

**Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes de centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição**

Efeito de fíler e substituição parcial do ligante

**Sara Nunes Mesuras de Jesus**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Orientadores**

Prof. Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Dr.<sup>a</sup> Eng.<sup>a</sup> Maria do Rosário da Silva Veiga

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Vogal: Prof.<sup>a</sup> Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

**Outubro 2016**



## Resumo

Além do consumo de recursos naturais, a indústria da construção é responsável pela produção de resíduos de construção e demolição (RCD). Conscientes deste problema, o Governo Português e a União Europeia criaram políticas com o objectivo de promover a reciclagem e reutilização destes resíduos e de encontrar soluções que sejam capazes de combinar crescimento económico e o desenvolvimento sustentável.

Esta investigação tem como objectivo estudar uma alternativa à deposição em aterro dos RCD, considerando uma nova aplicação para estes resíduos, nomeadamente em argamassas de revestimento, reduzindo assim o impacte ambiental, considerando duas abordagens (vector I e II). O primeiro vector estuda o efeito de filler, enquanto o segundo avalia a redução do cimento pela incorporação simultânea de dois tipos de agregados produzidos em centrais de reciclagem de RCD: agregado reciclado misto e de betão.

Os requisitos essenciais das argamassas foram avaliados através da realização de uma série de testes, com o objectivo de estudar a influência de ambos os agregados (inferiores a 0,149 mm) no desempenho das argamassas e para identificar a incorporação de agregados reciclados (10, 15 e 20%) e o traço volumétrico que produziram resultados mais satisfatórios. Os resultados das argamassas modificadas foram analisados tendo como base de comparação uma argamassa convencional.

Os resultados obtidos forneceram perspectivas positivas do uso destes agregados, embora tenham surgido algumas questões relacionadas com o elevado módulo de elasticidade e susceptibilidade à fendilhação das argamassas com incorporação de agregados reciclados de betão. No entanto, no primeiro vector, a argamassa com 15% de agregados reciclados mistos apresentou melhores resultados do que a argamassa convencional em quase todos os parâmetros, o que significa que, apesar da maior quantidade de resíduos contaminantes, a sua utilização em argamassas de revestimento é possível. Contudo, apenas as argamassas mais pobres em cimento com incorporação de agregados reciclados de betão apresentaram um desempenho satisfatório em algumas das propriedades mais importantes das argamassas (resistência mecânica, comportamento à água, aderência ao suporte e susceptibilidade à fendilhação).

**Palavras-chave:** argamassa de revestimento; resíduos de construção e demolição; redução do cimento; reciclagem; agregados reciclados; efeito de filler.

## Abstract

In addition to the consumption of natural resources, the construction industry is responsible for the production of construction and demolition waste (CDW). Aware of this problem, the Portuguese government and the European Union have created policies in order to promote the recycling and reuse of these wastes and to find solutions able to combine economic growth and sustainable development.

This investigation intends to find an alternative to landfill disposal of CDW, considering a new application for these wastes, particularly in rendering mortars, thus reducing the environmental impact by considering two approaches (vector I and II). The first vector evaluated the filler effect whilst the second studied the reduction of cement content with the simultaneous incorporation of two types of aggregates from CDW recycling plants: recycled concrete and mixed aggregates.

The essential requirements of rendering mortars were evaluated by carrying out a series of tests in order to study the influence of both aggregates (lower than 0,149 mm) on the performance of mortars and to identify the incorporation of recycled aggregates (10%, 15% and 20%) and the volumetric ratio that produce the most satisfactory results. The results of the modified mortars were analysed with a reference mortar as a basis of comparison.

The results provided positive prospects concerning the use of these aggregates, although there were some issues related to the high modulus of elasticity and susceptibility to cracking of mortars with incorporation of recycled concrete aggregates. Nevertheless, in the first vector, the mortar with 15% of recycled mixed aggregates presented better results than the conventional mortar in almost all parameters, which means that despite the higher amount of contaminants residues, its use in rendering mortars is possible. However, only the mortars poorer in cement with incorporation of recycled concrete aggregates have presented an acceptable performance in some of the most important properties of mortars (mechanical strength, water behaviour, adherence strength and susceptibility to cracking).

**Keywords:** rendering mortar; construction and demolition waste; cement reduction; recycling; recycled aggregates; filler effect.

## Agradecimentos

Ao longo do meu percurso no Instituto Superior Técnico, foram muitas as pessoas cujo apoio e compreensão foram essenciais e a quem devo o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Prof. Dr. Jorge Manuel Lopes Calião de Brito, que sempre admirei enquanto Professor e que me deu a oportunidade de realizar esta dissertação. Expresso o meu profundo agradecimento pela imensa disponibilidade, apoio, rigor, exigência, conhecimentos e pressão exercida nos momentos cruciais, fundamentais para a realização desta dissertação.

À Dr.<sup>a</sup> Eng.<sup>a</sup> Maria do Rosário da Silva Veiga, pela oportunidade de realizar a campanha experimental no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Agradeço também a ajuda e disponibilidade demonstradas no esclarecimento de dúvidas e na revisão dos vários capítulos, extremamente importantes na elaboração desta dissertação.

Ao Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos do Instituto Superior Técnico, nomeadamente ao Sr. Leonel.

Ao Laboratório da Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa) do LNEC, em especial à técnica Ana Maria Duarte, pelo apoio fundamental durante a fase experimental, mas também ao Bento Sabala, ao Acácio Monteiro, à Eng.<sup>a</sup> Rita Santos e à Eng.<sup>a</sup> Dora Santos pelo apoio demonstrado ao longo da fase de ensaios. E ainda à Eng.<sup>a</sup> Catarina Farinha, pelo apoio e acompanhamento, extremamente importantes, sobretudo na fase inicial desta dissertação.

Às empresas *RCD – Resíduos de Construção e Demolição SA.* e *SGR Ambiente* pela cedência dos agregados reciclados, utilizados na campanha experimental.

Ao Professor Manuel Pereira, do Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico, pela realização das análises químicas e mineralógicas aos agregados reciclados, mas também pelo apoio prestado na análise e compreensão dos resultados.

Ao Laboratório de Ensaios da Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto (APEB) pelas análises químicas aos agregados reciclados.

Ao meu colega e amigo Samuel Roque agradeço, em especial, o apoio, compreensão e espírito crítico, não só nesta fase final, mas também ao longo de todo o curso.

Aos meus amigos. Ao Rui Carrajola, ao André Morgado e à Joana, que estiveram ao meu lado neste caminho, cada um à sua maneira.

À minha família, em especial ao meu avô Manuel.

Aos meus pais, pelo carinho e apoio incondicional demonstrados ao longo de toda a minha vida, mas que se revelaram extremamente importantes ao longo da realização desta dissertação. E, acima de tudo, por acreditarem em mim.

Ao meu irmão, por sempre exigir o melhor de mim e por me fazer acreditar, mesmo em alturas de maior desânimo.

Ao Diogo, pela compreensão, apoio e carinho demonstrados em todas as fases. E, em especial, por me compreender e amparar nos meus momentos mais difíceis.



# Índice geral

<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objectivos da dissertação	2
1.3. Metodologia e organização da dissertação	3
<b>2. Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1. Resíduos de construção e demolição	5
2.2. Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição	5
2.3. Propriedades dos agregados reciclados	6
2.3.1. Composição dos agregados reciclados de RCD	6
2.3.2. Composição química dos agregados reciclados de RCD	6
2.3.3. Pozolanicidade e hidraulicidade dos agregados reciclados de RCD	7
2.3.4. Distribuição granulométrica e forma	8
2.3.5. Densidade, porosidade e absorção de água	9
2.4. Argamassas modificadas com agregados reciclados	9
2.4.1. Propriedades afectadas pela incorporação de resíduos muito finos nas argamassas	9
2.4.2. Propriedades afectadas pela redução do teor de cimento nas argamassas	15
<b>3. Campanha experimental</b>	<b>20</b>
3.1. Considerações iniciais	20
3.2. Planificação da campanha experimental	20
3.3. Constituintes das argamassas	20
3.3.1. Cimento e água	21
3.3.2. Agregados	21
3.4. Argamassas	22
3.5. Produção e preparação de provetes	23
3.5.1. Amassadura	23
3.5.2. Moldagem de provetes	23
3.5.2.1. Provetes prismáticos	24
3.5.2.2. Provetes cilíndricos (discos)	24
3.5.2.3. Aplicação sobre tijolo	24
3.5.3. Condições ambientais de cura	24
3.6. Ensaio aos constituintes	25
3.6.1. Análise granulométrica	25
3.6.2. Massa volúmica aparente (baridade)	25
3.6.3. Composição física, química e mineralógica dos agregados reciclados	26
3.7. Ensaio às argamassas	26

3.7.1.	Ensaio no estado fresco .....	26
3.7.1.1.	Consistência por espalhamento .....	26
3.7.1.2.	Massa volúmica no estado fresco .....	27
3.7.1.3.	Teor de ar incorporado .....	28
3.7.2.	Ensaio no estado endurecido .....	29
3.7.2.1.	Massa volúmica aparente da argamassa no estado endurecido .....	29
3.7.2.2.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	29
3.7.2.3.	Ultra-sons .....	30
3.7.2.4.	Resistência mecânica.....	31
3.7.2.5.	Absorção de água por capilaridade .....	32
3.7.2.6.	Secagem.....	33
3.7.2.7.	Porosidade aberta.....	34
3.7.2.8.	Observação binocular.....	34
3.7.2.9.	Variação dimensional.....	35
3.7.2.10.	Susceptibilidade à fendilhação.....	35
3.7.2.11.	Permeabilidade ao vapor de água .....	36
3.7.2.12.	Permeabilidade à água sob pressão .....	37
3.7.2.13.	Aderência ao suporte .....	37
3.7.2.14.	Envelhecimento acelerado.....	39
<b>4.</b>	<b>Apresentação e análise dos resultados .....</b>	<b>40</b>
4.1.	Considerações iniciais.....	40
4.2.	Ensaio aos constituintes das argamassas (primeira fase experimental) .....	40
4.2.1.	Composição física, química e mineralógica dos agregados reciclados .....	40
4.2.1.1.	Separação manual da fracção superior a 2,38 mm.....	40
4.2.1.2.	Análise química e mineralógica.....	41
4.2.2.	Análise granulométrica.....	42
4.2.3.	Massa volúmica aparente (baridade).....	43
4.3.	Ensaio às argamassas .....	43
4.3.1.	Segunda fase experimental .....	43
4.3.1.1.	Consistência por espalhamento .....	44
4.3.1.2.	Massa volúmica no estado fresco .....	45
4.3.1.3.	Massa volúmica aparente da argamassa no estado endurecido .....	47
4.3.1.4.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	48
4.3.1.5.	Ultra-sons .....	51



4.3.1.6.	Resistência à tracção por flexão e à compressão.....	52
4.3.1.7.	Absorção de água por capilaridade .....	55
4.3.1.8.	Secagem.....	57
4.3.1.9.	Porosidade aberta.....	58
4.3.1.10.	Observação binocular.....	59
4.3.1.11.	Seleção das argamassas com o melhor desempenho .....	61
4.3.2.	Terceira fase experimental .....	62
4.3.2.1.	Teor de ar incorporado .....	63
4.3.2.2.	Varição dimensional (retracção).....	63
4.3.2.3.	Susceptibilidade à fendilhação.....	65
4.3.2.4.	Permeabilidade ao vapor de água .....	67
4.3.2.5.	Envelhecimento acelerado.....	68
4.3.3.	Considerações finais.....	72
<b>5.</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>75</b>
5.1.	Considerações finais .....	75
5.2.	Conclusões gerais .....	75
5.3.	Propostas de desenvolvimentos futuros .....	80
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>81</b>
	<b>Anexos – Resultados da campanha experimental .....</b>	<b>I</b>
	Anexo A: Argamassas da segunda e terceira fases experimentais .....	I
	Anexo B: Número e tipo de provetes por ensaio .....	I
	Anexo C: Volume dos provetes por ensaio .....	I
	Anexo D: Composição das argamassas.....	I
	Anexo E: Análise mineralógica por DRX.....	II
	Anexo F: Análise granulométrica .....	II
	Anexo G: Massa volúmica aparente (baridade).....	II
	Anexo H: Consistência por espalhamento .....	II
	Anexo I: Massa volúmica das argamassas no estado fresco .....	III
	Anexo J: Massa volúmica aparente das argamassas no estado endurecido .....	IV
	Anexo K: Módulo de elasticidade dinâmico .....	V
	Anexo L: Ultra-sons .....	VI
	Anexo M: Resistência à tracção por flexão .....	VIII

Anexo N: Resistência à compressão.....	IX
Anexo O: Absorção de água .....	X
Anexo P: Porosidade aberta .....	XV
Anexo Q: Teor de ar incorporado .....	XV
Anexo R: Variação dimensional (retracção) .....	XVI
Anexo S: Permeabilidade ao vapor de água .....	XVIII
Anexo T: Permeabilidade à água sob pressão .....	XIX
Anexo U: Aderência ao suporte.....	XX

# Índice de figuras

## Capítulo 2

Figura 2.1: Representação esquemática da fractura do betão e exposição de zonas não hidratadas.....	8
Figura 2.2: Resistência à compressão e tracção por flexão de argamassas com incorporação de finos cerâmicos e argamassa, argamassa e blocos de betão e argamassa, barro vermelho, betão, vidro e loiça sanitária .....	12
Figura 2.3: Absorção de água por capilaridade de argamassas com incorporação de finos de betão, vidro e loiça sanitária aos 28 dias de idade .....	12
Figura 2.4: Absorção de água por capilaridade de argamassas com redução do teor de cimento e incorporação de finos de a) betão e barro vermelho; b) vidro e loiça sanitária .....	17

## Capítulo 3

Figura 3.1: Misturadora utilizada para a realização de amassaduras .....	24
Figura 3.2: Compactação da primeira camada .....	24
Figura 3.3: Compactação final por elevação do molde.....	24
Figura 3.4: Regularização da superfície do molde .....	24
Figura 3.5: Compactação da argamassa com o pilão.....	27
Figura 3.6: Aplicação de 15 pancadas por rotação do manípulo da mesa de espalhamento .....	27
Figura 3.7: Medição do diâmetro da argamassa com a craveira .....	27
Figura 3.8: Compactação da primeira camada de argamassa por oscilação do recipiente cilíndrico.....	28
Figura 3.9: Compactação da segunda camada .....	28
Figura 3.10: Regularização da superfície com colher de pedreiro .....	28
Figura 3.11: Equipamento para a determinação do teor de ar .....	29
Figura 3.12: Aparelho de medição de frequências fundamentais .....	30
Figura 3.13: Computador com software de processamento de dados .....	30
Figura 3.14: Equipamento utilizado no ensaio de ultra-sons .....	31
Figura 3.15: Método directo .....	31
Figura 3.16: Método indirecto .....	31
Figura 3.17: Acessório para ensaio de resistência à tracção por flexão .....	32
Figura 3.18: Acessório para ensaio de resistência à compressão.....	32
Figura 3.19: Provetes após ensaio de resistência à compressão.....	32
Figura 3.20: Corte dos provetes com a rebarbadora .....	33
Figura 3.21: Provetes no exsiccador.....	33
Figura 3.22: Provetes no recipiente com 2 cm de altura de água .....	33
Figura 3.23: Medição do comprimento do provete com o deflectómetro.....	35
Figura 3.24: Esquema de copo de ensaio com provete.....	37
Figura 3.25: Conjuntos de copos de ensaio e provetes na câmara climática.....	37
Figura 3.26: Vista geral do ensaio da permeabilidade à água sob pressão .....	37
Figura 3.27: Pormenor do ensaio de permeabilidade à água sob pressão após 48 horas .....	37
Figura 3.28: Colagem das pastilhas nos provetes .....	38
Figura 3.29: Posicionamento do dinamómetro de arrancamento.....	38
Figura 3.30: Rotura adesiva nos carotes após arrancamento .....	38

Figura 3.31: Tipologias de rotura .....	38
Figura 3.32: Provetes na câmara de envelhecimento acelerado: ciclo de calor – gelo .....	39
Figura 3.33: Provetes na câmara de envelhecimento acelerado: ciclo de gelo – degelo .....	39
<b>Capítulo 4</b>	
Figura 4.1: Curvas granulométricas da areia de rio, agregado reciclado de betão e misto .....	43
Figura 4.2: Necessidades de água por dm <sup>3</sup> de argamassa para o vector I .....	44
Figura 4.3: Massa volúmica no estado fresco das argamassas do vector I .....	46
Figura 4.4: Massa volúmica no estado fresco das argamassas do vector II .....	46
Figura 4.5: Massa volúmica aparente no estado endurecido das argamassas do vector I .....	47
Figura 4.6: Massa volúmica aparente no estado endurecido das argamassas do vector II .....	48
Figura 4.7: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas do vector I .....	49
Figura 4.8: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas do vector II .....	50
Figura 4.9: Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas do vector I - método indirecto ..	51
Figura 4.10: Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas do vector II - método indirecto ..	51
Figura 4.11: Resistência à a) compressão por flexão e b) à compressão das argamassas do vector I .....	52
Figura 4.12: Comparação da resistência à a) compressão e b) tracção por flexão aos 28 dias com os resultados de outros estudos .....	53
Figura 4.13: Resistência à compressão das argamassas do vector II .....	53
Figura 4.14: Resistência à tracção por flexão das argamassas do vector II .....	54
Figura 4.15: Comparação da resistência à a) tracção por flexão e b) à compressão com os obtidos noutros estudos aos 28 dias .....	54
Figura 4.16: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I .....	55
Figura 4.17: Comparação do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutros estudos .....	55
Figura 4.18: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARM (vector I) .....	55
Figura 4.19: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARB (vector I) .....	55
Figura 4.20: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector II .....	57
Figura 4.21: Comparação do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutros estudos .....	57
Figura 4.22: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARB (vector II) .....	57
Figura 4.23: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARM (vector II) .....	57
Figura 4.24: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARM (vector I) .....	58
Figura 4.25: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARB (vector I) .....	58
Figura 4.26: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARB (vector II) .....	58
Figura 4.27: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARM (vector II) .....	58
Figura 4.28: Porosidade aberta das argamassas do vector I .....	59
Figura 4.29: Porosidade aberta das argamassas do vector II .....	59
Figura 4.30: Ampliação de 700% para a argamassa REF_1:4 .....	60
Figura 4.31: Ampliação de 700% para a argamassa M_1:4_10 .....	60
Figura 4.32: Ampliação de 500% para a argamassa M_1:4_15 .....	60
Figura 4.33: Ampliação de 500% para a argamassa M_1:4_20 .....	60

Figura 4.34: Ampliação de 700% para a argamassa B_1:4_10 .....	60
Figura 4.35: Ampliação de 700% para a argamassa B_1:4_15 .....	60
Figura 4.36: Ampliação de 700% para a argamassa B_1:4_20 .....	60
Figura 4.37: Ampliação de 700% para a argamassa REF_1:6.....	60
Figura 4.38: Ampliação de 600% para a argamassa B_1:5_20 .....	60
Figura 4.39: Ampliação de 500% para a argamassa M_1:5_15 .....	60
Figura 4.40: Ampliação de 700% para a argamassa M_1:6_15 .....	60
Figura 4.41: Variação dimensional das argamassas do vector I.....	64
Figura 4.42: Comparação da variação dimensional das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutros estudos.....	64
Figura 4.43: Variação dimensional das argamassas do vector II .....	65
Figura 4.44: Comparação da variação dimensional das argamassas do vector II com os resultados obtidos noutros estudos.....	65
Figura 4.45: Pormenor da fissura observada na argamassa com adição de 20% de ARB.....	66
Figura 4.46: Permeabilidade à água sob pressão das argamassas do vector I - aos 28 dias e após envelhecimento acelerado.....	68
Figura 4.47: Permeabilidade à água sob pressão das argamassas do vector II - aos 28 dias e após envelhecimento acelerado .....	69

# Índice de tabelas

## Capítulo 2

Tabela 2.1: Resultados da separação manual das amostras (% em massa) .....	6
Tabela 2.2: Composição química dos agregados reciclados de RCD .....	7
Tabela 2.3: Descrição geral das campanhas experimentais .....	10
Tabela 2.4: Resistências mecânicas de argamassas com redução do teor de cimento e incorporação de finos barro vermelho, betão, vidro e loiça sanitária .....	18

## Capítulo 3

Tabela 3.1: Ensaio da campanha experimental.....	21
Tabela 3.2: Tipos de cura correspondentes a cada ensaio.....	25
Tabela 3.3: Descrição das condições ambientais por ciclo climático .....	39

## Capítulo 4

Tabela 4.1: Resultados da separação manual da fracção superior a 2,38 mm para cada agregado reciclado (% em massa).....	40
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios químicos aos agregados reciclados (amostra de tout-venant) .....	41
Tabela 4.3: Resultados da análise química por FRX dos agregados reciclados (fracção 0 - 2,38 mm) .....	42
Tabela 4.4: Massa volúmica aparente dos constituintes sólidos das argamassas.....	43
Tabela 4.5: Razão água / cimento das argamassas do vector I.....	44
Tabela 4.6: Necessidades de água por $\text{dm}^3$ de argamassa para o vector II .....	45
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios da 2ª fase experimental e selecção das argamassas do vector I com melhor desempenho .....	61
Tabela 4.8: Resultados dos ensaios da 2ª fase experimental e selecção das argamassas do vector II com melhor desempenho .....	62
Tabela 4.9: Teor de ar incorporado das argamassas do vector I e II.....	63
Tabela 4.10: Níveis de severidade de fissuração em função da abertura .....	66
Tabela 4.11: Permeabilidade ao vapor de água das argamassas do vector I e II.....	67
Tabela 4.12: Tipologia de rotura predominante de argamassas do vector I.....	70

## Capítulo 5

Tabela 5.1: Exigências de rebocos para edifícios novos.....	76
Tabela 5.2: Comparação do desempenho das argamassas modificadas pela adição de ARM com a argamassa de referência.....	77
Tabela 5.3: Comparação do desempenho das argamassas modificadas pela adição de ARB com a argamassa de referência.....	78

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

As actividades construtivas potenciam não só um importante efeito económico e social, mas também ambiental, associado à ocupação e uso do solo, ao consumo de recursos, à produção de resíduos e à alteração dos ecossistemas naturais, que podem interferir com o ambiente envolvente (Pinheiro, 2006). Consequentemente, a sustentabilidade da indústria da construção assume-se como uma prioridade nos dias de hoje.

Estima-se que o mercado global do cimento sofra um aumento de 4,5% ao ano, atingindo 5,2 biliões de toneladas em 2019, potenciado pela crescente evolução no sector da construção nos países em desenvolvimento, destacando-se o mercado da construção chinês, responsável por cerca de 50% da procura global de cimento (Freedonia, 2015). A produção de cimento implica a formação de CO<sub>2</sub> que, em 2009, correspondia a 5% das emissões globais de CO<sub>2</sub> provocadas pelo Homem (WBCSD/IEA, 2009). Este facto, aliado à elevada quantidade de energia necessária ao seu fabrico, justificam a necessidade de estudar materiais alternativos como substitutos parciais do cimento. O consumo de agregados, por sua vez, atingirá 53,2 biliões de toneladas em 2017, com um crescimento de 5,8% ao ano, prevenindo-se que o agregado britado seja o agregado mais procurado, por questões de durabilidade e resistência, mas também devido ao esgotamento de reservas de areia nalgumas regiões (Freedonia, 2013).

De acordo com o Eurostat, a quantidade de resíduos gerada pela União Europeia, em 2012, corresponde a mais de 2,5 biliões de toneladas, sendo que o sector da construção representa cerca de 33% desses resíduos, ou seja, mais de 821 milhões de toneladas. Sendo assim, o sector da construção é o principal responsável pela produção de resíduos na Europa, seguido pelo sector mineiro e de exploração de pedreiras (29%).

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, em Portugal e no ano de 2012, foram produzidas aproximadamente 928 mil toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), das quais 85% corresponde a minerais e resíduos sólidos (APA, 2015). No entanto, estas estatísticas baseiam-se na quantidade de resíduos recolhida pelos operadores e não nos números reais de produção de RCD. Assim, é provável que os RCD atinjam valores superiores aos mencionados. O carácter geograficamente disperso e temporário das obras dificulta o controlo e a fiscalização do desempenho ambiental das empresas do sector e contribui para a dificuldade de gestão dos resíduos (APA, 2015)

Desta forma, os RCD foram definidos como uma das prioridades em termos de resíduos da União Europeia. Com a publicação da Directiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro, a União Europeia estipula que os países devem tomar as medidas necessárias para alcançar um mínimo de 70% (em massa) de reciclagem de RCD não perigosos, em 2020. Neste sentido, defende-se a procura da sustentabilidade na indústria da construção, com o objectivo de garantir que o crescimento económico dos países, em muito potenciado pelo sector da construção, não implique necessariamente um consumo excessivo de recursos naturais e de produção de resíduos.

Em Portugal, o problema da gestão dos RCD conduziu à criação de legislação específica, com a aprovação e consequente publicação do Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, onde se estabelece o regime de operações de gestão de RCD. A necessidade de prevenção, reutilização e reciclagem dos RCD representa o principal foco destas medidas normativas, reduzindo o volume de resíduos depositados em aterros sanitários assim como a deposição não autorizada.

Os RCD provêm de obras de construção e reabilitação de edifícios e infra-estruturas, bem como de demolições

parciais ou totais e da criação ou manutenção de estradas e possuem um elevado potencial para a sua reciclagem e reutilização, uma vez que alguns dos seus componentes constituem recursos de elevado valor (European Commission, 2015). Como tal, o mercado dos agregados surge como uma alternativa de reciclagem para os RCD, permitindo reduzir o impacto ambiental dos recursos utilizados tradicionalmente no sector da construção, através da limitação da extracção e transformação de matérias-primas (Eurostat, 2015).

Adicionalmente, e no caso de os agregados reciclados poderem ser adquiridos localmente, permitindo uma redução de distâncias relativas ao transporte, os benefícios são ainda superiores, particularmente no que diz respeito ao consumo de combustíveis e emissão de poluentes. Os resíduos provenientes de novas construções estão menos misturados, menos contaminados e, conseqüentemente, possuem um potencial de recuperação superior ao dos resíduos de demolição ou reabilitação que, de uma forma geral, tendem a estar mais contaminados e representam a grande maioria dos RCD (European Commission - DG ENV, 2011). Por conseguinte, a separação dos diferentes resíduos no local onde foram gerados, bem como a identificação dos potenciais contaminantes deve ser realizada, de forma a evitar a contaminação da fracção inerte e assegurar uma elevada qualidade do material reciclado. Neste sentido, também a demolição selectiva pode contribuir para uma separação eficaz dos diferentes resíduos, bem como para a remoção de alguns contaminantes.

Actualmente, as centrais de reciclagem têm alguma dificuldade em colocar no mercado a fracção mineral reciclada, essencialmente devido à falta de experiência na utilização destes materiais, à dificuldade em assegurar a qualidade dos materiais reciclados, à desconfiança por parte dos compradores, questões ambientais, mas sobretudo devido à facilidade com que se obtém os agregados habitualmente utilizados, nomeadamente os agregados naturais, em grande parte localmente disponíveis e produzidos a custos competitivos (European Commission - DG ENV, 2011).

Ainda que nos últimos anos tenham sido efectuados diversos estudos sobre o desempenho de betões com incorporação da fracção grossa de agregados reciclados de RCD e que demonstram que o seu uso permite produzir betões com características aceitáveis para uma utilização corrente (Evangelista e Brito, 2013), actualmente a utilização da fracção fina nos betões é limitada ou proibida. Com o intuito de desenvolver soluções para esta fracção fina, têm sido realizados diversos estudos sobre a sua aplicação em betões, onde se conclui que é possível produzir betões com agregados finos sem prejudicar, de modo significativo, o seu desempenho (Evangelista e Brito, 2013).

No entanto, a utilização deste tipo de agregado como adição em argamassas de revestimento modificadas, nas quais é incorporada uma fracção muito fina de RCD proveniente de centrais de reciclagem, ainda não se encontra muito desenvolvida. Quase todos estudos existentes incidem, sobretudo, na incorporação de agregados obtidos em laboratório e que, como tal, não reflectem a variabilidade dos agregados produzidos nas centrais de reciclagem.

## **1.2. Objectivos da dissertação**

A presente dissertação surge na sequência de uma linha de investigação desenvolvida no Instituto Superior Técnico, que pretende estudar o desempenho de argamassas cimentícias com incorporação de agregados finos de resíduos de construção. Estes resíduos apenas foram avaliados individualmente, apresentando, de uma forma geral e para determinadas percentagens de incorporação, bons resultados. Desta forma, a consideração da reciclagem dos RCD enquanto agregados em argamassas de revestimento surge como o próximo passo.

Assim, com a presente dissertação, procurou-se avaliar duas aplicações dos agregados finos em argamassas: incorporação de muito finos de RCD e redução do teor de cimento. Pretendeu-se contribuir para o estudo de uma



alternativa ao uso de agregados naturais, diminuindo a sua extracção e a deposição de resíduos em aterros, com a sua possível reciclagem enquanto agregado para argamassas de revestimento. A redução do teor de cimento, por sua vez, pode ajudar a mitigar os impactes ambientais relacionados com a sua produção. Adicionalmente, pretendeu-se reduzir as incertezas relacionadas com o uso deste tipo de agregados.

Este desempenho foi avaliado no que diz respeito ao efeito de filler, conseguido pelo preenchimento dos vazios existentes na argamassa convencional, e à substituição parcial do cimento, denominados por vector I e vector II, respectivamente. O vector I consiste na incorporação de várias percentagens de partículas de agregado infra 0,149 mm, em substituição da areia, enquanto o vector II se caracteriza pela redução do teor de cimento das argamassas em estudo e, simultaneamente, pela incorporação dos mesmos agregados reciclados. Os resultados dos ensaios de caracterização e comportamento, no estado fresco e endurecido, permitem avaliar o desempenho destas argamassas, por comparação com argamassas de referência. Neste sentido, foram utilizados dois tipos de agregados distintos produzidos nas centrais de reciclagem: agregados reciclados de betão e agregados reciclados mistos, que podem conter materiais como: cerâmicos, betão, resíduos de argamassa endurecida e contaminantes. A utilização destes dois tipos de agregados teve como objectivo avaliar as diferenças de desempenho das argamassas nas várias propriedades, conforme o tipo de resíduo utilizado.

Por conseguinte, esta dissertação teve como principal objectivo contribuir para o estudo e desenvolvimento de soluções para a reciclagem dos RCD através da avaliação do desempenho de argamassas de revestimento, fabricadas com diferentes percentagens de incorporação de agregados provenientes de centrais de reciclagem de RCD. Assim, se as argamassas com adição de agregados reciclados deste tipo apresentarem um desempenho melhor ou comparável ao exibido pelas argamassas de referência, apenas produzidas com areia, a sua utilização em argamassas de revestimento representa uma possível solução para a reciclagem de agregados finos de RCD.

A par desta dissertação, Roque (s.d.) desenvolveu um terceiro vector, sobre o mesmo tema, que visa estudar a substituição contínua da curva granulométrica da areia pelos agregados reciclados, nas percentagens de 20, 50 e 100%, complementando a presente dissertação.

### **1.3. Metodologia e organização da dissertação**

Para cumprir os objectivos propostos, foi determinante que a presente dissertação fosse organizada em fases sequenciais, descritas de seguida.

A primeira fase consistiu no **levantamento bibliográfico**, com o objectivo de obter uma visão geral do tema, reunindo informação relacionada com os agregados de RCD e respectiva reciclagem, com ênfase na sua aplicação em argamassas de revestimento. Desta forma, foi possível compreender o avanço do conhecimento neste domínio, essencial para a descrição do estado da arte até à data da pesquisa, assim como para a análise e discussão dos resultados obtidos na campanha experimental.

A pesquisa efectuada revelou-se ainda fundamental para o **planeamento dos ensaios laboratoriais**, nomeadamente na definição da formulação das argamassas e dos ensaios a realizar em cada fase experimental, tendo em consideração os objectivos desta dissertação. A calendarização da campanha experimental e a concepção de um mapa de quantidades, foi determinante para o cumprimento de prazos, bem como para aquisição do material. Tendo em conta a elevada variabilidade dos agregados reciclados, foi necessário prever a quantidade de agregado com granulometria inferior a 0,149 mm e garantir que a amostra de *tout-venant* recolhida seria suficiente para a

realização de todos os ensaios, garantindo sempre uma margem de segurança.

Para a selecção dos agregados a incorporar no presente estudo, foram realizadas diversas visitas a centrais de reciclagem, com o intuito de garantir que os agregados possuíssem a granulometria e composição pretendidas e compreender o seu processo de fabrico. Após a obtenção dos agregados reciclados, deu-se início à **campanha experimental**, realizada em quatro laboratórios distintos e que teve a duração de cerca de dez meses. Todos os agregados foram secos, separados por granulometrias e alvo do ensaio de análise granulométrica no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico. As análises químicas e mineralógicas aos agregados reciclados foram realizadas no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico e no Laboratório de Ensaios da Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto (APEB). Os restantes ensaios foram efectuados no Laboratório da Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa), no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Simultaneamente à realização da campanha experimental, procedeu-se à **análise e discussão dos resultados**, garantindo uma correcta interpretação do comportamento das argamassas. Estes resultados foram então analisados com o objectivo de identificar tendências de comportamento, bem como as suas possíveis causas, enquadrando os resultados obtidos com os de outros estudos sobre a mesma temática e correlacionando com outros ensaios da mesma dissertação. A última fase consistiu na organização de informação e resultados obtidos, pela redacção deste texto. Assim, a presente dissertação está dividida em cinco capítulos, descritos de seguida:

- **capítulo 1:** o primeiro capítulo é dedicado à apresentação e enquadramento do tema, com ênfase na problemática dos resíduos de construção e demolição e da sustentabilidade na construção. São ainda definidos os objectivos gerais desta dissertação e é apresentada a metodologia e organização do trabalho;
- **capítulo 2:** no capítulo do estado da arte, são descritos e analisados os resultados obtidos em investigações com temáticas relacionadas com o presente estudo, e que resultam de uma extensa pesquisa bibliográfica. São apresentadas as principais propriedades destes agregados, bem como o seu processo de fabrico e, por fim, são analisadas campanhas de outros estudos e que se enquadram nos dois vectores de investigação em análise;
- **capítulo 3:** neste capítulo, procede-se à planificação da campanha experimental, sendo descritos as normas e procedimentos adoptados, bem como os equipamentos utilizados. Para cada ensaio, é referido o seu objectivo e descrita a forma como os resultados foram tratados de modo a permitir avaliar os diversos parâmetros em estudo. São ainda definidas as formulações das argamassas assim como os seus constituintes;
- **capítulo 4:** este capítulo, é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental para diversas propriedades das argamassas, sendo apontadas as causas prováveis para as tendências observadas. Para esta análise, foi fundamental o levantamento do estado da arte. Sempre que possível, é feita a correlação entre os diversos ensaios e os resultados obtidos por outros autores. Por fim, faz-se uma análise global sobre a influência da incorporação destes agregados reciclados nas argamassas, para cada um dos vectores;
- **capítulo 5:** neste último capítulo, são apresentadas as conclusões gerais da dissertação e discute-se a viabilidade das argamassas modificadas em estudo enquanto substitutas das argamassas convencionais, apresentando-se as principais vantagens e desvantagens da sua aplicação. São ainda apresentadas propostas de desenvolvimento futuro, com o objectivo de dar continuidade ao estudo da reciclagem dos RCD.

Por fim, e após as referências bibliográficas, são apresentados os anexos referenciados ao longo da dissertação, nos quais se podem consultar, com maior detalhe, os resultados individuais de cada ensaio.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Resíduos de construção e demolição

O Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, define como “resíduo de construção e demolição” os resíduos provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações. Actualmente a triagem destes RCD em obra é obrigatória, com vista ao seu encaminhamento para reciclagem ou outras formas de valorização, de acordo com o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho. É ainda estabelecida uma hierarquia de gestão em obra, onde é privilegiada a reutilização dos RCD no local. Os restantes resíduos devem ser alvo de triagem em obra, sendo posteriormente encaminhados para os operadores licenciados para o efeito, onde se deve proceder à reciclagem e a outras formas de valorização. Os resíduos que não venham a ser reciclados ou valorizados devem sofrer uma triagem antes da sua deposição em aterro.

### 2.2. Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição

Existe um elevado potencial para a reciclagem e reutilização dos resíduos de construção e demolição, uma vez que alguns dos seus componentes constituem recursos de elevado valor, nomeadamente o material inerte.

As centrais de reciclagem processam os RCD, fazendo-os passar por quatro operações principais: triagem, redução primária, britagem e peneiração. A triagem permite remover os resíduos considerados contaminantes ou impurezas como plástico, madeira, metais ou gesso. Na redução primária, os resíduos sofrem uma diminuição de tamanho e são removidos os materiais metálicos ainda presentes. Na britagem, também ocorre uma redução de tamanho até à granulometria pretendida, obtendo-se os agregados reciclados. As centrais de reciclagem podem ser móveis ou fixas, ainda que as centrais fixas permitam um maior controlo do processo de reciclagem dos agregados no que diz respeito à qualidade do produto final, possibilitando a existência de uma menor quantidade de materiais considerados contaminantes. Por fim, os agregados são separados nas várias fracções granulométricas, para serem utilizados em diferentes aplicações (Silva, 2008).

Segundo Angulo (2005), a produção de agregados grossos reciclados gera uma quantidade considerável de materiais finos. A fracção com dimensão inferior a 4,8 mm corresponde a 50%, em massa, da produção total.

Os agregados grossos reciclados de RCD têm vindo a ser estudados no que diz respeito à sua aplicação no betão. Vários investigadores concluíram que a fracção grossa pode ser aplicada como substituto do agregado natural e manter desempenhos favoráveis (Evangelista e Brito, 2013). No entanto, a incorporação da fracção fina destes agregados reciclados no betão é limitada ou impedida, na maioria dos casos. Bianchini *et al.* (2005) referem que a fracção fina dos agregados reciclados de RCD pode ser utilizada como agregado em argamassas, se for efectuada uma separação efectiva dos contaminantes, desde o local de origem dos resíduos.

Em Portugal, o uso da fracção mineral dos resíduos de construção e demolição como agregado em obras públicas e privadas tem de obedecer aos requisitos estabelecidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Actualmente, existem quatro especificações LNEC (LNEC – E 471, 2009; LNEC – E 472, 2009; LNEC – E 473, 2009; LNEC – E 474, 2009) que fornecem as directivas e determinam os requisitos mínimos que o material reciclado de RCD deve cumprir de forma a ser utilizado como agregado grosso para betões de ligantes hidráulicos, em misturas betuminosas, em camadas não ligadas de pavimentos ou em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte.

## 2.3. Propriedades dos agregados reciclados

As propriedades físicas e químicas dos agregados finos reciclados estão directamente relacionadas com a composição mineralógica dos resíduos de construção e demolição que lhes deram origem. Assumindo que as empresas de gestão e valorização de resíduos actuam geograficamente, a composição destes agregados também deverá variar com a localização geográfica por reflectirem a utilização de diferentes materiais e tecnologias de construção (Rodrigues *et al.*, 2013). Desta forma, analisam-se de seguida algumas propriedades destes agregados.

### 2.3.1. Composição dos agregados reciclados de RCD

Rodrigues *et al.* (2013) estudaram agregados finos de RCD provenientes de centrais de reciclagem portuguesas. Foram recolhidas amostras de *tout-venant* reciclado de modo a representar diversas áreas geográficas. A maioria das centrais comercializa agregados reciclados correspondentes a misturas de cerâmicos e betão e apenas uma produz um agregado reciclado maioritariamente constituído por betão.

Os autores procederam à separação manual da fracção 1-4 mm, tendo obtido os resultados presentes na Tabela 2.1, para as diferentes amostras. A categoria “minerais” inclui resíduos de betão, argamassas e partículas cimentícias. Por sua vez, foram considerados “outros” as partículas de materiais como a madeira, plástico e vidro. Verifica-se que a categoria “minerais” representa, em oito das dez amostras recolhidas, mais de 90% da composição das amostras de agregados reciclados. O conteúdo de cerâmicos (“tijolos”) constitui, em média, 5,8% da amostra. Já a fracção “outros” corresponde, em valores médios, a 0,31% da massa total. No entanto, os autores referem que os resultados relativos à composição dos agregados finos são influenciados pela variabilidade dos RCD e que tanto a dimensão da amostra como a distribuição temporal da sua recolha podem conduzir a valores ligeiramente diferentes.

**Tabela 2.1: Resultados da separação manual das amostras (% em massa)**  
(Adaptado de Rodrigues *et al.*, 2013)

Amostra	AMB-c	AMB-m	ARV	RTR	SGR#1	SGR#2	TRI	VAL	VIM#1	VIM#2
Minerais (%)	99,0	92,8	98,7	94,1	94,4	92,7	93,3	92,6	89,9	85,6
Tijolos (%)	0,7	6,8	1,0	5,2	4,1	5,6	5,6	7,2	8,6	13,5
Outros (%)	0,1	0,4	0,3	0,2	0,5	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1

A nível internacional, outros estudos sobre agregados reciclados revelam algumas diferenças na composição. Os agregados utilizados por Corinaldesi e Moriconi (2009), provenientes de uma central de reciclagem (fracção inferior a 5 mm), são compostos por 72% de betão, 25% de alvenaria e 3% de betume. Por sua vez, Bianchini *et al.* (2005), ao analisarem a fracção inferior a 10 mm de amostras recolhidas em diferentes períodos, verificaram que os agregados desta fracção possuem na sua composição 45% de tijolos e materiais de terracota, entre 40 a 45% de betão e 10 a 15% de materiais finos incoerentes de resíduos de argamassa e betão. O material que deu origem aos agregados finos em análise apresentava, na sua constituição, resíduos de madeira, metal, plástico, papel e borracha, em percentagens totais entre 5 e 9%, removidos por um processo de separação preliminar.

Deste modo, é possível concluir que os agregados de RCD são compostos, em grande parte, por materiais inertes.

### 2.3.2. Composição química dos agregados reciclados de RCD

A quantificação visual da composição dos agregados reciclados de RCD fornece pouca informação sobre a composição química dos mesmos (Angulo, 2005). O desconhecimento da história e das propriedades dos materiais que compõem os agregados reciclados de RCD leva a que a análise e definição da sua composição química forneçam informações importantes acerca dos mesmos (Silva *et al.*, 2014).

Com o intuito de avaliar a composição química dos seus agregados, Martínez *et al.* (2013) e Jochem (2012), analisaram agregados reciclados provenientes da demolição de três edifícios com tecnologias construtivas e materiais diferentes (AR1, AR2 e AR3) e à fracção inferior a 0,150 mm dos agregados AR4, provenientes de uma central de reciclagem de RCD (Tabela 2.2), respectivamente.

**Tabela 2.2: Composição química dos agregados reciclados de RCD**  
(Adaptado de Martínez *et al.* (2013) e Jochem (2012))

Elementos (% em massa)	Martínez <i>et al.</i> (2013) – AR1	Martínez <i>et al.</i> (2013) – AR2	Martínez <i>et al.</i> (2013) – AR3	Jochem (2012) – AR4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93	4,03	1,71	3,20
MnO	0,08	0,07	0,08	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,24	0,17	0,50
CaO	26,09	46,76	65,3	40,77
K <sub>2</sub> O	0,83	0,68	0,37	1,84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,15	0,1	-
SiO <sub>2</sub>	47,43	31,16	13,24	20,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,29	7,82	3,42	9,44
MgO	3,82	5,77	5,77	-
Na <sub>2</sub> O	2,21	1,10	0,2	-
Outros	-	-	-	0,81
<b>Perda de massa ao fogo</b>	<b>0,86</b>	<b>2,22</b>	<b>9,64</b>	<b>23,00</b>

AR1 – maioritariamente cerâmicos; AR2 – mistura de cerâmicos e argamassa; AR3 – maioritariamente betão; AR4 – RCD proveniente de central de reciclagem.

Os componentes maioritários, ainda que em percentagens diferentes em cada agregado, correspondem a SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e MgO. O agregado AR4 possui adicionalmente na sua constituição metais pesados como o titânio, o zinco e o cobre, em pequenas percentagens. Contudo, tal não se verifica nos outros agregados. A presença dos óxidos, nomeadamente SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nos agregados reciclados de RCD está relacionada com a existência de materiais como pasta de cimento endurecida, agregados naturais ou materiais cerâmicos (Angulo, 2005). Todos os agregados possuem uma percentagem elevada de CaO devido à presença de resíduos de cimento nos agregados. A perda de massa ao fogo está associada, igualmente, à presença de material de origem cimentícia, bem como de produtos cerâmicos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Jochem, 2012).

Angulo (2005) estudou as propriedades dos agregados reciclados de RCD provenientes de diferentes centrais e concluiu que, para a fracção inferior a 0,150 mm, existe uma variação substancial nas espécies químicas presentes comparativamente com as restantes granulometrias. Esta tendência foi registada para os diferentes agregados, independentemente da sua origem, pelo que se conclui que a composição dos agregados deixa de ser preponderante ao nível da composição química para esta granulometria. Assim, para a fracção inferior a 0,150 mm, há um aumento das percentagens Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e perda ao fogo, registando-se também uma diminuição da quantidade de SiO<sub>2</sub> presente.

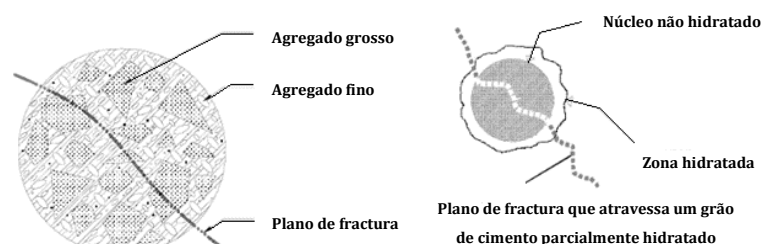
### 2.3.3. Pozolanicidade e hidraulicidade dos agregados reciclados de RCD

A existência de cimento não hidratado nos agregados reciclados, sobretudo devido à argamassa aderida, reportada por vários autores (Amin *et al.*, 2016; Poon *et al.*, 2006; Ashiquazzaman e Hossen, 2013), confere propriedades cimentícias residuais a estes agregados, em particular nas partículas com dimensão inferior a 2,4 mm (Amin *et al.*, 2016). A quantidade de argamassa aderida é crescente com a diminuição da dimensão dos agregados reciclados e depende do método de trituração dos mesmos, podendo variar entre 20 e 40% da massa dos agregados (Etxeberria *et al.*, 2007).

A britagem dos resíduos de betão, pela fractura do cimento parcialmente hidratado, pode expor superfícies não hidratadas (Figura 2.1), que estão disponíveis para re-hidratação após reciclagem (Amin *et al.*, 2016; Ashiquazzaman

e Hossen, 2013). De acordo com Neville (1995), citado por Amim *et al.* (2016), os quatro principais constituintes do cimento ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ ) permanecem substancialmente não hidratados no betão por décadas. Poon *et al.* (2006) referem ainda que a fracção inferior a 0,150 mm apresenta a maior quantidade de  $C_2S$  na sua constituição, o que pode explicar as propriedades hidráulicas evidenciadas pelos agregados reciclados muito finos.

Desta forma, a presença do cimento por reagir, conduz a incrementos de resistência após reciclagem, que demonstram ser mais significativos, em idades mais avançadas, nos agregados reciclados provenientes da britagem de betão com agregado de tijolo relativamente ao betão convencional. A diferença de comportamentos está relacionada com as propriedades pozolânicas adicionais do tijolo (Amin *et al.*, 2016).



