	2171,4	1161,7	2007,3	16,3	16,3
	2	2173,6	1167,5	2006,8	16,6	
	3	2148,1	1138,0	1985,3	16,1	

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Composição	Amostra	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)	Média
<i>BHD20RM</i>	1	1910,0	896,2	1749,8	15,8	15,0
	2	1906,0	903,3	1770,6	13,5	
	3	1913,0	930,5	1758,0	15,8	
<i>BM20RM</i>	1	1857,1	856,4	1645,5	21,1	21,0
	2	1846,3	832,1	1635,6	20,8	
	3	1894,7	883,5	1681,3	21,1	
<i>BHD50RM</i>	1	1986,0	957,7	1794,9	18,6	18,7
	2	1953,1	936,5	1763,5	18,7	
	3	1967,2	950,0	1774,3	19,0	
<i>BM50RM</i>	1	1848,4	832,4	1619,6	22,5	22,5
	2	1866,7	859,7	1635,2	23,0	
	3	1862,2	872,9	1643,6	22,1	
<i>B100RM</i>	1	1985,3	964,0	1728,6	25,1	25,1
	2	1991,3	973,5	1734,8	25,2	
	3	2004,4	993,9	1753,2	24,9	

M₁ - massa do provete saturado (g);

M₂ - massa do provete em água (g);

M₃ - massa do provete seco (g).

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO - ESPECIFICAÇÃO LNEC E395 (1993)

Composição	Amostra	M₁ (g)	M₂ (g)	M₃ (g)	Absorção (%)	Média
<i>BHD</i>	1	866,5	1746,6	1853,2	10,8	10,8
	2	845,8	1733,7	-	-	
	3	893,1	1823,1	-	-	
<i>BM</i>	1	668,4	1476,5	1672,7	19,5	19,5
	2	639,1	1432,9	-	-	
	3	573,4	1386,6	-	-	
<i>BHD20RHD</i>	1	893,4	1801,5	1935,9	12,9	12,8
	2	885,7	1787,2	1917,9	12,7	
	3	917,9	1824,0	1959,2	13,0	
<i>BM20RHD</i>	1	767,1	1580,1	1766,6	18,7	18,7
	2	758,5	1575,8	1767,9	19,0	
	3	763,0	1588,9	1776,5	18,5	
<i>BHD50RHD</i>	1	1054,3	1919,4	2055,2	13,6	13,3
	2	1031,9	1896,7	2029,3	13,3	
	3	1055,7	1944,4	2076,3	12,9	
<i>BM50RHD</i>	1	942,8	1789,1	1934,5	14,7	15,6
	2	933,3	1761,2	1924,2	16,4	
	3	949,5	1792,2	1949,3	15,7	
<i>B100RHD</i>	1	1161,7	2007,3	2162,2	15,5	14,7
	2	1167,5	2006,8	2154,8	15,0	
	3	1138,0	1985,3	2120,0	13,7	

ANEXO N - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Composição	Amostra	M₁ (g)	M₂ (g)	M₃ (g)	Absorção (%)	Média
<i>BHD20RM</i>	1	896,2	1749,8	1875,1	12,8	12,7
	2	903,3	1770,6	1894,1	12,5	
	3	930,5	1758,0	1880,6	12,9	
<i>BM20RM</i>	1	856,4	1645,5	1843,5	20,1	19,8
	2	832,1	1635,6	1829,4	19,4	
	3	883,5	1681,3	1879,1	19,9	
<i>BHD50RM</i>	1	957,7	1794,9	1974,8	17,7	17,7
	2	936,5	1763,5	1939,6	17,6	
	3	950,0	1774,3	1954,3	17,9	
<i>BM50RM</i>	1	832,4	1619,6	1836,6	21,6	21,5
	2	859,7	1635,2	1851,7	21,8	
	3	872,9	1643,6	1850,3	21,1	
<i>B100RM</i>	1	964,0	1728,6	1971,5	24,1	24,0
	2	973,5	1734,8	1976,5	24,1	
	3	993,9	1753,2	1991,5	23,9	

M₁ - massa do provete em água (g);

M₂ - massa do provete seco (g);

M₃ - massa do provete saturado após secagem em estufa (g).

ANEXO O

RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição		Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Amostra		Medição (mm)					
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
<i>BHD</i>	1	1,27	3,48	5,53	5,63	5,64	6,62	11,17	13,85
	2	1,93	0,55	5,4	5,63	5,57	6,32	12,69	14,09
	3	2,44	-	5,47	5,6	7,1	7,49	12,82	11,54
	4	-	2,63	5,58	5,74	7,13	7,13	13,04	10,96
	5	3,78	0,41	5,54	5,73	8,2	7,3	10,03	12,37
	6	1,77	-	5,79	5,8	7,86	7,23	9,57	12,03
	7	2,62	1,64	5,27	5,35	6,92	6,54	12,67	10,47
	8	3,74	2,29	5,07	5,71	7,03	6,71	13,78	10,69
Média		2,17		5,55		6,92		11,99	
<i>BM</i>	1	9,23	6,03	13,84	11,95	16,02	14,03	27,32	26,15
	2	6,94	8,82	13,68	14,05	17,3	12,81	27,71	28,87
	3	9,1	5,57	12,83	15,17	15,34	17,76	27,84	31,46
	4	7,65	5,55	9,75	13,05	15,61	14,72	23,96	29,15
	5	7,19	8,19	11,98	13,97	17,33	15,29	28,62	25,11
	6	7,01	8,64	13,55	12,5	14,46	14,1	24,95	28,16
	7	7,96	6,76	12,55	11,85	14,34	13,96	29,55	27,6
	8	6,35	5,91	14,14	13,3	13,7	17,3	33,83	28,68
Média		7,31		13,01		15,25		28,06	

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição	Amostra	Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Medição (mm)							
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
<i>BHD20RHD</i>	1	4,62	3,15	6,29	6,59	7,3	7,65	13,11	14
	2	3,25	2,4	5,67	6,05	7,2	7,41	13,2	13,91
	3	2,92	2,02	6,38	6	7,65	7,85	13,1	12,98
	4	2,36	3,61	6,07	7,18	7,21	7,7	13,05	13,01
	5	3,22	2,94	5,35	5,84	7,35	8,1	13,25	14,2
	6	3,22	2,09	4,62	-	6,85	7,62	13,33	13,55
	7	1,87	3,21	4,8	-	7,11	7,84	12,5	13,85
	8	3,65	2,52	5,67	-	7,65	7,89	13,13	13,4
	Média	2,94		5,97		7,52		13,35	
<i>BM20RHD</i>	1	5,72	5,52	8,84	8,75	12,23	13,02	19,12	19,97
	2	6,31	6	8,18	9,14	13,65	12,51	19,5	19,89
	3	5,79	5,72	8,46	8,5	11,24	12,43	19,11	20
	4	6,46	5,72	8,88	8,59	12,36	13	18,35	20,11
	5	5,74	5,61	8,63	8,57	12,68	12,75	18,42	21,91
	6	6,31	5,75	9,25	8,62	12,56	12,35	18,21	22
	7	5,67	5,67	8,47	8,8	13,13	12,68	19,87	20,98
	8	5,81	5,68	8,45	8,32	12,89	13,06	20	20,8
	Média	5,84		8,65		12,66		19,89	