**Figura 2.1: Representação esquemática da fractura do betão e exposição de zonas não hidratadas**  
(Adaptado de Amin *et al.*, 2016)

De facto, Leite e Molin (2002), ao avaliarem a actividade pozolânica apenas do material cerâmico presente numa amostra de agregado reciclado após separação e redução até este possuir uma dimensão inferior a 0,075 mm, verificaram que o índice de actividade pozolânica é suficiente para que seja considerado pozolânico. Os agregados reciclados que possuam elevadas percentagens de materiais cerâmicos na sua composição, visto que o efeito pozolânico deste resíduo é provável, podem contribuir para a resistência à compressão de argamassas em idades mais avançadas (Lima, 1999).

#### 2.3.4. Distribuição granulométrica e forma

Os equipamentos utilizados nas centrais, assim como o número de processos a que os materiais são sujeitos até possuírem a granulometria pretendida, influenciam o tamanho e a forma dos agregados daí resultantes (Silva *et al.*, 2014). Mesmo utilizando um equipamento de fragmentação idêntico, a percentagem de material inerte (betão, tijolo, pedra, areia e argamassa) pode influenciar a curva granulométrica do agregado reciclado (Angulo, 2000). Contudo, Rodrigues (2011), ao estudar os agregados finos de RCD de várias centrais de reciclagem portuguesas com diferentes equipamentos de fragmentação, concluiu que essa desigualdade não influencia significativamente a distribuição da composição dos agregados, sendo o principal parâmetro diferenciador o tipo de RCD a partir do qual este se produz.

Martínez *et al.* (2013) verificaram que a quantidade de finos com dimensão inferior a 0,149 mm nos agregados de RCD reciclados é superior à presente nos agregados naturais. Adicionalmente, agregados provenientes de centrais de reciclagem possuem uma superfície mais áspera e formas mais angulares do que os agregados naturais (Silva *et al.*, 2014). O agregado reciclado constituído maioritariamente por cerâmicos é aquele que apresenta uma quantidade mais elevada de material que passa neste peneiro. Para além do aumento da quantidade de cerâmicos na fracção muito fina, é de esperar que os finos de agregados reciclados possuam uma maior percentagem de argamassa na sua composição, visto esta fragmentar-se mais facilmente do que os minerais aos quais se encontra aderida (Rodrigues, 2011).

### 2.3.5. Densidade, porosidade e absorção de água

Os agregados de RCD produzidos nas centrais de reciclagem portuguesas possuem, segundo Rodrigues *et al.* (2013) massas volúmicas aparentes inferiores aos agregados naturais, em concordância com o registado por outros autores (Evangelista e Brito, 2007; Ledesma *et al.*, 2015). Esta diminuição da densidade está relacionada com o facto de os agregados reciclados de RCD serem mais porosos do que os agregados naturais produzidos a partir de rochas calcárias e ígneas, visto os primeiros possuírem na sua constituição: betão, argamassa endurecida e materiais cerâmicos (Jochem *et al.*, 2013; Angulo, 2005).

Com um aumento da porosidade, regista-se um incremento de absorção de água pelos agregados reciclados. Esta absorção de água pode variar de acordo com a natureza do material, a fracção granulométrica e a densidade do agregado. Assim, quanto maior a densidade do agregado, menor a sua absorção. Desta forma, a absorção de água é diferente conforme se trate de um agregado maioritariamente constituído por betão ou alvenaria (Angulo, 2000) e o agregado será mais poroso caso os resíduos que lhe deram origem contenham uma percentagem elevada de argamassa e material cerâmico. Assim sendo, as principais diferenças entre os agregados reciclados e os naturais consistem na maior absorção de água, menor resistência à fragmentação e menor densidade (Ledesma *et al.*, 2014) dos agregados reciclados.

## 2.4. Argamassas modificadas com agregados reciclados

Neste subcapítulo, são apresentados estudos que pretenderam avaliar o desempenho de argamassas modificadas pela incorporação de resíduos comparativamente às argamassas tradicionais, no que diz respeito à incorporação de finos e à redução do teor de cimento. Embora a presente dissertação tenha como objectivo o estudo da incorporação de RCD provenientes de centrais de reciclagem e na ausência de estudos com a utilização destes agregados, considerou-se pertinente apresentar adicionalmente estudos relativos à incorporação de outros agregados reciclados, que compõem a generalidade dos agregados provenientes das centrais de reciclagem, nomeadamente: resíduos de barro vermelho, betão triturado, vidro, loiça sanitária e pó de telha.

De seguida, é feita uma descrição geral das campanhas experimentais (Tabela 2.3) de vários autores que avaliam a introdução de resíduos muito finos em argamassas e a redução do teor de cimento através da incorporação de resíduos muito finos. Posteriormente, são descritas e analisadas as propriedades afectadas.

### 2.4.1. Propriedades afectadas pela incorporação de resíduos muito finos nas argamassas

A incorporação de agregados finos provenientes de resíduos é, de acordo com os autores citados, responsável por variações no desempenho das argamassas, consoante a percentagem de incorporação e o resíduo incorporado, essencialmente devido ao efeito de filler. De uma forma geral, a introdução destes resíduos muito finos nas argamassas até às percentagens estudadas, traduz-se em resultados positivos, apresentando indícios ou melhorias de desempenho face às argamassas tradicionais, nomeadamente:

- a introdução de finos é responsável pelo aumento da **trabalhabilidade** das argamassas:

Silva *et al.* (2009), Oliveira *et al.* (2013), Farinha *et al.* (2015) e Braga *et al.* (2012) verificaram a mesma tendência de redução da razão água / cimento com o incremento da quantidade de finos adicionada, já que há um aumento da plasticidade da argamassa (Oliveira *et al.*, 2013). Segundo os referidos autores, o efeito de filler, originado pelos

finos introduzidos, permite reduzir os vazios na argamassa, anteriormente preenchidos por água pela substituição por vazios ocupados pelas partículas muito finas de resíduos. Consequentemente, a água necessária apenas possui função de lubrificação e de hidratação do cimento (Oliveira *et al.*, 2013).

Tabela 2.3: Descrição geral das campanhas experimentais

	Estudos	Tipo de resíduo	Descrição geral da campanha experimental
Incorporação de muito finos	Silva <i>et al.</i> , 2009	Barro vermelho	Foram produzidas argamassas cimentícias com o traço volumétrico 1:4, nas quais se procedeu à substituição da areia (em volume) por resíduos muito finos de barro vermelho, nas percentagens de 0, 5 e 10%.
	Braga <i>et al.</i> , 2010	Betão	A incorporação de material dos resíduos dimensão inferior a 0,150 mm, nas percentagens de 0, 5, 10 e 15% (no total de volume de areia e betão triturado) foi estudada em argamassas cimentícias com o traço volumétrico 1:4.
	Oliveira <i>et al.</i> , 2013	Vidro	Os agregados utilizados são provenientes da trituração de vidro plano recozido e apenas foi utilizado o material inferior a 0,149 mm. As argamassas com incorporação de 0, 10, 15 e 20% de agregados muito finos (na total de areia e vidro) apresentam o mesmo traço volumétrico de 1:4.
	Farinha <i>et al.</i> , 2015	Loiça sanitária	Os resíduos de loiça sanitária, com dimensão inferior a 0,149 mm, foram incorporados nas percentagens de 0, 10, 15 e 20% (no total de volume de agregados), em argamassas cimentícias produzidas com o traço volumétrico 1:4.
	Miranda e Selmo, 2006 <sup>a</sup> e Miranda e Selmo, 2006 <sup>b</sup>	Argamassa de cimento, cal e areia Blocos de betão e argamassa Cerâmicos e argamassa	Num estudo anterior, os autores definiram um método para a dosagem de areias que permite controlar a trabalhabilidade e a retracção das argamassas, assim como a sua resistência. Pretendeu-se verificar se o referido método também poderia ser aplicado às argamassas com RCD. Foram obtidos, em laboratório, três tipos distintos de agregados reciclados provenientes de RCD. Manteve-se a quantidade de cimento constante, correspondendo a 10% da massa total das argamassas no estado endurecido. Para cada tipo de agregado reciclado, fez-se variar a quantidade de finos com dimensão inferior a 0,075 mm nas percentagens de 18, 25 e 32% da massa das argamassas, também no estado endurecido.
	Jochem <i>et al.</i> , 2013	RCD	Foram formuladas diversas argamassas, nas quais tanto o agregado natural como o agregado reciclado possuem uma composição granulométrica fina caracterizada por D/d: 1,2/0,15 mm, fazendo-se variar a percentagem de incorporação de muito finos (0, 6, 12, 18 e 24%). O material com dimensão inferior a 0,150 mm adicionado a cada argamassa corresponde ao fino da mesma natureza dos restantes agregados.
	Redução do teor de cimento	Silva <i>et al.</i> (2008)	Barro vermelho
Braga <i>et al.</i> (2014)		Betão	Foram analisadas argamassas, nas quais se procedeu à redução da quantidade de cimento, pela redução do traço volumétrico de 1:4 para 1:5 e 1:6 e simultânea introdução de 15% de finos de betão com dimensão inferior a 0,150 mm.
Oliveira <i>et al.</i> (2015)		Vidro	Os agregados utilizados são provenientes da trituração de vidro plano recozido. O material, com dimensão inferior a 0,149 mm, foi adicionado em 10, 15 e 20% do volume dos agregados, com o intuito de servir como substituto parcial do cimento, em argamassas com o traço volumétrico 1:5 e 1:6.
Farinha <i>et al.</i> (2016)		Loiça sanitária	Foi analisada a redução do teor de cimento, pela produção de argamassas com o traço volumétrico 1:4, 1:5 e 1:6 e simultânea introdução de finos de loiça sanitária. Os resíduos, com dimensão inferior a 0,149 mm, foram incorporados em argamassas, correspondendo a 20% do volume de agregados.
Pereira (2015)		RCD	Os resíduos incorporados nas argamassas, provenientes de uma centrais de reciclagem portuguesa, foram moídos até obter uma finura inferior à do cimento e utilizados como substituto parcial do cimento Portland (CEM I 42,5 R) em 0, 5 e 10%.
Antony e Nair (2016)		Telha	Foi analisada a potencialidade do uso de resíduos de pó de telha (com dimensão inferior a 0,090 mm), provenientes do fabrico de telhas, como substitutos parciais do cimento, pela produção de argamassas ao traço volumétrico 1:3 e 1:5, nas quais se fez substituir o cimento nas percentagens de 0, 5, 10, 15 e 20%.
Jackiewicz-Rek <i>et al.</i> (2015)		Loiça sanitária	Foram produzidas argamassas, nas quais se estudou a substituição do cimento Portland (CEM I 42,5 R) por agregados de loiça sanitária (dimensão inferior a 0,05 mm) nas percentagens de 10, 15 e 20% (em massa).

Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>) verificaram que a razão efectiva de água / cimento diminui com o aumento da incorporação de finos, para as diferentes composições de agregados de RCD testadas. Para incorporações de 18%, todos os



tipos de finos reciclados apresentam uma razão a/c semelhante. No entanto, para incorporações até 32%, os finos de argamassa e de blocos de betão apresentam o maior decréscimo. Jochem *et al.* (2013) concluíram que o espalhamento das argamassas com agregados reciclados foi inferior ao registado para as argamassas com agregados britados, verificando-se um aumento da trabalhabilidade à medida que se adicionou finos.

- o aumento da **massa volúmica**, registado por alguns autores, apesar de representar um incremento no peso próprio do revestimento, é também um indicador de aumento da compactidade, responsável pelas melhorias ao nível das **resistências mecânicas**, da **porosidade aberta**, assim como do seu comportamento à água:

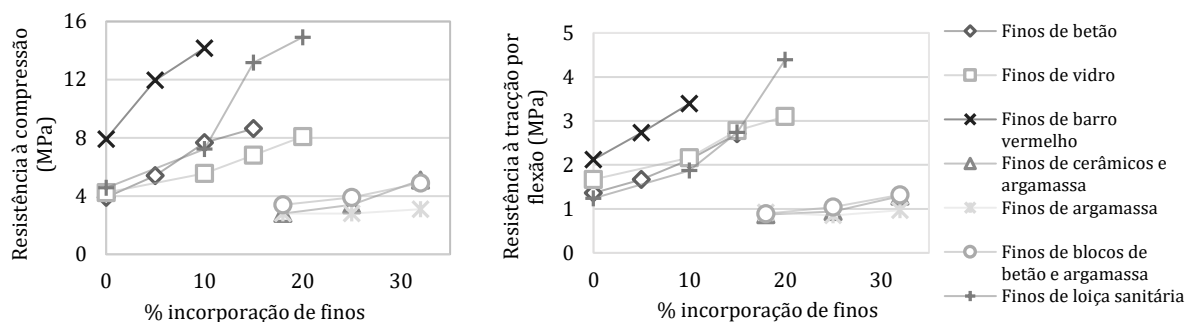
Os resultados obtidos nos estudos de Braga *et al.* (2012) e Farinha *et al.* (2015) seguem tendências semelhantes no estado fresco e no estado endurecido. Estes autores constataram que à medida que se aumenta a quantidade de finos, a massa volúmica também sofre um incremento. Apesar da massa volúmica aparente de ambos os resíduos incorporados ser inferior à da areia, os autores relacionam o incremento da argamassa com a redução do teor de água da mesma e com o efeito de fíler, que se sobrepôs ao efeito de diminuição de massa volúmica aparente.

Jochem *et al.* (2013) verificaram que a adição de finos, em praticamente todas as argamassas com agregados reciclados, reduz o teor de ar incorporado e, conseqüentemente, aumenta a massa volúmica das argamassas no estado fresco. A argamassa com 18% de finos é a única excepção a esta tendência. Já Oliveira *et al.* (2013) constataram que, contrariamente ao sucedido no estado fresco, a massa volúmica aparente no estado endurecido aumenta, de uma forma geral, com a adição de finos devido ao efeito de fíler. Segundo os referidos autores, o efeito da introdução de ar perde alguma importância no estado endurecido face ao efeito de fíler, visto que uma parte é libertada através do processo de compactação dos provetes e posterior estabilização. As argamassas estudadas por Silva *et al.* (2009) também apresentam comportamentos distintos consoante o estado seja fresco ou endurecido. No entanto, os valores no estado endurecido são semelhantes aos da argamassa de referência.

A porosidade aberta está directamente relacionada com propriedades como o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas. Devido ao efeito de fíler, as argamassas são mais compactas e, como tal, a uma maior percentagem de incorporação de finos corresponde a menor porosidade aberta (Farinha *et al.*, 2015). Em todos os estudos (Miranda e Selmo, 2006<sup>b</sup>; Silva *et al.*, 2009; Braga *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2013; Farinha *et al.*, 2015) é possível notar uma melhoria da sua resistência mecânica, tanto à tracção por flexão como à compressão (Figura 2.2). Os autores, citando Angelim *et al.* (2003), referem que a melhoria de desempenho demonstrada com a incorporação de finos está relacionada, para além do efeito de fíler, com a conseqüente diminuição da razão água / cimento, assim como com a possibilidade de ocorrência de efeitos pozolânicos por parte dos resíduos incorporados.

A adição de finos cerâmicos conduz às maiores resistências mecânicas, enquanto a adição de finos de vidro ou betão apresenta resultados inferiores e aproximados (Figura 2.2). Já os resultados obtidos por Miranda e Selmo (2006<sup>b</sup>) destacam-se dos restantes por serem muito inferiores, ainda que seja mantida a mesma tendência de aumento da resistência mecânica. Os finos de argamassa apresentam menores incrementos de resistência em relação aos restantes pois necessitam de uma quantidade de água superior (Miranda e Selmo, 2006<sup>a</sup>).

Jochem *et al.* (2013) concluíram que a adição de resíduos muito finos de RCD permite melhorar a resistência mecânica das argamassas. Verificou-se, adicionalmente, que comparativamente com argamassas com agregados britados com a mesma incorporação de muito finos, as argamassas com agregados reciclados apresentam valores de resistências superiores.

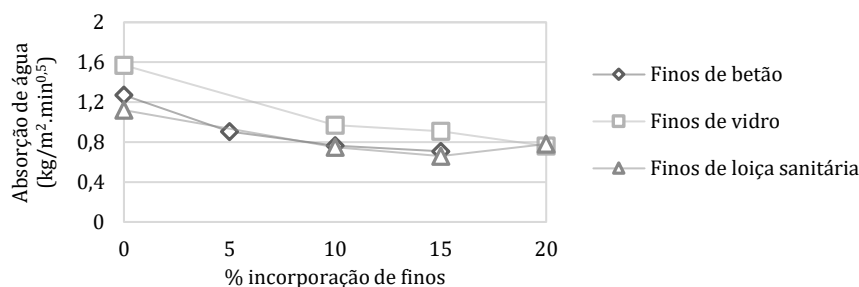


**Figura 2.2: Resistência à compressão e tração por flexão de argamassas com incorporação de finos cerâmicos e argamassa, argamassa e blocos de betão e argamassa, barro vermelho, betão, vidro e loiça sanitária**

(Adaptado de Miranda e Selmo (2006<sup>b</sup>), Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015))

- o comportamento das argamassas em relação à água é também melhorado, tanto ao nível da **permeabilidade à água sob pressão** assim como à **absorção de água por capilaridade**, pelas dificuldades impostas pela adição de finos à penetração e percolação de água no seu interior:

O coeficiente de absorção de água por capilaridade diminui com a incorporação de finos (Figura 2.3) (Silva *et al.*, 2009; Braga *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2013). No caso da argamassa modificada com adição de 20% de finos de vidro, o coeficiente de capilaridade é cerca de 50% inferior ao obtido para a argamassa de referência. Para a argamassa com adição de 15% de finos de betão, a diminuição deste coeficiente corresponde a 40% face ao registado para a argamassa sem adição de finos. No estudo de Farinha *et al.* (2015), o menor coeficiente de absorção de água por capilaridade não corresponde à argamassa com maior incorporação de finos, contrariamente ao sucedido noutros estudos, apesar de se registar um decréscimo, de forma geral, neste coeficiente. Ainda assim, o valor obtido para a maior percentagem de incorporação continua a ser inferior ao registado para a argamassa de referência.



**Figura 2.3: Absorção de água por capilaridade de argamassas com incorporação de finos de betão, vidro e loiça sanitária aos 28 dias de idade**

(Adaptado de Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015))

Para além do efeito de fíler, apontado pelos diversos autores, Farinha *et al.* (2015) referem que a diminuição do coeficiente de água por capilaridade assim como a absorção total de água, poderá estar relacionada com o potencial efeito pozolânico dos finos de loiça sanitária.

Também a adição de finos às argamassas, independentemente da percentagem e natureza dos resíduos, permite reduzir a permeabilidade à água sob pressão destas argamassas, tanto antes como após submissão das mesmas ao envelhecimento acelerado (Silva *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2013; Farinha *et al.*, 2015). Farinha *et al.* (2015) verificaram que a adição de 20% de finos de loiça sanitária contribuiu para um decréscimo considerável da permeabilidade à água sob pressão (89% e 82% antes e após o envelhecimento acelerado, respectivamente). No caso da adição de finos de vidro, apesar da grande variabilidade dos resultados, a argamassa modificada com 20% de

finos apresenta, em média, um menor valor para este parâmetro. No entanto, a diferença apenas começa a ser significativa após o envelhecimento acelerado (Oliveira *et al.*, 2013). Contrariamente ao observado por Oliveira *et al.* (2013), que verificaram uma melhoria na permeabilidade após o envelhecimento acelerado, as argamassas com adição de finos de loiça sanitária são mais permeáveis. Segundo Farinha *et al.* (2015), este facto indica que, após o envelhecimento acelerado, e apesar de não serem visíveis a olho nu, surgiram fissuras e ocorreu a desagregação na camada de revestimento.

- a **aderência ao suporte** é melhorada com a adição de finos:

Todas as argamassas com adição de finos apresentam uma melhoria de comportamento, tanto antes como depois do envelhecimento acelerado (Silva *et al.*, 2009; Braga *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2013; Farinha *et al.*, 2015). Segundo Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), aos 28 dias, este incremento na aderência é justificado com o aumento da percentagem de finos, que resulta numa melhoria na ligação entre o revestimento e o suporte, essencialmente devido à sucção de água e de finos da argamassa pelo suporte. Após o envelhecimento, as reacções de hidratação do cimento por hidratar, promovidas pelos ciclos de climáticos (Silva *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2013; Farinha *et al.*, 2015) podem sobrepor-se à microfissuração predominantemente superficial causada pelo envelhecimento, resultando num aumento de aderência após o envelhecimento, tal como observado por Oliveira *et al.*, (2013) para as argamassas com adição de finos de vidro. Quanto à tipologia de rotura predominante antes e após o envelhecimento acelerado, a generalidade dos autores observou uma rotura do tipo adesiva nas argamassas com adição de finos. Nas argamassas de referência, por sua vez, observam-se, também de uma forma geral, uma rotura do tipo coesiva na argamassa. De acordo com Oliveira *et al.* (2013), o aparecimento de rotura adesiva sugere que a incorporação de finos é responsável pelo incremento da resistência à rotura por tracção da argamassa e não tanto pela melhoria da sua ligação ao suporte.

Ainda assim, a incorporação de finos é também responsável por indícios ou desempenhos inferiores em determinadas propriedades, por comparação com a argamassa de referência, essencialmente no que diz respeito:

- **ao módulo de elasticidade dinâmico e à retracção:**

O aumento do módulo de elasticidade dinâmico conduz a maiores tensões internas e uma menor capacidade de deformação (Braga *et al.*, 2012) que, aliado à elevada retracção que estas argamassas apresentam, contribui para o aumento da probabilidade de ocorrência de fissuração do revestimento, ainda que tal não se tenha verificado em nenhum dos estudos. No entanto, um elevado módulo de elasticidade dinâmico pode ser um indicador de elevadas resistências mecânicas assim como de baixas absorções capilares (Farinha *et al.*, 2015).

À excepção de Silva *et al.* (2009), que registaram uma ligeira diminuição do valor do módulo de elasticidade dinâmico da argamassa modificada em relação à argamassa de referência, justificando os resultados obtidos com a menor rigidez dos finos de barro vermelho comparativamente à areia e com as semelhanças entre as duas argamassas, uma vez que apenas 10% do volume de agregados foi substituído, os vários autores (Braga *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2013; Farinha *et al.*, 2015) verificaram que o aumento dos finos nas argamassas conduz ao incremento neste parâmetro. Por sua vez, Braga *et al.* (2012) referem que a redução do consumo de água de argamassa modificada assim como o aumento da sua compacidade e rigidez, justifica esta o aumento nos valores do módulo de elasticidade dinâmico. Assim, para as argamassas com 15% de finos de betão e 20% de finos de vidro adicionados, regista-se um aumento de quase 50 e 70% no módulo de elasticidade dinâmico relativamente à argamassa de referência.

Segundo Veiga (1998), o uso de agregados com elevado teor de finos é uma das condições para o aumento da

retracção. Os autores (Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>), Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015)) concluíram que a adição de finos é responsável por um aumento da retracção das argamassas. Embora Silva *et al.* (2009) e Oliveira *et al.* (2013), para adições de finos de barro vermelho e finos de vidro, considerem que o incremento de aproximadamente 13 e 15% aos 80 e 100 dias, respectivamente, na retracção se trata de um valor ainda aceitável para o comportamento de uma argamassa de revestimento, Braga *et al.* (2012) e Farinha *et al.* (2015), por outro lado, registaram um aumento significativo na retracção nas suas argamassas (44 e 33% para a adição de 15% de finos de betão e 20% de finos de loiça sanitária) devido às tensões exercidas nos poros capilares.

Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>), ao estudarem argamassas com diferentes incorporações de finos de três agregados reciclados de RCD com composições distintas, para além de confirmarem a tendência registada nos estudos citados, concluíram que, à excepção da incorporação de 18%, a retracção varia conforme o agregado utilizado. Desta forma, para as argamassas com o maior conteúdo de resíduos cerâmicos, a retracção é ligeiramente inferior. Os referidos autores defendem ainda que este aumento de retracção está relacionado com a distribuição das dimensões dos poros no interior na argamassa após a introdução de finos, já que não foi encontrada uma relação entre a razão água / cimento efectiva ou total e os valores da retracção. Assim, Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>), concluem que a distribuição de poros influencia a retracção de uma forma mais significativa do que a porosidade introduzida pela razão água / cimento efectiva.

De acordo com Silva *et al.* (2009), uma reduzida **permeabilidade ao vapor de água** é um factor negativo numa argamassa, pois não permite que ocorra uma boa secagem da água que nela penetra e impede que o vapor de água produzido no interior dos edifícios seja conduzido para o exterior. Apesar de se registar uma redução neste parâmetro nos vários estudos (Silva *et al.*, 2009; Braga *et al.*, 2012; Farinha *et al.*, 2015), Silva *et al.* (2009) e Braga *et al.* (2012) consideram que, ainda assim, se tratam de valores aceitáveis para o seu bom desempenho enquanto argamassas de revestimento.

Para a argamassa com 10% de finos de barro vermelho, a permeabilidade ao vapor de água é aproximadamente 12% inferior e para as argamassas com 20% de finos de betão e loiça sanitária, essa diferença corresponde a 18% e 25%, respectivamente. Jochem *et al.* (2013), por sua vez, verificaram que as argamassas formuladas com agregados reciclados e com 24% de finos apresentam uma permeabilidade ao vapor de água superior às argamassas com 24% finos de agregados de britagem.

No que concerne ao **teor de ar incorporado**, a incorporação de finos foi responsável por tendências opostas. Se, por um lado, Oliveira *et al.* (2013) concluíram que este parâmetro aumenta à medida que se adiciona finos de vidro, justificando esta tendência com a forma maioritariamente laminar das partículas, que propicia o aprisionamento de ar nas argamassas. Por outro, Jochem *et al.* (2013) avaliaram o comportamento de argamassas com incorporação de finos em diferentes percentagens (0, 6, 12, 18 e 24%) e registaram uma tendência geral de decréscimo do teor de ar incorporado com a adição de finos, sendo a única excepção a argamassa com adição de 18% de finos. Já Farinha *et al.* (2015) verificaram que a adição de 20% de finos de loiça sanitária não influencia significativamente o teor de ar das argamassas, que permanece semelhante ao da argamassa sem adição de finos.

A argamassas modificadas apresentam um comportamento semelhante à argamassa de referência, no que diz respeito à **secagem** e a **resistência à fendilhação**, não tendo sido influenciados pela introdução de finos.

Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) verificaram que a incorporação de finos conduz

a uma velocidade de secagem inicial mais lenta que, segundo Farinha *et al.* (2015), pode ser justificado com a diminuição dos poros capilares, por comparação com as argamassas de referência, o que dificulta a saída de água do seu interior. No entanto, a adição de resíduos não influencia significativamente a secagem das argamassas, que apresentam um andamento semelhante ao registado para a argamassa de referência.

A avaliação qualitativa da susceptibilidade à fendilhação das argamassas pela aplicação de uma camada de revestimento com 2 cm na face de um tijolo cerâmico, permitiu concluir que, após observação por um período não inferior a 5 meses, nenhuma das argamassas revelou qualquer tipo de fissura visível a olho nu e, como tal, Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) concluíram que as argamassas em estudo são pouco susceptíveis à fendilhação. Ainda assim, os autores referem que tanto a área de aplicação da argamassa como as condições em laboratório são diferentes das existentes na sua eventual aplicação em obra, pelo que o teste é meramente indicativo de que este não é um parâmetro impeditivo à sua utilização.

Contudo, nos estudos de Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) os valores do módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas aos 90 dias são ligeiramente inferiores aos registados aos 28 dias. Segundo os autores, estas reduções podem dever-se a alguma **microfissuração interna** das argamassas ou a variações do teor de humidade dos provetes entre as duas idades.

#### **2.4.2. Propriedades afectadas pela redução do teor de cimento nas argamassas**

De acordo com os diferentes autores citados, a redução do teor de cimento das argamassas através da substituição por agregados finos provenientes de diferentes resíduos influencia o desempenho das argamassas, consoante o resíduo incorporado e a percentagem de substituição. O efeito de filler conferido pela adição de finos, assim como o seu potencial efeito pozolânico ou, quando este não existe, a existência de cimento por hidratar nos resíduos incorporados melhora, em grande parte, as propriedades das argamassas e permite contrariar o efeito da redução da quantidade de cimento. Com base nos estudos analisados, estas argamassas apresentam indícios ou melhorias de desempenho no que diz respeito às seguintes propriedades:

- a redução da **massa volúmica** permite diminuir o peso próprio do suporte:

Segundo Oliveira *et al.* (2015), a adição de finos é responsável por dois efeitos contrários. Por um lado, por efeito de filler, contribui para o aumento de densidade das argamassas. Por outro, aumenta o teor de ar. Além disso, a baixa densidade dos finos adicionados, nomeadamente os de barro vermelho e betão, é também responsável pela diminuição das massas volúmicas. Estes constituintes, ao apresentarem massas volúmicas aparentes inferiores à do cimento, contribuem para a diminuição da massa volúmica com a redução do ligante (Silva *et al.*, 2008; Braga *et al.*, 2014). Ainda assim, a incorporação de resíduos de loiça sanitária nas argamassas de Farinha *et al.* (2016), apesar destes finos apresentarem uma massa volúmica aparente superior à do cimento, não foi suficiente para contrariar o efeito da redução de cimento, que superou o efeito de filler e massa volúmica aparente.

Desta forma, todos os autores verificaram uma tendência geral de diminuição da massa volúmica tanto no estado fresco como no endurecido para as argamassas com incorporação de finos como substitutos do cimento.

- o **módulo de elasticidade dinâmico**, no caso dos finos de barro vermelho e vidro, é inferior à argamassa de referência e semelhante nas argamassas com finos de betão, pelo que estas argamassas estão sujeitas a menores tensões internas e possuem uma capacidade de deformação superior:

Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) concluíram que a redução do teor de cimento tem um efeito contrário à introdução de finos: para traço volumétrico constante, a introdução de finos aumenta o módulo de elasticidade dinâmico, por efeito de fíler e pozolânico. No entanto, a redução do teor de cimento é responsável pela sua diminuição (Farinha *et al.*, 2016 e Oliveira *et al.*, 2015). Em todos os estudos, para os vários traços volumétricos testados com menor quantidade de ligante, as argamassas modificadas apresentam diferenças no módulo de elasticidade dinâmico que não alteram o desempenho das argamassas (Farinha *et al.*, 2016; Braga *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015).

- as argamassas com um menor teor de cimento e incorporação de finos de barro vermelho e loiça sanitária evidenciam um melhor desempenho que a argamassa de referência relativamente à **permeabilidade ao vapor de água**, enquanto as de betão têm um comportamento semelhante:

O aumento da permeabilidade ao vapor de água de uma argamassa é um factor considerado positivo, na medida em que significa que a argamassa permite a saída do vapor de água que se encontra no seu interior (Farinha *et al.*, 2016). Este parâmetro foi estudado por Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014) e Farinha *et al.* (2016). No caso das argamassas com traço volumétrico 1:6 e adição de finos de barro vermelho em 10% e de loiça sanitária em 20%, o efeito da redução da quantidade de cimento foi suficiente para contrariar o da introdução de finos, pelo que estas argamassas apresentam valores de permeabilidade superiores à argamassa de referência com traço volumétrico 1:4. No entanto, o mesmo não se verificou nas argamassas com um teor de cimento maior, nomeadamente as argamassas com o traço volumétrico 1:5 e adição de 15% de finos de betão e 20% de finos de loiça sanitária, que possuem valores de permeabilidade ligeiramente inferiores à argamassa de referência e que, segundo Braga *et al.* (2014) e Farinha *et al.* (2016), não são significativos.

- a **absorção de água por capilaridade** é uma propriedade que melhora, em praticamente todos os estudos, com a introdução de finos e redução do cimento. Por conseguinte, estas argamassas são menos susceptíveis à entrada de água e estão mais protegidas contra os mecanismos de degradação convencionais:

Em todos os estudos (Silva *et al.*, 2008; Braga *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015; Farinha *et al.*, 2016), há uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade das diversas argamassas com a introdução de finos e simultânea introdução de agregados finos comparativamente à argamassa de referência com o traço volumétrico 1:4 (Figura 2.4). A redução do ligante e consequente aumento da relação água / cimento é responsável pelo aumento dos poros capilares e o fluxo de água entre estes (Braga *et al.*, 2014). No entanto, de acordo com Silva *et al.* (2008), a quantidade de finos adicionada, neste caso de barro vermelho, é superior à redução da quantidade de cimento, pelo que a argamassa possui um maior teor de finos, aumentando a sua compacidade.

A argamassa de traço volumétrico 1:6 e 20% de finos de loiça sanitária, pertencente ao estudo de Farinha *et al.* (2016) é a única excepção, apresentado um ligeiro aumento neste coeficiente. No entanto, a argamassa de referência com traço volumétrico 1:4 absorveu mais água até o ensaio estar terminado. Adicionalmente, todos os autores concluíram que, para a mesma incorporação de finos, à medida que se reduz a quantidade de cimento, a absorção de água aumenta. Contudo, Pereira (2015) e Antony e Nair (2016) verificaram que as argamassas nas quais se procedeu à substituição parcial do cimento apresentam um comportamento inferior ao da argamassa de referência. No entanto, Antony e Nair (2016) referem que é possível substituir o cimento até 15 e 10%, para os traços volumétricos 1:3 e 1:5, respectivamente, e obter absorções de água satisfatórias. Estes autores relacionam os resultados obtidos com o incremento de finos após substituição do cimento pelo pó de telha.

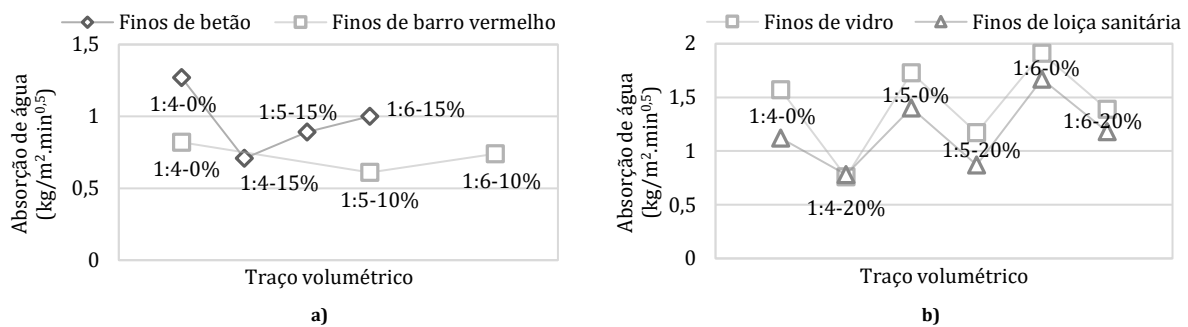


Figura 2.4: Absorção de água por capilaridade de argamassas com redução do teor de cimento e incorporação de finos de a) betão e barro vermelho; b) vidro e loiça sanitária

(Adaptado de Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016))

- **aderência ao suporte** melhorou com a substituição do cimento por finos de barro vermelho, de betão, vidro e loiça sanitária, sobretudo após o envelhecimento acelerado:

Os vários autores (Silva *et al.*, 2008; Braga *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015; Farinha *et al.*, 2016) concluíram que, após o envelhecimento, e de uma forma geral, a tensão de aderência das argamassas modificadas com uma menor quantidade de cimento é semelhante ou superior à da argamassa de referência, porque a redução da quantidade de cimento não é suficiente para cancelar o efeito positivo da introdução de finos. Contudo, Braga *et al.* (2014) referem uma diminuição de aderência nestas argamassas com redução da quantidade de cimento, uma tendência que, de forma geral, também se verificou nos outros estudos. Adicionalmente, Silva *et al.* (2008) justificam os aumentos da aderência observados após o envelhecimento na generalidade dos estudos com a cura a que os provetes estão sujeitos, referindo que as condições são insuficientes para que a hidratação do cimento esteja completa. Desta forma, e caso o envelhecimento acelerado não produza fissuras na argamassa, os ciclos climáticos permitem a prossecução da hidratação do cimento e, por conseguinte, a argamassa torna-se mais compacta.

As desvantagens apresentadas por estas argamassas relacionam-se com a sua **trabalhabilidade** e **resistências mecânicas**.

A redução da água necessária para manter a trabalhabilidade das argamassas menos ricas em cimento e com adição de finos não foi suficiente para que a razão água / cimento seguisse a mesma tendência (Silva *et al.*, 2008; Braga *et al.*, 2014; Farinha *et al.*, 2016). Desta forma, a introdução de finos e redução do cimento é responsável pelo aumento da razão água / cimento das várias argamassas. Acresce ainda que as misturas com menos cimento, com ou sem finos na sua constituição, precisam de mais água para alcançar a mesma trabalhabilidade, devido ao aumento da superfície específica dos agregados, o que implica um incremento na quantidade de água necessária para os molhar. No caso das argamassas de Silva *et al.* (2008) e Oliveira *et al.* (2015), verificou-se alguma perda de trabalhabilidade e exsudação, razão pela qual, no último estudo, foi necessário diminuir os espalhamentos para garantir a trabalhabilidade das argamassas com incorporação de finos de vidro.

Desta forma, estas argamassas são mais porosas, o que contribui para as perdas de resistência observadas nas argamassas com menos cimento, com excepção do estudo de Farinha *et al.* (2016) e de Jackiewicz-Rek *et al.* (2015). Até ao traço volumétrico 1:5, todas as argamassas com incorporação de finos, estudadas por Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016), possuem, aos 28 e 90 dias, resistências à compressão superiores à da argamassa de referência 1:4 (Tabela 2.4). Estes aumentos na resistência à compressão devem-se, essencialmente, aos efeitos de filler e pozolânico (Oliveira *et al.*, 2015; Farinha *et al.*, 2016). Para maiores reduções do teor de cimento, nomeadamente pela produção de argamassas com o traço volumétrico 1:6, apenas as

argamassas de Farinha *et al.* (2016) possuem resistências à compressão superiores. Também Jackiewicz-Rek *et al.* (2015) verificaram que a substituição de cimento por loiça sanitária até 20% é responsável por aumentos de cerca de 11 e 12% na resistência à compressão e à tracção por flexão, aos 56 dias de idade. Adicionalmente, após a aplicação de 25 ciclos de gelo – degelo, estes autores verificaram que a resistência à compressão não foi afectada. No entanto, houve um decréscimo máximo de cerca de 29% na resistência à tracção por flexão para a percentagem de substituição de 20%.

**Tabela 2.4: Resistências mecânicas de argamassas com redução do teor de cimento e incorporação de finos barro vermelho, betão, vidro e loiça sanitária**

(Adaptado de Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016))

Resíduo incorporado	Argamassa	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tracção por flexão (MPa)	
		28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
Barro vermelho (Silva <i>et al.</i> , 2008)	1:4-0%	7,92	-	2,12	-
	1:5-10%	8,40	-	1,93	-
	1:6-10%	5,75	-	1,65	-
Betão (Braga <i>et al.</i> , 2014)	1:4-0%	3,91	-	1,36	-
	1:5-15%	5,09	-	1,18	-
	1:6-15%	3,00	-	0,68	-
Vidro (Oliveira <i>et al.</i> , 2015)	1:4-0%	4,24	3,33	1,67	1,44
	1:5-20%	4,39	4,17	2,07	1,08
	1:6-20%	2,77	3,35	1,03	1,33
Loiça sanitária (Farinha <i>et al.</i> , 2016)	1:4-0%	4,56	4,00	1,24	1,58
	1:5-20%	6,98	8,31	2,23	1,87
	1:6-20%	6,62	5,74	1,59	1,44

Por análise da Tabela 2.4, verifica-se que apenas as argamassas com incorporação de finos de loiça sanitária apresentam resistências à tracção por flexão semelhantes ou superiores à argamassa de referência 1:4, para ambas as idades. Contudo, Braga *et al.* (2014) referem que, no caso da argamassa com 15% de finos de betão e traço volumétrico 1:5, à semelhança do sucedido para incorporações de outros resíduos, as perdas de resistência são pequenas devido à presença de material não hidratado nos finos incorporados e ao efeito de fíler.

Antony e Nair (2016) verificaram que o aumento da percentagem de substituição de cimento pelos resíduos de pó de telha é responsável por perdas consideráveis na resistência à compressão, para ambos os traços volumétricos estudados (1:3 e 1:5), causadas essencialmente pelo incremento nas necessidades de água das argamassas. Para incorporações de 20% e traço volumétrico 1:5, esse decréscimo corresponde a quase 69% e, no traço volumétrico mais rico, a 65%. Pereira (2015) também concluiu que a substituição de cimento por RCD até 10% é responsável por perdas de resistência até 20% face à argamassa de referência. No entanto, as resistências mecânicas aumentam com a idade, à semelhança do observado no estudo de Antony e Nair (2016) e Jackiewicz-Rek *et al.* (2015). Segundo Pereira (2015), este incremento parece indicar que os resíduos possuem alguma actividade pozolânica. De facto, Silva *et al.* (2008) referem que apenas os resíduos incorporados que apresentem uma actividade pozolânica significativa são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica nas argamassas com substituição de cimento na sua composição.

Contudo, existem algumas propriedades para as quais não se obteve uma tendência definida, pelo que não é possível concluir acerca das suas vantagens ou inconvenientes na utilização enquanto substitutos parciais do cimento, nomeadamente a **retracção, permeabilidade à água sob pressão e teor de ar incorporado**.

Para as argamassas sem qualquer adição de finos, a retracção é decrescente com a redução do teor de cimento (Oliveira *et al.*, 2015; Braga *et al.*, 2014). No entanto, enquanto as argamassas de Silva *et al.* (2008) e Oliveira *et al.* (2015), ainda que com diferentes traços volumétricos e percentagens de incorporação (traço 1:6 e 10% de finos de barro



vermelho e traço 1:5 e 20% de finos de vidro), apresentam retracções semelhantes às da argamassa de referência e, desta forma, valores de retracção bastante aceitáveis, a argamassa modificada estudada por Braga *et al.* (2014), com 15% de finos de betão e traço volumétrico 1:5, possui uma retracção cerca de 40% superior. Por outro lado, as argamassas com os traços volumétricos de 1:5 e 1:6 e com 20% de loiça sanitária apresentam retracções inferiores. Também no que diz respeito à substituição do cimento por loiça sanitária, Jackiewicz-Rek *et al.* (2015) concluíram que estas argamassas possuem retracções progressivamente menores com o aumento da percentagem de incorporação.

As argamassas modificadas estudadas por Farinha *et al.* (2016) possuem permeabilidades à água sob pressão, antes e após o envelhecimento acelerado, inferiores à da argamassa de referência 1:4, devido ao efeito de fíler e pozolânico. A sujeição aos ciclos de envelhecimento é ainda responsável pela diminuição da permeabilidade. Os resultados de Silva *et al.* (2008) estão em concordância com os obtidos por Farinha *et al.* (2016). Após o envelhecimento, a argamassa de traço volumétrico 1:6 e 10% de finos de barro vermelho apresenta uma redução de 58% face à argamassa de referência. Apenas as argamassas analisadas por Oliveira *et al.* (2015), com traço volumétrico 1:5 e adição de 20% de finos de vidro, possuem valores ligeiramente superiores aos da argamassa de referência 1:4. Inclusivamente, estes autores obtiveram valores de permeabilidade superiores para a argamassa modificada ao traço volumétrico 1:5 relativamente à argamassa de referência 1:5. Após o envelhecimento esta tendência é invertida, uma vez que a microfissuração causada pelos ciclos climáticos é essencialmente superficial, pelo que não influencia significativamente a permeabilidade à água sob pressão, prevalecendo o efeito da hidratação.

Quanto ao teor de ar, Oliveira *et al.* (2015) observaram que o ar contido nas argamassas no estado fresco aumenta com a diminuição do ligante e com a incorporação de finos. Os autores justificam estes resultados com a maior heterogeneidade das argamassas relativamente à argamassa de traço volumétrico 1:4, que propicia o aprisionamento de ar. Verifica-se que todas as argamassas modificadas possuem um valor de teor de ar incorporado semelhante e cerca de dobro do registado para a argamassa de referência com traço volumétrico 1:4. Já Farinha *et al.* (2016) registaram uma diminuição no teor de ar incorporado nas argamassas com 20% de finos de loiça sanitária e traço volumétrico 1:6. No entanto, Jackiewicz-Rek *et al.* (2015), ao substituírem apenas o cimento por loiça sanitária até 20%, concluíram que não há alterações significativas neste parâmetro.

Por sua vez, no que se refere à **secagem**, à **porosidade aberta** e à **susceptibilidade à fendilhação**, as diversas argamassas apresentam comportamentos semelhantes à da argamassa de referência 1:4. De facto, o balanço entre dois efeitos contrários: o efeito de fíler (aumento de compacidade) e o efeito da redução do cimento (aumento da porosidade), permitiu que a argamassa com 20% de finos de loiça sanitária e traço volumétrico 1:6, estudada por Farinha *et al.* (2016), apresentasse uma porosidade aberta semelhante à da de referência. Pela mesma razão, Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) concluíram que a adição de finos de betão, vidro e loiça sanitária, respectivamente, e simultânea redução da quantidade de cimento não influencia significativamente a secagem das argamassas, que permanece similar.

Após um período de observação não inferior a 4 meses, Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) não detectaram qualquer fissura visível a olho nu nas suas argamassas e, como tal, consideram que estas argamassas são pouco susceptíveis à fendilhação. Contudo, à semelhança do referido para a incorporação de muito finos, observou-se um decréscimo das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade dinâmico devido à microfissuração interna (Oliveira *et al.*, 2015; Farinha *et al.*, 2016).

### 3. Campanha experimental

#### 3.1. Considerações iniciais

Esta dissertação pretende avaliar o desempenho de argamassas cimentícias com incorporação de diferentes agregados reciclados de RCD, provenientes de centrais de reciclagem, relativamente ao seu potencial efeito de filler e como substitutos parciais do cimento. Neste sentido, o presente capítulo é reservado à descrição da campanha experimental, no que diz respeito à sua planificação, ensaios efectuados às argamassas no estado fresco e endurecido, caracterização dos materiais utilizados, formulações utilizadas, assim como os processos de fabrico e preparação de provetes e as condições ambientais de cura a que foram sujeitos.

#### 3.2. Planificação da campanha experimental

A campanha experimental está separada em dois vectores, ainda que estes não sejam completamente distintos, uma vez que no vector II serão apenas estudadas argamassas com uma percentagem de incorporação de muito finos para a qual se obtiver o melhor desempenho no vector I.

No vector I, são estudadas argamassas cimentícias modificadas com diferentes incorporações de muito finos de RCD, mais especificamente 10, 15 e 20%, tendo como base de comparação uma argamassa de referência sem incorporação de finos de RCD. Todas as argamassas em estudo neste vector apresentam o mesmo traço volumétrico de 1:4 (cimento: agregado). No que diz respeito ao vector II, faz-se variar o teor de cimento através da redução do traço volumétrico. São ensaiadas argamassas com diferentes traços volumétricos (1:4, 1:5 e 1:6), sem muito finos ou com uma percentagem de muito finos a definir pela análise dos resultados obtidos no vector I. Os agregados reciclados utilizados na campanha experimental provêm de centrais de reciclagem de RCD, sendo apenas utilizada a sua fracção muito fina (inferior a 0,149 mm).

A separação por granulometrias dos agregados foi realizada no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil) do Instituto Superior Técnico. Os restantes ensaios da campanha experimental foram realizados no Laboratório da Unidade de Revestimentos de Paredes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). A campanha experimental está estruturada em três fases de ensaios, como se descreve nos pontos seguintes e nas quais são realizados ensaios essencialmente de três tipos:

- **ensaios de identificação:** realizados aos constituintes das argamassas;
- **ensaios de caracterização:** efectuados a argamassas no estado fresco e endurecido;
- **ensaios de comportamento:** realizados a argamassas no estado endurecido por reflectirem o comportamento da argamassa quando aplicada num revestimento.

Na primeira fase experimental, foram realizados ensaios de identificação aos constituintes da argamassa. Na segunda fase, foram ensaiadas todas as argamassas do vector I e vector II, possibilitando a selecção das argamassas que apresentaram melhores desempenhos em cada vector para posterior análise na terceira fase experimental. Na Tabela 3.1, são apresentados todos os ensaios realizados às argamassas e seus constituintes.

#### 3.3. Constituintes das argamassas

As argamassas são constituídas por água, agregados e ligante. O ligante, neste caso o cimento, tem como função

aglutinar os agregados, enquanto a água, para além de ser responsável pela hidratação do ligante, confere a trabalhabilidade pretendida às argamassas.

**Tabela 3.1: Ensaios da campanha experimental**

	Ensaio	Tipo de ensaio	Tipo de material	Norma /especificação
1ª fase experimental	Análise granulométrica	Identificação	Areia; agregados reciclados ( <i>tout-venant</i> )	EN 1015-1 (1998)
	Massa volúmica aparente	Identificação	Cimento; areia; agregados reciclados (infra 0,149 mm)	Cahier 2669-4 (1993)
	Separação manual da fracção > 2,38 mm	Identificação	Agregados reciclados	-
	Análise química (FRX)	Identificação	Agregados reciclados (fracção 0 - 2,38 mm)	-
	Análise mineralógica (DRX)	Identificação	Agregados reciclados (infra 0,149 mm)	-
	Sais de cloretos solúveis em água	Identificação	<i>Tout-venant</i> de RCD	NP EN 1744-1 (2009)
	Teor total de enxofre	Identificação		
	Sulfatos solúveis em ácido	Identificação		
	Contaminantes leves	Identificação		
Determinação do húmus	Identificação			
2ª fase experimental	Consistência por espalhamento	Caracterização	Argamassa no estado fresco	EN 1015-3 (1999)
	Massa volúmica	Caracterização	Argamassa no estado fresco	EN 1015-6 (1998)
	Massa volúmica aparente	Caracterização	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-10 (1999)
	Módulo de elasticidade dinâmico	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	NP EN 14146 (2006)
	Ultra-sons	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	FE Pa 43 (2010)
	Resistência à tracção por flexão e à compressão	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-11 (1999)
	Absorção de água por capilaridade	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-18 (2002)
	Secagem	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	Não normalizado
	Porosidade aberta	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	NP EN 1936 (2008)
	Observação binocular	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	Não normalizado
3ª fase experimental	Teor de ar incorporado	Caracterização	Argamassa no estado fresco	EN 1015-7 (1998)
	Varição dimensional (retracção)	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	Cahier 2669-4 (1993)
	Susceptibilidade à fendilhação	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	Não normalizado
	Permeabilidade ao vapor de água	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	NP EN 1015-19 (2008)
	Permeabilidade à água sob pressão	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-21 (2002)
	Aderência ao suporte	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-12 (2000)
	Envelhecimento acelerado	Comportamento	Argamassa no estado endurecido	EN 1015-21 (2002)

### 3.3.1. Cimento e água

O ligante utilizado foi o cimento Portland de calcário do tipo CEM II/B-L 32,5N, correntemente utilizado para produzir argamassas em Portugal, da cimenteira Secil. A quantidade de água, proveniente da rede pública, de cada argamassa foi determinada de forma a que todas as argamassas apresentem um nível de trabalhabilidade adequado, pelo ensaio de consistência por espalhamento, de acordo com o definido na norma europeia EN 1015-3 (1999).

### 3.3.2. Agregados

Nesta dissertação, foram utilizados dois tipos de agregados: areia e agregados muito finos de RCD provenientes de centrais de reciclagem, que pretendem dar continuidade aos trabalhos de investigação nesta área. A areia a utilizada na campanha experimental é areia proveniente do rio Tejo, por ser a mais utilizada na formulação de argamassas e, desta forma, facilitar a comparação com outros trabalhos de investigação desenvolvidos. Não foi efectuada nenhuma lavagem prévia à areia, pelo facto de a mesma ser considerada lavada e ser aplicada em obra nestas condições. Após secagem da areia, foi realizada a sua peneiração para posterior utilização nas argamassas, de forma a garantir que apenas é usada a fracção inferior a 2,38 mm.

Nesta campanha experimental, foram utilizados dois tipos de agregados distintos produzidos nas centrais de reciclagem: maioritariamente constituídos por betão (agregado reciclado de betão) e de mistura (agregado reciclado misto), que podem conter materiais como cerâmicos, betão, resíduos de argamassa endurecida e contaminantes. Como referido, apenas a fracção do agregado com dimensão inferior a 0,149 mm foi incorporada nas argamassas cimentícias, com o objectivo de estudar o seu potencial efeito de fíler e possibilidade de actuarem enquanto substitutos do cimento. O material não foi sujeito a qualquer transformação, com o propósito de preservar as propriedades inerentes ao seu processo de fabrico. Assim, foi apenas realizada a sua peneiração, de forma a obter a quantidade de muito finos de RCD necessária, em peso, para toda a campanha.

O agregado reciclado de betão foi disponibilizado pela empresa *RCD – Resíduos de Construção e Demolição SA*, enquanto o agregado reciclado misto foi fornecido pela empresa *SGR Ambiente*, tendo sido recolhidas duas amostras únicas de *tout-venant*, em ambos os casos, de cerca de uma tonelada cada. Na selecção dos agregados reciclados, teve-se em consideração os seguintes aspectos: **tipo de agregado reciclado; grau de contaminação e granulometria**.

Em campanhas experimentais anteriores (Braga *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2009), foram incorporados agregados como o betão triturado e resíduos de barro vermelho não contaminados em argamassas e que influenciaram de formas distintas o comportamento das mesmas. Desta forma, optou-se por estudar dois tipos de agregados reciclados de RCD produzidos nas centrais de reciclagem e que são constituídos, em diferentes percentagens, pelos resíduos isolados mencionados.

Por outro lado, a quantidade de material considerado contaminante (madeira, terras, metal, vidro, plástico, entre outros) presente na composição dos agregados reciclados de RCD influencia a sua qualidade. Neste sentido, na selecção da amostra a utilizar, pretendeu-se que o agregado reciclado misto apresentasse, por quantificação visual, uma quantidade apreciável do referido material. Por outro lado, relativamente ao agregado reciclado de betão, a opção passou por seleccionar o agregado que apresentasse a menor quantidade possível de contaminantes. Esta selecção foi realizada com objectivo de averiguar qual a influência do processo de reciclagem, nomeadamente da origem dos agregados e, por outro lado, verificar se, no caso dos agregados reciclados possuírem uma percentagem considerável de contaminantes, a sua aplicação como agregados em argamassas é viável. Por último, no que diz respeito à granulometria, na selecção das amostras, foi necessário garantir a existência da quantidade de material com dimensão inferior a 0,149 mm necessários à campanha experimental. Assim, foram realizadas visitas prévias às centrais de reciclagem e seleccionadas pequenas amostras dos agregados reciclados, o que permitiu, por determinação da sua percentagem de muito finos, obter uma estimativa da massa total das amostras de *tout-venant* recolhidas.

### **3.4. Argamassas**

Na presente dissertação, são estudadas argamassas cimentícias nas quais se fez variar um ou vários constituintes, conforme o vector em análise. Esta variação nos constituintes origina formulações distintas, que se reflectem nas diferentes propriedades e desempenho das argamassas. No vector I, referente ao efeito de fíler, esta variação diz respeito à percentagem de agregados muito finos de RCD a incorporar, por substituição (em volume) da areia. Relativamente ao vector II, procede-se à redução do teor de cimento, para a argamassa que apresentar o melhor desempenho no vector I.

Na formulação das argamassas do vector I, optou-se por considerar o traço volumétrico de 1:4 (cimento: agregados), pelo facto de, por um lado, ser o traço correntemente utilizado na produção de argamassas cimentícias e,

por outro, permitir uma melhor comparação com os estudos recentemente desenvolvidos neste âmbito. Relativamente ao vector II, como referido, é feita uma redução do teor de cimento através da diminuição do traço volumétrico da argamassa para 1:5 e 1:6. A definição das percentagens de incorporação foi influenciada pelos resultados, de uma forma geral positivos, obtidos nas campanhas experimentais anteriores. Por conseguinte, na presente dissertação, são estudadas argamassas modificadas com 10, 15 e 20% de agregados muito finos de dois tipos de agregados reciclados de RCD.

Esta campanha experimental avalia o desempenho de um total de 13 argamassas, para os vectores I e II, na segunda fase experimental, das quais 7 passam à terceira fase de ensaios (Anexo A). As argamassas modificadas são identificadas de acordo com a seguinte nomenclatura: B/M\_1:X\_Y, enquanto as argamassas de referência, sem adição de muito finos são identificadas por REF\_1:X, nos quais:

- B ou M é atribuído de acordo com tipo de agregado (B – maioritariamente betão; M – misto);
- REF representa uma argamassa sem muito finos de RCD adicionados;
- 1:X diz respeito ao traço, que pode ser 1:4, 1:5 ou 1:6;
- Y, consoante a percentagem de incorporação (10, 15 e 20%).

### **3.5. Produção e preparação de provetes**

Nos subcapítulos seguintes, é feita uma descrição dos procedimentos adoptados para a produção e preparação das amassaduras e dos provetes, necessários à realização dos ensaios, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

#### **3.5.1. Amassadura**

As amassaduras da presente campanha experimental foram realizadas de acordo com o descrito na norma europeia EN 1015-2 (1998). No entanto, o tempo de amassadura é superior, pelo facto de serem misturados vários constituintes em simultâneo.

Após pesagem de todos os constituintes, os sólidos são introduzidos na cuba da misturadora (Figura 3.1), que é colocada em funcionamento, a uma velocidade lenta, de forma a efectuar uma mistura prévia aos constituintes. A água de amassadura é introduzida durante os primeiros 15 segundos de funcionamento da misturadora. Decorridos 2 minutos e meio, interrompe-se a amassadura mecânica e, recorrendo a uma colher de pedreiro, realiza-se uma mistura manual, com o objectivo de evitar que algum material fique por envolver no fundo na cuba. Por último, coloca-se novamente a misturadora em funcionamento por 30 segundos. Antes de se proceder à moldagem de provetes a ensaiar no estado endurecido ou à realização de ensaios no estado fresco, deve proceder-se à homogeneização manual da argamassa, com uma colher de pedreiro, durante 5 a 10 segundos.

#### **3.5.2. Moldagem de provetes**

Consoante o ensaio a realizar, é necessário moldar provetes distintos, sendo eles: cone truncado, prismas, cilindros, discos e tijolos. No Anexo B, são apresentadas informações relativas ao tipo e número de provetes por ensaio. No Anexo C, por sua vez, são apresentados os volumes dos provetes produzidos, o que permite prever a quantidade de argamassa (em volume) necessária ao seu fabrico. De seguida, descreve-se o processo de fabrico dos provetes utilizados no estado endurecido.

### 3.5.2.1. Provetes prismáticos

De acordo com a norma europeia EN 1015-11 (1999), para o fabrico dos provetes prismáticos são utilizados conjuntos de moldes normalizados (160 mm x 40 mm x 40 mm), que devem ser previamente limpos e lubrificados com recurso a óleo descofrante, com o intuito de prevenir a aderência da argamassa.

Para a sua produção, introduz-se a argamassa em duas camadas, sendo cada uma compactada através de 25 pancadas do pilão (Figura 3.2). Posteriormente, compacta-se o molde em quatro direcções, pela elevação de cada lado do molde (Figura 3.3), de forma a produzir 8 pancadas e eliminar os vazios que possam existir. Retira-se o excesso de argamassa com o auxílio da talocha e alisa-se a superfície (Figura 3.4). De acordo com o tipo de ensaio a realizar, os provetes são sujeitos a diferentes condições de cura (3.5.3).



Figura 3.1: Misturadora utilizada para a realização de amassaduras



Figura 3.2: Compactação da primeira camada



Figura 3.3: Compactação final por elevação do molde



Figura 3.4: Regularização da superfície do molde

Para a realização do ensaio de variação dimensional, são utilizados provetes prismáticos, produzidos de forma semelhante à descrita, com excepção no tipo de molde utilizado. Neste caso, os moldes possuem Pernos em cada extremidade, que permitem, após desmoldagem, a medição da variação dimensional longitudinal no deflectómetro.

### 3.5.2.2. Provetes cilíndricos (discos)

Os provetes cilíndricos são preparados de acordo com a norma europeia EN 1015-19 (1998). Para a sua produção, começa-se por garantir que os moldes cilíndricos estão limpos e que foi aplicado óleo descofrante, à semelhança do referido para os provetes prismáticos. De seguida, é colocada a argamassa no molde metálico, com o auxílio de uma colher de pedreiro, enquanto se faz alguma pressão, para permitir a sua compactação. Por último, retira-se o excesso de argamassa com a talocha e regulariza-se a superfície.

### 3.5.2.3. Aplicação sobre tijolo

Para o fabrico deste tipo de provetes, são fixadas, através de grampos metálicos, duas tábuas de madeira nas duas faces de maior dimensão do tijolo cerâmico, com o objectivo de funcionar como cofragem com 2 cm de altura. Com o auxílio de uma colher de pedreiro, aplica-se, exercendo alguma pressão, a argamassa no tijolo, cuja superfície foi previamente humedecida para prevenir a excessiva absorção de água de amassadura, necessária à hidratação do cimento. Por fim, regulariza-se a superfície com uma ripa de madeira, assim como as arestas sem cofragem. Passados 10 a 15 minutos, procede-se à desmoldagem do provete.

### 3.5.3. Condições ambientais de cura

Os provetes foram sujeitos a diferentes condições de cura, conforme o ensaio realizado e o documento normativo aplicado. No entanto, foi necessário proceder a algumas alterações, de acordo com as condições existentes (

Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Tipos de cura correspondentes a cada ensaio

Ensaio	Tipo de cura	Condições de cura
Massa volúmica aparente do estado endurecido, módulo de elasticidade, ultra-sons, resistências à tração por flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, permeabilidade à água sob pressão e aderência ao suporte	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sala condicionada a <math>20 \pm 2</math> °C e <math>95 \pm 5\%</math> HR (com saco de plástico de polietileno)</li> <li>▪ Desmoldar aos 2 dias</li> <li>▪ Permanecer no saco de plástico de polietileno durante 7 dias, após fabrico</li> <li>▪ Retirar saco de plástico aos 7 dias e manter provetes na sala condicionada a <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR até à data do ensaio</li> </ul>
Susceptibilidade à fendilhação e variação dimensional	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sala condicionada: <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR</li> <li>▪ Desmoldar aos 2 dias</li> <li>▪ Manter nas mesmas condições até à data do ensaio a <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR</li> </ul>
Permeabilidade ao vapor de água	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sala condicionada a <math>20 \pm 2</math> °C e <math>95 \pm 5\%</math> HR (com saco de plástico de polietileno)</li> <li>▪ Desmoldar e retirar saco de polietileno aos 2 dias</li> <li>▪ Manter na sala condicionada a <math>20 \pm 2</math> °C e <math>50 \pm 5\%</math> HR até à data do ensaio</li> </ul>

### 3.6. Ensaaios aos constituintes

A realização de ensaios aos constituintes das argamassas, que se descrevem nos pontos seguintes, permite o conhecimento das suas principais características, fundamentais para a formulação das argamassas, assim como para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

#### 3.6.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica aos constituintes das argamassas é realizada de acordo com a norma europeia EN 1015-1 (1998) e permite obter a curva granulométrica do agregado, uma característica muito importante das argamassas, na medida em que possibilita diferentes arranjos entre partículas e, como tal, influencia a compacidade da mistura.

**Equipamento:** balança com precisão de 0,1 g; estufa a  $105 \pm 5$  °C; peneiros de malha quadrada: 4.760, 2.380, 1.190, 0.590, 0.297 e 0.149 mm; máquina de vibração horizontal.

**Resultados:** para a obtenção da curva granulométrica de cada agregado, é necessário determinar a percentagem de material retido em cada peneiro, por aplicação da Equação 3.1. Para efeitos de análise, é considerado o valor médio dos resultados para as três amostras.

$$R_i = \frac{m_{\text{material retido } i}}{m_{\text{total}}} \times 100 \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:  $R_i$  – percentagem de material retido no peneiro  $i$  (%), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m_{\text{material retido } i}$  – massa retida no peneiro  $i$  (g);  $m_{\text{total}}$  – massa total da amostra (g).

#### 3.6.2. Massa volúmica aparente (baridade)

O ensaio da massa volúmica aparente dos agregados é realizado de acordo com o Cahier 2669-4 (1993) e permite a conversão de traços volumétricos em traços em massa. O conhecimento da massa volúmica aparente permite, igualmente, a avaliação da quantidade de vazios existente entre as partículas de um dado material.

**Equipamento:** balança com precisão de 0,1 g; equipamento para ensaio (suporte, molde tronco-cónico com obturador, recipiente cilíndrico com  $0,5 \text{ dm}^3$ ); estufa; espátula.

#### Procedimento:

1. seca-se a amostra numa estufa a  $105 \pm 5$  °C durante 24 horas; posteriormente, retira-se a amostra da estufa e deixa-se arrefecer à temperatura ambiente;
2. coloca-se a amostra num tabuleiro e, com a colher-concha, homogeneíza-se a mistura;
3. coloca-se o material no molde tronco-cónico, sem nunca tocar no molde, para evitar a eventual compactação da amostra e após completar o seu enchimento, faz-se rodar o obturador com um único movimento, permitindo que a amostra caia livremente;
4. regulariza-se a superfície do molde, retirando o excesso de material com o auxílio de uma espátula e pesa-se o conjunto molde e amostra.

Resultados: embora a norma defina que são necessárias três medições, optou-se por realizar seis a todos os constituintes, de forma a reduzir a eventual variabilidade dos resultados, considerando-se, para análise, o valor médio das seis amostras. A massa volúmica aparente (baridade) é dada por:

$$\rho_i = \frac{m_{1i} - m_2}{V_r} \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que:  $\rho_i$  – massa volúmica aparente do constituinte  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), com  $i = 1,2,3, \dots, n$ ;  $m_{1i}$  – massa do recipiente cilíndrico preenchido com o constituinte  $i$  (g);  $m_2$  – massa do recipiente cilíndrico vazio (g);  $V_r$  – volume do recipiente cilíndrico (l).

### **3.6.3. Composição física, química e mineralógica dos agregados reciclados**

Procedeu-se à separação manual da fracção granulométrica com dimensão superior a 2,38 mm, com o intuito de identificar, por observação visual, os principais constituintes de cada agregado reciclado. Foram utilizadas quatro amostras de aproximadamente 2,5 kg, para cada agregado e foi determinada a percentagem de cada material, em massa, na amostra. As análises de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difracção de Raios-X (DRX), realizadas no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico, aos agregados reciclados em estudo revela-se importante, pela dificuldade em identificar os constituintes dos agregados. Assim, através destas duas técnicas, é possível determinar os minerais e elementos químicos presentes nas amostras. Os restantes ensaios químicos foram realizados no Laboratório de Ensaios da Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto (APEB).

## **3.7. Ensaios às argamassas**

Após os ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas, são realizados ensaios tanto no estado fresco como no endurecido, que permitem comparar o desempenho das argamassas com diferentes taxas de incorporação de resíduos assim como a influência da redução do teor de cimento.

### **3.7.1. Ensaios no estado fresco**

#### **3.7.1.1. Consistência por espalhamento**

Este ensaio é realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (1999) e permite avaliar a trabalhabilidade das argamassas. A norma define que, para argamassas que possuam uma massa volúmica no estado fresco superior a  $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ , e a menos que exista outra especificação, o valor do espalhamento deverá atingir  $175 \pm 10$  mm. No



entanto, para garantir uma boa trabalhabilidade das argamassas em estudo, foi necessário diminuir o espalhamento para  $160 \pm 3$  mm. Reduziu-se o intervalo de valores, com o intuito de limitar a variabilidade das argamassas.

Equipamento: mesa de espalhamento; molde cónico truncado e alonga; pilão; colher de pedreiro; craveira.

Procedimento:

1. caso a mesa de espalhamento não tenha sido utilizada nas 24 horas que precedem a realização do ensaio, devem ser dadas 10 pancadas antes da sua utilização;
2. o molde cónico truncado é colocado no centro da mesa de espalhamento e introduz-se a argamassa em duas camadas, sendo cada camada compactada através de 10 pancadas do pilão (Figura 3.5), de forma a assegurar o preenchimento uniforme do molde; deve fazer-se uma pressão vertical no molde cónico truncado, para evitar a saída de água pela superfície inferior do molde;
3. retira-se a alonga do molde e o excesso de argamassa com o auxílio da colher de pedreiro;
4. a superfície livre da mesa de espalhamento deve ser limpa e seca, evitando remover qualquer água que possa existir em redor do molde cónico truncado;
5. retira-se lentamente o molde na vertical e roda-se o manípulo da mesa de espalhamento, produzindo 15 pancadas (Figura 3.6) com uma frequência constante de uma pancada por segundo;
6. mede-se o diâmetro da argamassa (Figura 3.7) em duas direcções ortogonais com o auxílio de uma craveira.

Resultados: para cada argamassa, o valor do espalhamento final é dado pelo valor médio das duas medições. O ensaio é considerado válido se os valores dos diâmetros não diferirem em mais de 10% do valor médio calculado. Caso tal não se verifique, deve repetir-se o ensaio, utilizando a mesma amostra. No entanto, se os resultados continuarem a não ser considerados válidos, deve realizar-se uma nova amassadura.



Figura 3.5: Compactação da argamassa com o pilão



Figura 3.6: Aplicação de 15 pancadas por rotação do manípulo da mesa de espalhamento



Figura 3.7: Medição do diâmetro da argamassa com a craveira

### 3.7.1.2. Massa volúmica no estado fresco

A massa volúmica da argamassa no estado fresco foi determinada de acordo com a norma europeia EN 1015-6 (1999).

Equipamento: balança com precisão de 0,1 g; recipiente cilíndrico metálico com capacidade de 1 l; colher de pedreiro; pano húmido.

Procedimento:

1. pesa-se o recipiente cilíndrico e regista-se o respectivo valor;
2. coloca-se a argamassa no recipiente cilíndrico até atingir cerca de metade do seu volume e compacta-se uniformemente a argamassa com 10 pancadas, produzidas pela oscilação do recipiente em direcções distintas (Figura 3.8);

3. preenche-se o recipiente cilíndrico e compacta-se novamente com 10 pancadas (Figura 3.9);
4. com a colher de pedreiro, alisa-se a superfície e retira-se a argamassa em excesso (Figura 3.10); limpa-se a superfície exterior do recipiente cilíndrico com um pano húmido, para garantir que não existe material acumulado e pesa-se o recipiente com a amostra.



**Figura 3.8: Compactação da primeira camada de argamassa por oscilação do recipiente cilíndrico**



**Figura 3.9: Compactação da segunda camada**



**Figura 3.10: Regularização da superfície com colher de pedreiro**

**Resultados:** a massa volúmica no estado fresco é dada pela Equação 3.3 e, para efeitos de análise, considera-se o valor médio de três amostras por argamassa.

$$\rho_{m_i} = \frac{m_{1_i} - m_2}{V_v} \quad \text{Equação 3.3}$$

Em que:  $\rho_{m_i}$  – massa volúmica no estado fresco da amostra  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m_2$  – massa do recipiente cilíndrico vazio (g);  $m_{1_i}$  – massa do recipiente cilíndrico preenchido com argamassa da amostra  $i$  (g);  $V_v$  – volume do recipiente cilíndrico (l).

### 3.7.1.3. Teor de ar incorporado

O ensaio do teor de ar incorporado é realizado de acordo com o descrito na norma europeia EN 1015-7 (1998), tendo sido aplicado o método da pressão, pelo facto de as argamassas possuírem um teor de ar incorporado inferior a 20%. Este ensaio permite determinar a quantidade de ar aprisionado na argamassa no estado fresco.

**Equipamento:** colher de pedreiro; pilão; cronómetro; garrafa de esguicho; equipamento para determinação do teor de ar (Figura 3.11).

#### Procedimento:

1. calibra-se o equipamento para determinação do teor de ar que, de seguida, deve ser cheio em quatro camadas iguais, compactando cada uma pela aplicação de dez pancadas com o pilão;
2. retira-se o excesso de argamassa com o auxílio da colher de pedreiro, limpa-se os bordos do recipiente e fecha-se a tampa do equipamento com grampos metálicos;
3. com as duas válvulas abertas, expulsa-se o ar contido no interior do equipamento, através da introdução de água pela válvula A até posterior saída pela válvula B sem bolhas de ar;
4. bombeia-se ar para o interior do reservatório até que se atinja uma pressão aproximada de zero;
5. ajusta-se o ponteiro no zero, pela abertura cuidadosa da válvula de ar;
6. fecha-se as válvulas A e B e abre-se a válvula principal durante 20 segundos, registando-se o teor de ar incorporado, arredondado a 0,1%.



Figura 3.11: Equipamento para a determinação do teor de ar

Resultados: o teor de ar incorporado de uma argamassa é dado pelo valor médio das duas amostras. No entanto, se os dois valores individuais se afastarem mais de 10% da média, o ensaio deverá ser repetido.

### 3.7.2. Ensaios no estado endurecido

#### 3.7.2.1. Massa volúmica aparente da argamassa no estado endurecido

A massa volúmica das argamassas no estado endurecido foi determinada de acordo com a norma europeia EN 1015-10 (1999), aos provetes com 28 e 90 dias de idade. No entanto, a determinação do volume dos provetes não é realizada hidrostáticamente, mas através da sua geometria. Pelo carácter não destrutivo do ensaio, estes provetes serão novamente utilizados nos ensaios de ultra-sons, módulo de elasticidade dinâmico e resistência mecânica.

Equipamento: balança com precisão de 0,01 g; craveira digital.

Procedimento:

1. mede-se três dimensões dos provetes (altura, largura e comprimento) com recurso à craveira digital; são efectuadas três medições para a largura e altura do prisma (nos extremos e centro do prisma), sendo o valor final a média destes três valores; para o comprimento é realizada apenas uma medição na direcção longitudinal;
2. pesa-se os provetes e regista-se os respectivos valores.

Resultados: a massa volúmica de cada provete é calculada de acordo com a Equação 3.4 e, para efeitos de análise, considera-se o valor médio dos três provetes.

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad \text{Equação 3.4}$$

Em que:  $\rho_i$  – massa volúmica aparente do provete  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V_i$  – volume do provete  $i$  ( $\text{m}^3$ );  $m_i$  – massa do provete  $i$  (kg).

#### 3.7.2.2. Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico é realizado de acordo com a norma portuguesa NP EN 14146 (2006), a três provetes de cada argamassa, aos 28 e 90 dias de idade. Uma argamassa de revestimento pode estar sujeita a tensões causadas por vários factores como o carregamento, variações térmicas ou retracção, pelo que deve ser capaz de se deformar, sem fissurar, na sua presença. O módulo de elasticidade de uma argamassa permite estimar, portanto, a capacidade de deformação de uma argamassa e é também um indicador da sua compacidade.

Equipamento: aparelho de medição de frequências fundamentais; computador com *software* de processamento de dados.

Procedimento:

1. introduz-se o valor da massa volúmica aparente no estado endurecido do provete no *software*;
2. coloca-se o provete longitudinalmente no aparelho de medição de frequências fundamentais (Figura 3.12), com a extremidade esquerda em contacto com a fonte emissora e a extremidade direita a 1 mm da fonte receptora;
3. liga-se o oscilador de frequência variável e observa-se o gráfico fornecido pelo *software* (Figura 3.13), no qual se observa as amplitudes das vibrações;
4. a frequência fundamental corresponde à menor frequência para a qual se atinge a amplitude máxima.

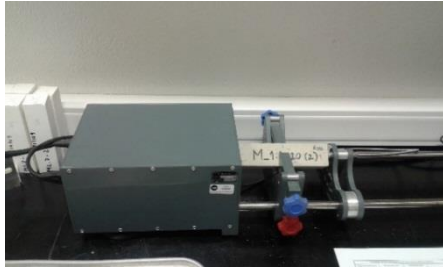


Figura 3.12: Aparelho de medição de frequências fundamentais



Figura 3.13: Computador com *software* de processamento de dados

Resultados: através do conhecimento da frequência de ressonância dos provetes, é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico pela aplicação da Equação 3.5. Para efeitos de análise, considera-se o valor médio dos três provetes, para cada tipo de argamassa, aos 28 e 90 dias de idade.

$$E_{di} = \frac{4 \times L_i^2 \times F_i^2 \times \rho_i}{g} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 3.5}$$

Em que:  $E_{di}$  – módulo de elasticidade dinâmico do provete  $i$  (MPa), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $L_i$  – comprimento do provete  $i$  (mm);  $F_i$  – frequência de ressonância longitudinal do provete  $i$  (Hz);  $\rho_i$  – peso volúmico do provete  $i$  (N/dm<sup>3</sup>);  $g$  – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

### 3.7.2.3. Ultra-sons

O ensaio de ultra-sons segue a metodologia descrita na ficha de ensaio Fe Pa 43 (2010), do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios, do LNEC. Este ensaio permite determinar a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, a partir da qual é possível avaliar as características internas das argamassas, nomeadamente no que diz respeito à sua homogeneidade e compacidade, bem como a eventual existência de fissuras ou defeitos no seu interior. Desta forma, o ensaio de ultra-sons é um método indirecto de avaliar a resistência mecânica, assim como o módulo de elasticidade dinâmico de uma argamassa. O ensaio de ultra-sons foi realizado segundo dois métodos: directo e indirecto, aos 28 e 90 dias, a apenas um provete por argamassa.

Equipamento: régua graduada; aparelho de medição de ultra-sons (Figura 3.14).

Procedimento:

**Método directo:**

1. coloca-se o transdutor emissor e o receptor no centro das faces longitudinalmente opostas do provete (Figura 3.15);
2. o transdutor emissor emite um impulso ultra-sónico, que percorre o provete e é recebido pelo transdutor receptor; faz-se seis leituras do tempo, em microssegundos, que a onda demora a percorrer todo o provete.

### Método indirecto:

1. sensivelmente a meio de uma das faces de maior dimensão do provete prismático, marcam-se vários pontos, afastados de 10 mm entre si;
2. coloca-se o transdutor emissor no primeiro ponto e faz-se variar a posição do transdutor receptor pelos vários pontos previamente marcados (Figura 3.16); os transdutores devem formar um ângulo de 45° com a horizontal, devendo ser aplicada uma pressão constante em ambos;
3. por fim, faz-se três leituras dos tempos de propagação das ondas ultra-sónicas, para cada ponto.



Figura 3.14: Equipamento utilizado no ensaio de ultra-sons

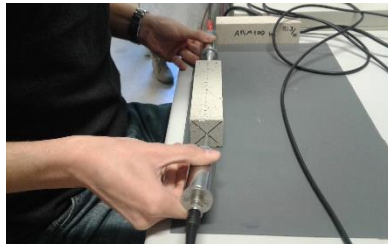


Figura 3.15: Método directo

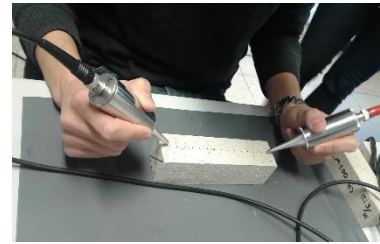


Figura 3.16: Método indirecto

**Resultados:** no método indirecto, a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas obtém-se a partir da recta de tendência do gráfico distância/ tempo, obtido para cada argamassa. O declive desta recta corresponde ao valor aproximado da velocidade das ondas. No método directo, esta velocidade é calculada através da Equação 3.6 e considera-se o valor médio das leituras para os pontos a igual distância, por argamassa.

$$v_i = \frac{d_i}{t_i} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 3.6}$$

Em que:  $v_i$  – velocidade de propagação da onda ultra-sónica no provete  $i$  (m/s), com  $i = 1,2,3, \dots, n$ ;  $d_i$  – distância entre o emissor e o receptor no provete  $i$  (mm);  $t_i$  – tempo de propagação da onda ultra-sónica no provete  $i$  ( $\mu$ s).

#### 3.7.2.4. Resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica realizados no âmbito desta dissertação consistem no ensaio de resistência à tracção por flexão e à compressão. Os ensaios são efectuados de acordo com a norma europeia EN 1015-11 (1999) e permitem avaliar a capacidade resistente da argamassa. Para o ensaio de resistência à tracção por flexão, são ensaiados três provetes prismáticos, sendo as metades provenientes deste ensaio (seis semi-prismas) utilizadas para o ensaio de resistência à compressão, ambos realizados aos 28 e 90 dias de idade.

**Equipamento:** máquina de ensaios; computador com *software* de processamento de dados; acessórios para determinação da resistência à tracção por flexão e à compressão.

##### a. Resistência à tracção por flexão

###### Procedimento:

1. centra-se o provete prismático no acessório para a determinação da resistência à tracção por flexão, com uma das faces de moldagem sobre os cilindros de apoio (Figura 3.17);
2. de seguida, aplica-se uma carga concentrada a meio vão, com uma velocidade uniforme compreendida entre 10 e 50 N/s, de modo a que a rotura ocorra entre 30 e 90 segundos após o início do carregamento, registando-se o valor máximo da carga aplicada.

**Resultados:** o valor da resistência à tracção por flexão de cada provete é dado pela Equação 3.7 e, para a análise dos resultados, considera-se o valor médio dos três provetes por argamassa.

$$f_i = 1,5 \frac{F_i \times l}{b_i \times d_i^2} \quad \text{Equação 3.7}$$

Em que:  $f_i$  – resistência à tracção por flexão do provete  $i$  (MPa), com  $i = 1,2,3, \dots, n$ ;  $F_i$  – máxima força suportada pelo provete  $i$  (N);  $l$  – distância entre apoios (100 mm);  $b_i$  – largura do provete  $i$  (mm);  $d_i$  – espessura do provete  $i$  (mm).

### b. Resistência à compressão

#### Procedimento:

1. coloca-se o semi-prisma no acessório para a determinação da resistência à compressão (Figura 3.18), com duas faces de moldagem do provete em contacto com as superfícies de transmissão de carga;
2. aplica-se uma carga uniforme, com uma velocidade compreendida entre 50 e 500 N/s, de forma a que a ruptura ocorra entre 30 e 90 segundos após o início do carregamento (Figura 3.19) e regista-se o valor máximo da carga aplicada.



Figura 3.17: Acessório para ensaio de resistência à tracção por flexão



Figura 3.18: Acessório para ensaio de resistência à compressão



Figura 3.19: Provetes após ensaio de resistência à compressão

**Resultados:** o valor da resistência à compressão de cada provete é dado pela Equação 3.8 e, para efeitos de análise, considera-se o valor médio dos resultados obtidos para os seis semi-prismas, por argamassa.

$$c_i = \frac{F_i}{b_i \times d_i} \quad \text{Equação 3.8}$$

Em que:  $c_i$  – resistência à compressão do provete  $i$  (MPa), com  $i = 1,2,3, \dots, n$ ;  $F_i$  – máxima força suportada pelo semi-prisma  $i$  (N);  $b_i$  – largura do provete  $i$  (mm);  $d_i$  – espessura do provete  $i$  (mm).

#### 3.7.2.5. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-18 (2002) aos 28 dias de idade e pretende medir a quantidade de água que, como o nome indica, ascende por capilaridade, quando o provete está em contacto com uma lâmina de água de 1 cm. As faces laterais dos provetes são barradas com cera, para que a absorção de água apenas ocorra pela secção transversal do semi-prisma em contacto com a água.

**Equipamento:** balança com precisão de 0,01 g; craveira digital; rebarbadora; parafina; pincel; exsiccador; estufa; barras de vidro com espessura de 1 cm; recipiente com profundidade mínima de 2 cm; papel absorvente.

#### Procedimento:

1. corta-se os provetes prismáticos em metades, com recurso a uma rebarbadora (Figura 3.20) e mede-se as



dimensões transversais dos semi-prismas, com uma craveira digital;

2. de seguida, os semi-prismas são colocados numa estufa à temperatura de  $60 \pm 5$  °C, até atingirem massa constante (aproximadamente 24 horas);
3. após a secagem em estufa, é aplicada parafina nas faces longitudinais dos semi-prismas; concluída a secagem da parafina, os provetes são colocados num exsicador durante 24 horas (Figura 3.21);
4. pesa-se todos os provetes, que são posteriormente colocados num recipiente com uma altura de água de 2 cm (Figura 3.22), sobre placas de vidro e com a face cortada em contacto com a água;
5. os provetes são retirados do recipiente, um a um, e efectua-se rapidamente a sua pesagem, tendo o cuidado de retirar o excesso de água com o auxílio de papel absorvente; após a pesagem, os provetes são novamente colocados no recipiente com água;
6. realiza-se pesagens dos provetes aos 10, 30, 60, 90, 180, 300, 480, 1440 minutos e de 24 em 24 horas, até que atinjam massa constante.



Figura 3.20: Corte dos provetes com a rebarbadora



Figura 3.21: Provetes no exsicador

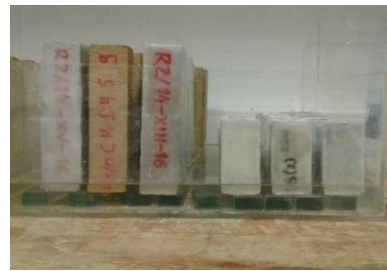


Figura 3.22: Provetes no recipiente com 2 cm de altura de água

**Resultados:** a realização deste ensaio permite obter o coeficiente de absorção capilar, que representa a velocidade de absorção de água por capilaridade de uma argamassa nos minutos iniciais. Este coeficiente pode ser calculado de acordo com a Equação 3.9 e corresponde ao declive da recta que une os pontos que representam as medições de massa aos 10 e 90 minutos, período no qual, para este tipo de argamassas, a absorção é linear. Para este ensaio, são utilizados três semi-prismas de cada argamassa e considera-se que o coeficiente de absorção de água por capilaridade é dado pelo valor médio dos três provetes.

$$C_i = \frac{M_{90_i} - M_{10_i}}{A_i \times (\sqrt{90} - \sqrt{10})} \quad \text{Equação 3.9}$$

Em que:  $C_i$  – coeficiente de absorção de água por capilaridade do semi-prisma  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ ), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $A_i$  – área da superfície do provete  $i$  em contacto com a água ( $\text{m}^2$ );  $M_{90_i}$  e  $M_{10_i}$  – massa do semi-prisma  $i$  aos 90 e 10 minutos, respectivamente (g).

### 3.7.2.6. Secagem

Após a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, é necessário avaliar o tempo de secagem das argamassas, um factor importante para a avaliação da sua durabilidade, já que este representa o tempo que a água em excesso está em contacto com o revestimento. Desta forma, os semi-prismas utilizados neste ensaio resultam do ensaio de absorção de água por capilaridade.

**Equipamento:** balança com precisão de 0,01 g; barras de vidro com espessura de 1 cm.

**Procedimento:**

1. após atingirem massa constante no ensaio de absorção de água por capilaridade, retira-se os semi-prismas

do recipiente, limpa-se a água em excesso e os provetes são colocados sobre as barras de vidro, onde permanecem todo o ensaio;

2. efectua-se pesagens dos provetes aos 30, 60, 90, 270, 450, 1440 minutos e de 24 em 24 horas, até que os provetes atinjam massa constante.

Resultados: para efeitos de análise, considera-se a média dos valores obtidos para cada provete, a partir dos quais é possível criar um gráfico que apresenta a evolução da secagem dos provetes ao longo do tempo e fornece a velocidade de secagem de cada argamassa.

### 3.7.2.7. Porosidade aberta

O ensaio da porosidade aberta é realizado de acordo com a norma portuguesa NP EN 1936 (2008) e permite obter o volume de poros interligados, em percentagem, de uma argamassa, que possibilitam a circulação de água no seu interior. Para a realização deste ensaio, aos 90 dias de idade, são utilizadas amostras que resultam do ensaio de resistência à compressão.

Equipamento: estufa; exsiccador com bomba de vácuo; balança com pesagem hidrostática (precisão de 0,01 g).

Procedimento:

1. os provetes são secos em estufa, à temperatura de  $70 \pm 5$  °C, até atingirem massa constante;
2. retira-se os provetes da estufa, sendo cada provete pesado e, posteriormente, colocado num exsiccador, que se encontra ligado a uma bomba de vácuo, com o objectivo de criar uma pressão negativa no exsiccador e eliminar o ar contido nos poros abertos dos provetes;
3. introduz-se lentamente água no interior do exsiccador, de modo a que as amostras absorvam parte da água e até que os provetes fiquem totalmente imersos;
4. após a imersão total dos provetes, estes devem ser mantidos durante mais 24 horas no exsiccador com a bomba de vácuo ligada;
5. após 24 horas, a bomba de vácuo é desligada e é aberta a torneira do exsiccador, mantendo-se os provetes imersos por mais 24 horas à pressão atmosférica;
6. posteriormente, cada provete imerso é pesado e anotada a sua massa; limpa-se rapidamente a água em excesso e pesa-se novamente o provete saturado, registando-se o seu valor.

Resultados: a porosidade aberta é calculada através da Equação 3.10 e, para este ensaio, são utilizadas três amostras de cada argamassa. Considera-se que a porosidade aberta da argamassa é dada pelo valor médio das três amostras.

$$p_a = \frac{m_{s_i} - m_{d_i}}{m_{s_i} - m_{h_i}} \times 100 \quad \text{Equação 3.10}$$

Em que:  $p_a$  – porosidade aberta do provete  $i$  (%), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m_{s_i}$  – massa do provete  $i$  saturado (g);  $m_{d_i}$  – massa do provete  $i$  seco (g);  $m_{h_i}$  – massa do provete  $i$  imerso em água (g).

### 3.7.2.8. Observação binocular

O ensaio de observação binocular permite observar possíveis microfissuras nas argamassas, a sua porosidade, assim como o arranjo entre os seus constituintes.



Equipamento: lupa binocular electrónica e respectivo computador com *software* de visualização específico; lixa.

Procedimento:

1. selecciona-se as amostras a analisar e, com o auxílio de uma lixa, regulariza-se a face que será alvo de observação;
2. as amostras são colocadas no suporte para observação binocular e observadas a diferentes distâncias focais, registando-se as diferentes imagens para todas as argamassas.

Resultados: o resultado final deste ensaio consiste no registo de imagens, com diferentes ampliações, para cada tipo de argamassa aos 90 dias. Para posterior análise, é escolhida uma imagem de cada ampliação e realiza-se uma comparação entre as várias argamassas em estudo.

### 3.7.2.9. Variação dimensional

O ensaio de variação dimensional é realizado de acordo com a metodologia descrita em Cahier 2669-4 (1993), com o objectivo de quantificar a retracção das argamassas ao longo do tempo. A retracção de uma argamassa pode provocar o aparecimento de fissuras, que afectam o desempenho das argamassas de revestimento.

Equipamento: deflectómetro; balança com precisão de 0,01 g.

Procedimento:

1. os provetes são desmoldados aos 2 dias de idade e mantidos em cura B, altura em que é realizada a primeira pesagem e medição no deflectómetro;
2. para a medição do seu comprimento, os provetes são colocados no aparelho para medição da variação dimensional, com o eixo longitudinal na vertical, sendo suspensos pelos pernos (Figura 3.23);
3. repete-se o ponto anterior aos 3, 6, 7, 10, 14, 21, 28, 35, 41, 50, 56, 70, 80 e 90 dias.



Figura 3.23: Medição do comprimento do provete com o deflectómetro

Resultados: a variação específica, em cada instante, de um provete é dada pela Equação 3.11. Para este ensaio, são utilizados três provetes de cada argamassa e, para efeitos de análise, considera-se o seu valor médio.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} \times 100 \quad \text{Equação 3.11}$$

Em que:  $\varepsilon_i$  – variação específica do comprimento do provete  $i$  (%), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\Delta L_i$  – diferença entre o comprimento inicial e final do provete  $i$  (mm);  $L_i$  – comprimento inicial do provete  $i$  (mm).

### 3.7.2.10. Susceptibilidade à fendilhação

O ensaio de susceptibilidade à fendilhação permite avaliar, por observação visual, se um revestimento, quando

aplicado num provete de tijolo, tem tendência a fendilhar aos 28 dias de idade. Este ensaio revela-se importante, na medida em que o aparecimento de fissuras nos revestimentos influencia o seu desempenho, por constituir um meio de entrada para agentes que provocam a sua degradação e, por conseguinte, afectam a sua durabilidade.

**Resultados:** neste ensaio são utilizados três provetes de aplicação sobre tijolo por cada argamassa: um provete submetido a uma cura do tipo B e exclusivamente utilizado neste ensaio, por representar condições de cura mais desfavoráveis; dois provetes alvos de uma cura do tipo A, a serem utilizados posteriormente no ensaio de permeabilidade à água sob pressão e aderência ao suporte. Para efeitos de análise, regista-se a ocorrência ou não de fissuras e, em caso afirmativo, a sua dimensão e espessura.

### 3.7.2.11. Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água é realizado de acordo com a norma portuguesa NP EN 1015-19 (2008), a dois provetes em forma de disco, para cada argamassa, aos 28 dias de idade. Este ensaio permite avaliar a capacidade que as argamassas possuem de libertar a água que penetra ou que, eventualmente, se forma no interior dos edifícios.

**Equipamento:** copo de ensaio circular, de material anticorrosivo; balança com precisão de 0,1 g; craveira; parafina; pincel; câmara climática; aro metálico.

#### Procedimento:

1. mede-se a espessura dos provetes em três locais distintos;
2. enche-se os copos de ensaios com 600 ml de água destilada e, posteriormente, colocam-se os provetes circulares (com 2 cm de espessura) nos respectivos copos; deve-se deixar uma pequena folga de ar de  $10 \pm 5$  mm entre o provete e a superfície da água (Figura 3.24);
3. marca-se, com o auxílio de um aro metálico, a área de colocação de cera, sendo os bordos selados com parafina, com o objectivo de evitar que a água evapore pelas juntas entre o molde e o copo de ensaio;
4. pesa-se os copos de ensaio e, de seguida, coloca-se os mesmos numa câmara climática à temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5$  % (Figura 3.25);
5. seguem-se pesagens diárias durante pelo menos 15 dias ou até se atingir o regime estacionário.

**Resultados:** a permeabilidade ao vapor de água de cada argamassa corresponde à média dos valores obtidos individualmente para os dois provetes de ensaio por argamassa, sendo calculada através da expressão:

$$W_{vp_i} = \frac{1}{A_i \times \Delta p / \left( \frac{\Delta G}{\Delta t} \right) - R_A} \times t_i \quad \text{Equação 3.12}$$

A espessura da camada de ar de difusão equivalente é calculada de acordo com a Equação 3.13.

$$S_d = \frac{1,852 \times 10^{-10}}{W_{vp_i}} \times t_i \quad \text{Equação 3.13}$$

Em que:  $W_{vp_i}$  – permeabilidade ao vapor de água do provete  $i$  (kg/m.s.Pa), com  $i = 1,2,3, \dots, n$ ;  $A_i$  – área da face plana do disco  $i$  (m<sup>2</sup>);  $\Delta p$  – diferença de pressão entre a água no interior e o ambiente exterior (Pa);  $\Delta G/\Delta t$  – fluxo de vapor de água (kg/s);  $R_A$  – resistência ao vapor de água da caixa-de-ar entre o provete  $i$  e a água;  $t_i$  – espessura do provete  $i$  (m);  $S_d$  – espessura da camada de ar de difusão equivalente (m).

**Legenda:**

- 1 - provete;
- 2 - selante;
- 3 - copo de ensaio;
- 4 - caixa-de-ar ( $\approx 10\text{ mm}$ );
- 5 - água;
- 6 - área ( $\approx 0,02\text{ m}^2$ ).