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição	Amostra	Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Medição (mm)							
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
<i>BHD50RHD</i>	1	3,69	4,07	6,57	6,31	7,95	8,95	14,51	13,95
	2	3,9	4,1	6,2	6,23	8,02	8,06	15,1	13,62
	3	3,94	4,65	5,66	5,85	8,16	8,1	14	14,3
	4	3,42	4,27	5,42	6,27	8,35	7,86	14,14	14
	5	2,62	4,26	5,8	6,31	8,14	8,56	14,06	13,5
	6	4,36	4,71	5,63	6,05	7,62	8,95	13,91	13,5
	7	4,4	3,22	6,54	6,21	7,03	9,1	13,35	14,09
	8	3,21	3,5	6,58	6,07	7,55	8,91	13,02	13,8
	Média		3,90		6,11		8,21		13,93
<i>BM50RHD</i>	1	5,13	4,23	7,84	8,85	8,9	9,09	16,37	16,47
	2	5,35	4,49	8,65	7,81	9,57	8,7	16,24	14,03
	3	5,36	4,95	7,93	7,07	10,3	8,96	17,04	17,36
	4	5,5	4,74	6,91	7,84	8,09	10,46	14,4	14,81
	5	4,89	5,51	8,99	9,14	11,88	10,02	15,9	16,53
	6	4,85	4,97	9,62	6,57	7,09	8,17	16,36	17,22
	7	4,85	4,28	9,03	6,75	10,12	8,92	16,05	15,46
	8	5,28	4,12	6,76	5,65	8,85	9,91	17,27	16,14
	Média		4,91		7,84		9,31		16,10

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição	Amostra	Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Medição (mm)							
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
<i>B100RHD</i>	1	4,58	3,82	7,24	6,64	6,93	9,68	15,44	15,18
	2	4,85	4,42	6,74	8,05	8,47	9,74	14,4	15,2
	3	4	4,68	7,44	7,64	7,95	8,94	15,24	14,48
	4	3,9	4,28	6,4	6,83	8,41	8,4	15,28	14,31
	5	4,41	4,51	6,78	6,61	10,74	7,22	14,52	14,9
	6	4,25	4,37	8,32	6,32	8,93	8,2	15,05	15,12
	7	3,87	4,05	6,36	7,06	9,09	6,52	15,09	14,84
	8	3,8	4,43	6,31	6,28	9,02	10,29	14,71	14,73
	Média	4,26		6,94		8,66		14,91	
<i>BHD20RM</i>	1	3,06	3,33	6,05	6,02	9,71	9,29	12,43	12,6
	2	2,75	3,1	8,69	5,66	8,84	9,22	14,59	17,33
	3	3,14	3,51	8,38	7	8,57	8,79	11,3	15,2
	4	2,96	3	7,11	6,98	8,17	8,63	15,33	15,42
	5	2,95	3,23	6,59	5,07	8,97	8,11	15,21	14,18
	6	3,11	2,88	7,06	5,09	9,15	7,83	12,63	13,51
	7	3,33	2,87	7,66	-	8,25	7,57	15,87	13,14
	8	3,06	3,54	6,99	-	8,25	7,01	13,14	14,65
	Média	3,11		6,64		8,52		14,16	

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição	Amostra	Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Medição (mm)							
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
<i>BM20RM</i>	1	6,07	6,11	11,31	10,86	13,02	11,93	20,65	20,66
	2	5,55	5,88	10,82	11,47	12,97	12,77	21,31	20,83
	3	5,75	5,71	10,33	11	12,83	12,8	22,02	22,15
	4	5,76	5,8	10,46	10,84	12,74	12,64	21,98	21,82
	5	5,29	5,58	10,74	10,14	11,77	13,63	20,9	21,96
	6	5,37	6,68	11,06	10	12,15	13,29	21,28	22,58
	7	6,56	6,38	9,32	10,72	13,62	12,04	21,34	23,17
	8	6,07	6,29	9,47	10,82	13,72	12,38	22,11	22,96
	média		5,93		10,59		12,77		21,73
<i>BHD50RM</i>	1	3,34	4,37	8,7	8,29	7,97	11,78	14,53	15,8
	2	3,12	3,81	8,02	8,52	11,75	11,49	15,61	16,02
	3	4	3,87	7,19	8,52	6,65	7,57	15,64	13,13
	4	3,4	3,52	8,25	6,4	7,69	12	16,35	13,14
	5	4,22	4,54	7,72	6,97	9,18	9,48	15,6	15,32
	6	3,66	4,49	8,5	6,87	8,25	8,55	14,94	14,43
	7	3,95	3,89	7,54	7,28	8,23	11,85	14,48	15,57
	8	4,06	3,55	7,62	-	10,71	9,09	14,2	15,6
	média		3,86		7,75		9,52		15,02