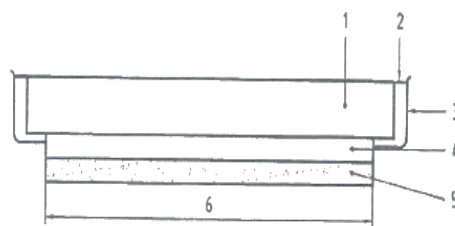


Figura 3.24: Esquema de copo de ensaio com provete (EN 1015-21, 2002)



Figura 3.25: Conjuntos de copos de ensaio e provetes na câmara climática

### 3.7.2.12. Permeabilidade à água sob pressão

Para a realização do ensaio de permeabilidade à água sob pressão, é seguida a metodologia descrita na norma europeia EN 1015-21 (2002). No entanto, foram realizadas algumas alterações relativamente ao esquema de ensaio e equipamento utilizado (Figura 3.26). A permeabilidade à água sob pressão de uma argamassa é um indicador da maior ou menor dificuldade que a água, no estado líquido, tem em penetrar nesse revestimento, pelo que é importante quantificar este parâmetro. Este ensaio é realizado a quatro provetes de tijolo de cada tipo de argamassa, sendo dois provetes ensaiados aos 28 dias de idade e os restantes após o seu envelhecimento acelerado.

Equipamento: recipiente de vidro graduado; cilindro de PVC com 84 mm de diâmetro e 115 mm de altura; selante resistente à água.

Procedimento:

1. o cilindro de PVC é fixado, com o selante resistente à água, no centro do provete;
2. após 24 horas, tem início o ensaio, quando tanto o cilindro como a proveta são cheios com água; durante o ensaio, deve-se garantir sempre uma altura de água de 100 mm acima da superfície da argamassa;
3. regista-se a quantidade de água absorvida pela argamassa ao longo de 48 horas (Figura 3.27) após o início do ensaio, pela leitura do nível da água na proveta.



Figura 3.26: Vista geral do ensaio da permeabilidade à água sob pressão



Figura 3.27: Pormenor do ensaio de permeabilidade à água sob pressão após 48 horas

Resultados: a quantidade de água absorvida pela argamassa é expressa em ml por unidade de área do revestimento exposta à água sob pressão.

### 3.7.2.13. Aderência ao suporte

O ensaio de aderência ao suporte é efectuado de acordo com a norma europeia EN 1015-12 (2000), a provetes de tijolo, aos 28 dias e após envelhecimento acelerado, permitindo avaliar a compatibilidade da argamassa com o suporte, através da quantificação da força necessária para provocar, por tracção, o seu arrancamento.

**Equipamento:** máquina caroteadora; pastilhas (50 mm de diâmetro); compressor de ar; resina epóxida de secagem rápida; dinamómetro de arrancamento.

**Procedimento:**

1. com o auxílio da máquina caroteadora, executa-se os entalhes circulares no revestimento, até que se atinja o suporte, mas sem perfurar o tijolo, garantindo que existe uma distância entre estes e os bordos de 5 cm; os entalhes devem ser limpos com o compressor de ar, de forma a remover os resíduos que possam existir; colam-se as pastilhas com resina epóxida de secagem rápida (Figura 3.28);
2. aproximadamente 24 horas depois da colagem, as pastilhas são arrancadas recorrendo ao dinamómetro de arrancamento (Figura 3.29), através do qual se aplica uma tensão uniforme entre 0,003 e 0,100 N/mm<sup>2</sup>.s às pastilhas. A rotura deve ocorrer 20 a 60 segundos após o início do carregamento. Regista-se o valor da força de rotura e a tipologia de rotura (Figura 3.30; Figura 3.31).



Figura 3.28: Colagem das pastilhas nos provetes



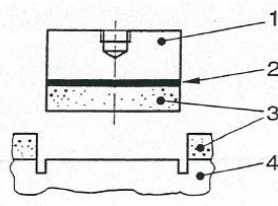
Figura 3.29: Posicionamento do dinamómetro de arrancamento



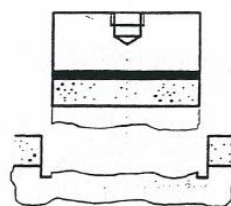
Figura 3.30: Rotura adesiva nos carotes após arrancamento

**Legenda:**

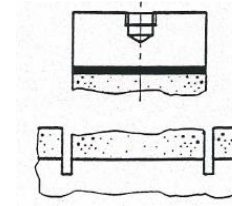
- 1 - pastilha;
- 2 - cola;
- 3 - argamassa;
- 4 - suporte.



Rotura adesiva



Rotura coesiva pelo suporte



Rotura coesiva pela argamassa

Figura 3.31: Tipologias de rotura (EN 1015-12, 2000)

**Resultados:** para que o ensaio seja válido, a rotura deve ser de um de dois tipos: coesiva ou adesiva. Se a rotura for do tipo coesiva, esta ocorre pela argamassa ou pelo suporte, sendo classificada por rotura coesiva pela argamassa ou coesiva pelo suporte, respectivamente. Por outro lado, no caso de a rotura ocorrer pela interface, classifica-se de rotura adesiva, sendo o valor da força registada no ensaio igual à força de aderência. Já na rotura coesiva, o valor da força de aderência é um majorante do valor registado no ensaio. Para cada argamassa, são necessárias 5 amostras e, para efeitos de análise, considera-se o seu valor médio. O valor da tensão de aderência para a rotura adesiva é calculado por aplicação da seguinte expressão:

$$f_{u_i} = \frac{F_{u_i}}{A_i} \quad \text{Equação 3.14}$$

Em que:  $f_{u_i}$  – tensão de aderência da amostra  $i$  (N/mm<sup>2</sup>), com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $F_{u_i}$  – força de rotura da amostra  $i$  (N);  $A_i$  – área da pastilha  $i$  (mm<sup>2</sup>).

### 3.7.2.14. Envelhecimento acelerado

Para a realização deste ensaio, foram seguidas as especificações presentes na norma europeia EN 1015-21 (2002), segundo a qual, após o período de cura de 28 dias, os provetes de tijolo são sujeitos ao processo de envelhecimento acelerado, com o objectivo avaliar o efeito de ciclos climáticos (8 ciclos de calor – gelo e 8 ciclos de gelo – degelo) em argamassas. Desta forma, simula-se eventuais condições de exposição solar, chuvas intensas e gelo, que podem influenciar negativamente características importantes das argamassas de revestimento, nomeadamente a permeabilidade à água sob pressão e a sua aderência ao suporte.

Equipamento: câmara de envelhecimento; arca frigorífica.

Procedimento:

1. aplica-se oito ciclos de calor-gelo (Figura 3.32) aos provetes de tijolo, de acordo com a Tabela 3.3;
2. entre ciclos, os provetes devem ser mantidos em condições normalizadas de  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  HR durante pelo menos 48 horas;
3. aplica-se oito ciclos de gelo-degelo (Figura 3.33) aos provetes de tijolo, de acordo com a Tabela 3.3;
4. por último, os provetes devem ser novamente colocados em descanso, em condições normalizadas de  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  HR durante pelo menos 48 horas, antes de ser realizado o ensaio de permeabilidade à água sob pressão e mais quatro dias até ser realizado o ensaio de aderência ao suporte, nos mesmos provetes;
5. verifica-se o aspecto visual dos provetes de tijolo e realizam-se os ensaios de permeabilidade à água sob pressão e o ensaio de aderência ao suporte.

**Tabela 3.3: Descrição das condições ambientais por ciclo climático**

Tipo de ciclo	Nº de ciclos	Condições por ciclo
Ciclos de calor-gelo	8	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Aquecimento por infravermelhos a <math>60 \pm 2</math> °C (8 h <math>\pm</math> 15 min)</li><li>2. Colocação em condições normalizadas de <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR (30 <math>\pm</math> 2 min)</li><li>3. Provetes na arca frigorífica a <math>-15 \pm 1</math> °C (15 h <math>\pm</math> 15 min)</li><li>4. Colocação em condições normalizadas de <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR (30 <math>\pm</math> 2 min)</li></ol>
Ciclos de gelo-degelo	8	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Aspersão dos provetes com água à temperatura de <math>20 \pm 2</math> °C (8 h <math>\pm</math> 15 min)</li><li>2. Colocação em condições normalizadas de <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR (30 <math>\pm</math> 2 min)</li><li>3. Provetes na arca frigorífica a <math>-15 \pm 1</math> °C (15 h <math>\pm</math> 15 min)</li><li>4. Colocação em condições normalizadas de <math>20 \pm 2</math> °C e <math>65 \pm 5\%</math> HR (30 <math>\pm</math> 2 min)</li></ol>



**Figura 3.32: Provetes na câmara de envelhecimento acelerado: ciclo de calor – gelo**



**Figura 3.33: Provetes na câmara de envelhecimento acelerado: ciclo de gelo – degelo**

## 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos para a campanha experimental descrita no Capítulo 3 e que dizem respeito aos ensaios aos constituintes assim como às argamassas em estudo no âmbito do vector I (efeito de fíler) e II (substituição parcial do cimento).

Para cada ensaio, procura-se realizar uma análise global dos resultados, tecendo comparações com os resultados individuais de outros ensaios obtidos no âmbito desta dissertação e referindo os aspectos positivos e negativos da sua incorporação nas argamassas cimentícias, para os dois vectores em análise. Para além disso, estes resultados são ainda, e sempre que possível, enquadrados nos resultados de trabalhos análogos descritos no capítulo referente ao Estado da Arte. Os resultados individuais de cada ensaio são apresentados, com maior detalhe, em anexo.

### 4.2. Ensaaios aos constituintes das argamassas (primeira fase experimental)

A primeira fase experimental tem como objectivo a análise das propriedades dos constituintes das argamassas, com especial ênfase para os agregados reciclados. Os constituintes das argamassas desempenham um papel fundamental no comportamento das mesmas, pelo que a sua caracterização é apresentada nos pontos seguintes.

#### 4.2.1. Composição física, química e mineralógica dos agregados reciclados

O carácter variável e heterogéneo dos agregados reciclados tem limitado a sua aplicação na construção civil. Neste sentido, a sua caracterização é fundamental. Embora apenas seja incorporada a fracção infra 0,149 mm nas argamassas em análise na presente dissertação, também é realizado um estudo das principais características físicas, químicas e mineralógicas das amostras de *tout-venant* recolhidas nas centrais de reciclagem de RCD, por se considerar um contributo importante para o estudo dos agregados reciclados e suas propriedades.

##### 4.2.1.1. Separação manual da fracção superior a 2,38 mm

Após separação manual da fracção granulométrica com dimensão superior a 2,38 mm das amostras de *tout-venant* dos agregados reciclados, foi possível determinar a percentagem de cada material, em massa, na amostra. Os resultados obtidos, para cada agregado, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados da separação manual da fracção superior a 2,38 mm para cada agregado reciclado (% em massa)

Agregado	Resíduos de betão, rochas e argamassa (%)	Cerâmicos (%)	Outros (%)
Agregado reciclado misto	70,83	17,34	11,82
Agregado reciclado de betão	99,67	0,29	0,04

Cerâmicos - tijolos; outros - vidro, metais, plástico, madeira, gesso, entre outros.

Verifica-se, portanto, que os agregados reciclados em análise possuem composições distintas, que reflectem os processos de triagem a que foram sujeitos. Efectivamente, a percentagem de contaminantes, incluída na categoria “outros”, obtida para o agregado reciclado de betão (que sofreu uma triagem prévia à sua britagem) é muito pouco significativa, quando comparada com quase 12% do agregado reciclado misto. Em ambos os agregados, predomina a componente de resíduos de betão, rochas e argamassa e é no agregado reciclado misto que se observa a maior percentagem de cerâmicos (cerca de 17%).

Os resultados obtidos não podem ser generalizados, uma vez que os materiais que lhes deram origem dependem do tipo de obra e tecnologia construtiva onde foram usados originalmente e, portanto, são variáveis com o tempo.



Rodrigues *et al.* (2013) verificaram que a componente mineral dos agregados reciclados das centrais portuguesas, na qual incluíram os resíduos de betão, rocha e argamassa, corresponde, em geral, a mais de 90% da composição de amostras, enquanto o conteúdo em cerâmicos é ligeiramente inferior (6%).

#### 4.2.1.2. Análise química e mineralógica

A separação visual dos agregados reciclados é insuficiente para a sua completa caracterização, pelo que se torna fundamental o conhecimento da sua composição química e mineralógica. Por conseguinte, foram realizados ensaios às amostras de *tout-venant* de ambos os agregados reciclados, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.2. No Anexo E, podem ser consultados, com maior detalhe, os resultados das análises químicas e mineralógicas.

**Tabela 4.2: Resultados dos ensaios químicos aos agregados reciclados (amostra de *tout-venant*)**

Ensaio	Agregado reciclado misto	Agregado reciclado de betão
Sais de cloretos solúveis em água (%)	0,021	[Limite de quantificação] < 0,010
Teor total de enxofre (%)	1,8	0,1
Teor de sulfatos solúvel em ácido, expresso como SO <sub>3</sub> (%)	4,4	0,3
Contaminantes leves - partículas leves no agregado (%)	8,6	0,3
Determinação do húmus	Ensaio negativo	Ensaio negativo

A matéria orgânica é uma das impurezas mais frequentes nos agregados finos e a sua presença pode ser detectada pela realização do ensaio de determinação do húmus. Para ambos os agregados reciclados, a cor da solução é mais clara do que a da solução padrão, pelo que se considera que o ensaio é negativo. A sua presença pode ser responsável pela diminuição da aderência dos agregados à pasta de cimento, mas também pode interferir nas reacções químicas de hidratação do mesmo, retardando a presa e endurecimento de argamassas, prejudicando a sua resistência.

A percentagem de sais de cloretos solúveis em água é também um parâmetro importante, uma vez que a presença destes sais pode dar origem à formação de eflorescências ou criptoflorescências, que são responsáveis pela degradação dos revestimentos. Por outro lado, pode também contribuir para o aumento do risco de corrosão das armaduras no interior do betão. Por conseguinte, a quantidade de cloretos deve ser limitada. Quanto aos contaminantes orgânicos leves, verifica-se que o agregado reciclado misto possui um valor cerca de 28 vezes superior ao do agregado reciclado de betão.

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados da análise química por FRX à fracção 0 - 2,38 mm de ambos os agregados reciclados. Pela sua análise, verifica-se que ambos os agregados possuem, como componentes maioritários, a SiO<sub>2</sub>, a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o CaO, relacionados com a presença de agregados naturais como a areia, resíduos cerâmicos ou pasta de cimento endurecida. No entanto, destaca-se a presença de CaO no agregado reciclado de betão, quase duas vezes superior à percentagem obtida para o agregado reciclado misto, capaz de conferir propriedades ligantes à fracção infra 0,149 mm e que poderá estar na origem de algumas diferenças de desempenho entre estes dois agregados, como se descreve mais adiante. Adicionalmente, o agregado reciclado misto possui também titânio, zinco e chumbo, em quantidades consideravelmente superiores às do agregado reciclado de betão, muito provavelmente porque os resíduos que estiveram na sua origem não foram alvo de triagem antes da sua britagem.

O complemento da análise química torna-se fundamental, pela realização de uma análise mineralógica por DRX, porque permite perceber a forma como os elementos estão ligados, e não apenas os elementos que os constituem. O resultado da análise mineralógica à fracção infra 0,149 mm é apresentado sob a forma de difractogramas, que permitem identificar as principais fases cristalinas presentes nos agregados reciclados em análise, com base na sua intensidade característica de reflexão. Considerando os resultados da DRX, verifica-se que há fases cristalinas em comum, mas o agregado reciclado misto possui uma maior diversidade.

Tabela 4.3: Resultados da análise química por FRX dos agregados reciclados (fracção 0 - 2,38 mm)

Elementos (% em massa)	Agregado reciclado misto	Agregado reciclado de betão
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,90	3,59
SiO <sub>2</sub>	55,27	39,71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,00
SO <sub>3</sub>	9,37	1,64
Cl	0,10	0,02
K <sub>2</sub> O	2,08	1,18
CaO	26,42	52,53
TiO <sub>2</sub>	0,43	0,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12	1,01
ZnO	0,08	0,01
PbO	0,01	0,002
Outros	0,03	0,018

Para a análise dos resultados e por uma questão de simplificação, ao longo deste texto atribui-se a designação de ARM e ARB, respectivamente, à fracção infra 0,149 mm dos agregados reciclados mistos e de betão, incorporada nas argamassas deste estudo. Assim, para cada agregado reciclados são enunciadas as principais fases cristalinas (Anexo E):

- **ARM:** para além do quartzo e alguma mica - moscovite e da calcite, identificam-se sulfatos de cálcio com diferentes graus de hidratação (bassanite e gesso) e alguns componentes de origem cimentícia (silicato cálcico);
- **ARB:** identificam-se como componentes principais a calcite e o quartzo e algum feldspato (microclina) e moscovite. Existem também vestígios de componentes cimentícios, como os silicatos cálcicos.

A presença de potássio em ambas as amostras está relacionada com a existência de microclina, um feldspato potássico, mica - moscovite e argila. As rochas graníticas são constituídas essencialmente por quartzo e feldspatos e podem conter também moscovite. Por conseguinte, considerando os resultados da DRX, conclui-se que o ARB é constituído maioritariamente por agregados graníticos. A calcite é um dos componentes principais em ambos os agregados reciclados, o que leva a crer que, para além dos agregados graníticos, as amostras também apresentam calcário na sua constituição. O teor em calcário no agregado reciclado de betão é substancialmente superior (cerca de 1,8 vezes) ao do agregado reciclado misto, o que demonstra que este agregado também possui uma grande quantidade de calcário na sua constituição.

O ARM possui, adicionalmente, sulfatos de cálcio com diferentes graus de hidratação (gesso e bassanite), que estão de acordo com os resultados da análise química, para os quais se verificou um aumento do teor de enxofre e do teor de sulfatos solúvel em ácido (que tem em consideração os sulfatos provenientes do gesso), relativamente ao agregado reciclado de betão. Novamente, a não utilização de uma demolição selectiva, bem como uma triagem inexistente ou pouco eficaz, podem justificar a presença de gesso neste agregado. Os sulfatos, podem reagir com o aluminato tricálcico do cimento hidratado ou com a alumina dos agregados, dando origem a produtos expansivos, que podem causar tensões internas na argamassa, diminuindo a sua durabilidade. A presença de gesso, é confirmada pelo TG-diferencial, na qual se regista a decomposição do gesso, um pouco abaixo de 200 °C, seguida pela combustão da madeira e dos componentes plásticos.

#### 4.2.2. Análise granulométrica

Pretende-se avaliar o efeito de filer, através da formulação de argamassas com 10, 15 e 20% de partículas de granulometria inferior a 0,149 mm, no total de volume de agregados. O conhecimento da curva granulométrica da areia de rio é essencial, na medida em que permite saber qual a percentagem de resíduos com dimensão inferior a 0,149 mm a incorporar nas argamassas em estudo.



Por análise da Figura 4.1, verifica-se que a areia de rio possui, na sua constituição, 0,73% de partículas abaixo de 0,149 mm. Desta forma, conclui-se que as percentagens de incorporação não são exactamente 10, 15 e 20%, mas sim ligeiramente inferiores: 9,27, 14,27 e 19,27%. No entanto, por uma questão de simplificação, optou-se por utilizar a designação de 10, 15 e 20% para caracterizar a adição de ARB e ARM.

Na Figura 4.1, observa-se as curvas granulométricas da areia de rio assim como a dos agregados de RCD provenientes de centrais de reciclagem, ainda que nos agregados reciclados apenas a fracção inferior a 0,149 mm tenha sido incorporada nas argamassas do presente estudo. No entanto, com o intuito de contribuir para o estudo dos agregados reciclados e suas propriedades, considera-se importante a sua apresentação. A areia de rio exibe uma granulometria contínua, caracterizada pela distribuição uniforme das partículas pelas várias granulometrias, permitindo a obtenção de argamassas mais compactas. Por comparação das várias curvas granulométricas, conclui-se que os agregados reciclados possuem uma maior quantidade de partículas abaixo de 0,149 mm, com destaque para o agregado misto, onde essa quantidade corresponde a cerca de 5% da massa do agregado.

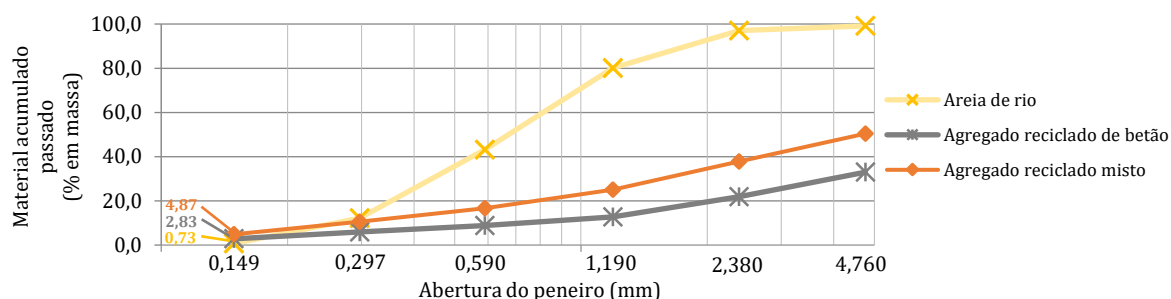


Figura 4.1: Curvas granulométricas da areia de rio, agregado reciclado de betão e misto

#### 4.2.3. Massa volúmica aparente (baridade)

A determinação da massa volúmica aparente dos constituintes sólidos de uma argamassa permite a conversão de traços volumétricos para traços em massa, fundamental para a sua correcta formulação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.4 e dizem respeito à areia de rio, ao ARM, ao ARB e ao cimento. Pela sua análise, verifica-se que a maior baridade, no caso dos agregados reciclados, corresponde ao ARB. Ainda assim, ambos os agregados reciclados possuem uma baridade inferior à da areia de rio, como seria de esperar, e à do cimento.

Tabela 4.4: Massa volúmica aparente dos constituintes sólidos das argamassas

	ARM ( $\leq 0,149$ mm)	ARB ( $\leq 0,149$ mm)	Cimento	Areia de rio ( $\leq 2,38$ mm)
Massa volúmica aparente ( $\text{kg/m}^3$ )	809,5	878,1	1029,7	1471,4

### 4.3. Ensaios às argamassas

Neste ponto, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados às argamassas, no âmbito dos vectores I e II, que dizem respeito à incorporação de finos e à redução do teor de cimento.

#### 4.3.1. Segunda fase experimental

Embora a campanha experimental esteja dividida em dois vectores distintos e a formulação das argamassas do vector II dependa dos resultados obtidos para o vector I, a análise dos resultados será realizada em simultâneo, já que muitos dos resultados obtidos para o segundo vector se relacionam com os do primeiro. No final deste capítulo, é então realizada uma análise global do desempenho das argamassas modificadas, para cada vector de investigação, com o intuito de inferir acerca da potencialidade da sua aplicação enquanto argamassas de revestimento e como substitutas das argamassas convencionais.

Na segunda fase experimental, são realizados ensaios de caracterização e de comportamento às argamassas, com o objectivo de determinar a percentagem de incorporação de agregados reciclados e o traço volumétrico para os quais se obteve o melhor desempenho, para serem estudados, em maior detalhe, na terceira fase experimental. De seguida, são apresentados os resultados dos ensaios às argamassas do vector I com 10, 15 e 20% de ARM e ARM, ao traço 1:4 assim como os das argamassas menos ricas em cimento, pela redução do traço de 1:4 para 1:5 e 1:6, nas quais se adicionou 15% de ARM e 20% de ARB, percentagens para as quais se obteve melhores desempenhos no vector I, como se constatará mais adiante.

#### 4.3.1.1. Consistência por espalhamento

Na avaliação da trabalhabilidade das argamassas assim como das suas necessidades de água, procedeu-se ao ensaio de consistência por espalhamento. Apesar dos espalhamentos recomendados na norma europeia EN 1015-3 (1999), para garantir uma adequada trabalhabilidade das argamassas em estudo, foi necessário diminuir o espalhamento para  $160 \pm 3$  mm. Desta forma, todas as argamassas são semelhantes do ponto de vista da trabalhabilidade. Os valores individuais deste ensaio são apresentados no Anexo H.

Como é possível observar na Figura 4.2, para incorporações até 15%, a introdução de finos, independentemente da natureza do resíduo, é responsável pela diminuição da quantidade de água necessária para manter a mesma trabalhabilidade. Como todas as argamassas são produzidas com o mesmo traço (1:4), tal significa que a incorporação de finos provoca a diminuição da relação água / cimento (Tabela 4.5). O efeito de fíler justifica esta tendência, na medida em que os vazios na argamassa, anteriormente preenchidos por água, são substituídos por vazios ocupados pelas partículas muito finas de agregado reciclado.

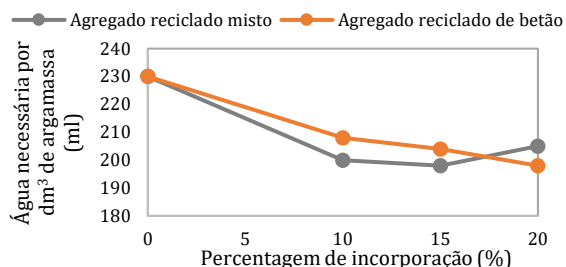


Figura 4.2: Necessidades de água por  $\text{dm}^3$  de argamassa para o vector I

Tabela 4.5: Razão água / cimento das argamassas do vector I

Argamassa	Espalhamento médio (mm)	Razão água / cimento
Ref 1:4	159,5	1,12
B 1:4 10	161,5	1,01
B 1:4 15	158,5	0,99
B 1:4 20	158,0	0,96
M 1:4 10	159,0	0,97
M 1:4 15	160,0	0,96
M 1:4 20	162,0	1,00

No entanto, no caso do ARM, para incorporações de 20%, há um incremento da água necessária por  $\text{dm}^3$  de argamassa, de forma a manter a mesma trabalhabilidade, o que pode ser explicado pelo aumento da superfície específica total dos agregados, causado pelo aumento do teor de finos. Por conseguinte, para além da água necessária para as reacções de hidratação, é também necessária água para lubrificar a superfície dos agregados. Desta forma, até a uma percentagem de 15% de ARM, o efeito de fíler prevalece. Para incorporações superiores, o aumento da superfície específica total dos agregados contraria os benefícios conferidos pelo efeito de fíler, pelo que há um aumento da água necessária, ainda que a relação água / cimento permaneça inferior à da argamassa de referência.

No que concerne às argamassas com ARB, com o aumento da percentagem de finos incorporada, há uma diminuição da quantidade de água necessária para atingir a trabalhabilidade desejada, para todas as incorporações estudadas, devido ao efeito de fíler. O ARB segue, portanto, a mesma tendência verificada por Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>), Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013), Jochem *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), referentes à incorporação de finos de diferentes tipos de RCD, barro vermelho, betão, vidro, RCD e loiça sanitária. Com a diminuição da razão água

/ cimento, é expectável que as argamassas modificadas apresentem um melhor comportamento à água e ao nível das resistências mecânicas, como se comprovará mais adiante.

No que diz respeito ao vector II, ao reduzir o teor de cimento das argamassas de referência, registou-se um ligeiro aumento da exsudação de água. Ainda assim, considerou-se que a consistência apresentada era aceitável para a sua aplicação e desempenho. Como seria de esperar, a quantidade de água necessária para se obter o mesmo espalhamento aumenta no caso das argamassas de referência, quando se efectua a redução da quantidade de ligante de 1:4 para 1:5 e 1:6 (Tabela 4.6). Isto sucede porque, com a substituição do cimento por areia, há um incremento da superfície específica dos agregados e, portanto, um aumento na quantidade de água necessária à sua lubrificação.

**Tabela 4.6: Necessidades de água por dm<sup>3</sup> de argamassa para o vector II**

Argamassa	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)	Média do espalhamento (mm)	Razão água / cimento
Ref_1:4	230	159,5	1,12
Ref_1:5	244	162,0	1,42
B_1:5_20	207	162,5	1,20
M_1:5_15	200	163,0	1,17
Ref_1:6	250	159,0	1,70
B_1:6_20	210	159,5	1,43
M_1:6_15	210	163,0	1,43

A introdução de 15% de ARM e 20% de ARB permite contrariar o efeito da redução do teor de cimento, tendo-se obtido argamassas mais homogêneas e trabalháveis. Efectivamente, a incorporação destes resíduos permite diminuir significativamente a quantidade de água necessária por dm<sup>3</sup> de argamassa (Tabela 4.6), não só comparativamente às respectivas argamassas de referência como também à argamassa com o traço 1:4, devido ao efeito de fíler.

Contudo, esta diminuição não é suficiente para que a razão água / cimento siga a mesma tendência, pelo que todas as argamassas modificadas com menos cimento possuem razões a/c superiores à argamassa de referência 1:4. Ainda assim, para as argamassas modificadas com o traço 1:5, este aumento na razão água /cimento não é significativo, correspondendo a aproximadamente 7 e 5%, conforme a adição é de ARB ou ARM e comparativamente à argamassa de referência 1:4, pelo que se considera que estas argamassas possuem desempenhos semelhantes à argamassa de referência 1:4. Quando se reduz ainda mais o teor de ligante, produzindo argamassas com o traço 1:6, o aumento na razão água /cimento atinge 28%. A aumentos na razão água /cimento das argamassas estão associadas diminuições de resistência, pelo que se espera que as argamassas apresentem resistências mecânicas inferiores.

Estes resultados são concordantes com os obtidos por Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016), que também constataram que há um aumento da razão água / cimento, ao diminuir a quantidade de cimento nas argamassas. Adicionalmente, Silva *et al.* (2008) também registaram um aumento da exsudação. Contudo, e à semelhança do verificado no presente estudo, a trabalhabilidade das argamassas foi considerada aceitável. O mesmo não sucedeu no estudo de Oliveira *et al.* (2015), no qual a forte exsudação levou a que os autores diminuíssem o espalhamento das argamassas.

#### **4.3.1.2. Massa volúmica no estado fresco**

Os resultados obtidos para a massa volúmica no estado fresco das argamassas em estudo no âmbito dos vectores I e II podem ser consultados na Figura 4.3, na Figura 4.4 e no Anexo I.

Como referido, ambos os agregados reciclados possuem massas volúmicas aparentes inferiores à da areia. Adicionalmente, na análise dos resultados, é necessário ter ainda em consideração o efeito de fíler conseguido pela

introdução dos agregados reciclados. Desta forma, por análise da Figura 4.3, é possível observar duas tendências contrárias, consoante o agregado incorporado nas argamassas.

As argamassas produzidas com o ARB apresentam, por efeito de filler, um aumento da sua massa volúmica no estado fresco, para todas as incorporações estudadas e face à argamassa de referência de traço 1:4. Alguns dos vazios na argamassa, anteriormente preenchidos com água, são agora substituídos por espaços ocupados por agregados muito finos de ARB, que conduzem a um aumento da massa volúmica das argamassas. Apesar de os ARB possuírem uma massa volúmica inferior à da areia, o efeito de filler foi suficiente para contrariar a tendência de diminuição da massa volúmica no estado fresco.

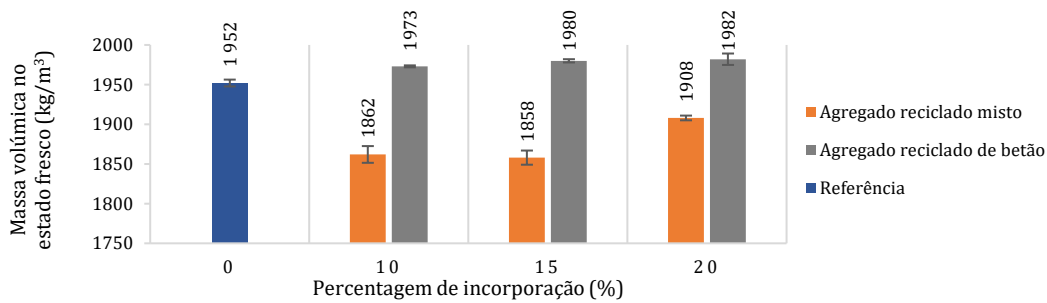


Figura 4.3: Massa volúmica no estado fresco das argamassas do vector I

Por outro lado, a diminuição da baridade, no caso do ARM comparativamente à areia de rio, demonstra ser mais significativa do que no ARB. Nestas argamassas, regista-se um decréscimo na massa volúmica, em relação à argamassa de referência, para todas as percentagens estudadas. No entanto, há uma reversão de tendência para 20% de finos incorporados. Por conseguinte, consoante a percentagem de finos, o efeito da diminuição da baridade do ARM prevalece sobre o efeito de filler. Para incorporações de 20%, o efeito de filler adquire alguma importância, ainda que não seja suficiente para que a massa volúmica seja superior à da argamassa de referência.

Na análise dos resultados obtidos para o vector II, para além dos efeitos da incorporação de resíduos muito finos, é necessário ter em consideração o efeito da redução do cimento. Desta forma, reduzindo a quantidade de ligante pela introdução simultânea de agregados reciclados, a baixa baridade destes agregados comparativamente à da areia e cimento pode conduzir a uma diminuição da massa volúmica. Acresce ainda que a redução do cimento nas argamassas está associada, como referido, a um aumento da razão água / cimento e, conseqüentemente, a aumentos de porosidade. Por conseguinte, e como se observa na Figura 4.4, as argamassas de referência com traço 1:5 e 1:6 são progressivamente mais leves do que a argamassa de referência 1:4, que apresenta uma razão água / cimento menor.

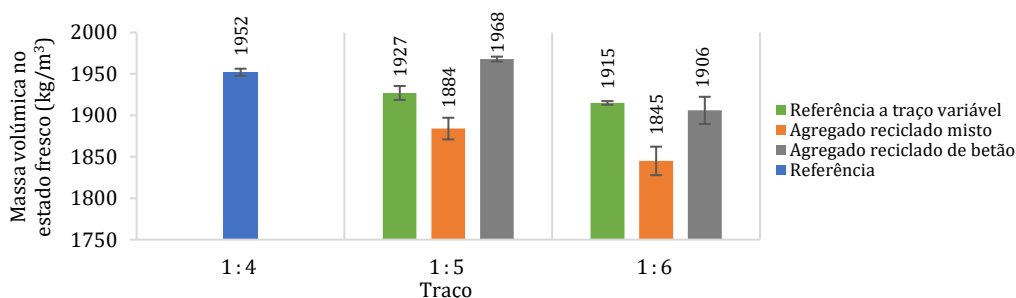


Figura 4.4: Massa volúmica no estado fresco das argamassas do vector II

Com efeito, nas argamassas com 15% de ARM, a redução da quantidade de cimento, do traço 1:4 para 1:5 e 1:6 sobrepôs-se ao efeito de filler, pelo que há uma redução da massa volúmica das argamassas em 3,5 e 5,5%, respectivamente (Figura 4.4). Adicionalmente, o considerável aumento do teor de ar incorporado, registado para as

argamassas com 15% de ARM (4.3.2.1 Teor de ar incorporado), pode também ter contribuído para o decréscimo da massa volúmica no estado fresco destas argamassas de ambos os vectores. A forma das partículas propicia o aprisionamento de ar que, ao possuir uma densidade inferior à dos agregados, reduz a massa volúmica.

No que diz respeito às argamassas com 20% de ARB, até ao traço 1:5, o efeito de filler predomina sobre o efeito da redução do teor de cimento, registando-se um incremento na massa volúmica no estado fresco de cerca de 0,8%, face aos valores obtidos para a argamassa de referência 1:4. Para menores quantidades de cimento, no entanto, há um decréscimo de 2,4% na massa volúmica. Neste caso, o aumento do teor de ar em aproximadamente 40% pode explicar esta redução na massa volúmica que, inclusivamente, é inferior à da argamassa de referência com traço 1:6, sem qualquer adição de agregados reciclados.

As alterações induzidas pela adição de ARM e ARB e redução do teor de ligante não são significativas, pelo que se considera que as argamassas possuem um desempenho semelhante ao da argamassa de referência 1:4.

#### 4.3.1.3. Massa volúmica aparente da argamassa no estado endurecido

Na Figura 4.5, na Figura 4.6 e no Anexo J, são apresentados os resultados referentes ao ensaio da massa volúmica no estado endurecido. O aumento da massa volúmica no estado endurecido pode ser um indicativo de melhores desempenhos ao nível das resistências mecânicas, mas também constitui um acréscimo no peso próprio do revestimento.

No vector I, os resultados obtidos mostram, mais uma vez, que a introdução de agregados reciclados de diferente natureza é responsável por tendências distintas nas argamassas (Figura 4.5). Assim, a incorporação de ARB provoca o aumento da massa volúmica aparente das argamassas no estado endurecido por comparação com a argamassa de referência, em ambas as idades, à semelhança do sucedido no estado fresco, ainda que, para o estado endurecido esse incremento seja mais evidente. Esta tendência justifica-se com o efeito de filler, de acordo com o descrito para o estado fresco, que prevaleceu sobre o efeito decréscimo da massa volúmica aparente dos ARB face à areia.

Já no que diz respeito às adições de ARM, há um ligeiro decréscimo da massa volúmica comparativamente ao registado para a argamassa de referência, aos 28 e 90 dias. O aumento da incorporação de finos não parece influenciar significativamente este parâmetro, já que todas as argamassas apresentam valores da massa volúmica aproximados. A menor baridade destes agregados sobrepôs-se ao efeito de filler e é responsável pela diminuição da massa volúmica tanto no estado endurecido como no estado fresco. Além disso, no estado endurecido, as diferenças nos valores da massa volúmica entre estas argamassas e a de referência são menores, provavelmente devido à perda de importância do efeito da introdução de ar, já que algum desse ar é libertado através da compactação dos provetes na altura do seu fabrico.

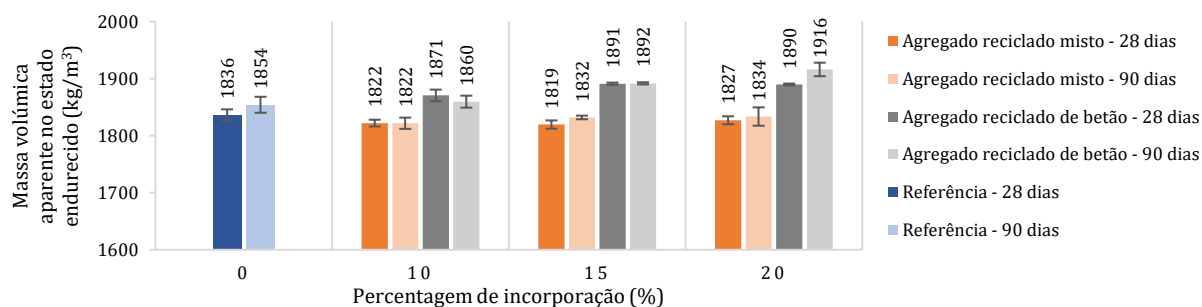


Figura 4.5: Massa volúmica aparente no estado endurecido das argamassas do vector I

No que diz respeito ao vector II, por análise da Figura 4.6, verifica-se que os resultados deste ensaio diferem consideravelmente dos obtidos para o estado fresco, sobretudo porque o efeito da introdução de ar perde importância no estado endurecido, à semelhança do constatado para o vector I. De facto, aos 90 dias, todas as argamassas modificadas possuem massas volúmicas inferiores à argamassa de referência 1:4 e semelhantes ou ligeiramente superiores às das respectivas argamassas de referência, o que não se verificou no estado fresco.

Comparativamente ao estado fresco, a argamassa com 20% de ARB e traço 1:5 é aquela que apresenta a maior descaída, alterando o seu desempenho face à argamassa de referência. Esta tendência poderá ser explicada pela maior quantidade de água necessária para manter a trabalhabilidade, comparativamente com a outra argamassa modificada (com 15% de ARM) ao mesmo traço e com a argamassa de referência. Parte da água é consumida nas reacções de hidratação do cimento, enquanto a restante evapora, diminuindo a massa volúmica aparente das argamassas no estado endurecido face ao estado fresco, à semelhança do ocorrido, como menor expressão, para as restantes argamassas em estudo em ambos os vectores.

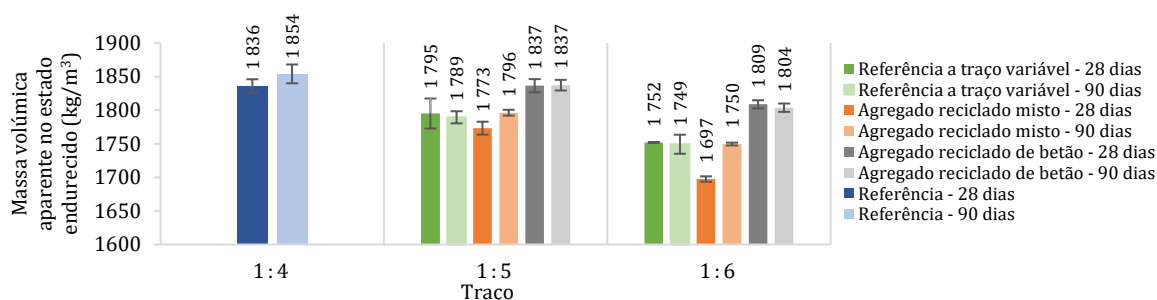


Figura 4.6: Massa volúmica aparente no estado endurecido das argamassas do vector II

Em suma, a incorporação de agregados reciclados nas argamassas, qualquer que seja a natureza do resíduo e nas percentagens estudadas, provoca uma diminuição da massa volúmica no estado endurecido, por comparação com a argamassa de referência ao traço 1:4. O efeito de filler dos ARM e ARB não foi suficiente para inverter a redução da massa volúmica, causada pelo aumento de porosidade das argamassas, consequência do aumento da sua razão água / cimento com a redução da quantidade de ligante. Além disso, a menor baridade dos ARM assim como a menor percentagem de incorporação, parecem constituir a razão pela qual esta redução é mais acentuada nas argamassas que os possuem na sua constituição.

Os resultados obtidos demonstram, de uma forma geral, uma tendência de aumento da massa volúmica aos 90 dias, para ambos os vectores, constituindo as argamassas B\_1:4\_10% e B\_1:6\_20% as únicas excepções. A diminuição na massa volúmica das argamassas modificadas do primeiro vector com incorporações de ARM e do segundo vector, independentemente do traço ou agregado reciclado introduzido, apesar de pouco significativa, constitui um aspecto positivo, visto diminuir o seu peso próprio.

#### 4.3.1.4. Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados referentes ao ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, realizado aos 28 e 90 dias, são apresentados na Figura 4.7, na Figura 4.8 e no Anexo K.

Se, por um lado, um elevado módulo de elasticidade é um indicador de bons desempenhos de uma argamassa ao nível da sua resistência mecânica, por outro também representa um aumento de rigidez e, por conseguinte, maiores concentrações de tensões internas e menor capacidade de deformação, aumentando a probabilidade de surgimento de fissuras nas argamassas do estado endurecido.

No vector I, aos 28 e aos 90 dias, para ambos os agregados reciclados incorporados, verifica-se que a adição de muito finos é responsável por um incremento do módulo de elasticidade, relativamente ao valor obtido para a argamassa de referência, com excepção da argamassa com 20% de ARM. Até incorporações de 10%, ambas as argamassas modificadas apresentam módulos de elasticidade semelhantes, sobretudo aos 90 dias. No entanto, para incorporações superiores, a natureza do agregado reciclado ganha relevância e induz comportamentos distintos no que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico das argamassas do vector I, como é possível observar na Figura 4.7.

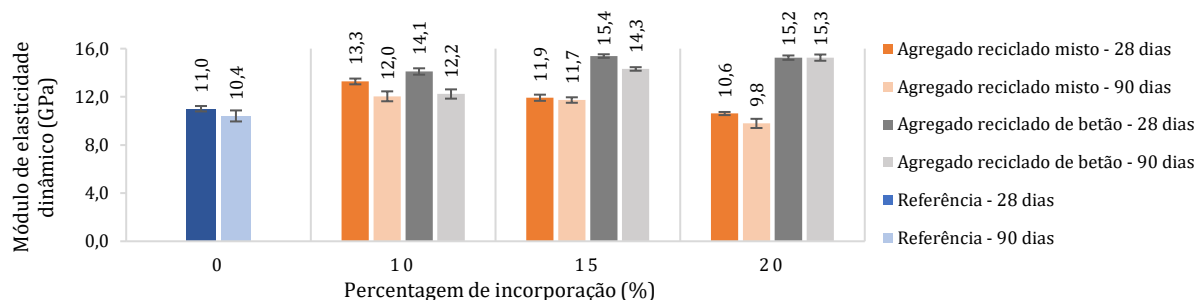


Figura 4.7: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas do vector I

No caso das argamassas com ARB na sua constituição, o módulo de elasticidade aumenta, de uma forma geral, com a adição de finos, devido ao efeito de fíler, que torna a estrutura das argamassas mais compacta. A argamassa com 20% de ARB corresponde à argamassa que apresenta o maior incremento aos 90 dias e que se reflecte num aumento de 47%. Já a argamassa modificada que apresenta o melhor desempenho é a argamassa com 10% de ARB, que possui um módulo de elasticidade 28 e 17% superior ao da argamassa de referência, sem finos, aos 28 e 90 dias, respectivamente.

A introdução de ARM, por sua vez, segue uma tendência oposta. Apesar de se registar um aumento do módulo de elasticidade para incorporações deste resíduo até 10%, também devido ao efeito de fíler, é possível observar uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da percentagem de incorporação destes resíduos. As argamassas com adições superiores a 10% de ARM na sua composição possuem módulos de elasticidade semelhantes ao da argamassa de referência. Para adições de 20%, há, inclusivamente, um decréscimo de cerca de 6%, aos 90 dias.

A forma das partículas e conseqüente arranjo na estrutura da argamassa, assim como o aumento das necessidades de água verificado para a argamassa com 20% de ARM, poderão ser responsáveis por um aumento do volume de vazios e, conseqüentemente, diminuição da compactidade, provocando a referida redução do módulo de elasticidade. A redução desta propriedade representa, portanto, uma melhoria de desempenho, pelas razões referidas acima, ainda que seja também um indício de que esta argamassa apresentará resistências mecânicas inferiores às restantes.

Com excepção de Silva *et al.* (2009), cujo estudo da adição de 10% de barro vermelho permitiu diminuir o módulo de elasticidade das argamassas, Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), obtiveram argamassas mais rígidas, que reflectem o seu aumento de compactidade, o que está de acordo com a generalidade dos resultados obtidos neste estudo.

Resumidamente, as argamassas com incorporação de ARB até 20% apresentam módulos de elasticidade superiores ao da argamassa de referência, o que indicia melhores resistências mecânicas e um melhor comportamento à água, mas um desempenho inferior nesta propriedade. Contrariamente, a argamassa com 20% de finos de ARM é aquela que, de todas em estudo, apresenta o melhor desempenho no que se refere a este parâmetro. Uma diminuição de



rigidez é positiva, na medida em que permite que a argamassa de revestimento se deforme sob a acção de tensões provocadas pelo carregamento, pela sua retracção ou devido às variações térmicas.

Relativamente ao vector II, para além da introdução de muito finos, é necessário ter em consideração um efeito contrário, relacionado com a redução da quantidade de ligante. Assim, verifica-se que o módulo de elasticidade decresce, de uma forma geral, com a redução do teor de cimento de 1:4 para 1:5 e 1:6, tanto para as argamassas modificadas como para as argamassas de referência (Figura 4.8). Efectivamente, em ambas as idades, todas as argamassas apresentam menores valores do módulo de elasticidade do que a argamassa de referência ao traço 1:4, com excepção da argamassa com 20% de ARB e traço 1:5 que, aos 90 dias, possui um módulo de elasticidade 1,2% superior.

De facto, e tal como acontece no vector I, os ARM são responsáveis pelos maiores decréscimos no valor do módulo de elasticidade, em ambas as idades. Esta diminuição aos 90 dias atinge 35 e 55%, para a incorporação de 15% de ARM quando se efectua a redução do traço de 1:4 para 1:5 e de 1:4 e 1:6, respectivamente.

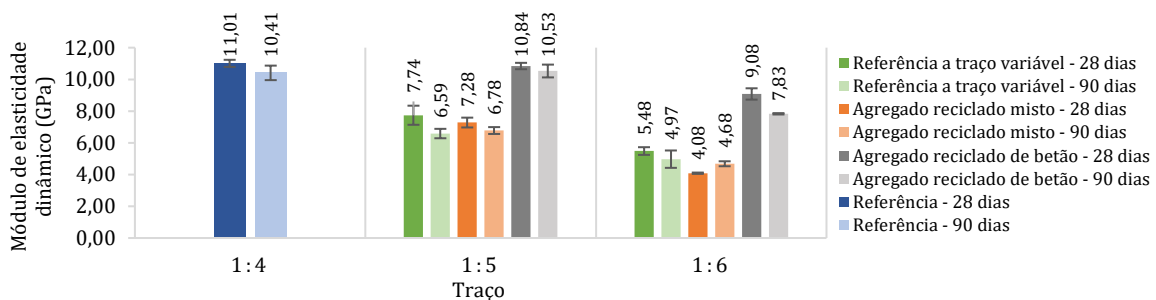


Figura 4.8: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas do vector II

No caso das argamassas com adição de 20% de ARB, o módulo de elasticidade aumenta, tanto aos 28 como aos 90 dias, em relação às respectivas argamassas de referência. Para este agregado reciclado, o efeito de filler até ao traço 1:5, foi preponderante em relação ao efeito da redução do teor de cimento, pelo que as argamassas apresentam, em ambas as idades, valores muito semelhantes ao módulo de elasticidade da argamassa de referência 1:4. Com a redução do teor de cimento, pela formulação de argamassas modificadas ao traço 1:6, há um decréscimo nesta propriedade, sobretudo aos 90 dias, em cerca de 25%. Neste caso, a quantidade de ARB adicionada não foi suficiente para contrariar o efeito da redução da quantidade de cimento. As argamassas menos ricas em cimento, ao possuírem uma menor quantidade de ligante na sua composição, não têm uma ligação tão efectiva entre os agregados que, aliada ao aumento de porosidade com o aumento da razão  $a/c$ , contribuem para que haja uma redução na sua compacidade.

Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) também estudaram o módulo de elasticidade dinâmico. De uma forma geral, as argamassas modificadas possuem módulos de elasticidade ligeiramente inferiores ou pouco superiores ao da argamassa de referência 1:4, pelo que os autores consideram que as diferenças registadas não alteram o desempenho das argamassas. Contudo, verifica-se que a introdução de ARB e ARM tem uma maior influência, permitindo reduzir consideravelmente este parâmetro, sobretudo no caso da adição de 15% de ARM.

Adicionalmente, com excepção da argamassa B\_1:4\_20%, todas as argamassas em estudo apresentam uma descida nos valores do módulo de elasticidade dos 28 para os 90 dias (Figura 4.7 e Figura 4.8). As diferenças entre os valores obtidos para as duas idades estão relacionadas com a possível microfissuração interna dos provetes, confirmada pela observação binocular das amostras aos 90 dias (2.3.1.10 Observação binocular).



Como nota final, importa referir que a redução verificada neste parâmetro para as argamassas do vector II pode ser considerada positiva, na medida em que permite obter argamassas menos rígidas, que potenciam uma melhor absorção de deformações a que os revestimentos estão sujeitos quando aplicados num suporte, evitando a sua fissuração. Desta forma, a redução do teor de cimento permite contrariar o efeito da introdução de agregados reciclados e produzir argamassas modificadas com desempenhos semelhantes ou superiores ao da argamassa de referência 1:4.

#### 4.3.1.5. Ultra-sons

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas permite avaliar a compacidade das argamassas, uma vez que é obtida através da medição do tempo que uma determinada onda ultra-sónica demora a percorrer a distância compreendida entre o receptor e o emissor. Esta onda, ao atravessar vazios na argamassa, perde velocidade. Como tal, a argamassas mais compactas está associado um incremento na velocidade de propagação. Na Figura 4.9, na Figura 4.10 e no Anexo L, são apresentados os resultados individuais do ensaio de ultra-sons.

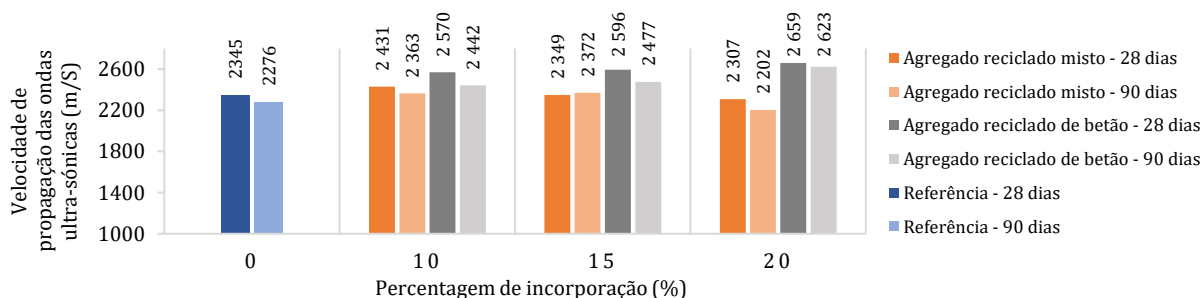


Figura 4.9: Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas do vector I - método indirecto

Pela análise da Figura 4.9, referente ao vector I, conclui-se que a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas é crescente com incorporação de ARB, atingindo um incremento de 15% para a adição de 20% de ARB. Até incorporações de 15% de ARM, também se regista um aumento na velocidade das ondas ultra-sónicas. No entanto, para 20% de ARM, há um decréscimo, para valores 3% inferiores aos da argamassa de referência.

No vector II (Figura 4.10), verifica-se que a redução do teor de cimento nas argamassas provoca um decréscimo nos valores da velocidade das ondas ultra-sónicas obtidos pelo método indirecto para todas as argamassas em estudo e comparativamente à argamassa de referência ao traço 1:4.

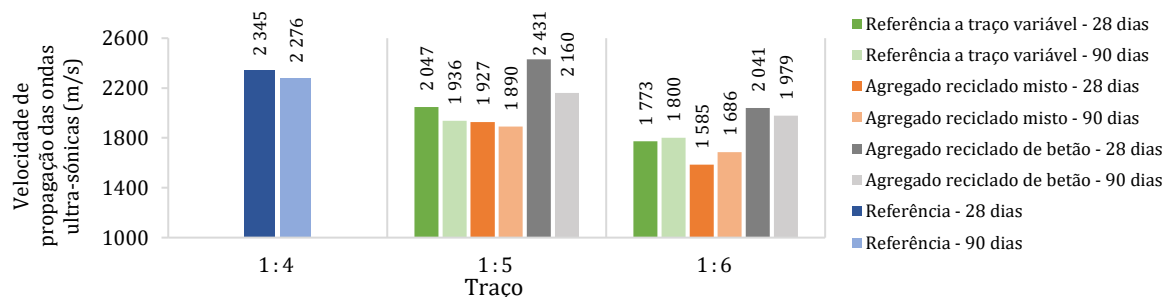


Figura 4.10: Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas do vector II - método indirecto

Apenas a argamassa com B\_1:5\_20% possui, aos 28 dias, um valor superior, para os dois métodos aplicados. No que diz respeito aos ARB, e de uma forma geral, o efeito de filler não foi suficiente para contrariar o decréscimo na compacidade das argamassas com a redução de cimento, ainda que todas as argamassas com incorporações

de ARB possuam valores superiores para a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas relativamente às respectivas argamassas de referência. Por outro lado, a introdução de ARM foi responsável por um decréscimo.

No Anexo L, apresenta-se os resultados obtidos para este ensaio, através da aplicação do método directo, que reflectem tendências semelhantes às registadas pelo método indirecto. Os resultados obtidos para as argamassas em estudo em ambos os vectores estão em concordância com os obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico e porosidade aberta, pelo facto de ambos os ensaios avaliarem a compacidade de uma argamassa.

#### 4.3.1.6. Resistência à tracção por flexão e à compressão

A resistência à tracção por flexão e à compressão das argamassas foi avaliada aos 28 e 90 dias, sendo os resultados apresentados na Figura 4.11, na Figura 4.13, na Figura 4.14, no Anexo M e no Anexo N.

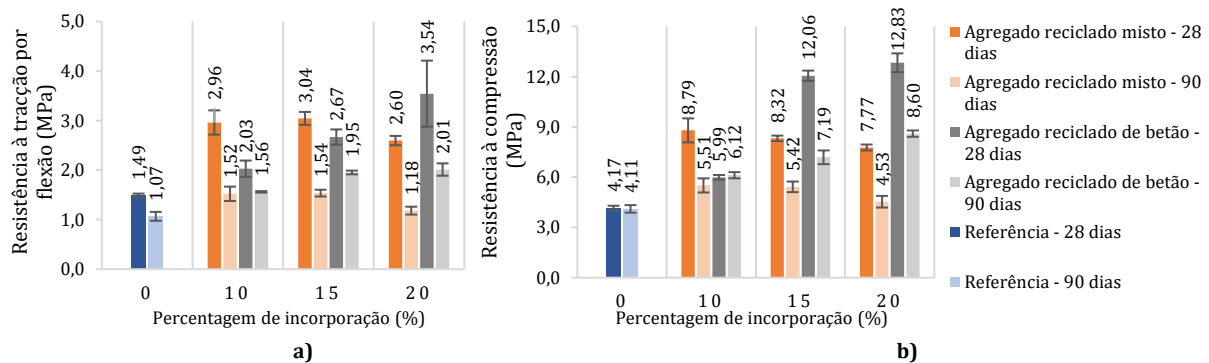


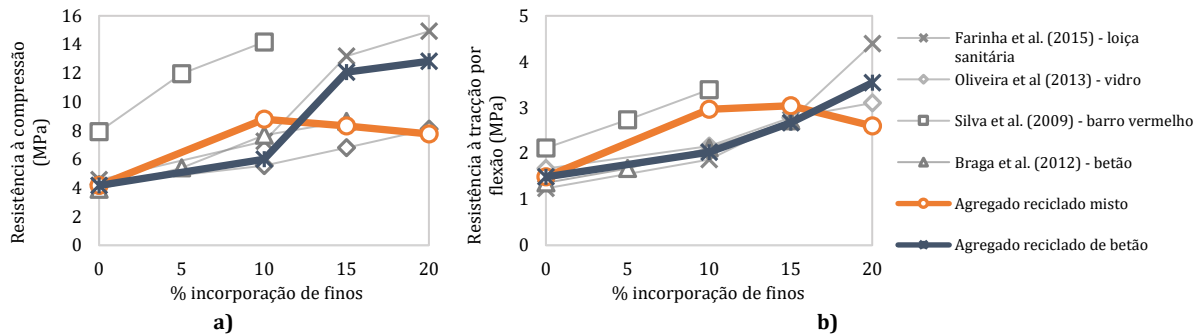
Figura 4.11: Resistência à a) compressão por flexão e b) à compressão das argamassas do vector I

Pela análise da Figura 4.11, é possível concluir que, em concordância com os resultados do módulo de elasticidade, a utilização de agregados reciclados diferentes origina tendências opostas nas argamassas, com o aumento da percentagem de incorporação. Assim, à medida que se aumenta a percentagem de ARB, tanto a resistência à compressão como a resistência à tracção por flexão aumentam, para ambas as idades. No caso da argamassa com 20% de ARB, comparativamente à argamassa de referência, esse aumento corresponde, aos 90 dias, a aproximadamente 109 e 88% para a resistência à compressão e à tracção por flexão, respectivamente.

Por outro lado, com base nos resultados obtidos nos ensaios de ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico, seria de esperar que as argamassas com ARM apresentassem uma tendência decrescente para as resistências mecânicas analisadas. Efectivamente, de uma forma geral, há um decréscimo de resistências com o aumento da incorporação destes resíduos. A única excepção consiste na resistência à tracção por flexão aos 28 e 90 dias, para a argamassa com adição de 15% de ARM. Ainda assim, todas as argamassas modificadas possuem resistências mecânicas superiores à argamassa de referência. A adição de 10% destes resíduos provoca uma melhoria de 34% na resistência à compressão, enquanto a adição de 15% é responsável por um aumento de 44% na resistência à tracção, constituindo, desta forma, as formulações que apresentam o melhor desempenho.

O aumento de resistência verificado é explicado, por um lado, pelo efeito de filler conferido pela adição de agregados reciclados. Por outro, a eventual existência de cimento por hidratar nos agregados reciclados, sobretudo devido à presença de argamassa, pode levar a aumentos de resistência nas argamassas que os incorporam. Contudo, poder-se-á atribuir ao aumento da porosidade das argamassas com o aumento da percentagem de ARM a razão pela qual as resistências mecânicas destas argamassas diminuem.

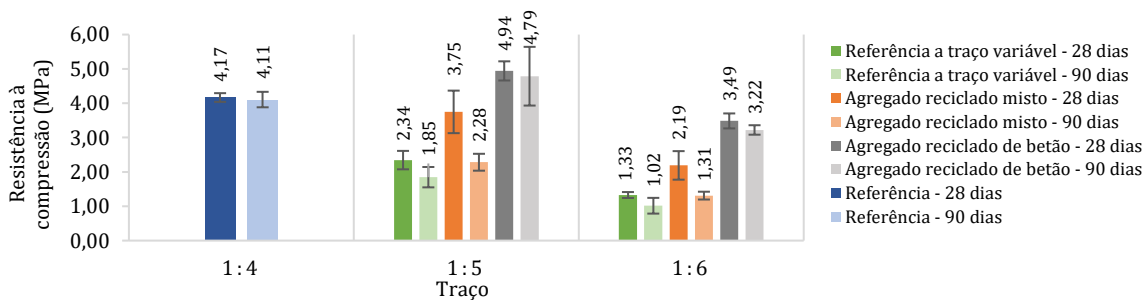
Esta tendência de incremento de resistências com a percentagem de incorporação de muito finos, observada para o ARB, é também constatada por Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), como se pode observar na Figura 4.12, assim como por Miranda e Selmo (2006<sup>b</sup>) e Jochem *et al.* (2013). A adição de ARM, apesar de produzir argamassas mais resistentes, não segue, para percentagens superiores a 10% de substituição, a tendência notada pelos diversos autores. Adicionalmente, Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) referem perdas de resistência, aos 90 dias, provocadas pela microfissuração interna.



**Figura 4.12: Comparação da resistência à a) compressão e b) tracção por flexão aos 28 dias com os resultados de outros estudos**

Em suma, a adição dos vários resíduos e nas percentagens estudadas, induz nas argamassas significativas melhorias de desempenho. Apesar dos bons resultados conferidos pela adição do ARM, a introdução do ARB permite obter argamassas consideravelmente mais resistentes.

Já no vector II, por análise da Figura 4.13 e da Figura 4.14, verifica-se que há uma redução nos valores das resistências mecânicas, em ambas as idades, com a diminuição do teor de cimento, com excepção da argamassa com 20% de ARB e traço 1:5. Este resultado é coerente com o obtido para o módulo de elasticidade dinâmico e porosidade aberta, abordada mais adiante em 4.3.2.1.9 (Porosidade aberta). Nos referidos ensaios, esta argamassa (B\_1:5\_20%) apresenta melhorias de desempenho relativamente à argamassa de referência ao traço 1:4, tal como verificado para a resistência à compressão, com um incremento de 17% e de 34% para a resistência à tracção.



**Figura 4.13: Resistência à compressão das argamassas do vector II**

No caso das argamassas com 20% de ARB, para cada traço analisado, o efeito de filler e a existência de material de origem cimentícia por hidratar, são responsáveis por aumentos consideráveis nas resistências mecânicas. Com a redução do teor de cimento, as argamassas com 20% de ARB e traço 1:6 apresentam resultados menos satisfatórios, ocorrendo uma diminuição de cerca de 7% para a resistência à tracção por flexão e de quase 22% na resistência à compressão, também por comparação com a argamassa de referência 1:4.

A adição de 15% de ARM em argamassas mais pobres em cimento provoca um decréscimo bastante acentuado na resistência à compressão aos 90 dias, face à argamassa de referência 1:4, apesar de aos 28 dias estas apresentarem valores superiores às respectivas argamassas de referência. No que diz respeito à resistência à tracção por flexão,

há um ligeiro aumento dos 28 para os 90 dias, alcançando valores semelhantes aos da argamassa de referência 1:4. Aos 90 dias, as argamassas modificadas apresentam um decréscimo de cerca de 45 e 68% na resistência à compressão e 26 e 55% na resistência à tracção por flexão, para os traços volumétricos 1:5 e 1:6, relativamente à argamassa de referência ao traço 1:4. Esta diminuição bastante significativa nos valores das resistências mecânicas leva a crer que o ARM não possui actividade pozolânica significativa, apesar de possuir resíduos de pó de tijolo na sua composição, contrariamente ao concluído por Antony e Nair (2016), Jackiewicz-Rek *et al.* (2015) e Pereira (2015), para resíduos de pó de tijolo, loiça sanitária e RCD.

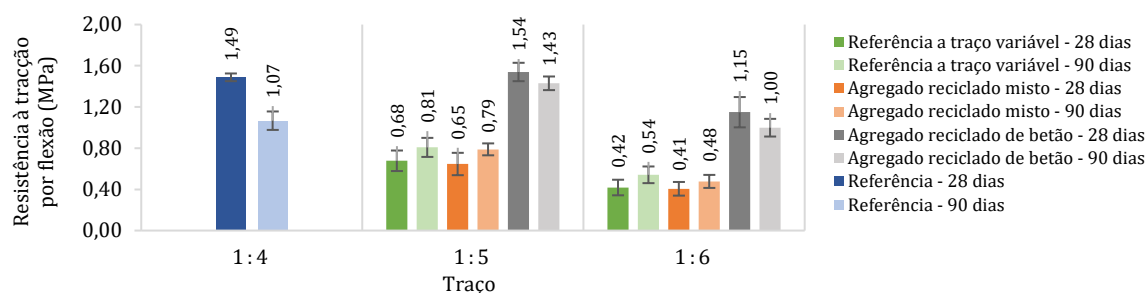


Figura 4.14: Resistência à tracção por flexão das argamassas do vector II

Em suma, verifica-se que o comportamento das argamassas modificadas com menores teores de cimento é influenciado mais significativamente consoante o agregado reciclado incorporado. Com adição de 20% de ARB, é possível reduzir o teor de cimento, mantendo desempenhos bastante aceitáveis, com especial ênfase na argamassa modificada com traço 1:5 que apresenta, inclusivamente, melhor comportamento do que a argamassa de referência 1:4. Contudo, as argamassas menos ricas em cimento com 15% de ARM possuem desempenhos inferiores, uma vez que a redução do cimento teve mais influência, sobrepondo-se ao efeito de filler.

A Figura 4.15 permite enquadrar os resultados obtidos com os de outros estudos. Assim, é possível notar que os ARB e ARM se enquadram em tendências distintas. Por um lado, Silva *et al.* (2008) e Braga *et al.* (2014) concluíram que a redução do traço de 1:4 para 1:5 e 1:6 tem uma influência preponderante na resistência à tracção, pelo que todas as argamassas modificadas apresentam um decréscimo nesta propriedade, à semelhança do sucedido para as adições de 15% de ARM. Por outro lado, Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) verificaram que a introdução de vidro e loiça sanitária permite atingir resistências à tracção, para o traço de 1:5, superiores à argamassa de referência, tal como se observou para a adição de 20% de ARB.

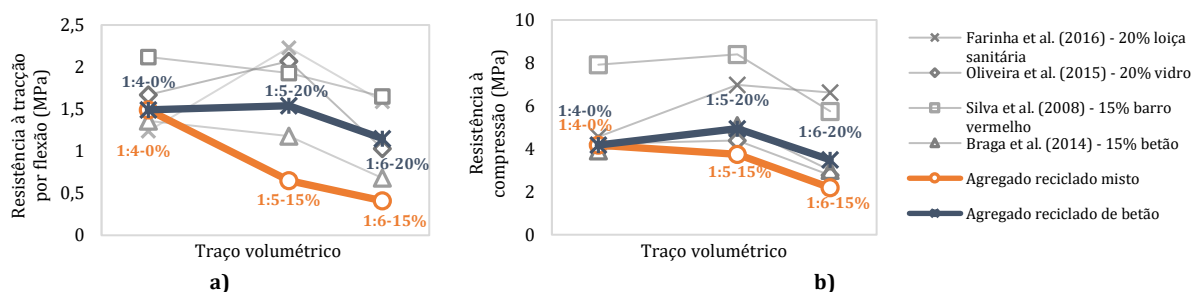


Figura 4.15: Comparação da resistência à a) tracção por flexão e b) à compressão com os obtidos noutros estudos aos 28 dias

No caso da resistência à compressão, as argamassas com ARB têm um comportamento semelhante ao registado pelos diversos autores e que consiste num aumento da resistência à compressão para as argamassas modificadas ao traço 1:5. Segue-se um decréscimo neste parâmetro quando se reduz ainda mais o teor de cimento, apesar de a resistência continuar superior à da argamassa de referência, ao contrário do que se verifica para a adição de

20% de ARB. Já as argamassas com 15% de ARM evidenciam um comportamento distinto das restantes, com o decréscimo de resistências com a redução do teor de cimento.

A generalidade das argamassas apresenta um decréscimo nos valores das resistências aos 90 dias. A presença de humidade em contacto com os provetes é responsável por prolongar as reacções de hidratação do cimento, pelo que seria de esperar um aumento da resistência mecânica. No entanto, estas diminuições podem ser justificadas pelo aparecimento de microfissuração interna nalguns provetes. Verifica-se que, contrariamente ao esperado, o decréscimo na resistência foi mais significativo na resistência à compressão do que na resistência à tracção por flexão, propriedade que deveria ser mais afectada pela microfissuração interna dos provetes.

#### 4.3.1.7. Absorção de água por capilaridade

A avaliação da absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo revela-se importante, na medida em que a água constitui um dos principais mecanismos de degradação dos revestimentos. Desta forma, um baixo coeficiente de capilaridade está associado a uma menor taxa de absorção de água por capilaridade e, portanto, a um melhor desempenho das argamassas, já que estas estão mais protegidas relativamente à entrada da água.

Os resultados referentes a este ensaio são apresentados na Figura 4.16, na Figura 4.20 e no Anexo O. Por análise da Figura 4.16, é possível concluir que a introdução de agregados reciclados muito finos nas argamassas do vector I provoca, como referido, uma alteração na sua estrutura interna, o que contribui para uma diminuição muito significativa nos coeficientes de capilaridade para as várias argamassas modificadas, independentemente da percentagem de incorporação de resíduos. Por conseguinte, o efeito de filler é responsável pelo aumento da capacidade das argamassas modificadas relativamente à argamassa de referência.

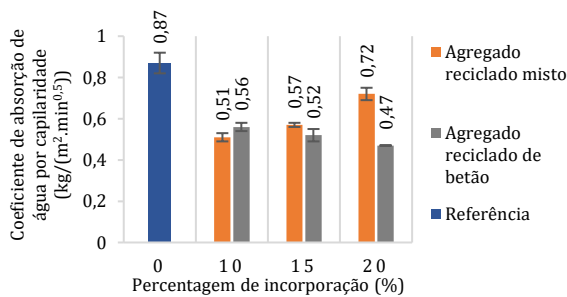


Figura 4.16: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I

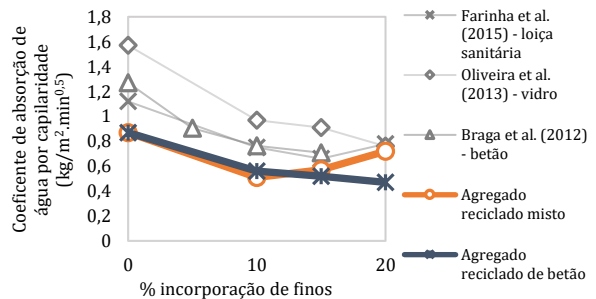


Figura 4.17: Comparação do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutras estudos

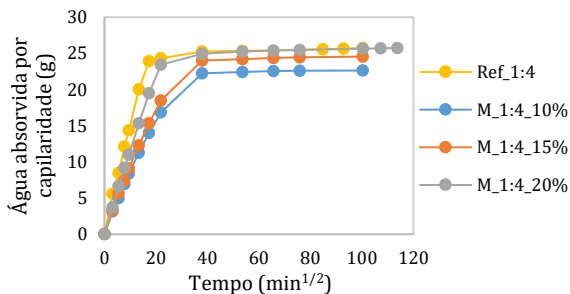


Figura 4.18: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARM (vector I)

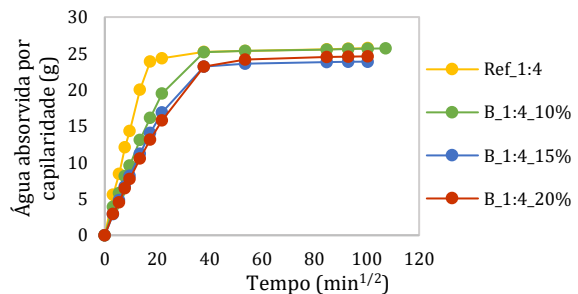


Figura 4.19: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARB (vector I)

Quanto mais compacta for uma argamassa, maior será a dificuldade que a mesma apresenta à circulação de água no seu interior. Efectivamente, e por análise da Figura 4.16, conclui-se que a introdução de resíduos de diferente natureza é responsável por comportamentos à água distintos. Para as argamassas com ARB, o coeficiente de absorção de

água por capilaridade diminui com a incorporação de finos. Por outro lado, as argamassas com adição de ARM apresentam um aumento deste coeficiente com a percentagem incorporada. No entanto, e como referido, todas as argamassas exibem uma melhoria de comportamento relativamente a esta propriedade.

A introdução de 20% de ARB permite uma redução de sensivelmente 46% relativamente ao coeficiente de absorção de capilaridade da argamassa de referência. Ainda que o menor coeficiente, no caso das argamassas com ARM, corresponda à argamassa com adição de 10% e represente uma diminuição de 41%, a adição de 20% de agregados da mesma natureza permite diminuir o coeficiente em 17% face à argamassa convencional. Por análise da Figura 4.17, verifica-se que Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) obtiveram argamassas, de uma forma geral, com menores coeficientes de absorção de água por capilaridade com o aumento da percentagem de incorporação de betão, vidro e loiça sanitária, o que está de acordo com o observado para a adição de ARB.

Em suma, é possível concluir que, independentemente do resíduo incorporado e da percentagem estudada, as argamassas modificadas apresentam um melhor comportamento à água. No entanto, as argamassas com 20% de ARM e 10% de ARB absorvem uma quantidade de água, no final do ensaio, semelhante à argamassa de referência (Figura 4.18 e Figura 4.19), pelo que se considera que, de entre as argamassas modificadas do vector I, são as que possuem o pior desempenho.

Com base nos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico e ultra-sons, o comportamento em relação à água evidenciado pelas argamassas em estudo no vector II era expectável. Para cada traço analisado, e por observação da Figura 4.20, verifica-se que a introdução de ARM ou ARB provoca uma diminuição no coeficiente de absorção de água por capilaridade, relativamente à respectiva argamassa de referência. No entanto, apenas a argamassa com 20% de ARB, onde ocorreu uma redução do teor de cimento de 1:4 para 1:5, apresenta melhorias de desempenho face à argamassa de referência 1:4, apresentando uma redução na velocidade de absorção de água nos minutos iniciais, em cerca de 7%.

Porém, ao se produzir argamassas com 20% de ARB, ao traço 1:6, o efeito de filler não é suficiente para evitar o aumento dos poros capilares nas argamassas, causado pela redução do teor de cimento e consequente aumento da razão água / cimento, pelo que estas argamassas apresentam um coeficiente de absorção de água 11,5% superior. No final do ensaio, a absorção de água das argamassas foi pouco superior à da argamassa de referência 1:4 (Figura 4.22), correspondendo a um incremento de 4,0 e 0,4%, para o traço 1:5 e 1:6, respectivamente.

Relativamente às argamassas com um menor teor de ligante e 15% de ARM, pelas razões expostas para a argamassa B\_1:6\_20%, há um aumento substancial neste coeficiente, em cerca de 22 e 74%, quando se reduz o traço 1:4 para o traço 1:5 e 1:6, respectivamente. Desta forma, estas argamassas possuem um comportamento à água inferior ao verificado para a argamassa de referência 1:4. Contudo, apesar do aumento da velocidade de absorção nos minutos iniciais, a argamassa com 15% de ARM e traço 1:5 apenas apresenta um aumento de 0,4% no total de água absorvida, enquanto na argamassa modificada ao traço 1:6 esse incremento corresponde a 5,3% (Figura 4.23).

Na Figura 4.21, é feita uma comparação dos resultados obtidos para as argamassas do vector II com os de outros estudos, verificando-se que, de uma forma geral, a redução do teor de cimento e simultânea introdução de agregados reciclados permite reduzir os coeficientes de absorção de água por capilaridade. Contudo, Pereira *et al.* (2015) e Antony e Nair (2016) verificaram que as argamassas nas quais se procedeu à substituição parcial do cimento apresentam um comportamento inferior.

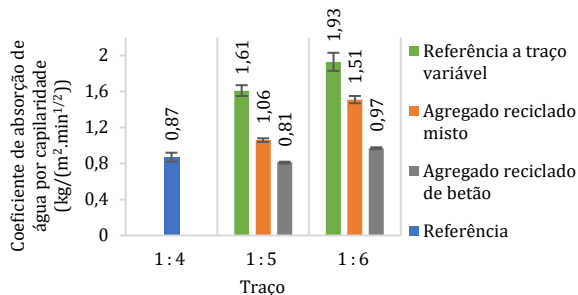


Figura 4.20: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector II

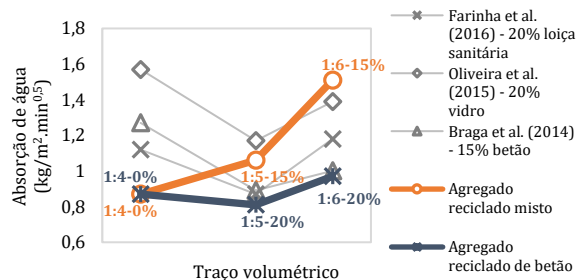


Figura 4.21: Comparação do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutros estudos

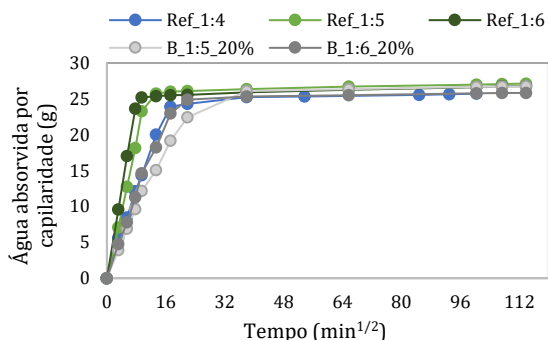


Figura 4.22: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARB (vector II)

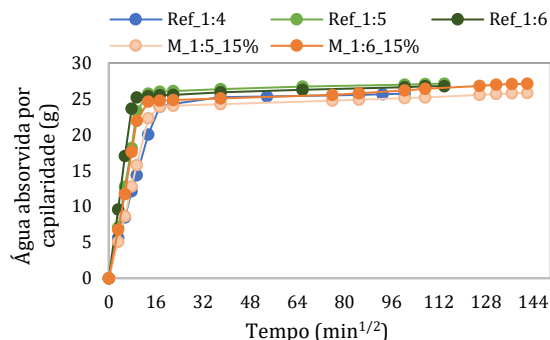


Figura 4.23: Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de ARM (vector II)

#### 4.3.1.8. Secagem

O ensaio de secagem tem início imediatamente após o fim do ensaio de absorção de água por capilaridade e consiste na medição da massa dos provetes até que se atinja a massa constante, permitindo obter as curvas de secagem dos vários provetes em estudo. Desta forma, apresenta-se, nas Figura 4.24 a Figura 4.27, as curvas de secagem das argamassas com ARM e ARB, que permitem avaliar o seu tempo de secagem e o tempo que a água em excesso está em contacto com o revestimento.

Como referido, a água é um dos principais factores de degradação dos revestimentos e o ideal seria que toda a água que eventualmente foi absorvida por capilaridade possa evaporar rapidamente. No entanto, e como se observa na Figura 4.24 à Figura 4.27, tal não se verifica. É possível concluir que a secagem é mais acentuada nas primeiras semanas, para todas as argamassas e que, com o evoluir do tempo, a taxa de evaporação sofre variações diárias reduzidas, comparativamente com as medições iniciais.

As argamassas modificadas do vector I (Figura 4.24 e Figura 4.25), ao possuírem poros capilares de menor dimensão, dificultam a saída de água do seu interior. Sendo assim, para ambos os agregados reciclados incorporados, verifica-se que, apesar de a sua adição ser responsável pelo aumento do tempo de secagem, não altera significativamente as suas curvas de secagem. Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), apesar de referirem que a adição de betão, vidro e loiça sanitária faz diminuir a taxa de evaporação das argamassas, também concluem que esta adição não introduz alterações significativas no que diz respeito à sua secagem.

Desta forma, a argamassa de referência é aquela que apresenta um melhor desempenho relativamente a todas as argamassas estudadas, uma vez que é aquela que possui uma taxa de evaporação superior. Apesar de a argamassa de referência ser aquela que absorveu a maior quantidade de água, é também aquela que permite uma secagem mais rápida, pela razão exposta anteriormente. Pela mesma razão, verifica-se que as argamassas com 20% de

ARM e 10% de ARB possuem os melhores desempenhos, dentro de cada agregado reciclado, evidenciando os dois reciclados, desta forma, tendências opostas.

No vector II, o aumento dos poros capilares com a redução do teor de cimento é responsável por uma evaporação mais rápida no caso das argamassas com menos cimento. Por outro lado, a introdução de ARM e ARB permite diminuir o tamanho dos poros. O equilíbrio entre dois efeitos contraditórios é responsável pela obtenção de argamassas modificadas com menor quantidade de cimento, nas quais não há alterações significativas no andamento das curvas de secagem das argamassas em estudo, que permanece semelhante ao registado para a argamassa de referência ao traço 1:4. Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016) chegaram a conclusões semelhantes, ao estudarem a substituição parcial do cimento pela simultânea adição de finos de betão, vidro e loiça sanitária.

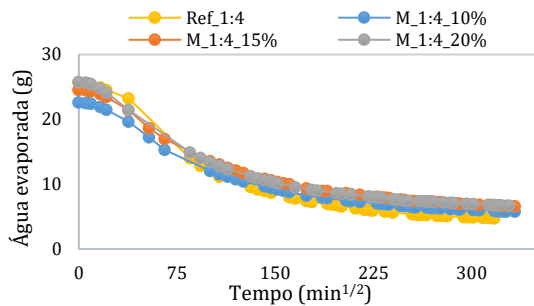


Figura 4.24: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARM (vector I)

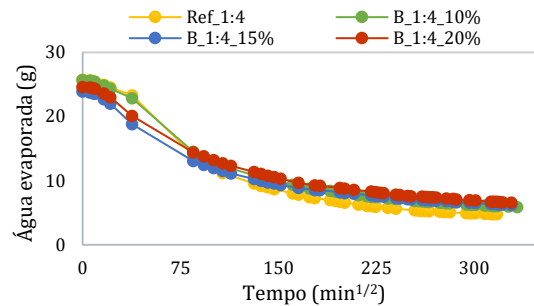


Figura 4.25: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARB (vector I)

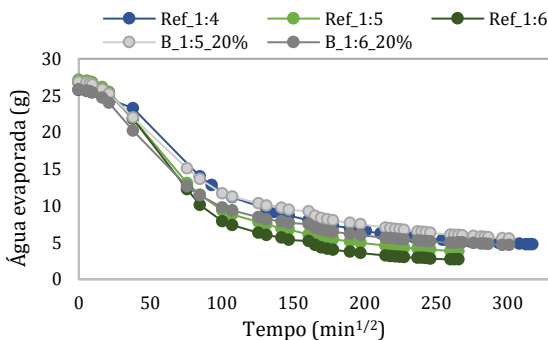


Figura 4.26: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARB (vector II)

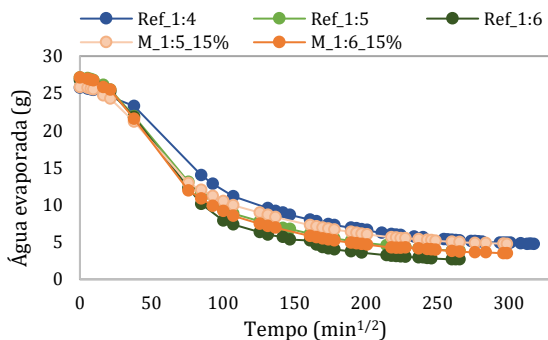


Figura 4.27: Curvas de secagem das argamassas com adição de ARM (vector II)

A argamassa com 20% de ARB e traço 1:5 é a única que apresenta um módulo de elasticidade superior ao da argamassa de referência 1:4 e uma porosidade aberta inferior, indicativos de um aumento de compacidade. Por conseguinte, o efeito de filler predomina e esta argamassa tem uma secagem inferior à da argamassa de referência 1:4. As argamassas com 15% de ARM, por outro lado, apresentam melhorias na velocidade de secagem, com especial ênfase para a argamassa com o menor teor de ligante (1:6), devido à predominância do efeito da redução do ligante face ao efeito de filler, já que a adição de ARM também é inferior à de ARB. Por fim, todas as argamassas modificadas menos ricas em cimento apresentam menores tempos de secagem.

#### 4.3.1.9. Porosidade aberta

A porosidade aberta de uma argamassa representa, em percentagem, o volume de poros interligados. Os resultados referentes a este ensaio podem ser consultados na Figura 4.28, na Figura 4.29 e no Anexo P.

Pela análise da Figura 4.28, verifica-se que as argamassas modificadas do vector I apresentam comportamentos distintos, conforme o agregado reciclado incorporado. Assim, à medida que se adicionam ARB, a porosidade das



argamassas diminuí. Desta forma, as argamassas com 10 e 15% deste tipo de agregados possuem uma porosidade aberta cerca de 7% inferior à registada para a argamassa de referência. Já na argamassa com incorporações de 20%, esse decréscimo atinge 10,5%, correspondendo, portanto, à argamassa com o melhor desempenho. Farinha *et al.* (2015), ao estudarem esta propriedade, também verificaram que a uma maior percentagem de loiça sanitária, está associada uma menor porosidade aberta. Apresentando uma tendência oposta, as argamassas formuladas com ARM possuem, para incorporações superiores a 10%, porosidades abertas ligeiramente superiores à da argamassa de referência. A argamassa com 10% de ARM possui uma porosidade aberta cerca de 2% inferior à de referência, enquanto a argamassa com 20%, por outro lado, apresenta um aumento de 3%. Desta forma, conclui-se que a incorporação de ARM não afecta significativamente esta propriedade.

A introdução de ARB provoca um aumento do módulo de elasticidade e melhora o comportamento das argamassas à água, pelo que seria de esperar que a porosidade aberta fosse decrescente com a incorporação de agregados reciclados. No caso dos ARM, sucede o contrário.

Pela análise da Figura 4.29, referente ao vector II, verifica-se que a porosidade aberta é crescente com a diminuição da quantidade de cimento, tanto para as argamassas de referência como para as argamassas nas quais se efectuou a adição de 15% de ARM e 20% de ARB, com excepção da argamassa ao traço 1:5 com 20% de ARB, para a qual se registou uma diminuição de 4,6%, como esperado, relativamente ao valor obtido para a argamassa de referência ao traço 1:4. Na argamassa com 20% de ARB e traço 1:5, o efeito de filler sobrepôs-se ao efeito da redução do teor de ligante e, portanto, há um ligeiro decréscimo na sua porosidade aberta. Para o traço 1:6, sucedeu o contrário.

As argamassas com ARB seguem a tendência verificada por Farinha *et al.* (2016), que registou uma tendência de decréscimo na porosidade aberta com a diminuição do teor de cimento até ao traço 1:5. No entanto, a argamassa com 20% e traço 1:6 possui uma porosidade aberta semelhante à da argamassa de referência 1:4.

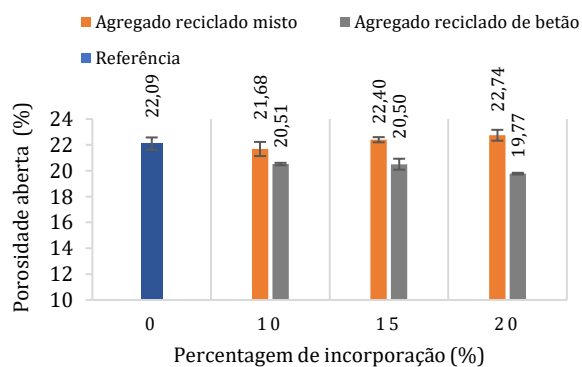


Figura 4.28: Porosidade aberta das argamassas do vector I

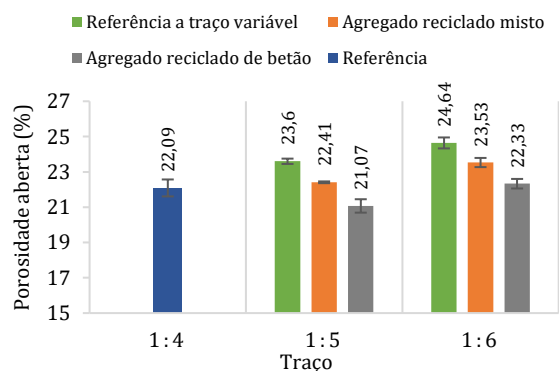


Figura 4.29: Porosidade aberta das argamassas do vector II

No que diz respeito à adição de 15% de ARM, para o traço de 1:5, o incremento na porosidade aberta das argamassas corresponde a 1,4%, enquanto para a argamassa formulada com o traço 1:6, esse aumento é de 6,5%, pelo que não são considerados relevantes. Desta forma, e apesar das pequenas oscilações verificadas para as argamassas modificadas mais pobres em cimento, a percentagem de vazios interconectáveis não se altera significativamente, pelo que as argamassas apresentam um desempenho semelhante à argamassa de referência ao traço 1:4.

#### 4.3.1.10. Observação binocular

Todas as argamassas em estudo nesta dissertação foram alvo de observação binocular, com o intuito de obter uma justificação para o decréscimo verificado aos 90 dias nos ensaios do módulo de elasticidade, ultra-sons e

resistências mecânicas, estando representadas na Figura 4.30 a Figura 4.40 as observações mais relevantes. A lupa binocular electrónica utilizada permite obter ampliações até 700 % das argamassas em estudo.



**Figura 4.30:** Ampliação de 700% para a argamassa REF\_1:4



**Figura 4.31:** Ampliação de 700% para a argamassa M\_1:4\_10



**Figura 4.32:** Ampliação de 500% para a argamassa M\_1:4\_15



**Figura 4.33:** Ampliação de 500% para a argamassa M\_1:4\_20



**Figura 4.34:** Ampliação de 700% para a argamassa B\_1:4\_10



**Figura 4.35:** Ampliação de 700% para a argamassa B\_1:4\_15



**Figura 4.36:** Ampliação de 700% para a argamassa B\_1:4\_20



**Figura 4.37:** Ampliação de 700% para a argamassa REF\_1:6



**Figura 4.38:** Ampliação de 600% para a argamassa B\_1:5\_20



**Figura 4.39:** Ampliação de 500% para a argamassa M\_1:5\_15



**Figura 4.40:** Ampliação de 700% para a argamassa M\_1:6\_15

A possível microfissuração interna dos provetes, apontada como causa provável do decréscimo nos valores do módulo de elasticidade dinâmico, resistências mecânicas e ultra-sons aos 90 dias de idade, verificado para as argamassas do vector I, foi confirmada pela sua observação binocular. Efectivamente, todas as argamassas em estudo apresentam, para além das discontinuidades habituais (cavidades), microfissuras tendencialmente em maior número e com abertura superior, com o aumento da incorporação de resíduos, para ambos os agregados reciclados. Assim, a tendência para a ocorrência de microfissuração nas argamassas do vector I parece acentuar-se com o aumento da percentagem de muito finos, sendo na argamassa com 20% de ARB (Figura 4.36) que se observa o maior padrão de microfissuração. Já na argamassa de referência, apenas se observou uma fissura isolada (Figura 4.30).

Contudo, apesar do decréscimo generalizado dos valores aos 90 dias para as argamassas do vector II, só se observou algumas microfissuras nas argamassas com 15% de ARM (Figura 4.39 e Figura 4.40). Na argamassa de traço 1:5 e 20% de ARB (Figura 4.38) e na argamassa de referência 1:6 (Figura 4.37), apenas se observou uma microfissura isolada, com as maiores ampliações. Contudo, tal não significa que as restantes argamassas não possuam microfissuração interna, uma vez que há um decréscimo das suas propriedades aos 90 dias. As microfissuras detectadas possuem aberturas inferiores às observadas para as argamassas do vector I.

Adicionalmente, e como esperado, observa-se que a argamassa com 20% de ARB e traço 1:5 possui uma matriz bastante mais compacta do que as restantes. De facto, através da observação binocular, confirma-se o aumento da quantidade e dimensão dos poros para as argamassas com menos cimento, contrariado pela adição de agregados reciclados, para cada traço analisado.

#### 4.3.1.11. Selecção das argamassas com o melhor desempenho

Na segunda fase experimental, são realizados diversos ensaios com o objectivo de seleccionar uma argamassa modificada, entre cada agregado reciclado em estudo, que apresente o melhor desempenho na generalidade dos parâmetros avaliados e que, simultaneamente, permita um maior aproveitamento destes agregados, possibilitando obtenção de argamassas mais sustentáveis do ponto de vista ambiental.

Desta forma, apresenta-se na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8 uma comparação de resultados obtidos nos diversos ensaios para as argamassas modificadas em estudo. As variações percentuais nos parâmetros em análise foram calculadas tendo como base os resultados obtidos para a argamassa de referência 1:4. Para a sua análise, é necessário considerar que os valores a verde, cinzento e laranja indicam, respectivamente, que a tendência é considerada positiva, pouco significativa (até 10%) ou negativa. Nas referidas tabelas, são também assinaladas, a verde, as argamassas com melhor desempenho em cada ensaio.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios da 2ª fase experimental e selecção das argamassas do vector I com melhor desempenho

Ensaio	M_1:4_10	M_1:4_15	M_1:4_20	B_1:4_10	B_1:4_15	B_1:4_20
Exigência de água	-13%	-14%	-11%	-10%	-12%	-14%
Massa volúmica estado fresco	-5%	-5%	-2%	1%	1%	2%
Massa volúmica no estado endurecido (90 dias)	-2%	-1%	-1%	0%	2%	3%
Módulo elasticidade dinâmico (90 dias)	15%	13%	-6%	17%	38%	47%
Ultra-sons: método indirecto (90 dias)	4%	4%	-3%	7%	9%	15%
Resistência à compressão (90 dias)	34%	32%	10%	49%	75%	109%
Resistência à tracção por flexão (90 dias)	42%	44%	40%	46%	82%	88%
Absorção de água por capilaridade	-41%	-35%	-17%	-36%	-40%	-46%
Secagem	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior
Porosidade aberta	-2%	1%	3%	-7%	-7%	-11%
Observação binocular	Maior fissuração	Maior fissuração	Maior fissuração	Maior fissuração	Maior fissuração	Maior fissuração

#### a) Vector I - incorporação de muito finos

No caso das argamassas produzidas com ARM, verifica-se que a argamassa com 10% de adição de resíduos é, efectivamente, a que apresenta melhores resultados nos ensaios da 2ª fase experimental, com excepção do módulo de elasticidade dinâmico, ultra-sons e resistência à tracção por flexão. No entanto, e tendo em consideração que o principal objectivo desta dissertação se relaciona com a reciclagem dos RCD, optou-se por prosseguir para a 3ª fase de ensaios com a argamassa que possui 15% de agregado reciclado na sua constituição. Esta argamassa,

apesar de apresentar um desempenho ligeiramente inferior nalgumas propriedades, permite majorar a quantidade de agregado reciclado utilizado. Além disso, também será importante para a definição das formulações das argamassas do vector II, na medida em que actuará como substituto do cimento, pela produção de argamassas menos ricas em cimento. No que diz respeito à incorporação de ARB, a argamassa com 20% de resíduos é aquela que, com excepção do módulo de elasticidade, ultra-sons e observação binocular, tem o melhor desempenho na 2ª fase.