ANEXO O - RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Composição	Amostra	Idade (dias)							
		7		28		56		120	
		Medição (mm)							
		Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BM50RM	1	4,46	4,53	8,85	9,17	11,14	10,62	17,84	18,62
	2	5,1	5,09	9,19	8,81	11,52	10,36	17,77	17,95
	3	5,48	4,73	8,76	9,57	10,71	11,38	19,86	17,53
	4	5,05	5,11	8,92	9,43	11,35	10,94	16,38	17,54
	5	4	4,47	8,49	8,61	10,84	12,16	18,4	18,25
	6	4,37	4,54	9,25	8,97	11	12,26	17,26	18,2
	7	5,48	5,33	8,95	8,97	11,18	10,9	18,62	17,94
	8	4,79	4,83	8,81	9,16	11,04	11,27	18,82	17,83
	Média		4,84		8,99		11,17		18,05
B100RM	1	4,13	4,07	7,5	9,05	9,54	10,56	16,11	15,8
	2	4,59	4,31	6,24	8,54	9,78	10,55	15,93	15,91
	3	4,16	4,23	9,39	8	10,46	10	15,87	16,18
	4	4,52	3,81	8,05	9,69	12,05	9,52	15,91	16,22
	5	4,96	4,29	7,1	8,91	12,04	12	15,73	15,96
	6	4,76	4,63	8,07	9,81	9,52	11,97	16,27	16,05
	7	3,98	3,73	7,7	8,55	8,42	8,32	16,06	16,28
	8	3,93	4,05	9,1	8,64	10,37	10,22	16,26	15,9
	Média		4,26		8,40		10,33		16,03

ANEXO P

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE

CLORETOS

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

28 DIAS

BHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	300
	20	-	190
	Temperatura (°C)		24,5
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	160
	Temperatura (°C)		23,3
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	18,1	20,39	16,54
2	19,43	18,26	16,8
3	18,77	22,68	19,39
4	21,14	23,12	16,55
5	19,79	22,53	16,1
6	18,21	20,38	15,25
7	20,05	20,45	15
Média (mm)	19,36	21,12	16,52
Largura do provete (mm)	53	53	52

BM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	350
	20	-	220
	Temperatura (°C)		24,4
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	200
	Temperatura (°C)		24,4
Medição (mm)	P1	P2	P3
1	21,25	25,45	24,33
2	22,62	26,23	24,78
3	23,05	25,51	24,53
4	26,59	26,15	25,56
5	25,12	26,23	25,39
6	26,61	26,68	25,55
7	24,45	25,49	24,45
Média (mm)	24,24	25,96	24,94
Largura do provete (mm)	51	51	50

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BHD20RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	360
	20	-	230
	Temperatura (°C)		22,8
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	210
	Temperatura (°C)		22,8
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	20,09	20,13	19,97
2	23,41	21,35	20,15
3	27,16	19,00	19,88
4	23,59	19,68	19,45
5	24,50	20,88	19,79
6	25,10	22,78	20,88
7	20,36	21,06	25,87
Média (mm)	23,46	20,70	20,86
Largura do provete (mm)	50	50	49

BM20RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	260
	25	-	220
	Temperatura (°C)		20,7
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	25	-	200
	Temperatura (°C)		23,3
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	25,65	27,68	21,58
2	24,45	23,40	24,67
3	26,88	24,64	24,77
4	27,98	24,15	24,16
5	27,56	25,77	25,78
6	27,31	25,35	26,81
7	25,67	24,56	25,18
Média (mm)	26,50	25,08	24,71
Largura do provete (mm)	49	50	52

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BHD50RHD				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	30	-	320	106,67
	20	-	200	66,67
	Temperatura (°C)		23,9	
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	20	-	200	66,67
	Temperatura (°C)		24,1	
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	
1	20,16	20,58	22,60	
2	20,35	23,47	21,35	
3	20,22	23,65	25,15	
4	21,15	23,55	25,00	
5	19,36	24,50	23,48	
6	19,44	23,25	23,71	
7	19,67	22,36	24,23	
Média (mm)	20,05	23,05	23,65	
Largura do provete (mm)	50	48	49	