#### b) Vector II – redução do teor de cimento

Relativamente à adição de 15% de ARM, conclui-se que, com excepção dos ensaios de resistência, do aparecimento de microfissuração interna nos provetes aos 90 dias e do aumento da absorção de água, a adição deste agregado e na percentagem estudada, permite obter melhorias de desempenho em praticamente todos os parâmetros relativamente à argamassa de referência. Considera-se que as perdas de resistência demonstradas pela argamassa com menos cimento (traço 1:6) podem prejudicar o seu desempenho, assim como aumentar substancialmente o coeficiente de absorção de água, dois parâmetros fundamentais para o seu bom desempenho e durabilidade.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios da 2ª fase experimental e selecção das argamassas do vector II com melhor desempenho

Ensaio	M_1:5_15	M_1:6_15	B_1:5_20	B_1:6_20
Exigência de água	5%	28%	7%	28%
Massa volúmica estado fresco	-4%	-6%	1%	-2%
Massa volúmica no estado endurecido (90 dias)	-3%	-6%	-1%	-3%
Módulo elasticidade dinâmico (90 dias)	-35%	-55%	1%	-25%
Ultra-sons: método indirecto (90 dias)	-17%	-26%	-5%	-13%
Resistência à compressão (90 dias)	-45%	-68%	17%	-22%
Resistência à tracção por flexão (90 dias)	-26%	-55%	34%	-7%
Absorção de água por capilaridade	22%	74%	-7%	12%
Secagem	Superior	Superior	Inferior	Semelhante
Porosidade aberta	1%	7%	-5%	1%
Observação binocular	Padrão de fissuração	Padrão de fissuração	Fissura isolada	Sem fissuração

Por outro lado, a introdução de 20% de ARB e simultânea redução do teor de ligante permite obter resultados satisfatórios, para ambos os traços estudados. Contudo, e apesar do aumento da resistência mecânica e melhor comportamento à água da argamassa modificada com o traço 1:5, a argamassa com menos cimento apresenta, uma diminuição no módulo de elasticidade, assim como uma ausência de microfissuração, para as ampliações testadas. Tendo em consideração os resultados obtidos no vector I, estes dois parâmetros permitem reduzir a probabilidade de ocorrência de fissuração, assim como perdas de resistência. Desta forma, opta-se por prosseguir para a terceira fase experimental com a argamassa menos rica em cimento, permitindo maximizar a reciclagem de agregados e reduzir a quantidade de cimento utilizado na construção civil, sem perdas substanciais no seu desempenho.

#### 4.3.2. Terceira fase experimental

Na terceira fase experimental, são efectuados ensaios complementares de caracterização e comportamento às argamassas com melhor desempenho na segunda fase, para cada tipo de agregado reciclado em estudo, com o objectivo de avaliar o seu desempenho face a uma argamassa de referência ao traço 1:4. Assim, nesta fase são avaliadas, no âmbito do vector I, as argamassas B\_1:4\_20% e M\_1:4\_15% e, no vector II, as argamassas M\_1:5\_15% e B\_1:6\_20% assim como as respectivas argamassa de referência.

#### 4.3.2.1. Teor de ar incorporado

As argamassas deste estudo foram avaliadas no que diz respeito a esta propriedade. Os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 4.9 e no Anexo Q. Se, por um lado, o aumento do teor de ar pode contribuir, no estado fresco, para uma melhoria na trabalhabilidade, por outro, no estado endurecido, pode também conduzir a diminuições da resistência mecânica assim como da aderência das argamassas ao suporte.

No vector I e por análise da Tabela 4.9, verifica-se que a introdução de muito finos, para os dois agregados reciclados em estudo, é responsável por um aumento do teor de ar, bastante acentuado no caso da incorporação do ARM. Este aumento de aproximadamente 95% para a argamassa com 15% de ARM, pode explicar a diminuição da massa volúmica no estado fresco que todas as argamassas formuladas com este tipo de agregado apresentaram. Relativamente à argamassa com 20% de ARB, este incremento de ar na argamassa corresponde a 25%, por comparação com a argamassa de referência.

**Tabela 4.9: Teor de ar incorporado das argamassas do vector I e II**

Argamassa	Teor de ar incorporado (%)	Desvio-padrão (%)
Ref 1:4	7,13	0,13
M 1:4 15	13,88	0,13
B 1:4 20	8,88	0,13
Ref 1:5	7,63	0,13
M 1:5 15	14,75	0,00
Ref 1:6	7,13	0,13
B 1:6 20	10,00	0,00

Farinha *et al.* (2015) concluíram que a adição de loiça sanitária não introduz alterações significativas no teor de ar das argamassas. Jochem *et al.* (2013) verificaram que a adição de finos, em praticamente todas as argamassas com agregados reciclados, reduz o teor de ar. No entanto, Oliveira *et al.* (2013), à semelhança do ocorrido para a adição de ARB e ARM, registaram um aumento considerável no teor de ar incorporado, provocado essencialmente pela forma laminar das partículas de vidro.

No vector II, a redução da quantidade de cimento parece não influenciar consideravelmente o teor de ar das argamassas (Tabela 4.9). É, portanto, a incorporação de agregados muito finos, o parâmetro diferenciador das argamassas, em concordância com o observado nas argamassas em estudo no vector I. Para 15% de ARM, há um incremento de praticamente 107% face à argamassa de referência 1:4, enquanto para a incorporação de 20% de ARB, esse incremento corresponde a cerca de 40%.

O aumento do teor de ar verificado, causado pela incorporação de muito finos, pode estar relacionado com a forma destas partículas que, por terem sido sujeitas a processos de britagem, são mais angulosas e, como tal, contribuem para o aprisionamento de ar nas argamassas, resultando num incremento no teor de ar. No entanto, as diferenças entre os dois tipos de agregados podem estar relacionadas com o aumento do teor de finos do ARM comparativamente ao ARB.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Oliveira *et al.* (2015), no qual se observou uma tendência de aumento do teor de ar incorporado nas argamassas com redução do teor de cimento e simultânea adição de finos de vidro. Por outro lado, Farinha *et al.* (2016) observaram um decréscimo no teor de ar para a argamassa com 20% de loiça sanitária e traço de 1:6, pela sobreposição do efeito da redução do cimento face à incorporação de finos.

#### 4.3.2.2. Variação dimensional (retracção)

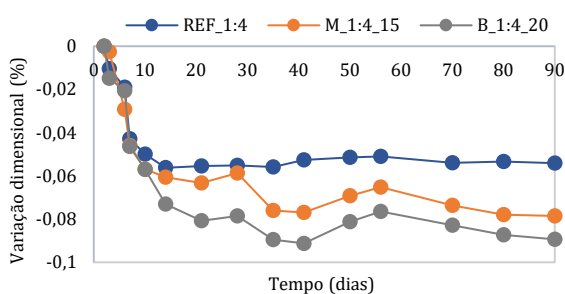
O ensaio de variação dimensional foi realizado até aos 90 dias, por se tratar de um parâmetro que tende a estabilizar com o tempo, permitindo obter uma previsão do comportamento de cada argamassa a longo prazo. Os resultados



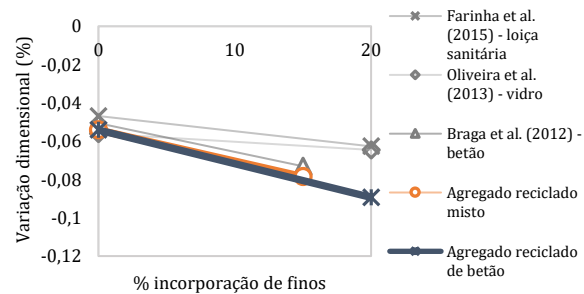
deste ensaio podem ser consultados nas Figura 4.41, na Figura 4.43 e no Anexo R.

Numa primeira análise, é possível constatar que a maior variação dimensional dos provetes ocorre nos primeiros dias de idade (entre os 10 e 14 dias) e a partir daí apenas se observa ligeiras oscilações, essencialmente causadas por variações de humidade ou de temperatura. Adicionalmente, e como esperado, observa-se que a introdução de muito finos é responsável pelo aumento bastante significativo da retracção. De facto, no vector I, ambas as argamassas modificadas apresentam valores de retracção superiores à argamassa de referência. Inclusivamente, este incremento de retracção pode estar na origem da microfissuração interna observada aos 90 dias, assim como da pequena fissuração superficial que surgiu na argamassa com 20% de ARB.

A argamassa com 20% de ARB, apesar de possuir o maior módulo de elasticidade, deveria apresentar maiores restrições internas e, por conseguinte, menores valores de retracção. Contudo, sucede o contrário e esta argamassa possui a maior retracção, de todas as argamassas em análise. A maior quantidade de agregados reciclados introduzidos, no caso do ARB, assim como o elevado teor de CaO, relacionado com a presença de resíduos compostos por pasta cimentícia, podem explicar a diferença nos valores da retracção verificada para a incorporação de 15% de ARM e 20% de ARB. Apesar de se ter mantido o traço volumétrico constante e igual a 1:4, a existência destes resíduos pode ter conduzido a um aumento do teor de cimento nas argamassas e contribuído para o aumento da retracção que, aliado à introdução de muito finos, produz elevadas tensões capilares nas argamassas.



**Figura 4.41: Variação dimensional das argamassas do vector I**



**Figura 4.42: Comparação da variação dimensional das argamassas do vector I com os resultados obtidos noutros estudos**

Por análise da Figura 4.42, verifica-se que Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015), também concluíram que a introdução destes agregados muito finos é responsável por um incremento na retracção das argamassas. Contudo, e para as percentagens estudadas, a retracção é superior para os agregados utilizados nesta dissertação. Ambas as argamassas modificadas, ao possuírem valores de retracção cerca de 65 e 45% superiores aos da argamassa de referência aos 90 dias, para a adição de ARB e ARM, respectivamente, apresentam piores desempenhos no que diz respeito a esta característica. Miranda e Selmo (2006<sup>a</sup>) também concluíram que as argamassas com o maior conteúdo de resíduos cerâmicos possuem menores retracções comparativamente a argamassas com outros resíduos de construção e demolição na sua constituição.

Por observação da Figura 4.43 e à semelhança do notado para o vector I, verifica-se que a tendência de aumento da retracção com a incorporação de agregados muito finos se mantém. No entanto, para além do efeito da introdução de muito finos, é necessário ter em consideração o efeito da redução da quantidade de cimento, responsável pela diminuição da retracção. Efectivamente, ambas as argamassas de referência de traço 1:5 e 1:6, menos ricas em cimento, apresentam valores de retracção inferiores aos da argamassa de referência 1:4, sendo a argamassa de traço 1:6 aquela que possui menores valores de retracção, como seria de esperar.

A conjugação dos dois efeitos, a incorporação de agregados reciclados muito finos e a redução do teor de cimento, é

então responsável por comportamentos distintos nas argamassas modificadas. Enquanto a redução do traço de 1:4 para 1:6 permitiu à argamassa com 20% de ARB apresentar variações dimensionais, aos 90 dias, ligeiramente superiores à argamassa de referência em cerca de 11%, contrariando, portanto, o efeito da introdução de finos, o mesmo não foi possível para a argamassa modificada com 15% de ARM e traço 1:5. Neste caso, a redução do teor de cimento não foi suficiente para compensar o efeito negativo da introdução destes resíduos, pelo que há um substancial aumento da retracção da argamassa em 52%, comparativamente à argamassa de referência 1:4, que pode estar na origem da microfissuração interna observada aos 90 dias para estas argamassas. O reduzido módulo de elasticidade poderá ter contribuído igualmente para o aumento da retracção das argamassas modificadas, já que as argamassas possuem menos restrições internas.

Na Figura 4.44, é possível observar que a introdução de ARB e ARM segue a tendência de aumento da retracção registada por Braga *et al.* (2014) e Oliveira *et al.* (2015), já que a redução do teor de cimento não foi suficiente para contrariar o efeito do teor de finos. Apenas as argamassas com incorporação de loiça sanitária, referentes aos estudos de Jackiewicz-Rek *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016), apresentaram retracções inferiores.

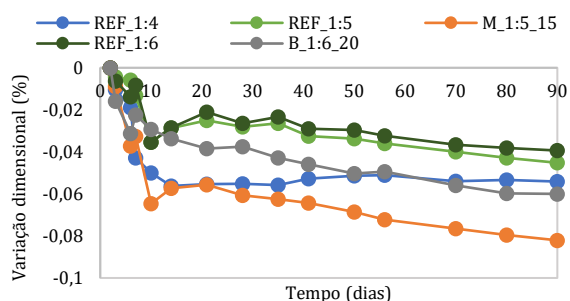


Figura 4.43: Variação dimensional das argamassas do vector II

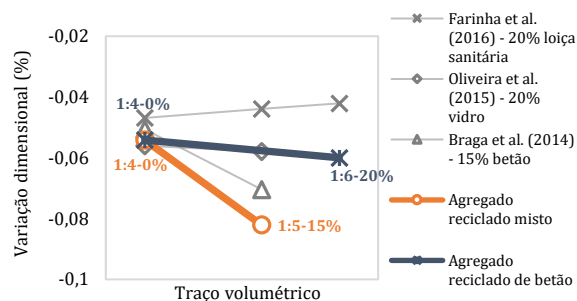


Figura 4.44: Comparação da variação dimensional das argamassas do vector II com os resultados obtidos noutros estudos

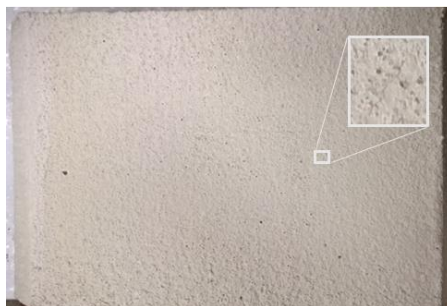
Por fim, conclui-se que, apesar de a argamassa com 20% de ARB e traço 1:6 apresentar um desempenho satisfatório, próximo do da argamassa de referência, no que diz respeito à variação dimensional aos 90 dias, a redução da quantidade de cimento não foi suficiente para que a argamassa com 15% de ARM e traço 1:5 possuísse um desempenho considerado satisfatório.

#### 4.3.2.3. Suscetibilidade à fendilhação

A fissuração das argamassas de revestimento é uma patologia frequente nas fachadas dos edifícios que, para além das consequências estéticas inerentes, pode comprometer seriamente a estanqueidade de um revestimento e, consequentemente, a sua durabilidade. Com o intuito de avaliar a propensão das argamassas a uma eventual fissuração, foi aplicada uma camada de argamassa com 2 cm de espessura na face de três tijolos, sujeitos a condições de cura distintas, sendo observado, ao longo do tempo, o aparecimento ou não de fissuras.

A argamassa com 20% de ARB, submetida a uma cura do tipo B (condições de cura mais desfavoráveis) foi a única, das várias argamassas analisadas, a apresentar uma pequena fissura superficial (Figura 4.45), aos 14 dias de idade. Os restantes provetes da mesma argamassa, posteriormente utilizados nos ensaios de permeabilidade à água sob pressão e aderência ao suporte, em cura A, não apresentaram quaisquer fissuras. O elevado módulo de elasticidade assim como o considerável aumento de retracção face à argamassa de referência, com especial expressão nos primeiros 28 dias de idade, provocados pela adição de 20% ARB, podem justificar o aparecimento desta fissura de retracção por secagem.

Como referido, um elevado módulo de elasticidade é responsável por maiores concentrações de tensões internas e pela maior dificuldade da argamassa em se deformar. Esta argamassa, ao possuir uma elevada retracção, é responsável pelo aparecimento de tensões de tracção no revestimento que, ao ultrapassarem a sua capacidade resistente, conduziram à formação da fissura, logo nos primeiros dias de idade, pelo que se considera que esta argamassa é susceptível à fendilhação. Segundo Veiga (1998), a tendência para a fissuração por retracção, para além de estar relacionada com elevados valores de retracção, é tanto maior quanto maior for a relação módulo de elasticidade / resistência à tracção. Assim, para evitar que surjam fissuras nas argamassas, estas deverão possuir reduzidos valores de retracção, assim como do módulo de elasticidade.



**Figura 4.45: Pormenor da fissura observada na argamassa com adição de 20% de ARB**

De acordo com a classificação presente na Tabela 4.10, trata-se de uma microfissura que, segundo Gaspar *et al.* (2006), devido à sua reduzida dimensão, não é responsável por uma perda de estanqueidade significativa e, como tal, não compromete a durabilidade do revestimento. Como referido, trata-se de uma microfissura isolada, com abertura inferior a 0,25 mm, com cerca de 1,5 cm de extensão e que se encontra estabilizada, após 3 meses de observação.

**Tabela 4.10: Níveis de severidade de fissuração em função da abertura**  
(Adaptado de Gaspar *et al.*, 2006)

0	1	2	3	4
≤ 0,1 mm	0,1 a 0,25 mm	0,25 a 1,0 mm	1,0 a 2,0 mm	≥ 2 mm
Fio de cabelo	Limiar da visibilidade	Visível, localizada. Não visível em fotografias (excepto em detalhes de pormenor)	Bem definida. Tenuemente visível em fotografia a 3 m da fachada	Efeitos estruturais. Facilmente visível em fotografia
Microfissuras		Fissuras		Fendas

Por outro lado, tanto na argamassa de referência assim como na argamassa com 15% de ARM, não foi observado qualquer indício de fissuração superficial, após inspecção visual durante 3 meses, tal como verificado por Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015).

Contrariamente ao sucedido no vector I, nenhuma das argamassas do vector II exibiu, após 3 meses de observação ocular, qualquer fissura, independentemente do tipo de cura a que foram sujeitas. Efectivamente, a redução do ligante permitiu inverter a tendência de aumento do módulo de elasticidade, bem como a de retracção das argamassas, induzidos pela incorporação de resíduos muito finos. A argamassa com 15% de ARM, apesar do considerável aumento da retracção, possui um módulo de elasticidade quase 35% inferior ao da argamassa de referência 1:4, o que permite que esta argamassa tenha a capacidade de absorver deformações sem que surjam fissuras.

Assim, é possível concluir, ainda que apenas de forma indicativa, visto as condições de aplicação utilizadas em laboratório diferirem das da sua eventual aplicação em obra, nomeadamente no que diz respeito à posição de aplicação e dimensão do suporte, que as argamassas do vector II, com ou sem adição de agregados reciclados, nas quais se fez reduzir a quantidade de ligante, são pouco susceptíveis à fissuração, em concordância com Silva *et al.* (2008), Braga *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016).



#### 4.3.2.4. Permeabilidade ao vapor de água

A água existente no revestimento, quer seja de construção ou que, eventualmente, se infiltre através das fissuras nos revestimentos ou ainda que seja absorvida pelos mesmos, não deve permanecer no seu interior. Adicionalmente, o vapor de água formado no interior das construções também deverá sair para o exterior. A permeabilidade ao vapor de água é, portanto, uma propriedade muito importante das argamassas, na medida em que um reboco com uma elevada permeabilidade ao vapor de água facilita a secagem do revestimento e impede a condensação de água na sua superfície, evitando problemas inerentes ao fenómeno das condensações interiores.

Por conseguinte, foi avaliado o desempenho das argamassas dos vectores I e II no que diz respeito à permeabilidade ao vapor de água. Os resultados deste ensaio são apresentados na Tabela 4.11 e no Anexo S.

Tabela 4.11: Permeabilidade ao vapor de água das argamassas do vector I e II

Argamassa	Permeabilidade (ng/m.s.Pa)	Desvio-padrão (ng/m.s.Pa)	Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 20 mm de argamassa (m)
Ref_1:4	17,52	0,24	0,21
M_1:4_15	17,21	0,40	0,22
B_1:4_20	15,67	0,48	0,24
Ref_1:5	24,64	0,16	0,15
M_1:5_15	22,44	1,45	0,17
Ref_1:6	27,63	0,21	0,13
B_1:6_20	22,06	0,19	0,17

No vector I, e como esperado, a introdução de 20% de ARB provoca uma diminuição de 11% na permeabilidade ao vapor de água. No entanto, a adição de 15% de ARM não influencia significativamente a permeabilidade das argamassas, pelo que estas apresentam uma libertação do vapor de água idêntica à da argamassa de referência. De facto, esta argamassa possui uma porosidade aberta semelhante à da de referência e um módulo de elasticidade cerca de 13% superior. Estas propriedades relacionam-se com o volume de vazios nas argamassas e podem explicar o ligeiro decréscimo na permeabilidade das argamassas com 15% de ARM. Por conseguinte, conclui-se que esta argamassa apresenta resultados bastante satisfatórios para esta propriedade.

Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012) e Farinha *et al.* (2015) também avaliaram esta propriedade, tendo verificado que a adição de resíduos muito finos é responsável pela diminuição da permeabilidade ao vapor de água, à semelhança do observado para a adição de 20% de ARB. Contudo, Jochem *et al.* (2013) concluíram que as argamassas produzidas com agregados reciclados com 24% de incorporação de muito finos possuem permeabilidades superiores às argamassas, com as mesmas adições, mas formuladas com agregados de britagem.

No vector II, para a análise dos resultados é necessário ter em consideração dois efeitos contrários, à semelhança do referido para outras propriedades. Como esperado, a redução da quantidade de cimento permite aumentar a permeabilidade das argamassas, tanto para as argamassas modificadas como para as de referência com menor teor de cimento. No entanto, para cada traço analisado, a introdução de 15% de ARM e 20% de ARB reduz a permeabilidade ao vapor de água, já que estas argamassas, como constatado nos ensaios do módulo de elasticidade, ultra-sons e porosidade aberta, apresentam compacidades superiores às respectivas argamassas de referência.

Contudo, a redução provocada pelo efeito de filler não foi suficiente para anular o efeito positivo da diminuição do teor de cimento, pelo que a adição de 15% de ARM e 20% de ARB permite obter resultados muito satisfatórios, pela produção de argamassas 28 e 25% mais permeáveis ao vapor de água do que a argamassa de referência ao traço 1:4.

Silva *et al.* (2008) concluíram que a adição de 10% de barro vermelho a argamassas de traço 1:6 permite torná-las mais permeáveis, à semelhança do que acontece neste estudo. Por outro lado, Braga *et al.* (2014) concluíram

que as argamassas com uma menor quantidade de cimento, nas quais se incorporou resíduos de betão, são semelhantes à argamassa de referência no que se refere à sua permeabilidade ao vapor de água. Farinha *et al.* (2016) também obtiveram valores próximos dos da argamassa de referência, para a argamassa modificada de traço 1:5 e apenas a redução do traço para 1:6, permitiu obter argamassas mais permeáveis.

#### 4.3.2.5. Envelhecimento acelerado

Com o intuito de avaliar a durabilidade das argamassas de revestimento em estudo, são realizados ensaios de carácter mecânico (aderência ao suporte) e de comportamento face à água (permeabilidade à água sob pressão) antes e após o envelhecimento acelerado. De seguida, são apresentados os resultados referentes a estes ensaios.

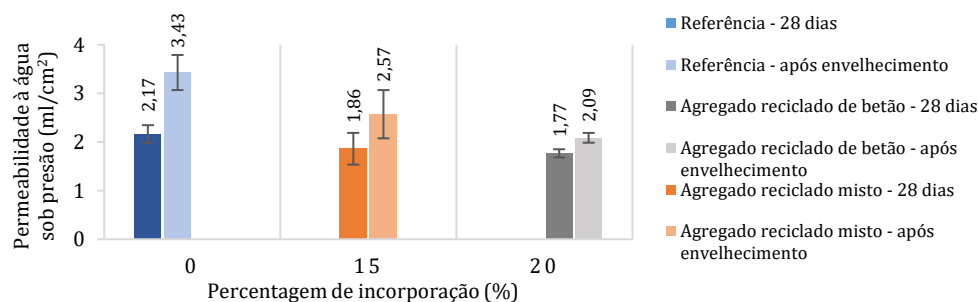
##### a) Aspecto visual

Como referido, não se observou qualquer fissura nos provetes de aplicação em tijolo ensaiados aos 28 dias, para ambos os vectores. Após o envelhecimento acelerado, apesar de se verificar a degradação da camada superficial das argamassas, causada pela sua lixiviação, nenhum dos revestimentos apresentou fissuras visíveis a olho nu.

##### b) Permeabilidade à água sob pressão

Os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água sob pressão, após 48 horas, são apresentados na Figura 4.46, na Figura 4.47 e no Anexo T. Esta propriedade foi estudada antes e após o envelhecimento acelerado.

A permeabilidade à água sob pressão, à semelhança de outras propriedades como a porosidade aberta ou a absorção de água por capilaridade, está relacionada com a estrutura porosa das argamassas. Por efeito de filler, as argamassas do vector I são menos susceptíveis à entrada de água. Desta forma, a diminuição da permeabilidade à água líquida nestas argamassas era um resultado previsível.



**Figura 4.46: Permeabilidade à água sob pressão das argamassas do vector I - aos 28 dias e após envelhecimento acelerado**

Antes e após o envelhecimento acelerado, é notória uma diminuição da permeabilidade à água sob pressão com a incorporação de muito finos. No entanto, as diferenças acentuam-se após o envelhecimento. A redução na permeabilidade da argamassa com ARM corresponde a 25% e, no caso da incorporação de ARB, atinge 39%, por comparação com a argamassa de referência. O envelhecimento acelerado a que as várias argamassas foram submetidas influenciou o seu comportamento à água no estado líquido. O envelhecimento provocou um aumento na permeabilidade à água sob pressão em todas as argamassas em estudo, sendo esse aumento mais significativo na argamassa de referência. No entanto, e como referido, a tendência de decréscimo da permeabilidade mantém-se para as argamassas modificadas.

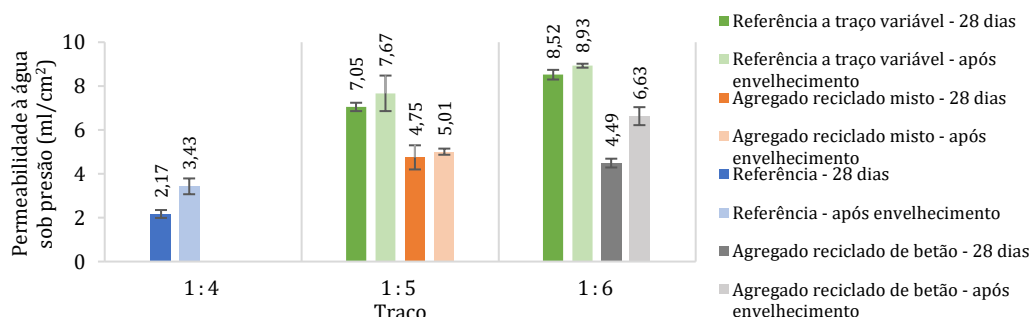
Os ciclos climáticos podem ser responsáveis por induzirem resultados contrários nas argamassas. Se, por um lado, a presença de água pode prolongar as reacções de hidratação do cimento por hidratar, tornando a argamassa mais compacta e diminuindo a sua permeabilidade à água no estado líquido. Por outro lado, e como se veio a

verificar, o aumento da permeabilidade à água sob pressão após o envelhecimento leva a crer que, apesar de não se ter observado fissuras, houve de facto alguma degradação do revestimento, que poderá ser responsável por este aumento de permeabilidade. A manter-se o padrão evidenciado pela observação binocular das amostras aos 90 dias de idade, resultantes de ensaios de compressão, alguma da eventual microfissuração existente poderá ter sido acentuada pelos ciclos climáticos, devido às variações térmicas e à formação de gelo.

Um decréscimo no valor da permeabilidade à água sob pressão é considerado positivo, na medida em que é um indicativo de que a água, no estado líquido, tem maior dificuldade em penetrar na argamassa. Assim, conclui-se que ambas as argamassas modificadas em estudo no vector I apresentam uma melhoria de desempenho.

Silva *et al.* (2009), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) concluíram que a adição de barro vermelho, vidro e loiça sanitária, para as percentagens estudadas, permite reduzir a permeabilidade à água sob pressão destas argamassas, aos 28 dias assim como após o envelhecimento acelerado. Adicionalmente, Farinha *et al.* (2015) registaram um aumento na permeabilidade após o envelhecimento. Contudo, Oliveira *et al.* (2013) referem que os ciclos climáticos permitiram melhorar o comportamento das argamassas, pelo que estas argamassas possuem uma menor permeabilidade à água líquida.

No que diz respeito ao vector II, a redução do teor de ligante é, de forma geral, responsável por um aumento da permeabilidade à água sob pressão. Por outro lado, e à semelhança do referido para outras propriedades, com a adição de agregados reciclados, por efeito de fíler, há um decréscimo na permeabilidade à água líquida, para cada traço. A incorporação de ARB e ARM nas percentagens estudadas não é suficiente para contrariar o efeito da redução do teor de cimento. Por conseguinte, as argamassas são mais porosas, facilitando a entrada de água para o seu interior.



**Figura 4.47: Permeabilidade à água sob pressão das argamassas do vector II - aos 28 dias e após envelhecimento acelerado**

A argamassa com 15% de ARM e traço 1:5, apresenta um aumento de 119 e 46% face ao valor obtido para a argamassa de referência, antes e após o envelhecimento, respectivamente. Já a argamassa com 20% de ARB e traço 1:6, mesmo possuindo uma menor quantidade de ligante, apresenta uma permeabilidade semelhante à da argamassa com 15% de ARM e traço 1:5, aos 28 dias. No entanto, após o envelhecimento, é a argamassa mais afectada pelos ciclos climáticos, registando um incremento de 43% no valor da sua permeabilidade.

No caso das argamassas com 15% de ARM, regista-se um ligeiro aumento da permeabilidade após o envelhecimento, que pode não ser representativo por se situar dentro do desvio-padrão aos 28 dias. Portanto, o prolongamento das reacções de hidratação do cimento parece ter equilibrado a tendência de aumento da microfissuração, potenciada pelos ciclos climáticos.

Farinha *et al.* (2016) referem que as reacções de hidratação permitiram que, após o envelhecimento acelerado, as

argamassas com menor teor de cimento e simultânea introdução de 10% de barro vermelho e 20% de loiça sanitária, estudadas por Silva *et al.* (2008) e Farinha *et al.* (2016), apresentem melhorias de desempenho, relativamente à argamassa de referência 1:4, ao evidenciarem menores permeabilidade à água sob pressão. Oliveira *et al.* (2015), por sua vez, obtiveram argamassas modificadas (de traço 1:5 e 20% de vidro) com uma permeabilidade superior.

Conclui-se, portanto, que as argamassas modificadas do vector II são consideravelmente mais susceptíveis à penetração de água, o que constitui uma tendência desfavorável e, como tal, estas argamassas possuem um pior comportamento para este parâmetro relativamente à argamassa de referência 1:4.

### c) Aderência ao suporte

A aderência ao suporte das várias argamassas em estudo também foi avaliada antes e após o envelhecimento acelerado e os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 4.12 e no Anexo U.

Idealmente, a rotura de uma argamassa deve ocorrer no seio do revestimento, o que corresponde a uma tipologia de rotura do tipo B. No entanto, e como se pode observar na Tabela 4.12, na maioria das argamassas em análise no âmbito do vector I, o mesmo não se verifica. De facto, apenas a argamassa de referência apresenta uma rotura no seio do revestimento e após o envelhecimento acelerado. De uma forma geral, aos 28 dias, na argamassa de referência os carotes apresentam um misto de rotura adesiva (A) com coesiva pelo revestimento (B). A argamassa com 20% de ARB também apresenta uma tipologia de rotura mista, mantendo-se a rotura adesiva (A), mas surgindo, ainda que com menor expressão, rotura coesiva pelo suporte (C). No caso da argamassa com 15% de ARM, apenas se observa roturas do tipo A.

**Tabela 4.12: Tipologia de rotura predominante de argamassas do vector I**

Argamassa	Tipologia da rotura predominante	Aos 28 dias		Após o envelhecimento acelerado		
		Aderência ao suporte (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Tipologia da rotura predominante	Aderência ao suporte (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
Ref_1:4	A/B	0,54	0,11	B	0,55	0,06
M_1:4_15	A	0,66	0,10	A/B	0,64	0,07
B_1:4_20	A/C	0,87	0,07	A	0,66	0,05
Ref_1:4	A/B	0,54	0,11	B	0,55	0,06
Ref_1:5	B	0,39	0,07	B	0,41	0,08
M_1:5_15	B	0,44	0,02	A/B	0,56	0,08
Ref_1:6	B	0,29	0,01	B	0,27	0,08
B_1:6_20	A/B	0,66	0,05	B	0,63	0,05

A - rotura adesiva; B - rotura coesiva pelo revestimento; C - rotura coesiva pelo suporte.

Contudo, e considerando que a introdução de finos, independentemente da sua composição, melhora a aderência, apesar de ambas as argamassas modificadas não apresentarem as tipologias de rotura consideradas mais favoráveis, o aparecimento da rotura adesiva é um indicativo de que a resistência à tracção das argamassas é superior à resistência da interface. O incremento nos valores da aderência, registados nas argamassas modificadas face à argamassa de referência, justifica-se pela melhoria da ligação entre o suporte e o revestimento, favorecida pela sucção de água e de finos da argamassa pelos poros do suporte.

Aos 28 dias, a argamassa com 15% de ARM possui valores de aderência 22% superiores aos da referência, enquanto a argamassa com 20% de ARB apresenta um aumento superior, de cerca de 61%. A aplicação dos ciclos climáticos, apesar de não influenciar a capacidade de aderência das argamassas de referência e com adição de ARM, poderá ter degradado significativamente a argamassa com 20% de ARB, pelas razões apontadas para o aumento da permeabilidade à água sob pressão e que se relacionam com a microfissuração das argamassas. Por conseguinte, estas argamassas apresentam, após o envelhecimento, um decréscimo da capacidade de aderência

para valores semelhantes aos observados na argamassa com 15% de ARM. Ainda que os ciclos climáticos não tenham tido grande influência na tensão de aderência das argamassas, com excepção da argamassa com 20% de ARB, por observação da Tabela 4.12, verifica-se que todas as argamassas alteraram a sua tipologia de rotura predominante após o envelhecimento.

Silva *et al.* (2009), Braga *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2013) e Farinha *et al.* (2015) avaliaram a aderência ao suporte das argamassas com diferentes percentagens de barro vermelho, betão, vidro e loiça sanitária. Todos os autores concluíram, aos 28 dias, que a adição dos referidos resíduos permite obter argamassas com uma maior capacidade de aderência, à semelhança do verificado neste estudo. À excepção de Braga *et al.* (2012), todos os autores avaliaram esta propriedade após o envelhecimento acelerado, tendo concluído que há um aumento da tensão de aderência, relacionado com a evolução das reacções de hidratação do cimento durante os ciclos de climáticos.

A redução do teor de cimento tem influência directa na resistência mecânica, implicando menores resistências à tracção das argamassas. Adicionalmente, a ligação entre o suporte e o revestimento é comprometida, já que existe uma quantidade menor de água, cimento e finos absorvida pelo suporte, enfraquecendo a ligação.

Posto isto, verifica-se que no âmbito do vector II, a introdução de 15% de ARM e 20% de ARB resulta numa melhoria da tensão de aderência das argamassas, dentro de cada traço. Contudo, no caso da adição de ARM, o efeito positivo da introdução do agregado reciclado não é suficiente para compensar o efeito da redução do teor de cimento. Assim sendo, a argamassa com 15% de ARM e traço 1:5 possui uma tensão de aderência cerca de 20% inferior à da argamassa de referência 1:4. Efectivamente, esta argamassa possui, aos 28 dias, uma resistência à tracção 56% inferior à da argamassa de referência, pelo que seria de esperar o aparecimento de uma rotura coesiva no seio do revestimento (B).

No entanto, para a argamassa com 20% de ARB, e apesar desta conter uma quantidade de cimento inferior à argamassa modificada com 15% de ARM, há um aumento da tensão de aderência face à argamassa de referência 1:4 em aproximadamente 20%. Conclui-se, portanto, que a quantidade de resíduos adicionada foi suficiente para compensar a redução no teor de cimento. A tipologia de rotura predominante, um misto de rotura adesiva e coesiva pelo revestimento (A/B), é concordante com a resistência à tracção, da mesma ordem de grandeza da argamassa de referência.

Como referido, a submissão das argamassas a ciclos climáticos pode influenciar o seu comportamento de formas distintas. Efectivamente, após o envelhecimento acelerado, há um aumento de 27% na tensão de aderência da argamassa com 15% de ARM, devido à presença de água nos ciclos de climáticos, que permite a hidratação do cimento não hidratado durante o período de cura. Por outro lado, à semelhança do referido para permeabilidade à água sob pressão, a fissuração provocada pelo envelhecimento nas argamassas com 20% de ARB mostrou ser preponderante, razão pela qual há um decréscimo da tensão de aderência assim como o aparecimento de apenas rotura coesiva pelo suporte. Ainda assim, a tensão de aderência continua a ser superior à da argamassa de referência ao traço 1:4.

Aos 28 dias, Silva *et al.* (2008) e Braga *et al.* (2014), ao introduzir barro vermelho e betão nas argamassas com redução do teor de cimento, verificaram que há um aumento na tensão de aderência, tal como acontece para as incorporações de 20% de ARB. Oliveira *et al.* (2015) e Farinha *et al.* (2016), no entanto, observaram uma tendência semelhante à registada para a adição de 15% de ARM e que consiste num decréscimo na capacidade de aderência destas argamassas, com a redução do teor de cimento. No entanto, em todos os estudos, há um aumento na tensão

de aderência das argamassas após o envelhecimento acelerado, permitindo que todas as argamassas modificadas possuam desempenhos superiores ou muito semelhantes ao obtido pela argamassa de referência ao traço 1:4, à semelhança do observado para a adição de ARB e ARM.

Em suma, conclui-se que todas as argamassas modificadas em estudo apresentam, antes e após o envelhecimento, melhorias de aderência face à argamassa de referência, com a excepção da argamassa M\_1:5\_15%, aos 28 dias.

### 4.3.3. Considerações finais

#### 4.3.3.1. Vector I – incorporação de muito finos

Importa agora analisar o desempenho global das argamassas modificadas, comparativamente à argamassa de referência, tendo em consideração os resultados obtidos e quando se introduz os seguintes agregados reciclados:

##### a. agregado reciclado de betão (ARB):

Com o aumento da percentagem de ARB, a diminuição da quantidade de água de amassadura para manter a **trabalhabilidade** é responsável pela diminuição da razão água / cimento das argamassas, pelo que se obtém argamassas menos porosas. Por efeito de filler, há um aumento da compacidade, que se reflecte no ligeiro incremento da **massa volúmica**, tanto no estado fresco como no endurecido. Se, por um lado, este aumento pode ser considerado negativo por constituir um acréscimo no peso próprio do revestimento, por outro, é um indicador de melhorias de desempenho ao nível da resistência mecânica e comportamento à água. De facto, a diminuição da porosidade nas argamassas modificadas com ARB é concordante com os consideráveis aumentos no **módulo de elasticidade dinâmico** e **velocidade de propagação de ultra-sons** assim como com a diminuição da **porosidade aberta**. Adicionalmente, a introdução de ARB provoca o aumento do **teor de ar incorporado** nas argamassas, que perde alguma importância no estado endurecido.

Ao nível da **resistência mecânica**, há um aumento muito substancial tanto de resistência à compressão como à tracção por flexão, especialmente aos 28 dias. Aos 90 dias, as argamassas continuam a possuir resistências muito superiores às da argamassa de referência, mas há um decréscimo nos valores, devido à microfissuração interna dos provetes, confirmada através de **observação binocular**.

O aumento no valor do módulo de elasticidade, observado para todas as argamassas modificadas, é um indicador de que as argamassas são mais rígidas e, como tal, têm uma maior dificuldade em se deformar sem fissurar, quando sujeitas a tensões, por exemplo, provocadas pela retracção por secagem. Adicionalmente, a adição destes agregados resultou num aumento substancial da sua **variação dimensional** aos 90 dias. Crê-se que a combinação destes dois factores foi responsável pelo aparecimento da fissura superficial que surgiu, aos 14 dias, nos provetes de tijolo e que, desta forma, aumentou a **susceptibilidade à fendilhação** das argamassas modificadas, uma das principais causas de degradação dos revestimentos. Por conseguinte, considera-se que as argamassas modificadas, com especial ênfase para a argamassa com 20% de ARB na sua constituição, apresentam um comportamento inferior ao da argamassa de referência para estes três parâmetros.

O comportamento à água, como referido, também é alterado significativamente com a incorporação de ARB. Ao nível da **absorção de água por capilaridade**, há um decréscimo no coeficiente de absorção de água, que mede a quantidade de água absorvida nos minutos iniciais e que reflecte a maior dificuldade de penetração da água no interior da argamassa. A **secagem** das argamassas modificadas não é alterada significativamente. No entanto, conclui-se que a introdução de ARB contribui para um aumento do tempo de secagem das argamassas. Quanto à

**permeabilidade ao vapor de água**, a introdução de 20% de ARB torna as argamassas mais compactas, dificultando a libertação do vapor de água.

Quanto à avaliação da durabilidade através do **envelhecimento acelerado**, conclui-se que os ciclos climáticos produzem efeitos maioritariamente negativos nestas argamassas. Contudo, mesmo após envelhecimento acelerado, as argamassas modificadas possuem uma **permeabilidade à água sob pressão** inferior à da argamassa de referência, já que a água tem mais dificuldade em penetrar e percolar no seu interior e há um aumento da **aderência ao suporte**, antes e após o envelhecimento.

#### **b. agregado reciclado misto (ARM):**

A introdução de ARM nas argamassas é responsável pelo aumento da **trabalhabilidade**. Até incorporações de 15%, há uma redução da razão a/c. No entanto, para incorporações de 20%, a tendência inverte-se. Ainda assim, todas as argamassas modificadas necessitam de menos água de amassadura do que a argamassa de referência.

O efeito de filler não foi suficiente para inverter a tendência de decréscimo conferida pela baixa baridade dos ARM e pelo **teor de ar incorporado**, bastante significativo para estas argamassas, pelo que há uma pequena diminuição nos valores das **massas volúmicas**. Apesar de permitir obter argamassas ligeiramente mais leves, com o aumento da percentagem de ARM, há um incremento na porosidade das argamassas, como se constatou no ensaio de **porosidade aberta**, ainda que este não seja considerado significativo. Contudo, a adição de ARM é responsável por melhores **resistências mecânicas**, ainda que não sejam atingidos os valores obtidos para a incorporação de ARB e por resultados bastantes satisfatórios no que diz respeito ao **módulo de elasticidade dinâmico**, registando-se inclusivamente, uma diminuição deste parâmetro para a incorporação de 20% de ARM. Juntamente com o ensaio de **ultra-sons**, confirma-se a menor compacidade das argamassas com o aumento da incorporação de ARM.

Apesar de a argamassa com 15% de ARM possuir maior **variação dimensional** do que a argamassa de referência, o facto de estas argamassas possuírem **módulos de elasticidade** menores do que os registados para a argamassa com 20% de ARB, permitiu que a argamassa conseguisse absorver as tensões provocadas pela sua retracção e se deformasse sem fissurar. Por conseguinte, não se considera que estas argamassas apresentem **elevada susceptibilidade à fendilhação**. No entanto, por **observação binocular**, observou-se microfissuras internas nos provetes, responsáveis por decréscimos nalgumas propriedades aos 90 dias de idade.

O comportamento à água também é melhorado, na medida em que todas as argamassas possuem coeficientes de **absorção de água por capilaridade** inferiores ao da argamassa de referência, pelas razões referidas e que se prendem com o aumento da porosidade das argamassas. Quanto à secagem, embora permaneça similar à da argamassa de referência, a introdução de ARM é responsável pelo aumento do tempo de **secagem**. A **permeabilidade ao vapor de água**, por seu lado, não é influenciada significativamente.

A **permeabilidade à água sob pressão** e a **aderência ao suporte** são parâmetros para os quais o desempenho das argamassas é melhorado com a incorporação de ARM. Os ciclos de envelhecimento parecem influenciar mais significativamente os resultados da permeabilidade, potenciando o aparecimento de fissuras, não observadas a olho nu e que contribuíram para o aumento da permeabilidade após o envelhecimento.

#### **4.3.3.2. Vector II – redução do teor de cimento**

Neste ponto, é avaliado o desempenho global das argamassas modificadas, nas quais se procedeu à redução do teor de ligante, com o intuito de estudar a viabilidade do uso dos ARB e ARM enquanto substitutos parciais do

cimento. Contudo, para este vector, optou-se por uma análise conjunta, já que estes agregados apresentam tendências semelhantes.

A redução do teor de cimento nas argamassas modificadas é responsável por um decréscimo na sua **trabalhabilidade**, uma vez que a diminuição na quantidade de água de amassadura não é suficiente para que a razão água / cimento também diminua. Este incremento na razão água / cimento, é um indício do aumento da porosidade destas argamassas, confirmado pelo ensaio de **porosidade aberta**. Efectivamente, com excepção da argamassa com 20% de ARB e traço 1:5, todas as argamassas possuem **massas volúmicas** inferiores e um volume de vazios interconectáveis superior ao da argamassa de referência ao traço 1:4, sendo essas diferenças mais representativa no caso do ARM. Como referido, esta redução na massa volúmica permite que os revestimentos possuam um menor peso próprio, reduzindo os esforços no suporte.

O **módulo de elasticidade dinâmico** das argamassas modificadas e os resultados do ensaio de **ultra-sons** demonstram que, de facto, estas argamassas são mais porosas, já que a introdução do ARM e ARB não é suficiente para contrariar o efeito da redução da quantidade de cimento. Ao formular argamassas modificadas com o traço 1:5 e 1:6, é possível obter revestimentos menos rígidos ou com uma rigidez semelhante à argamassa de referência ao traço 1:4. Desta forma, estas argamassas possuem uma maior capacidade de deformação, pelo que a sua **susceptibilidade à fendilhação** é diminuída. Apesar das argamassas com 15% de ARM e 20% de ARB possuírem **variações dimensionais** cerca de 52 e 11% superiores, relativamente à argamassa de referência, não se observou fissuras superficiais em nenhum dos revestimentos. De facto, a diminuição da quantidade de cimento permitiu evitar o surgimento de fissuração superficial, observada, no âmbito do vector I, para a argamassa com 20% de ARB e traço 1:4.

O teor de ar incorporado é superior nas argamassas modificadas (B\_1:6\_20% e M\_1:5\_15%), com especial expressão na argamassa com 15% de ARM, o que pode explicar a diminuição observada na resistência mecânica e aderência desta argamassa antes do envelhecimento. Efectivamente, apenas a argamassa com 20% de ARB e traço 1:5 apresenta melhorias de desempenho face à argamassa de referência, tanto no ensaio de **resistência à compressão** como na **resistência à tracção por flexão**. As restantes argamassas possuem menores resistências, tantos aos 28 como aos 90 dias, sendo esses decréscimos mais substanciais no caso da adição de ARM.