BM50RHD				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	30	-	310	103,33
	20	-	190	63,33
	Temperatura (°C)		22,7	
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	20	-	180	60,00
	Temperatura (°C)		23,7	
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	
1	22,78	18,00	20,03	
2	23,15	18,85	21,67	
3	22,45	19,62	21,72	
4	23,74	21,98	24,61	
5	23,80	23,70	23,42	
6	23,42	23,54	21,30	
7	21,00	22,16	21,01	
Média (mm)	22,91	21,12	21,97	
Largura do provete (mm)	51	51	50	

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

B100RHD				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (A)	Corrente/provete (mA)
	30	-	390	130,00
	15	-	180	60,00
	Temperatura (°C)			21,6
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (A)	Corrente/provete (mA)
	15	-	160	53,33
		Temperatura (°C)		22,4
Medição (mm)	Provete 1		Provete 2	Provete 3
1	16,00		16,70	17,44
2	15,35		18,65	19,80
3	15,85		19,55	20,16
4	15,76		19,89	19,65
5	15,13		18,32	18,32
6	15,45		16,40	17,65
7	16,74		19,82	17,25
Média (mm)	15,75		18,48	18,61
Largura do provete (mm)	52		51	52

BHD20RM				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	30	-	240	80,00
	25	-	150	50,00
	Temperatura (°C)			21,4
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	25	-	120	40,00
		Temperatura (°C)		23,3
Medição (mm)	Provete 1		Provete 2	Provete 3
1	20,00		20,64	-
2	19,12		20,25	-
3	21,02		23,10	-
4	21,01		24,74	-
5	21,00		27,56	-
6	20,15		23,24	-
7	18,32		20,78	-
Média (mm)	20,09		22,90	-
Largura do provete (mm)	50		50	50

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BM20RM				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	30	-	310	103,33
	20	-	190	63,33
	Temperatura (°C)		25,2	
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	20	-	170	56,67
		Temperatura (°C)		24,2
Medição (mm)	Provete 1		Provete 2	Provete 3
1	21,66		27,54	29,00
2	23,95		27,65	28,34
3	23,40		28,32	25,47
4	22,93		29,45	25,15
5	21,84		29,69	26,62
6	22,56		30,40	25,48
7	23,74		29,19	25,50
Média (mm)	22,87		28,89	26,51
Largura do provete (mm)	49		48	48

BHD50RM				
Início do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	30	-	290	96,67
	20	-	180	60,00
	Temperatura (°C)		23,7	
Fim do ensaio	Voltagem (V)		Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
	20	-	160	53,33
		Temperatura (°C)		25,0
Medição (mm)	Provete 1		Provete 2	Provete 3
1	18,15		20,16	18,16
2	17,94		20,74	18,45
3	19,8		22,65	18,89
4	20,63		22,31	19,14
5	21,06		20,51	19,71
6	19,29		18,37	17,48
7	18,16		18,67	17,62
Média (mm)	19,29		20,49	18,49
Largura do provete (mm)	49		50	50

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BM50RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	310
	20	-	200
	Temperatura (°C)		24,0
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	180
	Temperatura (°C)		25,0
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	22,61	20,16	21,64
2	23,54	21,65	21,2
3	24,65	21,35	21,73
4	24,72	24,59	23,59
5	24,32	24,33	23,24
6	24,69	20,47	23,87
7	20,4	17,68	23,45
Média (mm)	23,56	21,46	22,67
Largura do provete (mm)	52	51	52

B100RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	340
	20	-	210
	Temperatura (°C)		22,5
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	210
	Temperatura (°C)		25,0
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	21,64	20,79	22,13
2	22,61	24,34	22,57
3	22,58	21,65	23,62
4	22,34	22,86	23,41
5	22,55	22,39	22,39
6	20,47	20,42	21,74
7	22,57	21,61	20,35
Média (mm)	22,11	22,01	22,32
Largura do provete (mm)	50	51	51

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

90 DIAS

BHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	220
	25	-	180
	Temperatura (°C)		24,0
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	150
	Temperatura (°C)		22,7
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	17,77	17,36	17,88
2	18,61	22,46	19,44
3	17,97	19,77	16,87
4	17,48	18,71	20,32
5	16,40	18,90	19,74
6	18,55	17,03	17,61
7	20,42	16,72	17,60
Média (mm)	18,17	18,71	18,49
Largura do provete (mm)	50	51	52

BM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	310
	20	-	200
	Temperatura (°C)		24,2
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	170
	Temperatura (°C)		22,9
Medição (mm)	P1	P2	P3
1	26,14	21,01	22,49
2	27,67	23,45	25,26
3	24,00	22,81	25,98
4	27,30	25,47	25,13
5	24,51	24,25	23,23
6	25,25	24,22	22,77
7	23,91	23,88	21,78
Média (mm)	25,54	23,58	23,81
Largura do provete (mm)	51	50	50

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BHD20RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	300
	20	-	190
	Temperatura (°C)		23,6
Fim do ensaio	20	-	170
	Temperatura (°C)		25,0
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	17,48	21,95	15,25
2	19,28	18,65	14,60
3	19,88	20,25	18,18
4	17,24	21,20	18,59
5	19,42	19,60	21,17
6	19,07	18,50	20,00
7	17,85	19,30	19,24
Média (mm)	18,60	19,92	18,15
Largura do provete (mm)	50	50	50

BM20RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	260
	25	-	210
	Temperatura (°C)		23,9
Fim do ensaio	25	-	190
	Temperatura (°C)		25,3
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	24,42	17,54	20,54
2	17,15	19,00	22,33
3	17,78	18,72	23,04
4	18,28	20,01	25,50
5	17,87	18,65	20,34
6	18,63	18,63	20,01
7	18,02	18,48	19,45
Média (mm)	18,88	18,72	21,60
Largura do provete (mm)	53	53	52

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BHD50RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	310
	20	-	190
	Temperatura (°C)		22,1
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	190
			63,33
	Temperatura (°C)		26,0
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	21,71	21,53	17,21
2	24,57	18,66	16,64
3	21,98	19,22	18,32
4	20,33	23,47	20,36
5	22,60	21,18	21,18
6	23,33	19,70	19,88
7	21,53	19,10	17,23
Média (mm)	22,29	20,41	18,69
Largura do provete (mm)	50	49	50

BM50RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	310
	20	-	190
	Temperatura (°C)		25,2
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	190
			63,33
	Temperatura (°C)		23,7
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	18,41	19,35	24,66
2	19,74	22,50	25,38
3	21,17	20,44	21,19
4	19,56	21,57	23,77
5	20,60	20,95	21,00
6	19,36	19,36	21,90
7	18,41	18,41	23,94
Média (mm)	19,61	20,37	23,12
Largura do provete (mm)	50	49	49

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

B100RHD			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	310
	20	-	190
	Temperatura (°C)		23,9
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	190
	Temperatura (°C)		24,9
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	19,85	21,11	20,16
2	18,56	23,66	20,90
3	21,81	23,40	24,00
4	24,72	24,42	24,02
5	24,65	24,69	22,24
6	21,73	23,61	21,46
7	20,85	19,94	20,66
Média (mm)	21,74	22,98	21,92
Largura do provete (mm)	51	52	52

BHD20RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	240
	25	-	190
	Temperatura (°C)		23,1
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	25	-	190
	Temperatura (°C)		25,9
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	19,77	20,70	21,30
2	21,49	22,80	20,76
3	22,66	23,70	19,92
4	23,33	21,91	21,68
5	23,56	22,75	22,61
6	22,67	23,11	23,69
7	19,35	21,23	18,55
Média (mm)	21,83	22,31	21,22
Largura do provete (mm)	5,2	5,1	5,2