O comportamento à água também é afectado negativamente pela redução da quantidade de cimento, sobretudo nas argamassas com adição de ARM. A única excepção reside na argamassa com 20% de ARB e traço 1:5, em concordância com os resultados obtidos noutros ensaios. Neste caso, a argamassa possui um menor coeficiente de **absorção de água por capilaridade** do que a argamassa de referência ao traço de 1:4, pelo que esta argamassa se encontra mais protegida dos mecanismos de degradação. Contudo, verificou-se que esta argamassa é a única que apresenta uma **secagem** inferior à da argamassa de referência. Nas restantes argamassas modificadas, o tempo de secagem é inferior ou semelhante. A redução do teor de cimento, para a adição de 15% de ARM e 20% de ARB, permite obter argamassas com uma maior **permeabilidade ao vapor de água**, facilitando a secagem destes revestimentos e impedindo a condensação de água na sua superfície.

Ambas as argamassas modificadas possuem **permeabilidades à água sob pressão** superiores à da argamassa de referência, influenciadas negativamente pelo envelhecimento acelerado. Os ciclos climáticos afectam as argamassas de forma distinta no que se refere à **aderência** destas argamassas. Porém, após o envelhecimento, tanto a adição de ARB como ARM possuem um melhor desempenho na aderência ao suporte.



## **5. Conclusões e desenvolvimentos futuros**

### **5.1. Considerações finais**

Apesar da criação, em 2008, de legislação específica para a gestão dos resíduos de construção e demolição (Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de Março), Portugal ainda se encontra muito longe de cumprir a meta de 70% de reutilização ou reciclagem dos RCD em 2020, imposta pela UE. Contrariamente ao que sucede em vários países Europeus como a Dinamarca, a Alemanha, a Holanda ou o Reino Unido, que já apresentam taxas de reciclagem destes resíduos que permitem cumprir as metas preconizadas pela União Europeia, estima-se que a reciclagem dos RCD ronde 5% em Portugal (European Commission - DG ENV, 2011).

Neste sentido, o LNEC tem desenvolvido especificações técnicas sobre os RCD e respectivas aplicações, que contribuem para o cumprimento das metas definidas. Estas especificações focam-se, essencialmente, nos usos mais comuns no sector da construção civil para estes agregados reciclados, nomeadamente como agregados grossos em betões de ligantes hidráulicos e na utilização dos agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos, assim como em aterros e camadas de leito de infraestruturas de transporte. Contudo, a valorização da fracção fina destes agregados reciclados ainda não se encontra muito desenvolvida. Por conseguinte, a realização de trabalhos de investigação como este é de extrema importância e espera-se que contribua para a dissipação de dúvidas inerentes ao uso da fracção muito fina na formulação de argamassas de revestimento. Desta forma, é possível minimizar o consumo de recursos naturais e por outro, contribuir para o desenvolvimento de alternativas à utilização de cimento, fundamental ao sector da construção mas responsável por impactes ambientais muito significativos.

É fundamental promover o desenvolvimento de documentos normativos aplicáveis ao fabrico de argamassas com agregados reciclados na sua constituição e sua aplicação em obras correntes e que permitam, desta forma, promover a utilização da fracção fina. Quer seja pela incorporação de agregados reciclados muito finos em substituição da areia, quer pela simultânea redução da quantidade de cimento, a elaboração deste estudo, assim como de trabalhos de investigação nesta área, é indispensável ao aprofundamento do conhecimento técnico acerca desta matéria.

### **5.2. Conclusões gerais**

Para além das especificações da norma portuguesa NP EN 998-1 (2010), na qual é definido um conjunto mínimo de características que as argamassas pré-doseadas devem cumprir com vista à atribuição da marcação CE, para o bom comportamento global dos revestimentos exteriores, o LNEC recomenda alguns requisitos adicionais, referentes a aspectos não contemplados na norma portuguesa.

Ainda que o principal objectivo seja a implementação deste tipo de argamassa em obras correntes, são apresentados, na Tabela 5.1, valores indicativos de ensaios às argamassas de revestimento, de acordo com a referida norma portuguesa e as exigências complementares do LNEC, com o intuito de avaliar, ainda que a título indicativo, a adequabilidade destas argamassas ao seu uso enquanto revestimentos exteriores. Para tal, são também apresentados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3 os resultados dos ensaios realizados e procede-se à avaliação do desempenho das argamassas em estudo no âmbito dos vectores I e II, por comparação com a argamassa de referência ao traço de 1:4.

Os revestimentos de paredes devem possuir várias propriedades que permitam satisfazer as exigências funcionais que lhe são requeridas. Neste sentido, a compatibilidade física com o suporte deve ser assegurada e o revestimento deve aderir adequadamente e absorver os deslocamentos do mesmo, sem produzir concentrações

de tensões ou destacar. Os resultados do ensaio de aderência ao suporte são muito positivos, obtendo-se melhorias de comportamento para todas as argamassas.

**Tabela 5.1: Exigências de rebocos para edifícios novos**  
(Adaptado do Relatório 427/05 NRI, 2005)

Base de exigência	Característica / verificação	Especificação / recomendação
NP EN 998 - 1 (2010)	Resistência à compressão após 28 dias de idade (MPa)	CS I: 0,4 a 2,5 CS II: 1,5 a 5,0 CS III: 3,5 a 7,5 CS IV: $\geq 6$
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ )	W0: não especificado W1: $c \leq 0,40$ W2: $c \leq 0,20$
	Permeabilidade à água sob pressão ( $\text{ml}/\text{cm}^2$ )	$\leq 1$ após 48 horas
Exigências complementares do LNEC	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	$\leq 10$
	Retracção	Sem exigência (preferencialmente moderada)
	Resistência à tracção	Sem exigência (preferencialmente média)
	Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 0,010 m de reboco (m)	$S_d \leq 0,15$
	Resistência ao arrancamento	$\geq 0,3$ (MPa) ou rotura coesiva
	Permeabilidade à água sob pressão e aderência após ciclos climáticos	Sem redução significativa após ciclos

Todas as argamassas possuem resistências ao arrancamento superiores a 0,3 MPa, tanto antes como após o envelhecimento acelerado, ainda que nem sempre seja apresentada uma rotura do tipo coesiva pelo suporte, devido ao aumento da resistência à tracção das argamassas com adições de ARB e ARM, independentemente do traço analisado. Ainda que todas as argamassas possuam tensões de aderência dentro dos limites recomendados, destacam-se os incrementos de aderência registados para as argamassas com incorporação de ARB. Os ciclos climáticos demonstraram não ter uma influência significativa no comportamento das argamassas relativamente a esta propriedade, com excepção da argamassa com 20% de ARB e traço 1:4, que reduziu a sua capacidade de aderência após o envelhecimento acelerado e da argamassa com 15% de ARM e traço 1:5, que beneficiou do prolongamento das reacções de hidratação, potenciadas pelos ciclos de gelo - degelo, apresentando incrementos de aderência após os ciclos climáticos.

Para garantir a compatibilidade da argamassa com o suporte, o reboco deve possuir um módulo de elasticidade inferior ou igual ao do suporte. Por conseguinte, considera-se que as argamassas do vector I, ao apresentarem módulos de elasticidade muito elevados, são adequadas apenas para alguns tipos de suporte que apresentem também eles módulos de elasticidade elevados, tais como suportes em betão. As argamassas do vector II, por sua vez, não parecem ter restrições quanto ao suporte sobre o qual podem ser aplicadas, visto serem argamassas muito menos rígidas e se enquadrarem dentro dos limites recomendados pelo LNEC.

A impermeabilização da parede é outro factor fundamental, pelo que o revestimento deve limitar a quantidade de água que atinge o suporte. Neste sentido, a absorção de água por capilaridade e a capacidade de secagem das argamassas foram duas das propriedades avaliadas no presente estudo. Com excepção das argamassas com 15% de ARM menos ricas em cimento, as restantes argamassas possuem coeficientes de absorção de água semelhantes, no caso do vector II, ou muito inferiores à argamassa de referência ao traço 1:4, para o vector I. Estes resultados devem-se essencialmente ao efeito de fíler conferido pela adição dos agregados reciclados e que demonstrou ser mais significativo nos ARB. Ao nível da secagem, ainda que se registem algumas diferenças face ao observado para a argamassa de referência, estas não são consideradas significativas.

A norma portuguesa NP EN 998 - 1 (2010) define limites para a absorção de água por capilaridade e, apesar de todas as argamassas do vector I possuírem coeficientes de absorção de água relativamente baixos e inferiores ao da argamassa de referência 1:4, todas as argamassas deste estudo pertencem à categoria W0, na qual não é especificado

qualquer coeficiente. Contudo, as argamassas com adição de ARB e traço 1:4 possuem coeficientes próximos dos necessários para serem considerados de categoria W1. Esta norma define ainda o limite de 1 ml/cm<sup>2</sup> para a permeabilidade à água sob pressão, como forma de garantir a impermeabilização da zona não fendilhada, ainda que nenhuma das argamassas em estudo cumpra o valor limite apontado pela norma. Porém, importa referir que este valor se refere a argamassas aplicadas em monocamada e não a revestimentos correntes, como é o caso das argamassas em estudo. Os revestimentos em monocamada, por possuírem apenas uma camada e actuarem como substitutos dos rebocos correntes que, em geral, possuem duas ou três camadas com funções distintas, têm de desempenhar as mesmas funções, com menos camadas e uma espessura total inferior. Desta forma, as exigências para estes revestimentos são superiores para que os rebocos possuam desempenhos semelhantes.

**Tabela 5.2: Comparação do desempenho das argamassas modificadas pela adição de ARM com a argamassa de referência**

Ensaio	Ref_1:4	Vector I						Vector II				
		M_1:4_10		M_1:4_15		M_1:4_20		M_1:5_15		M_1:6_15		
Exigência de água (razão a / c)	1,12	0,97	↘ -13%	0,96	↘ -14%	1,00	↘ -11%	1,17	↔ 5%	1,43	↗ 28%	
Massa volúmica estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1952	1862	↘ -5%	1858	↘ -5%	1908	↘ -2%	1884	↘ -4%	1845	↘ -6%	
Massa volúmica no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> ) - 28 dias	1836	1822	↘ -1%	1819	↘ -1%	1827	↘ -1%	1773	↘ -3%	1697	↘ -8%	
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) - 28 dias	11,0	13,3	↗ 21%	11,9	↔ 8%	10,6	↘ -4%	7,28	↘ -34%	4,08	↘ -63%	
Ultra-sons – método indirecto (m/s) - 28 dias	2345	2431	↔ 4%	2349	↔ 0%	2307	↘ -2%	1927	↘ -18%	1585	↘ -32%	
Resistência à compressão (MPa) - 28 dias	4,17	8,79	↗ 111%	8,32	↗ 100%	7,77	↗ 86%	3,75	↔ -10%	2,19	↘ -48%	
Resistência à tracção por flexão (MPa) - 28 dias	1,49	2,96	↗ 99%	3,04	↗ 104%	2,60	↗ 75%	0,65	↘ -56%	0,41	↘ -73%	
Absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	0,87	0,51	↘ -41%	0,57	↘ -35%	0,72	↘ -17%	1,06	↗ 22%	1,51	↗ 74%	
Porosidade aberta (%)	22,09	21,68	↘ -2%	22,40	↔ 1%	22,74	↔ 3%	22,41	↔ 1%	23,53	↔ 7%	
Teor de ar incorporado (%)	7,13	NA	-	13,88	↗ 95%	NA	-	14,75	↗ 107%	NA	-	
Variação dimensional (%)	-0,0542	NA	-	-0,0785	↗ 45%	NA	-	-0,0821	↗ 51%	NA	-	
Susceptibilidade à fendilhação	Não fendilhou	NA	-	Não fendilhou	↔	NA	-	Não fendilhou	↔	NA	-	
Permeabilidade ao vapor de água (ng/m.s.Pa)	17,52	NA	-	17,21	↔ -2%	NA	-	22,44	↗ 28%	NA	-	
Sem envelhecimento acelerado	Permeabilidade à água sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )	2,17	NA	-	1,86	↘ -14%	NA	-	4,75	↗ 119%	NA	-
	Aderência ao suporte (MPa)	0,54	NA	-	0,66	↗ 22%	NA	-	0,44	↘ -18%	NA	-
Após envelhecimento acelerado	Permeabilidade à água sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )	3,43	NA	-	2,57	↘ -25%	NA	-	5,01	↗ 46%	NA	-
	Aderência ao suporte (MPa)	0,55	NA	-	0,64	↗ 16%	NA	-	0,56	↗ 2%	NA	-

**Legenda:**

**verde** - traduz uma melhoria de desempenho relativamente à argamassa de referência;

**cinzento** - indica que a argamassa modificada apresenta um desempenho inferior (até 10%) face à argamassa de referência e, como tal, pouco significativo e considerado equivalente ao da argamassa de referência;

**vermelho** - indica que a argamassa modificada apresentou um desempenho inferior (em mais de 10%) ao da argamassa de referência;

**NA** - parâmetro não avaliado.

Quanto maior a permeabilidade ao vapor de água de um revestimento, mais facilmente se procede à libertação do vapor de água que se forma no interior dos edifícios ou da água que penetra nas construções. As diferenças de desempenho obtidas face à argamassa de referência ao traço 1:4 não são muito significativas, registando-se inclusivamente uma melhoria de desempenho para as argamassas com um menor teor de cimento. Assim,

considera-se que a permeabilidade ao vapor de água não foi comprometida pela adição dos agregados reciclados. No entanto, as argamassas estudadas no vector II beneficiaram da redução do teor de cimento e possuem espessuras da camada de ar equivalente inferiores à da argamassa de referência.

**Tabela 5.3: Comparação do desempenho das argamassas modificadas pela adição de ARB com a argamassa de referência**

Ensaio	Ref_1:4	Vector I						Vector II				
		B_1:4_10		B_1:4_15		B_1:4_20		B_1:5_20		B_1:6_20		
Exigência de água (razão a / c)	1,12	1,01	↘ -10%	0,99	↘ -12%	0,96	↘ -14%	1,20	↔ 7%	1,43	↗ 28%	
Massa volúmica estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1952	1973	↔ 1%	1980	↔ 1%	1982	↔ 2%	1968	↔ 1%	1906	↘ -2%	
Massa volúmica no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> ) - 28 dias	1836	1871	↔ 2%	1891	↔ 3%	1890	↔ 3%	1837	↔ 0%	1809	↘ -1%	
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) - 28 dias	11,01	14,1	↗ 28%	15,4	↗ 40%	15,2	↗ 38%	10,84	↘ -2%	9,08	↘ -18%	
Ultra-sons - método indirecto (m/s) - 28 dias	2345	2570	↔ 10%	2596	↗ 11%	2659	↗ 13%	2431	↔ 4%	2041	↘ -13%	
Resistência à compressão (MPa) - 28 dias	4,17	5,99	↗ 44%	12,06	↗ 189%	12,83	↗ 208%	4,94	↗ 18%	3,49	↘ -16%	
Resistência à tracção por flexão (MPa) - 28 dias	1,49	2,03	↗ 36%	2,67	↗ 79%	3,54	↗ 138%	1,54	↗ 3%	1,15	↘ -23%	
Absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	0,87	0,56	↘ -36%	0,52	↘ -40%	0,47	↘ -46%	0,81	↘ -7%	0,97	↗ 11%	
Porosidade aberta (%)	22,09	20,51	↘ -7%	20,50	↘ -7%	19,77	↘ -11%	21,07	↘ -5%	22,33	↔ 1%	
Teor de ar incorporado (%)	7,13	NA	-	NA	-	8,88	↗ 25%	NA	-	10,00	↗ 40%	
Variação dimensional (retracção)	-0,0542	NA	-	NA	-	-0,0894	↗ 65%	NA	-	-0,0600	↗ 11%	
Susceptibilidade à fendilhação	Não fendilhou	NA	-	NA	-	Fendilhou	↘	NA	-	Não fendilhou	↔	
Permeabilidade ao vapor de água (ng/m.s.Pa)	17,52	NA	-	NA	-	15,67	↘ -11%	NA	-	22,06	↗ 26%	
Sem envelhecimento acelerado	Permeabilidade à água sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )	2,17	NA	-	NA	-	1,77	↘ -18%	NA	-	4,49	↗ 107%
	Aderência ao suporte (MPa)	0,54	NA	-	NA	-	0,87	↗ 61%	NA	-	0,66	↗ 22%
Após envelhecimento acelerado	Permeabilidade à água sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )	3,43	NA	-	NA	-	2,09	↘ -39%	NA	-	6,63	↗ 93%
	Aderência ao suporte (MPa)	0,55	NA	-	NA	-	0,66	↗ 20%	NA	-	0,63	↗ 15%

**Legenda:**

**verde** - traduz uma melhoria de desempenho relativamente à argamassa de referência;  
**cinzento** - indica que a argamassa modificada apresenta um desempenho inferior (até 10%) face à argamassa de referência e, como tal, pouco significativo e considerado equivalente ao da argamassa de referência;  
**vermelho** - indica que a argamassa modificada apresentou um desempenho inferior (em mais de 10%) ao da argamassa de referência;  
**NA** - parâmetro não avaliado.

Os elevados módulos de elasticidade das argamassas modificadas em estudo no vector I, bem como os incrementos na retracção das mesmas, constituem as propriedades que mais afectaram negativamente o desempenho destas argamassas, com especial ênfase na formulação com 20% de ARB e traço 1:4. A susceptibilidade à fendilhação é influenciada por um conjunto de características das argamassas, nomeadamente o seu módulo de elasticidade dinâmico, a sua resistência à tracção e a sua retracção. A interacção destas propriedades resulta numa maior ou menor probabilidade de ocorrência de fissuração nas argamassas.

A confirmar-se a tendência de fissuração da argamassa com 20% de ARB e traço 1:4, poderá estar comprometida a capacidade de impermeabilização do reboco, facilitando a penetração de água e de outros agentes que, desta forma, reduzem a durabilidade não só do revestimento como do próprio suporte, para além das questões estéticas

inerentes ao aparecimento de fissuração. Porém, as argamassas de revestimento correntes são aplicadas em várias camadas distintas, pelo que as eventuais fissuras que possam surgir não se propagam geralmente entre camadas e, como tal, a água tem mais dificuldade em atingir o suporte. Neste sentido, seria importante avaliar com maior detalhe o comportamento à fissuração destas argamassas, bem como a influência das condições de cura, visto apenas se ter observado uma fissura no provete sujeito às condições de cura mais desfavoráveis. No que diz respeito às restantes argamassas, nenhuma revelou propensão para o desenvolvimento de fissuras.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico, nenhuma das argamassas modificadas do vector I nem a argamassa de referência cumprem o valor sugerido (inferior a 10 GPa), ainda que a incorporação de 20% ARM permita produzir argamassas com um módulo de elasticidade próximo do recomendado. Contudo, ao avaliar-se a redução do teor de ligante pela simultânea adição de ARB e ARM, foi possível obter argamassas que, de uma forma geral, possuem módulos de elasticidade inferiores ou muito próximos do sugerido para as argamassas de revestimento.

Relativamente à resistência mecânica, a norma portuguesa NP EN 998-1 (2010) define classes de resistência à compressão aos 28 dias para argamassas pré-doseadas de revestimento. Todas as argamassas do vector I, independentemente do resíduo incorporado, podem ser incluídas na categoria CS IV ( $\geq 6$  MPa), categoria correspondente à máxima resistência. As restantes argamassas, analisadas no âmbito do vector II, enquadram-se em categorias diferentes consoante o traço. Para o traço 1:6 e incorporações de 15% de ARM e 20% de ARB, as argamassas pertencem à classe de compressão CS II, enquanto as restantes, formuladas com o traço 1:5, se inserem na categoria CS III, à semelhança da argamassa de referência ao traço de 1:4. Apesar da diminuição na classe de resistência das argamassas com o menor teor de ligante, a classe CS II adequa-se ao seu desempenho enquanto argamassas não-estruturais, como é o caso das argamassas de revestimento.

A separação dos diferentes resíduos no local onde foram gerados, bem como a identificação dos potenciais contaminantes deve ser realizada, de forma a evitar a contaminação da fracção inerte e assegurar uma elevada qualidade do material reciclado. Também a demolição selectiva pode contribuir para uma separação eficaz dos diferentes resíduos, bem como para a remoção de alguns contaminantes. Assim, ao avaliar o comportamento das argamassas com adição de agregados reciclados com composições distintas, seria de esperar que se obtivesse resultados diferentes consoante o agregado incorporado. As diferentes técnicas de processamento a que os RCD são sujeitos podem contribuir para a melhoria da qualidade dos agregados reciclados, pela eliminação de materiais contaminantes e de substâncias perigosas. Neste sentido, esperava-se que o agregado reciclado de betão e mais concretamente a fracção infra 0,149 mm (ARB) constituísse um agregado de melhor qualidade.

Efectivamente, a argamassa com 20% de ARB apresenta melhorias mais significativas do que a argamassa com 15% de ARM, em particular na resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, permeabilidade à água sob pressão e aderência ao suporte. Contudo, o aparecimento de fissuras levanta dúvidas sobre uma propriedade importante dos revestimentos, a sua susceptibilidade à fendilhação. Como tal, conclui-se que argamassa modificada com melhor desempenho, no âmbito do vector I, é a argamassa com 15% de ARM e traço 1:4 por, à excepção da variação dimensional, apresentar resultados superiores aos da argamassa de referência. Por conseguinte, a utilização do agregado reciclado misto, infra 0,149 mm e na percentagem estudada, em argamassas de revestimento é viável, ainda que este possua uma quantidade superior de materiais considerados contaminantes.

Assim, seria de esperar que as argamassas do vector II com a adição de 20% de ARB beneficiassem da redução do

teor de cimento, por um lado e que possuísem valores satisfatórios, por outro, devido ao efeito de filler e à existência de material cimentício por hidratar nos agregados reciclados. Efectivamente, e embora a redução do cimento tenha sido superior na argamassa com ARB, pela produção de argamassas com o traço de 1:6, esta argamassa modificada possui um comportamento superior à argamassa com 15% de ARM e traço de 1:5. O balanço entre o efeito da redução do teor de cimento e o efeito da introdução de finos permitiu que a argamassa com ARB apresentasse um módulo de elasticidade inferior ao da argamassa de referência e uma retracção aceitável, não havendo indício de surgimento de fissuras. As perdas de resistência também não são preocupantes tendo em consideração o campo de aplicação destas argamassas. O comportamento à água no estado líquido revelou ser um dos parâmetros mais afectados, especialmente no que diz respeito à permeabilidade à água sob pressão. A argamassa com 15% de ARM e traço 1:5, por sua vez, apresenta maiores decréscimos de desempenho na absorção de água por capilaridade assim como na permeabilidade à água sob pressão, antes do envelhecimento acelerado, e na variação dimensional e aderência ao suporte, ainda que nesta última propriedade os valores obtidos estejam dentro dos limites aconselhados pelo LNEC.

Face aos resultados obtidos e a título conclusivo, considera-se que os objectivos gerais desta dissertação foram alcançados, na medida em que as argamassas modificadas com melhor desempenho e, como tal, estudadas com mais detalhe, evidenciam melhorias significativas em muitos dos ensaios realizados neste estudo, tanto no vector I como no vector II. Estes resultados realçam a necessidade de continuar a estudar a influência dos agregados finos provenientes de centrais de reciclagem de RCD nestas e noutras propriedades das argamassas que ficaram por estudar, no sentido de tornar possível a sua aplicação em argamassas correntes enquanto substitutos da areia e do cimento.

### **5.3. Propostas de desenvolvimentos futuros**

Concluiu-se que a introdução da parcela muito fina dos dois agregados reciclados de RCD em estudo permite melhorar, e em alguns dos parâmetros estudados de forma muito significativa, o desempenho das argamassas. No caso do ARB possibilita, inclusivamente, a redução do teor de cimento, sem abdicar significativamente do seu desempenho. Contudo, há propriedades como a susceptibilidade à fendilhação, que carecem de uma análise mais pormenorizada e ainda outros aspectos não avaliados nesta investigação. Neste sentido, seria importante continuar a estudar e a avaliar o comportamento das argamassas com incorporação de agregados finos provenientes de centrais de reciclagem de RCD, promovendo o conhecimento científico das mesmas e contribuindo para a sustentabilidade no sector da construção civil e para o desenvolvimento da indústria da reciclagem. Assim, são listadas algumas sugestões de estudos futuros que se considera terem um elevado potencial de desenvolvimento:

- estudo mais aprofundado do comportamento à fissuração das argamassas com agregados reciclados;
- avaliação da durabilidade das argamassas, pela realização de ensaios complementares aos efectuados neste estudo (gelo / degelo; ataque de cloretos e ataque de sulfatos);
- estudo do desempenho das argamassas com incorporação de agregados reciclados muito finos provenientes de centrais de reciclagem de RCD como substitutos da areia, utilizando outros ligantes;
- substituição contínua da curva granulométrica da areia por agregados finos de RCD e simultânea adição de agregados muito finos de RCD (nas percentagens óptimas determinadas no âmbito desta dissertação e no estudo de Roque (s.d.));
- estudo da incorporação de agregados reciclados de RCD em argamassas de assentamento;
- avaliação da influência das condições de cura no desempenho das argamassas;
- perceber as razões da evolução negativa das propriedades mecânicas.

## Referências bibliográficas

**Amin, A. F. M. S.; Hasnat, A.; Khan, A. H., Ashiquzzaman, M.;** *Residual cementing property in recycled fines and coarse aggregates: occurrence and quantification*; Journal of Materials in Civil Engineering, V. 28 (4), 2016;

**Angelim, R.R.; Angelim, S.C.M., Carasek H.;** *Influência da adição de finos calcários, siliciosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos*, V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Junho 2003, pp. 401-416;

**Angulo, S.C.;** *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*; Dissertação de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005, 236 p.;

**Angulo, S.C.;** *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*; Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000, 172 p.;

**APA;** *Resíduos de construção e demolição*, Agência Portuguesa do Ambiente, 2015. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283> [Consultado em: Outubro 2015];

**Ashiquazzaman, M; Hossen, Sk. B.;** *Cementing property evaluation of recycled fine aggregate*; International Referreed Journal of Engineering and Science, V. 2, 2015, pp. 63-68;

**Antony, J., M; Nair, D.;** *Roof tile powder as a partial replacement to cement in masonry mortar*; Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ), V. 3, N. 2, 2016;

**Bianchini, G.; Marrocchino, E.; Tassinari, R.; Vaccaro, C.;** *Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal*; Waste Management, V. 25, 2005, pp. 149-159;

**Braga, M.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Incorporation of fine concrete aggregates in mortars*; Construction and Building Materials, V. 36, 2012, pp. 960-968;

**Braga, M.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates*; Materials and Structures, V. 47, 2014, pp. 171-182;

**Corinaldesi, V.; Moriconi, G.;** *Behavior of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate*; Construction and Building Materials, V. 23, 2009, pp.289-294;

**Etzeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M.;** *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*; Cement and Concrete Research, V. 37, 2007, pp. 735-742;

**European Commission (DG ENV);** *Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – SR1. Final Report Task 2*; February 2011, 240 p.;

**European Comission;** *Construction and demolition waste (CDW)*, Outubro 2015. Disponível em: [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm) [Consultado em: Outubro 2015];

**Eurostat;** *Waste statistics*, September 2015. Disponível em: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics) [Consultado em: Outubro 2015];

**Evangelista L.; Brito, J. de;** *A utilização de agregados finos reciclados de Resíduos de Construção e Demolição no fabrico de betão: Levantamento do estado da arte*, 2013, 12 p.;

**Evangelista L.; Brito, J. de;** *Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates*; *Cement & Concrete Composites*, V. 29, 2007, pp. 397-401;

**Farinha, C.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Incorporation of fine sanitary are aggregates in coating mortars*; *Construction and Building Materials*, V. 83, 2015, pp. 194-206;

**Farinha, C.; Brito, J. de; Veiga, R.; Lucas, J.;** *Reduction of cement content in renderings with fine sanitary ware aggregates*; *Materials and Structures*, V. 49, 2016, pp. 1605-1618;

**Freedonia;** *World Cement*, Industry Study with Forecasts for 2019 & 2024, Study nº 3303: The Freedonia Group; August 2015, 492 p.;

**Freedonia;** *World Construction Aggregates*, Industry Study with Forecasts for 2017 & 2022, Study nº 3038: The Freedonia Group; December 2013, 418 p.;

**Gaspar, P.; Flores-Colen, I.; Brito, J. de;** *Técnicas de diagnóstico e classificação de fissuração em fachadas rebocadas*; 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios - PATORREB, Porto, Portugal, 2006;

**Jackiewicz-Rek; Zalegowski, K.; Garbacz, A.; Bissonnette, B.;** *Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers*; *Procedia Engineering*, V. 108, 2015, pp. 681-687;

**Jochem, L.D.;** *Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2012, 221 p.;

**Jochem, L.D.; Rocha, J.C.; Cheriaf, M.;** *Estudo comparativo entre argamassas de revestimento com agregado reciclado de RCD e com agregado de britagem*; Encontro Latino-americano de edificações e comunidades sustentáveis, Curitiba, Paraná, 2013;

**Jochem, L.D.; Rocha, J.C.; Cheriaf, M.;** *Mitos e verdades sobre o efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos e argamassas de cimento produzidas em São Paulo*; I Conferência Latino-americana de construção sustentável, X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, São Paulo, Brasil, 2004;

**Ledesma, E.F.; Jiménez, J.R.; Aysuso, J.; Fernández, J.M.; Brito, J. de;** *Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – Part-I: ceramic masonry waste*; *Journal of Cleaner Production*, V. 87, 2015, pp. 692-706;

**Ledesma, E.F.; Jiménez, J.R.; Fernández, J.M.; Galvín, A.P.; Agrela F.; Barbudo, A.;** *Properties of Masonry Mortars Manufactured with Fine Recycled Concrete Aggregates*; *Construction and Building Materials* V. 71, 2014, pp. 289–298;



**Leite, M.; Molin, D.;** *Avaliação da actividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D*; *Sitentibus*, n.º 26, 2002, pp. 111-130;

**LNEC (NRI);** *Regras para a concessão de documentos de aplicação a revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento*; Relatório 427 / 05 – NRI. LNEC, Lisboa, Dezembro de 2005;

**LNEC – E 471;** *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. LNEC, Lisboa, Dezembro de 2009, 8 p.

**LNEC – E 472;** *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central*. LNEC, Lisboa, Dezembro de 2009, 4 p.

**LNEC – E 473;** *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*. LNEC, Lisboa, Dezembro de 2009, 4 p.

**LNEC – E 474;** *Guia para a utilização de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte*. LNEC, Lisboa, Dezembro de 2009, 4 p.

**Martínez, I.; Etxeberria, M.; Pavón, E.; Díaz, N.;** *A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in aggregate in masonry mortars*; *Construction and Building Materials*, V. 49, 2013, pp. 384-392;

**Miranda, L.F.R.; Selmo, S.M.S.;** *CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties*; *Construction and Building Materials*, V. 20, 2006<sup>a</sup>, pp. 615-624;

**Miranda, L.F.R.; Selmo, S.M.S.;** *CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 µm under accelerated aging performance*; *Construction and Building Materials*, V. 20, 2006<sup>b</sup>, pp. 625-633;

**Neville, A. M.;** *Properties of Concrete*; 4<sup>th</sup> edition, Pearson Education Limited, England, 1995;

**Oliveira, R.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Incorporation of fine glass aggregates in rendering*; *Construction and Building Materials*, V.44, 2013, pp. 329-341;

**Oliveira, R.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Reduction of the cement content in renderings with fine glass aggregates*; *Journal of Cleaner Production*, V. 95, 2015, pp. 75-88;

**Pereira, C.;** *Resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015, 97 p.;

**Pinheiro, M.D.;** *Ambiente e construção sustentável*, Instituto do Ambiente, 2006, 240 p.;

**Poon, C.; Qiao, X. C.; Chan, D.;** *The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base*; *Waste Management*, V. 26, 2006, pp. 1166-1172;

**Rodrigues, F.;** *Caracterização de agregados finos reciclados provenientes de centrais de reciclagem Portuguesas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011, 146 p.;

**Rodrigues, F.; Carvalho, M. T.; Evangelista, L.; Brito, J. de;** *Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants*; Journal of Cleaner Production, V. 52, 2013, pp. 438-435;

**Roque, S.;** *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes de centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição - Reciclagem de agregados*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, s.d.;

**Silva, J.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement with fine ceramics in rendering mortars*; Materials and Structures, V. 41, 2008, pp. 1333-1344;

**Silva, J.; Brito, J. de; Veiga, R.;** *Incorporation of fine ceramics in mortars*; Construction Building Materials, V. 23, 2009, pp. 556-564;

**Silva, L.;** *Possibilidades de utilização de agregados de resíduos de construção e demolição na construção de edifícios correntes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008, 68 p.;

**Silva, R.V.; Brito, J. de; Dhir, R.K.;** *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*; Construction and Building Materials, V. 65, 2014, pp. 201-217;

**Veiga, M.R.;** *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Maio de 1998;

**WBCSD/IEA;** *Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050*; World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)/International Energy Agency (IEA); 2009, 36 p.;

**Zhao, Z.; Remond, S.; Damidot, D.; Xu, W.;** *Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars*; Construction and Building Materials, V. 81, 2015, pp. 179-186.

## **Legislação**

**Decreto-Lei n.º 178/2006**, de 5 de Setembro, Diário da República, 1ª série – N.º 171 – 5 de Setembro de 2006;

**Decreto-Lei n.º 46/2008**, de 12 de Março, Diário da República, 1ª série – N.º 51 – 12 de Março de 2008;

**Decreto-Lei n.º 73/2011**, de 17 de Junho, Diário da República, 1ª série – N.º 116 – 17 Junho de 2011;

**Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 19 de Novembro de 2008, Jornal Oficial da União Europeia;

## **Normas / Especificações de ensaio**

**Cahier 2669-4**, Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation, *Modalités d'essais*, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1993;

**EN 1015-1**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*, European Committee for Standardization (CEN), 1998;

**EN 1015-3**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, European Committee for Standardization (CEN), 1999;

**EN 1015-6**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 1998;

**EN 1015-7**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 1998;

**EN 1015-8**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 1999;

**EN 1015-10**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 1999;

**EN 1015-11**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 1999;

**EN 1015-12**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*, European Committee for Standardization (CEN), 2000;

**EN 1015-18**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, European Committee for Standardization (CEN), 2002;

**EN 1015-21**, European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates*, European Committee for Standardization (CEN), 2002;

**FE Pa 43**, Ficha de ensaio, *Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 2010;

**NP EN 998 – 1**, European Standard, *Especificações de argamassas para alvenarias – Parte 1: Argamassas em rebocos interiores e exteriores*, European Committee for Standardization (CEN), 2010;

**NP EN 1015-19**, European Standard, *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria – Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2008;

**NP EN 14146**, European Standard, *Métodos de ensaio de argamassas para pedra natural: Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2006;

**NP EN 1744-1**, European Standard, *Ensaio para determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte I: análise química*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2009;

**NP EN 1936**, European Standard, *Métodos de ensaio de argamassas para pedra natural: Determinação de massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2008.

## Anexos – Resultados da campanha experimental

### Anexo A: Argamassas da segunda e terceira fases experimentais

Fase experimental	Vector	Argamassa	Resíduo incorporado	Traço (volume)	% substituição
2ª fase	I e II	REF_1:4	-	1:4	0
	I e II	M_1:4_Y	ARM	1:4	Y
	I e II	B_1:4_Y	ARB	1:4	Y
	II	REF_1:5	-	1:5	0
	II	M_1:5_Y*	ARM	1:5	Y*
	II	B_1:5_Y*	ARB	1:5	Y*
	II	REF_1:6	-	1:6	0
	II	M_1:6_Y*	ARM	1:6	Y*
3ª fase	I e II	REF_1:4	-	1:4	0
	I e II	M_1:4_Y*	ARM	1:4	Y*
	I e II	B_1:4_Y*	ARB	1:4	Y*
	II	REF_1:X*	-	1:X*	0
	II	M_1:X*_Y*	ARM	1:X*	Y*
	II	B_1:X*_Y*	ARB	1:X*	Y*

Y\* corresponde ao valor da percentagem de substituição da areia por muito finos de agregados de RCD, para a qual se obteve o melhor desempenho na segunda fase experimental do vector I; X\* diz respeito ao traço da argamassa que obteve melhores resultados na segunda fase experimental do vector II.

### Anexo B: Número e tipo de provetes por ensaio

Ensaio	Tipo de provete	Nº de provetes por argamassa	Nº de argamassas	Nº total de provetes
Consistência por espalhamento	Cone truncado	3	13	39
Massa volúmica no estado fresco	Prisma	6	13	78
Massa volúmica aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico, ultra-sons, resistência à tracção por flexão e à compressão, porosidade aberta e observação binocular				
Absorção de água por capilaridade e secagem	Semi-prisma	3	13	39
Susceptibilidade à fendilhação	Aplicação em tijolo	3	7	21
Teor de ar incorporado	Cilindro	2	7	14
Varição dimensional (retracção)	Prisma	3	7	21
Permeabilidade ao vapor de água	Disco	2	7	14
Permeabilidade à água sob pressão (sem envelhecimento acelerado)	Aplicação em tijolo	2	7	14
Aderência ao suporte (sem envelhecimento acelerado)	Aplicação em tijolo	2	7	14
Envelhecimento acelerado (aderência ao suporte e permeabilidade ao vapor de água)	Aplicação em tijolo	2	7	14

### Anexo C: Volume dos provetes por ensaio

Ensaio	Provete	Volume (dm³)
Massa volúmica aparente	Cilindro	$V = \pi \times 0,435^2 \times 0,845 = 0,500$
Consistência por espalhamento	Cone truncado	$V = \pi \times ((1 + 0,7)/2)^2 \times 0,6 = 1,362$
Massa volúmica no estado fresco	Cilindro	$V = \pi \times 0,5^2 \times 1,27 = 1,000$
Teor de ar incorporado	Cilindro	$V = \pi \times 0,6^2 \times 0,89 = 1,000$
Massa volúmica aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico, ultra-sons, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão	Prisma	$V = 1,6 \times 0,4 \times 0,4 = 0,256$
Absorção de água por capilaridade e secagem	Semi-prisma	$V = (1,6 \times 0,4 \times 0,4)/2 = 0,128$
Susceptibilidade à fendilhação	Tijolo	$V = 3 \times 2 \times 0,2 = 1,200$
Varição dimensional	Prisma	$V = 1,6 \times 0,4 \times 0,4 = 0,256$
Permeabilidade à água sob pressão	Tijolo	$V = 3 \times 2 \times 0,2 = 1,200$
Permeabilidade ao vapor de água	Disco	$V = \pi \times 0,8^2 \times 0,2 = 0,402$
Aderência ao suporte	Tijolo	$V = 3 \times 2 \times 0,2 = 1,200$
Envelhecimento acelerado	Tijolo	$V = 3 \times 2 \times 0,2 = 1,200$

### Anexo D: Composição das argamassas

Argamassa	% adição	Traço	Argamassa (dm³)	Cimento (dm³)	Areia (dm³)	RCD (dm³)	Areia (g)	RCD (g)	Cimento (g)
REF_1:4	0	1:4	1,0	0,200	0,800	0,000	1177,1	0,0	205,9
B_1:4_10	10	1:4	1,0	0,200	0,726	0,074	1068,8	64,6	205,9
B_1:4_15	15	1:4	1,0	0,200	0,686	0,114	1010,0	99,7	205,9
B_1:4_20	20	1:4	1,0	0,200	0,646	0,154	951,1	134,9	205,9
M_1:4_10	10	1:4	1,0	0,200	0,726	0,074	1068,8	59,6	205,9
M_1:4_15	15	1:4	1,0	0,200	0,686	0,114	1010,0	92,0	205,9
M_1:4_20	20	1:4	1,0	0,200	0,646	0,154	951,1	124,3	205,9
REF_1:5	0	1:5	1,0	0,167	0,833	0,000	1226,2	0,0	171,6
B_1:5:20	20	1:5	1,0	0,167	0,673	0,160	990,7	140,5	171,6
M_1:5_15	15	1:5	1,0	0,167	0,715	0,118	1052,1	95,8	171,6
REF_1:6	0	1:6	1,0	0,143	0,857	0,000	1261,2	0,0	147,1
B_1:6:20	20	1:6	1,0	0,143	0,693	0,165	1019,0	144,5	147,1
M_1:6_15	15	1:6	1,0	0,143	0,735	0,122	1082,1	98,5	147,1

## Anexo E: Análise mineralógica por DRX

Agregado	Fase cristalina	Fórmula química
ARM (infra 0,149 mm)	Calcite	Ca C O <sub>3</sub>
	Quartzo	Si O <sub>2</sub>
	Bassanite	Ca S O <sub>4</sub> · 0,5 H <sub>2</sub> O
	Gesso	Ca S O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
	Moscovite	( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3,1</sub> Al <sub>0,9</sub> ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>
	Wollastonite	Ca Si O <sub>3</sub>
ARB (infra 0,149 mm)	Calcite	Ca C O <sub>3</sub>
	Quartzo	Si O <sub>2</sub>
	Microclina	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	Moscovite	H <sub>2</sub> K Al <sub>3</sub> ( Si O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
	Wollastonite	Ca Si O <sub>3</sub>

## Anexo F: Análise granulométrica

Análise granulométrica aos agregados reciclados					Areia de rio	
Fracção granulométrica (mm)	Acumulado retido (%)	Acumulado passado (%)	Acumulado retido (%)	Acumulado passado (%)	Areia de rio acumulada retida (%)	Areia de rio acumulada passada (%)
Refugo	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
0,149 - 0,297	95,13	4,87	97,17	2,83	99,27	0,73
0,297 - 0,590	89,50	10,50	94,08	5,92	87,86	12,14
0,590 - 1,190	83,34	16,66	91,20	8,80	56,84	43,16
1,19 - 2,38	74,91	25,09	87,19	12,81	19,90	80,10
2,38 - 4,760	62,25	37,75	78,11	21,89	3,04	96,96
> 4,76	49,59	50,41	67,02	32,98	0,85	99,15

## Anexo G: Massa volúmica aparente (baridade)

Constituinte	Massa do recipiente (g)	Massa do recipiente e amostra (g)	Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> )	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Média da massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de variação
ARM (infra 0,149 mm)	379,4	782,1	0,5	805,4	809,5	4,1	0,005
		785,0		811,2			
		788,3		817,8			
		783,1		807,4			
		783,6		808,4			
		782,7		806,6			
ARB (infra 0,149 mm)	379,4	817,8	0,5	876,8	878,1	1,0	0,001
		817,9		877,0			
		818,6		878,4			
		819,1		879,4			
		818,3		877,8			
		818,9		879,0			
Cimento	379,4	893,0	0,5	1027,2	1029,7	3,4	0,004
		896,9		1035,0			
		895,8		1032,8			
		893,5		1028,2			
		894,6		1030,4			
		891,8		1024,8			
Areia de rio	379,4	1115,6	0,5	1472,4	1471,4	1,0	0,001
		1115,1		1471,4			
		1114,9		1471,0			
		1114,1		1469,4			
		1115,3		1471,8			
		1115,5		1472,2			

## Anexo H: Consistência por espalhamento

Argamassa	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)	Razão água / cimento	Espalhamento 1 (mm)	Espalhamento 2 (mm)	Média do espalhamento (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coefficiente de variação
REF_1:4	230	1,12	157,0	162,0	159,5	2,5	0,016
B_1:4_10	208	1,01	160,0	163,0	161,5	1,5	0,009
B_1:4_15	204	0,99	158,0	159,0	158,5	0,5	0,003
B_1:4_20	198	0,96	157,0	159,0	158,0	1,0	0,006
M_1:4_10	200	0,97	156,0	162,0	159,0	3,0	0,019
M_1:4_15	198	0,96	154,0	166,0	160,0	6,0	0,038
M_1:4_20	205	1,00	159,0	165,0	162,0	3,0	0,0019
REF_1:5	244	1,42	157,0	162,0	159,5	2,5	0,016
B_1:5_20	207	1,20	162,0	163,0	162,5	0,5	0,003
M_1:5_15	200	1,17	162,0	164,0	163,0	1,0	0,006
REF_1:6	250	1,70	157,0	161,0	159,0	2,0	0,013
B_1:6_20	210	1,43	162,0	164,0	163,0	1,0	0,006
M_1:6_15	210	1,43	159,0	160,0	159,5	0,5	0,003

**Anexo I: Massa volúmica das argamassas no estado fresco**

Arga-massa	Massa do recipiente (g)	Massa do recipiente e da amostra (g)	Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> )	Massa volúmica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Média da massa volúmica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de variação
REF_1:4	463,6	2416,30	1	1952,7	1952	4,3	0,002
	463,6	2419,80		1956,2			
	463,6	2409,50		1945,9			
B_1:4_10	463,6	2436,10	1	1972,5	1973	1,2	0,001
	463,6	2438,40		1974,8			
	463,6	2435,60		1972,0			
B_1:4_15	463,6	2441,60	1	1978,0	1980	2,1	0,001
	463,6	2442,70		1979,1			
	463,6	2446,40		1982,8			
B_1:4_20	463,6	2438,00	1	1974,4	1982	7,2	0,004
	463,6	2442,70		1979,1			
	463,6	2455,10		1991,5			
M_1:4_10	463,6	2340,10	1	1876,5	1862	10,5	0,006
	463,6	2315,90		1852,3			
	463,6	2320,20		1856,6			
M_1:4_15	463,6	2330,30	1	1866,7	1858	8,9	0,005
	463,6	2309,10		1845,5			
	463,6	2324,40		1860,8			
M_1:4_20	463,6	2368,80	1	1905,2	1908	3,0	0,002
	463,6	2376,00		1912,4			
	463,6	2371,30		1907,7			
REF_1:5	463,6	2401,90	1	1938,3	1927	8,4	0,004
	463,6	2388,90		1925,3			
	463,6	2381,60		1918,0			
B_1:5_20	463,6	2434,80	1	1971,2	1968	2,9	0,001
	463,6	2430,90		1967,3			
	463,6	2427,60		1964,0			
M_1:5_15	463,6	2366,10	1	1902,5	1884	13,1	0,007
	463,6	2335,90		1872,3			
	463,6	2341,80		1878,2			
REF_1:6	463,6	2381,40	1	1917,8	1915	2,2	0,001
	463,6	2376,00		1912,4			
	463,6	2378,80		1915,2			
B_1:6_20	463,6	2391,70	1	1928,1	1907	16,4	0,009
	463,6	2351,90		1888,3			
	463,6	2367,70		1904,1			
M_1:6_15	463,6	2327,70	1	1864,1	1845	17,2	0,009
	463,6	2310,70		1847,1			
	463,6	2285,90		1822,3			