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BM20RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	240
	25	-	200
	Temperatura (°C)		25,0
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	25	-	180
	Temperatura (°C)		23,3
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	24,11	25,78	28,14
2	25,72	24,68	24,14
3	29,46	29,61	27,69
4	29,00	26,73	25,27
5	29,53	27,80	30,29
6	26,94	25,59	25,75
7	25,02	25,67	27,88
Média (mm)	27,11	26,55	27,02
Largura do provete (mm)	50	48	48

BHD50RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	260
	25	-	210
	Temperatura (°C)		24,5
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	25	-	170
	Temperatura (°C)		23,3
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	25,39	19,46	16,51
2	22,9	21,49	21,21
3	21,69	23,01	21,49
4	21,16	22,36	23,88
5	20,42	22,53	19,87
6	22,44	23,2	17,35
7	20,29	18,81	17,78
Média (mm)	22,04	21,55	19,73
Largura do provete (mm)	51	50	52

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

BM50RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	260
	25	-	210
	Temperatura (°C)		20,0
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	25	-	200
	Temperatura (°C)		22,8
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	22,21	21,29	18,5
2	24,62	20,5	20,83
3	23,05	20,19	19,87
4	21,92	20,97	26,41
5	20,1	20,74	22,77
6	19,91	22,05	22,8
7	19,98	20,75	22,13
Média (mm)	21,68	20,93	21,90
Largura do provete (mm)	52	51	52

B100RM			
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Início do ensaio	30	-	340
	20	-	210
	Temperatura (°C)		20,3
	Voltagem (V)	Corrente (mA)	Corrente/provete (mA)
Fim do ensaio	20	-	210
	Temperatura (°C)		22,4
Medição (mm)	Provete 1	Provete 2	Provete 3
1	20,9	18,85	17,85
2	19,97	20,58	18,23
3	18,36	19,92	16,6
4	19,8	20,64	19,8
5	18,72	21,86	21,22
6	19,26	21,62	16,57
7	17,64	20,87	16,49
Média (mm)	19,24	20,62	18,11
Largura do provete (mm)	50	50	49

ANEXO P - RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

28 Dias	BHD	BM	BHD20 RHD	BM20 RHD	BHD50 RHD	BM50 RHD	B100RHD	BHD20 RM	BM20 RM	BHD50 RM	BM50 RM	B100RM
<i>Voltagem (v)</i>	20	20	20	25	20	20	15	25	20	20	20	20
<i>Temperatura (°c)</i>	23,9	24,4	22,8	22,0	24,0	23,0	22,0	21,8	24,7	24,4	24,5	23,8
<i>Largura provete (mm)</i>	53	51	50	49	49	51	52	50	48	50	52	51
<i>Profundidade (mm)</i>	19,00	25,05	21,67	25,43	22,25	22,00	17,61	21,50	26,09	19,42	22,57	22,14
<i>Duração ensaio (h)</i>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<i>Difusão (10⁻²m²/s)</i>	13,87	18,12	15,13	14,03	15,34	15,68	16,67	11,94	17,92	13,50	16,48	15,82
90 Dias	BHD	BM	BHD20 RHD	BM20 RHD	BHD50 RHD	BM50 RHD	B100RHD	BHD20 RM	BM20 RM	BHD50 RM	BM50 RM	B100RM
<i>Voltagem (v)</i>	25	20	20	25	20	20	20	25	25	25	25	20
<i>Temperatura (°c)</i>	23,4	23,55	24,3	24,6	24,1	24,4	24,4	24,5	23,2	23,1	21,4	21,4
<i>Largura provete (mm)</i>	51	50	50	53	50	49	52	52	48	51	52	50
<i>Profundidade (mm)</i>	18,46	24,31	18,89	19,73	20,46	21,03	22,21	21,79	26,90	21,11	21,50	19,32
<i>Duração ensaio (h)</i>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<i>Difusão (10⁻²m²/s)</i>	10,36	17,18	13,09	11,59	14,27	14,45	16,19	12,7	14,7	12,0	12,4	13,3