**Anexo J: Massa volúmica aparente das argamassas no estado endurecido**

Argamassa	Pro- vete	Massa volúmica aparente das argamassas no estado endurecido aos 28 dias								Massa volúmica aparente das argamassas em estado endurecido aos 90							
		Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa do provete (g)	Massa volú- mica aparente (kg/m³)	Média (kg/m³)	Desvio- padrão	Coefficiente de variação	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa do provete (g)	Massa vo- lúmica aparente (kg/m³)	Média (kg/m³)	Desvio- padrão	Coefficiente de variação
REF_1:4	1	39,45	40,18	159,80	462,48	1825,98	1836,05	10,10	0,0055	39,90	40,00	159,99	476,87	1867,87	1854,13	14,02	0,0076
	2	40,07	40,09	160,00	470,95	1832,31				40,21	39,97	160,25	472,54	1834,88			
	3	40,08	39,93	159,93	473,55	1849,85				39,63	40,14	160,17	473,74	1859,64			
B_1:4_10	1	39,73	40,08	160,04	473,81	1859,37	1870,55	10,18	0,0054	39,77	40,19	159,68	476,63	1867,17	1859,59	10,53	0,0057
	2	40,07	39,99	159,89	478,71	1868,29				40,04	40,07	159,61	472,39	1844,71			
	3	39,58	40,00	160,00	477,32	1884,00				39,56	40,06	159,95	473,23	1866,90			
B_1:4_15	1	40,15	40,04	159,77	485,06	1888,52	1891,12	1,92	0,0010	39,90	40,08	159,96	483,19	1889,04	1891,69	1,92	0,0010
	2	40,13	40,18	160,05	488,55	1893,10				39,82	40,13	160,36	485,18	1893,53			
	3	40,15	40,07	159,88	486,59	1891,75				39,79	40,01	159,73	481,24	1892,49			
B_1:4_20	1	40,10	40,12	160,17	487,27	1890,96	1889,75	1,61	0,0009	39,83	40,13	159,66	493,00	1932,00	1916,08	11,88	0,0062
	2	40,21	40,25	160,33	490,60	1890,81				40,14	40,08	159,74	491,56	1912,75			
	3	40,33	40,22	159,65	488,83	1887,48				40,21	40,12	159,74	490,52	1903,48			
M_1:4_10	1	40,47	40,03	160,37	471,20	1813,69	1822,05	5,91	0,0032	39,76	40,06	160,23	462,54	1812,07	1821,77	9,89	0,0054
	2	40,43	40,03	160,00	472,88	1826,32				39,91	40,14	160,02	470,53	1835,35			
	3	40,33	39,99	160,00	471,23	1826,14				39,60	39,98	160,04	460,65	1817,89			
M_1:4_15	1	40,19	40,51	159,71	475,56	1829,06	1819,46	7,29	0,0040	39,88	40,08	159,94	467,31	1827,95	1831,93	3,20	0,0017
	2	39,98	40,13	159,77	465,99	1817,90				39,88	40,06	159,92	469,02	1835,79			
	3	40,16	39,65	160,12	461,89	1811,42				39,79	40,00	159,98	466,48	1832,03			
M_1:4_20	1	40,31	40,09	159,90	470,11	1819,29	1826,96	7,00	0,0038	40,16	40,20	160,61	470,63	1815,35	1833,52	16,10	0,0088
	2	40,11	40,06	159,77	468,61	1825,38				40,21	40,15	160,51	474,48	1830,73			
	3	39,94	40,15	159,80	470,50	1836,22				39,87	40,17	160,19	475,82	1854,48			
REF_1:5	1	39,55	40,19	159,86	460,48	1812,50	1795,10	22,36	0,0125	39,49	40,00	159,75	451,49	1789,35	1789,47	9,02	0,0050
	2	39,76	40,12	160,11	450,45	1763,54				40,03	40,26	159,68	463,44	1800,58			
	3	39,80	40,16	159,95	462,55	1809,25				39,61	40,08	160,06	451,85	1778,49			
B_1:5_20	1	40,00	39,94	160,03	473,06	1850,32	1836,58	9,77	0,0053	40,05	40,05	160,02	468,78	1826,53	1837,35	7,89	0,0043
	2	39,98	40,04	160,05	468,46	1828,44				39,97	40,08	160,20	473,53	1845,11			
	3	40,15	40,06	160,06	471,33	1830,97				40,10	39,94	159,92	471,38	1840,42			
M_1:5_15	1	39,65	40,02	160,17	453,89	1785,87	1773,30	9,62	0,0054	39,95	39,89	160,14	457,40	1792,02	1796,33	4,33	0,0024
	2	40,35	40,10	160,24	459,39	1771,54				39,91	40,04	160,06	459,12	1794,71			
	3	39,82	40,04	160,27	450,34	1762,50				39,66	40,03	160,13	458,13	1802,25			
REF_1:6	1	40,19	40,03	159,77	450,00	1751,00	1751,95	0,68	0,0004	39,67	40,05	159,83	447,35	1761,52	1749,35	14,20	0,0081
	2	39,36	40,13	160,05	443,08	1752,53				39,63	40,10	160,32	440,69	1729,44			
	3	39,61	40,03	160,14	444,98	1752,32				39,67	39,98	160,20	446,40	1757,09			
B_1:6_20	1	40,03	40,07	159,99	461,98	1800,37	1808,79	6,09	0,0034	39,99	40,16	159,90	463,71	1805,73	1803,76	6,20	0,0034
	2	39,76	40,06	160,08	461,79	1811,43				40,01	40,02	160,24	460,61	1795,37			
	3	39,81	39,96	160,17	462,39	1814,57				39,80	40,03	160,00	461,51	1810,17			
M_1:6_15	1	40,23	40,31	160,23	441,60	1699,36	1697,49	4,02	0,0024	39,85	40,22	160,00	448,07	1747,40	1749,66	2,08	0,0012
	2	39,73	39,97	160,15	432,61	1701,19				40,12	39,95	159,95	449,26	1752,41			
	3	39,97	40,00	160,61	434,49	1691,91				39,97	40,10	160,04	448,68	1749,16			



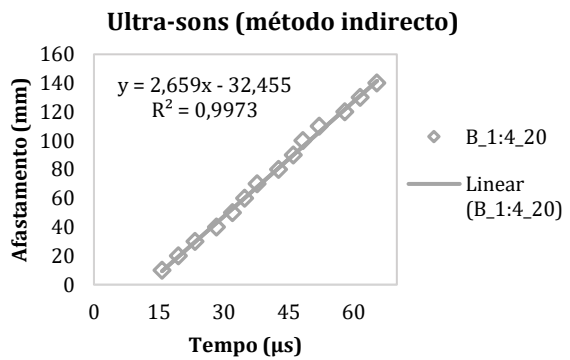
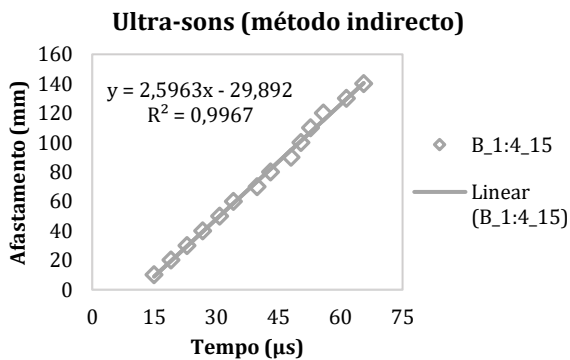
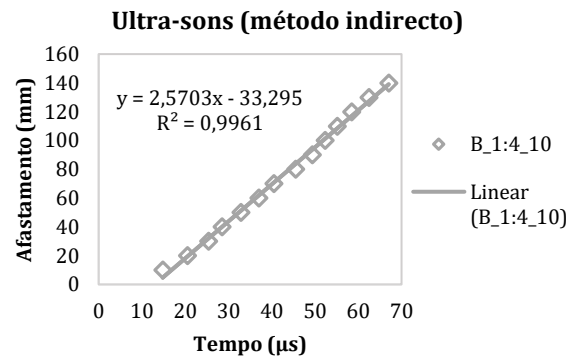
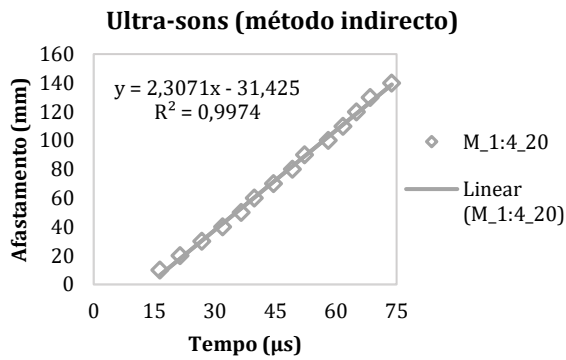
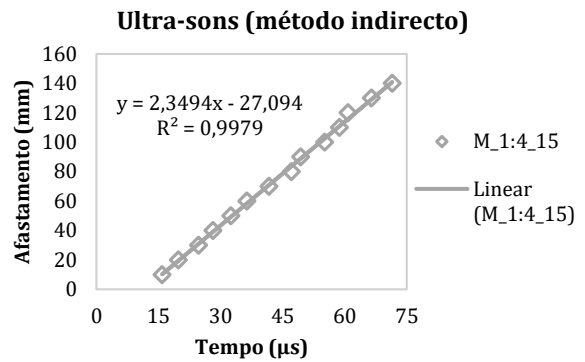
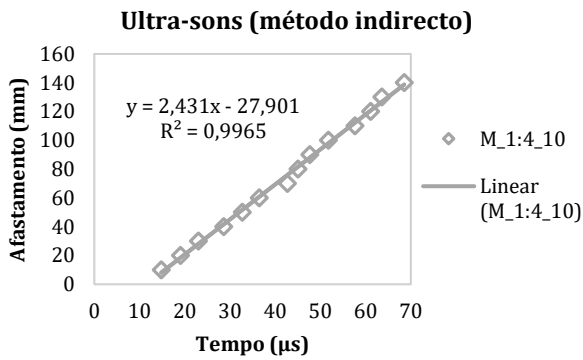
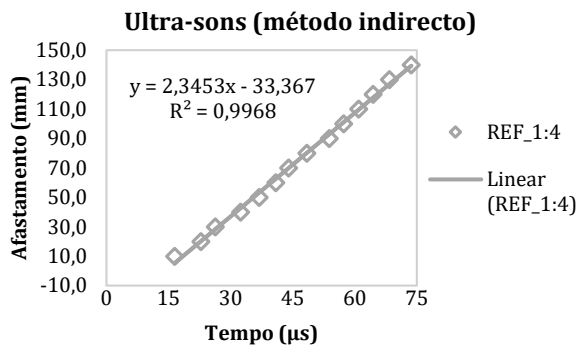
Anexo K: Módulo de elasticidade dinâmico

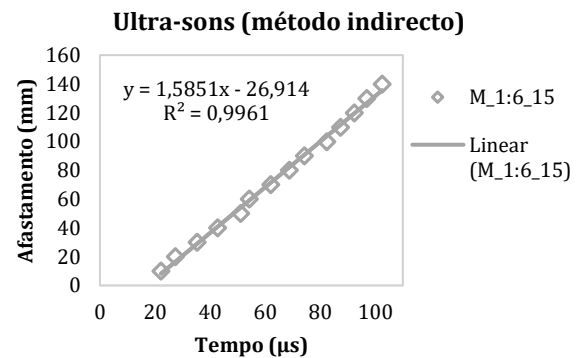
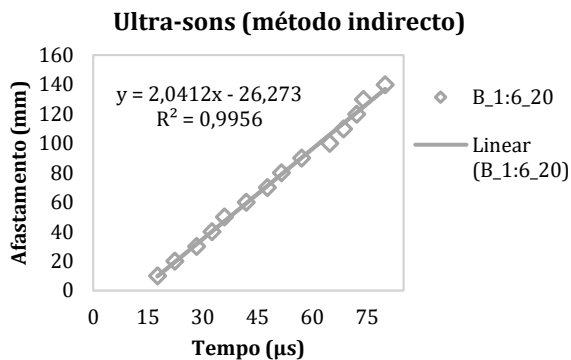
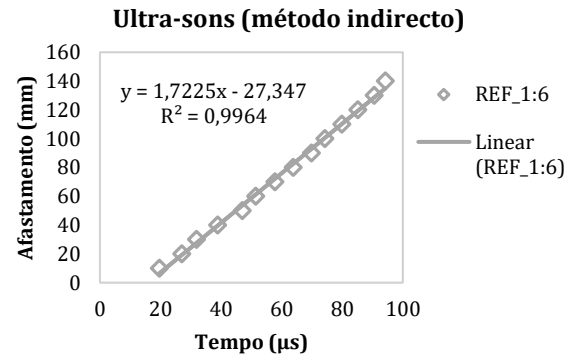
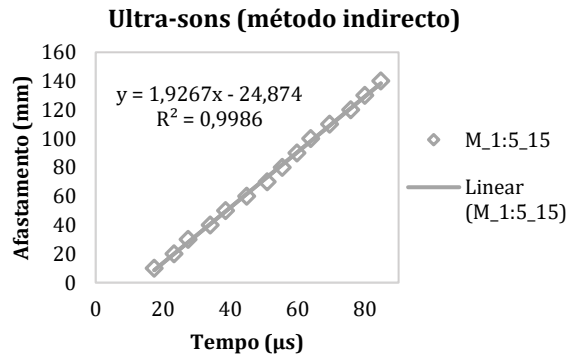
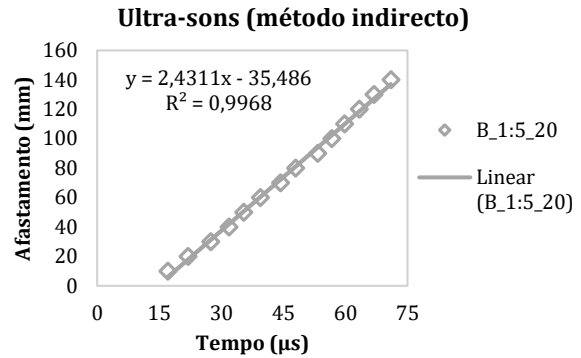
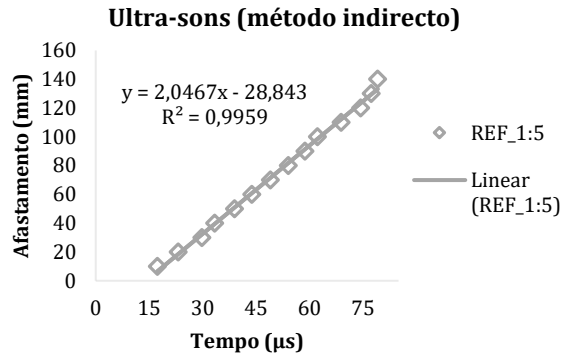
Argamassa	Provete	Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias										Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias									
		A (mm)	L (mm)	C (mm)	Massa do provete (g)	Peso volúmico (N/m³)	Frequência (Hz)	Ed (GPa)	Média do Ed (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	Coefficiente de variação	A (mm)	L (mm)	C (mm)	Massa do provete (g)	Peso volúmico (N/m³)	Frequência (Hz)	Ed (GPa)	Média do Ed (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	Coefficiente de variação
REF_1:4	1	39,45	40,18	159,80	462,48	17894,60	7616,40	10,82	11,01	0,22	0,020	39,90	40,00	159,99	476,87	18305,13	7596,80	11,04	10,41	0,46	0,044
	2	40,07	40,09	160,00	470,95	17956,66	7616,40	10,88				40,21	39,97	160,25	472,54	17981,86	7268,10	9,96			
	3	40,08	39,93	159,93	473,55	18128,53	7735,70	11,33				39,63	40,14	160,17	473,74	18224,52	7324,30	10,24			
B_1:4_10	1	39,73	40,08	160,04	473,81	18221,83	8566,8	13,98	14,10	0,26	0,019	39,77	40,19	159,68	476,63	18298,31	8019,9	12,25	12,23	0,38	0,031
	2	40,07	39,99	159,89	478,71	18309,24	8516,2	13,86				40,04	40,07	159,61	472,39	18078,12	7906,9	11,75			
	3	39,58	40,00	160,00	477,32	18463,21	8660,4	14,47				39,56	40,06	159,95	473,23	18295,59	8151	12,69			
B_1:4_15	1	40,15	40,04	159,77	485,06	18507,45	8871,8	15,18	15,38	0,15	0,010	39,90	40,08	159,96	483,19	18512,63	8637,8	14,43	14,31	0,15	0,010
	2	40,13	40,18	160,05	488,55	18552,41	8944	15,52				39,82	40,13	160,36	485,18	18556,61	8600,9	14,41			
	3	40,15	40,07	159,88	486,59	18539,17	8939,7	15,46				39,79	40,01	159,73	481,24	18546,37	8545,7	14,10			
B_1:4_20	1	40,10	40,12	160,17	487,27	18531,45	8860,9	15,24	15,25	0,18	0,012	39,83	40,13	159,66	493,00	18933,61	8892,2	15,58	15,25	0,26	0,017
	2	40,21	40,25	160,33	490,60	18529,98	8922,9	15,48				40,14	40,08	159,74	491,56	18744,93	8835,5	15,24			
	3	40,33	40,22	159,65	488,83	18497,32	8838,5	15,03				40,21	40,12	159,74	490,52	18654,10	8769,9	14,94			
M_1:4_10	1	40,47	40,03	160,37	471,20	17774,16	8390,4	13,14	13,27	0,24	0,018	39,76	40,06	160,23	462,54	17758,31	7970,6	11,82	12,04	0,41	0,034
	2	40,43	40,03	160,00	472,88	17897,96	8362,5	13,08				39,91	40,14	160,02	470,53	17986,39	8192,4	12,62			
	3	40,33	39,99	160,00	471,23	17896,13	8531,5	13,61				39,60	39,98	160,04	460,65	17815,35	7919,1	11,68			
M_1:4_15	1	40,19	40,51	159,71	475,56	17924,82	8093,9	12,23	11,92	0,26	0,021	39,88	40,08	159,94	467,31	17913,94	7996	11,96	11,73	0,23	0,019
	2	39,98	40,13	159,77	465,99	17815,40	8019,6	11,94				39,88	40,06	159,92	469,02	17990,73	7931,4	11,81			
	3	40,16	39,65	160,12	461,89	17751,93	7902,2	11,60				39,79	40,00	159,98	466,48	17953,94	7803,9	11,42			
M_1:4_20	1	40,31	40,09	159,90	470,11	17829,06	7498,6	10,46	10,61	0,13	0,012	40,16	40,20	160,61	470,63	17790,39	7041,3	9,29	9,79	0,38	0,039
	2	40,11	40,06	159,77	468,61	17888,70	7537,7	10,59				40,21	40,15	160,51	474,48	17941,15	7234,4	9,87			
	3	39,94	40,15	159,80	470,50	17994,98	7580,6	10,78				39,87	40,17	160,19	475,82	18173,94	7323,5	10,21			
REF_1:5	1	39,55	40,19	159,86	460,48	17762,54	6738,4	8,41	7,74	0,60	0,078	39,49	40,00	159,75	451,49	17535,67	5877,7	6,31	6,59	0,30	0,045
	2	39,76	40,12	160,11	450,45	17282,66	6200	6,95				40,03	40,26	159,68	463,44	17645,65	6172,9	7,00			
	3	39,80	40,16	159,95	462,55	17730,63	6513,4	7,85				39,61	40,08	160,06	451,85	17429,21	5948,4	6,45			
B_1:5_20	1	40,00	39,94	160,03	473,06	18133,13	7655,2	11,11	10,84	0,20	0,019	40,05	40,05	160,02	468,78	17899,96	7297	9,96	10,53	0,40	0,038
	2	39,98	40,04	160,05	468,46	17918,68	7529,8	10,62				39,97	40,08	160,20	473,53	18082,12	7575,2	10,87			
	3	40,15	40,06	160,06	471,33	17943,53	7585,3	10,80				40,10	39,94	159,92	471,38	18036,08	7557,5	10,75			
M_1:5_15	1	39,65	40,02	160,17	453,89	17501,50	6440,1	7,60	7,28	0,31	0,043	39,95	39,89	160,14	457,40	17561,80	6039,3	6,70	6,78	0,22	0,032
	2	40,35	40,10	160,24	459,39	17361,08	6366,6	7,38				39,91	40,04	160,06	459,12	17588,19	5969,1	6,55			
	3	39,82	40,04	160,27	450,34	17272,51	6155,1	6,86				39,66	40,03	160,13	458,13	17662,00	6183,6	7,07			
REF_1:6	1	40,19	40,03	159,77	450,00	17159,79	5707,8	5,82	5,48	0,24	0,044	39,67	40,05	159,83	447,35	17262,91	5106,6	4,69	4,97	0,55	0,110
	2	39,36	40,13	160,05	443,08	17174,79	5446,1	5,33				39,63	40,10	160,32	440,69	16948,47	5021,4	4,48			
	3	39,61	40,03	160,14	444,98	17172,76	5428,8	5,30				39,67	39,98	160,20	446,40	17219,44	5638,4	5,73			
B_1:6_20	1	40,03	40,07	159,99	461,98	17643,62	6832,4	8,61	9,08	0,36	0,039	39,99	40,16	159,90	463,71	17696,16	6514,3	7,84	7,83	0,04	0,006
	2	39,76	40,06	160,08	461,79	17752,06	7029,1	9,17				40,01	40,02	160,24	460,61	17594,59	6493	7,77			
	3	39,81	39,96	160,17	462,39	17782,77	7129,6	9,47				39,80	40,03	160,00	461,51	17739,69	6519,6	7,88			
M_1:6_15	1	40,23	40,31	160,23	441,60	16653,77	4830,9	4,07	4,08	0,04	0,010	39,85	40,22	160,00	448,07	17124,49	5048,4	4,56	4,68	0,16	0,033
	2	39,73	39,97	160,15	432,61	16671,67	4811,9	4,04				40,12	39,95	159,95	449,26	17173,63	5053,7	4,58			
	3	39,97	40,00	160,61	434,49	16580,70	4869,1	4,14				39,97	40,10	160,04	448,68	17141,77	5230	4,90			

A – altura; L – largura; C – comprimento.

Ed – módulo de elasticidade dinâmico.

Anexo L: Ultra-sons





Afastamento (mm)	Método directo						Velocidade média de propagação da onda ultra-sónica (m/s)	Desvio-padrão (m/s)
	Tempo ( $\mu$ s)							
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média		
REF 1:4	73,0	73,0	73,3	73,0	72,6	73,0	2192	7
B 1:4_10	65,5	65,5	65,7	65,6	65,5	65,6	2441	3
B 1:4_15	64,3	64,0	64,0	63,8	64,6	64,1	2495	11
B 1:4_20	62,2	62,7	62,7	62,7	62,9	62,6	2554	10
M 1:4_10	67,0	67,2	67,2	66,9	66,9	67,0	2387	5
M 1:4_15	69,8	69,8	69,8	69,6	69,6	69,7	2295	3
M 1:4_20	74,9	75,2	75,5	75,5	75,5	75,3	2124	7
REF 1:5	83,2	83,2	83,2	82,8	82,8	83,0	1927	5
B 1:5_20	72,1	72,6	72,6	72,6	72,9	72,6	2205	8
M 1:5_15	86,4	85,7	85,0	85,2	85,2	85,5	1871	11
REF 1:6	96,3	96,3	96,3	96,5	96,2	96,3	1661	2
B 1:6_20	80,3	79,3	79,3	79,3	79,5	79,5	2012	10
M 1:6_15	107,1	107,1	106,7	106,7	107,9	107,1	1494	6

Anexo M: Resistência à tracção por flexão

Argamassa	Provete	Resistência à tracção por flexão aos 28 dias								Resistência à tracção por flexão aos 90 dias							
		Altura (mm)	Largura (mm)	Carga (N)	Média da carga (N)	Tensão (MPa)	Média da tensão (MPa)	Desvio-padrão (GPa)	Coefficiente de variação	Altura (mm)	Largura (mm)	Carga (N)	Média da carga (N)	Tensão (MPa)	Média da tensão (MPa)	Desvio-padrão (GPa)	Coefficiente de variação
REF_1:4	1	39,45	40,18	630	632	1,51	1,49	0,04	0,03	39,90	40,00	500	453	1,18	1,07	0,09	0,08
	2	40,07	40,09	616		1,44				40,21	39,97	413		0,96			
	3	40,08	39,93	649		1,52				39,63	40,14	447		1,06			
B_1:4_10	1	39,73	40,08	789	856	1,87	2,03	0,17	0,08	39,77	40,19	670	661	1,58	1,56	0,01	0,01
	2	40,07	39,99	836		1,95				40,04	40,07	666		1,55			
	3	39,58	40,00	943		2,26				39,56	40,06	646		1,55			
B_1:4_15	1	40,15	40,04	1199	1149	2,79	2,67	0,15	0,06	39,90	40,08	851	828	2,00	1,95	0,04	0,02
	2	40,13	40,18	1193		2,77				39,82	40,13	826		1,95			
	3	40,15	40,07	1055		2,45				39,79	40,01	806		1,91			
B_1:4_20	1	40,10	40,12	1132	1740	2,63	3,54	0,67	0,19	39,83	40,13	781	864	1,84	2,01	0,12	0,06
	2	40,21	40,25	1826		4,21				40,14	40,08	918		2,13			
	3	40,33	40,22	1653		3,79				40,21	40,12	892		2,06			
M_1:4_10	1	40,47	40,03	1336	1290	3,06	2,96	0,24	0,08	39,76	40,06	562	643	1,33	1,52	0,15	0,10
	2	40,43	40,03	1145		2,63				39,91	40,14	717		1,68			
	3	40,33	39,99	1388		3,20				39,60	39,98	649		1,55			
M_1:4_15	1	40,19	40,51	1400	1310	3,21	3,04	0,13	0,04	39,88	40,08	652	651	1,53	1,54	0,07	0,04
	2	39,98	40,13	1236		2,89				39,88	40,06	688		1,62			
	3	40,16	39,65	1293		3,03				39,79	40,00	613		1,45			
M_1:4_20	1	40,31	40,09	1080	1117	2,49	2,60	0,09	0,04	40,16	40,20	473	508	1,09	1,18	0,08	0,07
	2	40,11	40,06	1110		2,58				40,21	40,15	503		1,16			
	3	39,94	40,15	1160		2,72				39,87	40,17	548		1,29			
REF_1:5	1	39,55	40,19	288	286	0,69	0,68	0,10	0,15	39,49	40,00	282	341	0,68	0,81	0,09	0,11
	2	39,76	40,12	233		0,55				40,03	40,26	382		0,89			
	3	39,80	40,16	337		0,79				39,61	40,08	359		0,86			
B_1:5_20	1	40,00	39,94	651	659	1,53	1,54	0,09	0,06	40,05	40,05	616	612	1,44	1,43	0,07	0,05
	2	39,98	40,04	613		1,44				39,97	40,08	574		1,34			
	3	40,15	40,06	712		1,65				40,10	39,94	645		1,51			
M_1:5_15	1	39,65	40,02	281	275	0,67	0,65	0,11	0,17	39,95	39,89	367	334	0,86	0,79	0,06	0,07
	2	40,35	40,10	219		0,50				39,91	40,04	308		0,72			
	3	39,82	40,04	324		0,77				39,66	40,03	326		0,78			
REF_1:6	1	40,19	40,03	225	177	0,52	0,42	0,08	0,18	39,67	40,05	227	227	0,54	0,54	0,08	0,15
	2	39,36	40,13	143		0,34				39,63	40,10	186		0,44			
	3	39,61	40,03	162		0,39				39,67	39,98	269		0,64			
B_1:6_20	1	40,03	40,07	404	487	0,94	1,15	0,15	0,13	39,99	40,16	414	425	0,97	1,00	0,09	0,09
	2	39,76	40,06	541		1,28				40,01	40,02	390		0,91			
	3	39,81	39,96	516		1,22				39,80	40,03	472		1,12			
M_1:6_15	1	40,23	40,31	139	173	0,32	0,41	0,07	0,16	39,85	40,22	167	204	0,39	0,48	0,06	0,13
	2	39,73	39,97	175		0,42				40,12	39,95	233		0,54			
	3	39,97	40,00	205		0,48				39,97	40,10	212		0,50			

Anexo N: Resistência à compressão

Arga-massa	Pro- vete	Resistência à compressão aos 28 dias									Resistência à compressão aos 90 dias														
		A (mm)		L (mm)		Carga (N)		Média da carga (N)	Tensão (MPa)		Média da tensão (MPa)	Desvio- padrão (MPa)	Coefici- ente de variação	A (mm)		L (mm)		Carga (N)		Média da carga (N)	Tensão (MPa)		Média da tensão (MPa)	Desvio- padrão (MPa)	Coefici- ente de variação
		Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.		Esq.	Dir.				Esq.	Dir.	Esq.	Dir.								
REF_1:4	1	39,45	40,18	6352	6341	6657	4,01	4,00	4,17	0,13	0,03	39,90	40,00	7129	6503	6562	4,47	4,08	4,11	0,23	0,05				
	2	40,07	40,09	6931	6928		4,31	4,31				40,21	39,97	6236	6232		3,88	3,88							
	3	40,08	39,93	6664	6724		4,16	4,20				39,63	40,14	6913	6356		4,35	4,00							
B_1:4_10	1	39,73	40,08	9207	9488	9540	5,78	5,96	5,99	0,14	0,02	39,77	40,19	9338	9833	9760	5,84	6,15	6,12	0,18	0,03				
	2	40,07	39,99	9368	9733		5,85	6,07				40,04	40,07	9979	9973		6,22	6,22							
	3	39,58	40,00	9763	9683		6,17	6,12				39,56	40,06	9355	10084		5,90	6,36							
B_1:4_15	1	40,15	40,04	19218	19238	19407	11,95	11,97	12,06	0,31	0,03	39,90	40,08	12345	11311	11473	7,72	7,07	7,19	0,41	0,06				
	2	40,13	40,18	20448	18938		12,68	11,75				39,82	40,13	11595	12187		7,26	7,63							
	3	40,15	40,07	19549	19052		12,15	11,84				39,79	40,01	10385	11015		6,52	6,92							
B_1:4_20	1	40,10	40,12	20298	20101	20736	12,62	12,49	12,83	0,56	0,04	39,83	40,13	13849	13270	13816	8,67	8,30	8,60	0,19	0,02				
	2	40,21	40,25	20759	22743		12,83	14,05				40,14	40,08	14031	13949		8,72	8,67							
	3	40,33	40,22	20186	20329		12,44	12,53				40,21	40,12	13529	14266		8,39	8,84							
M_1:4_10	1	40,47	40,03	13491	14211	14214	8,33	8,77	8,79	0,72	0,08	39,76	40,06	8147	8986	8773	5,11	5,64	5,51	0,42	0,08				
	2	40,43	40,03	13621	12640		8,42	7,81				39,91	40,14	10119	8958		6,32	5,59							
	3	40,33	39,99	16000	15322		9,92	9,50				39,60	39,98	8419	8010		5,32	5,06							
M_1:4_15	1	40,19	40,51	13621	13608	13376	8,37	8,36	8,32	0,16	0,02	39,88	40,08	9050	8846	8655	5,66	5,53	5,42	0,32	0,06				
	2	39,98	40,13	13370	13190		8,33	8,22				39,88	40,06	9199	8964		5,76	5,61							
	3	40,16	39,65	13661	12804		8,58	8,04				39,79	40,00	8033	7840		5,05	4,93							
M_1:4_20	1	40,31	40,09	12611	12221	12500	7,80	7,56	7,77	0,18	0,02	40,16	40,20	6708	6588	7299	4,16	4,08	4,53	0,35	0,08				
	2	40,11	40,06	12132	12555		7,55	7,81				40,21	40,15	8035	7086		4,98	4,39							
	3	39,94	40,15	12950	12533		8,08	7,82				39,87	40,17	7854	7523		4,90	4,70							
REF_1:5	1	39,55	40,19	3762	4457	3737	2,37	2,80	2,34	0,27	0,11	39,49	40,00	3437	2897	2942	2,18	1,83	1,85	0,30	0,16				
	2	39,76	40,12	3267	3242		2,05	2,03				40,03	40,26	2706	3234		1,68	2,01							
	3	39,80	40,16	3660	4034		2,29	2,52				39,61	40,08	3323	2056		2,09	1,30							
B_1:5_20	1	40,00	39,94	8213	8515	7917	5,14	5,33	4,94	0,28	0,06	40,05	40,05	4687	8052	7671	2,92	5,02	4,79	0,85	0,18				
	2	39,98	40,04	7634	8228		4,77	5,14				39,97	40,08	8387	8861		5,24	5,53							
	3	40,15	40,06	7293	7616		4,53	4,74				40,10	39,94	8066	7973		5,04	4,98							
M_1:5_15	1	39,65	40,02	6668	6679	5995	4,20	4,21	3,75	0,62	0,17	39,95	39,89	3873	3456	3636	2,43	2,17	2,28	0,25	0,11				
	2	40,35	40,10	6471	5698		4,00	3,52				39,91	40,04	3442	3762		2,15	2,35							
	3	39,82	40,04	3929	6526		2,46	4,09				39,66	40,03	3019	4262		1,90	2,68							
REF_1:6	1	40,19	40,03	2322	1939	2113	1,44	1,21	1,33	0,09	0,06	39,67	40,05	1915	1737	1613	1,21	1,09	1,02	0,23	0,23				
	2	39,36	40,13	1932	2117		1,22	1,34				39,63	40,10	2006	1165		1,26	0,73							
	3	39,61	40,03	2176	2191		1,37	1,38				39,67	39,98	1062	1790		0,67	1,13							
B_1:6_20	1	40,03	40,07	5331	5177	5562	3,32	3,23	3,49	0,22	0,06	39,99	40,16	5086	5334	5157	3,17	3,32	3,22	0,14	0,04				
	2	39,76	40,06	5448	5503		3,42	3,46				40,01	40,02	5233	5348		3,27	3,34							
	3	39,81	39,96	6218	5692		3,91	3,58				39,80	40,03	5253	4685		3,30	2,94							
M_1:6_15	1	40,23	40,31	3070	3199	3510	1,89	1,97	2,19	0,42	0,19	39,85	40,22	2159	2103	2100	1,35	1,31	1,31	0,11	0,09				
	2	39,73	39,97	2875	3069		1,81	1,93				40,12	39,95	1901	2206		1,19	1,38							
	3	39,97	40,00	4239	4606		2,65	2,88				39,97	40,10	2385	1848		1,49	1,15							

A - altura; L - largura.

Esq. - metade esquerda do provete; Dir. - metade direita do provete.

**Anexo O: Absorção de água**

Absorção de água por capilaridade de REF_1:4										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	228,08	0,00	0,000000	235,00	0,00	0,000000	232,54	0,00	0,000000
3,16	10	233,68	5,60	0,003504	240,07	5,07	0,00314	238,68	6,14	0,003885
5,48	30	236,76	3,08	0,001927	242,80	2,73	0,00169	241,42	2,74	0,001734
7,75	60	240,54	3,78	0,002365	246,25	3,45	0,00213	245,13	3,71	0,002348
9,49	90	242,90	2,36	0,001477	248,28	2,03	0,00126	247,49	2,36	0,001493
13,42	180	249,05	6,15	0,003849	253,36	5,08	0,00314	253,29	5,80	0,003670
17,32	300	252,63	3,58	0,002240	257,41	4,05	0,00251	257,28	3,99	0,002525
21,91	480	252,99	0,36	0,000225	257,83	0,42	0,00026	257,77	0,49	0,000310
37,95	1440	253,34	0,35	0,000219	259,90	2,07	0,00128	258,10	0,33	0,000209
53,67	2880	253,50	0,16	0,000100	259,99	0,09	0,00006	258,17	0,07	0,000044
84,85	7200	253,66	0,16	0,000100	260,18	0,19	0,00012	258,43	0,26	0,000165
92,95	8640	253,84	0,18	0,000113	260,26	0,08	0,00005	258,51	0,08	0,000051
100,40	10080	253,92	0,08	0,000050	260,31	0,05	0,00003	258,57	0,06	0,000038
Área da base imersa (mm²)		1598,00			1616,03			1580,32		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,91			0,80			0,88		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,87								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,05								
Absorção de água por capilaridade de M_1:4_10										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	250,60	0,00	0,000000	225,49	0,00	0,000000	231,43	0,00	0,000000
3,16	10	253,53	2,93	0,001812	228,65	3,16	0,00195	234,77	3,34	0,002058
5,48	30	255,24	1,71	0,001057	230,54	1,89	0,00117	236,68	1,91	0,001177
7,75	60	257,10	1,86	0,001150	232,45	1,91	0,00118	238,80	2,12	0,001306
9,49	90	258,48	1,38	0,000853	233,89	1,44	0,00089	240,29	1,49	0,000918
13,42	180	261,14	2,66	0,001645	236,75	2,86	0,00176	243,39	3,10	0,001910
17,32	300	263,70	2,56	0,001583	239,42	2,67	0,00165	246,37	2,98	0,001836
21,91	480	266,38	2,68	0,001657	242,23	2,81	0,00173	249,44	3,07	0,001891
37,95	1440	273,26	6,88	0,004254	247,02	4,79	0,00296	253,99	4,55	0,002803
53,67	2880	273,58	0,32	0,000198	247,16	0,14	0,00009	254,06	0,07	0,000043
65,73	4320	273,70	0,12	0,000074	247,27	0,11	0,00007	254,18	0,12	0,000074
75,89	5760	273,77	0,07	0,000043	247,30	0,03	0,00002	254,25	0,07	0,000043
100,40	10080	273,79	0,02	0,000012	247,30	0,00	0,00000	254,30	0,05	0,000031
Área da base imersa (mm²)		1617,24			1620,86			1623,27		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,48			0,51			0,54		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,51								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,02								
Absorção de água por capilaridade de M_1:4_15										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	245,82	0,00	0,000000	234,94	0,00	0,000000	236,69	0,00	0,000000
3,16	10	249,06	3,24	0,002013	238,19	3,25	0,002007	240,04	3,35	0,002064
5,48	30	251,35	2,29	0,001423	240,47	2,28	0,001408	242,52	2,48	0,001528
7,75	60	253,16	1,81	0,001125	242,25	1,78	0,001099	244,34	1,82	0,001121
9,49	90	254,75	1,59	0,000988	244,02	1,77	0,001093	245,95	1,61	0,000992
13,42	180	258,08	3,33	0,002069	247,04	3,02	0,001865	249,19	3,24	0,001996
17,32	300	261,2	3,12	0,001939	250,08	3,04	0,001877	252,24	3,05	0,001879
21,91	480	264,46	3,26	0,002026	253,22	3,14	0,001939	255,25	3,01	0,001855
37,95	1440	270,18	5,72	0,003555	258,83	5,61	0,003464	260,53	5,28	0,003253
53,67	2880	270,39	0,21	0,000130	259,03	0,20	0,000123	260,65	0,12	0,000074
65,73	4320	270,50	0,11	0,000068	259,18	0,15	0,000093	260,85	0,20	0,000123
75,89	5760	270,66	0,16	0,000099	259,24	0,06	0,000037	260,93	0,08	0,000049
100,40	10080	270,69	0,03	0,000019	259,38	0,14	0,000086	261,03	0,10	0,000062
Área da base imersa (mm²)		1609,20			1619,65			1622,88		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,56			0,51			0,58		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,57								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,01								

Absorção de água por capilaridade de M_1:4_20										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	236,07	0,00	0,0000000	229,20	0,00	0,0000000	226,80	0,00	0,0000000
3,16	10	239,85	3,78	0,0023596	232,61	3,41	0,0021170	230,67	3,87	0,0023865
5,48	30	242,86	3,01	0,0018789	235,32	2,71	0,0016824	233,85	3,18	0,0019610
7,75	60	245,54	2,68	0,0016729	237,72	2,40	0,0014899	236,31	2,46	0,0015170
9,49	90	247,41	1,87	0,0011673	239,46	1,74	0,0010802	238,16	1,85	0,0011408
13,42	180	252,01	4,60	0,0028714	243,50	4,04	0,0025081	242,57	4,41	0,0027194
17,32	300	256,41	4,40	0,0027466	247,37	3,87	0,0024025	246,80	4,23	0,0026084
21,91	480	260,48	4,07	0,0025406	251,37	4,00	0,0024832	250,59	3,79	0,0023371
37,95	1440	261,33	0,85	0,0005306	254,11	2,74	0,0017010	251,45	0,86	0,0005303
53,67	2880	261,60	0,27	0,0001685	254,37	0,26	0,0001614	251,80	0,35	0,0002158
65,73	4320	261,72	0,12	0,0000749	254,52	0,15	0,0000931	251,93	0,13	0,0000802
75,89	5760	261,85	0,13	0,0000811	254,62	0,10	0,0000621	252,03	0,10	0,0000617
100,40	10080	261,95	0,10	0,0000624	254,79	0,17	0,0001055	252,21	0,18	0,0001110
107,33	11520	262,09	0,14	0,0000874	254,86	0,07	0,0000435	252,24	0,03	0,0000185
113,84	12960	262,17	0,08	0,0000499	254,91	0,05	0,0000310	252,25	0,01	0,0000062
Área da base imersa (mm²)		1602,00			1610,81			1621,65		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,75			0,67			0,73		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,72								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,03								
Absorção de água por capilaridade de B_1:4_10										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	246,08	0,00	0,0000000	244,44	0,00	0,0000000	248,49	0,00	0,0000000
3,16	10	250,17	4,09	0,002541	248,32	3,88	0,00242	252,20	3,71	0,002325
5,48	30	252,20	2,03	0,001261	250,30	1,98	0,00124	253,98	1,78	0,001115
7,75	60	254,59	2,39	0,001485	252,66	2,36	0,00147	256,18	2,20	0,001378
9,49	90	256,09	1,50	0,000932	254,15	1,49	0,00093	257,58	1,40	0,000877
13,42	180	259,87	3,78	0,002348	257,72	3,57	0,00223	260,82	3,24	0,002030
17,32	300	263,07	3,20	0,001988	260,85	3,13	0,00195	263,59	2,77	0,001736
21,91	480	266,53	3,46	0,002150	264,27	3,42	0,00213	266,65	3,06	0,001917
37,95	1440	271,30	4,77	0,002963	269,69	5,42	0,00338	273,52	6,87	0,004305
53,67	2880	271,33	0,03	0,000019	269,85	0,16	0,00010	273,91	0,39	0,000244
84,85	7200	271,51	0,18	0,000112	269,99	0,14	0,00009	274,08	0,17	0,000107
92,95	8640	271,61	0,10	0,000062	270,10	0,11	0,00007	274,13	0,05	0,000031
100,40	10080	271,64	0,03	0,000019	270,14	0,04	0,00002	274,20	0,07	0,000044
107,33	11520	271,67	0,03	0,000019	270,19	0,05	0,00003	274,24	0,04	0,000025
Área da base imersa (mm²)		1609,61			1603,21			1596,00		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,58			0,57			0,53		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,56								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,02								
Absorção de água por capilaridade de B_1:4_15										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm²)
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	253,13	0,00	0,0000000	250,24	0,00	0,0000000	248,50	0,00	0,0000000
3,16	10	255,77	2,64	0,001646705	253,44	3,20	0,001997	251,38	2,88	0,001817
5,48	30	257,60	1,83	0,0011415	255,50	2,06	0,001285	253,23	1,85	0,001167
7,75	60	259,39	1,79	0,001116516	257,60	2,10	0,001310	255,05	1,82	0,001148
9,49	90	260,81	1,42	0,0008857	259,20	1,60	0,000998	256,45	1,40	0,000883
13,42	180	263,66	2,85	0,001777693	262,38	3,18	0,001984	259,45	3,00	0,001893
17,32	300	266,40	2,74	0,0017091	265,43	3,05	0,001903	262,24	2,79	0,001761
21,91	480	269,11	2,71	0,001690368	268,46	3,03	0,001890	265,05	2,81	0,001773
37,95	1440	275,83	6,72	0,004191613	273,93	5,47	0,003413	271,70	6,65	0,004196
53,67	2880	276,32	0,49	0,000305638	274,25	0,32	0,000200	272,10	0,40	0,000252
84,85	7200	276,53	0,21	0,000130988	274,36	0,11	0,000069	272,36	0,26	0,000164
92,95	8640	276,59	0,06	0,0000374	274,42	0,06	0,000037	272,41	0,05	0,000032
100,40	10080	276,61	0,02	0,0000125	274,44	0,02	0,000012	272,44	0,03	0,000019
Área da base imersa (mm²)		1603,20			1602,80			1584,71		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,50			0,57			0,51		
Média (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,52								
Desvio-padrão (kg/(m².min <sup>1/2</sup> ))		0,03								

Absorção de água por capilaridade de B_1:4_20										
Provetete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	249,16	0,00	0,0000000	241,4	0,00	0,0000000	251,15	0,00	0,0000000
3,16	10	252,11	2,95	0,0018378	244,49	3,09	0,0019135	253,99	2,84	0,0017631
5,48	30	253,73	1,62	0,0010092	246,04	1,55	0,0009599	255,58	1,59	0,0009871
7,75	60	255,65	1,92	0,0011961	248,01	1,97	0,0012199	257,49	1,91	0,0011857
9,49	90	256,95	1,30	0,0008099	249,25	1,24	0,0007679	258,75	1,26	0,0007822
13,42	180	259,74	2,79	0,0017381	252,19	2,94	0,0018206	261,51	2,76	0,0017134
17,32	300	262,31	2,57	0,0016011	254,76	2,57	0,0015915	264,11	2,60	0,0016141
21,91	480	264,89	2,58	0,0016073	257,42	2,66	0,0016472	266,78	2,67	0,0016575
37,95	1440	272,60	7,71	0,0048032	264,16	6,74	0,0041738	274,56	7,78	0,0048298
53,67	2880	273,70	1,10	0,0006853	264,80	0,64	0,0003963	275,76	1,20	0,0007450
84,85	7200	274,02	0,32	0,0001994	265,13	0,33	0,0002044	276,15	0,39	0,0002421
92,95	8640	274,03	0,01	0,0000062	265,13	0,00	0,0000000	276,17	0,02	0,0000124
100,40	10080	274,10	0,07	0,0000436	265,2	0,07	0,0000433	276,21	0,04	0,0000248
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1605,18			1614,83			1610,82		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		0,48			0,47			0,47		
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		0,47								
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		0,00								
Absorção de água por capilaridade de REF_1:5										
Provetete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	222,00	0,00	0,0000000	232,33	0,00	0,0000000	226,46	0,00	0,0000000
3,16	10	229,48	7,48	0,004723	239,12	6,79	0,00428	233,44	6,98	0,004412
5,48	30	235,86	6,38	0,004029	244,61	5,49	0,00346	238,60	5,16	0,003262
7,75	60	241,55	5,69	0,003593	249,91	5,30	0,00334	243,80	5,20	0,003287
9,49	90	246,48	4,93	0,003113	255,10	5,19	0,00327	249,01	5,21	0,003293
13,42	180	247,32	0,84	0,000530	258,30	3,20	0,00202	252,42	3,41	0,002156
17,32	300	247,53	0,21	0,000133	258,59	0,29	0,00018	252,69	0,27	0,000171
21,91	480	247,61	0,08	0,000051	258,66	0,07	0,00004	252,81	0,12	0,000076
37,95	1440	247,90	0,29	0,000183	258,94	0,28	0,00018	253,05	0,24	0,000152
65,73	4320	248,25	0,35	0,000221	259,28	0,34	0,00021	253,34	0,29	0,000183
100,40	10080	248,56	0,31	0,000196	259,55	0,27	0,00017	253,64	0,30	0,000190
107,33	11520	248,65	0,09	0,000057	259,61	0,06	0,00004	253,75	0,11	0,000070
113,84	12960	248,72	0,07	0,000044	259,66	0,05	0,00003	253,82	0,07	0,000044
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1583,60			1587,98			1581,96		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		1,70			1,59			1,56		
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		1,61								
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		0,06								
Absorção de água por capilaridade de REF_1:6										
Provetete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	213,12	0,00	0,0000000	218,93	0,00	0,0000000	225,14	0,00	0,0000000
3,16	10	223,22	10,10	0,006364	228,25	9,32	0,00593	234,49	9,35	0,005885
5,48	30	231,41	8,19	0,005160	235,70	7,45	0,00474	241,17	6,68	0,004205
7,75	60	237,62	6,21	0,003913	242,90	7,20	0,00458	247,53	6,36	0,004003
9,49	90	237,91	0,29	0,000183	244,49	1,59	0,00101	250,35	2,82	0,001775
13,42	180	238,14	0,23	0,000145	244,59	0,10	0,00006	250,57	0,22	0,000138
17,32	300	238,18	0,04	0,000025	244,78	0,19	0,00012	250,73	0,16	0,000101
21,91	480	238,34	0,16	0,000101	244,82	0,04	0,00003	250,76	0,03	0,000019
37,95	1440	238,65	0,31	0,000195	245,13	0,31	0,00020	251,19	0,43	0,000271
65,73	4320	239,05	0,40	0,000252	245,46	0,33	0,00021	251,54	0,35	0,000220
100,40	10080	239,50	0,45	0,000284	245,76	0,30	0,00019	251,83	0,29	0,000183
107,33	11520	239,61	0,11	0,000069	245,88	0,12	0,00008	251,93	0,10	0,000063
113,84	12960	239,61	0,00	0,0000000	245,91	0,03	0,00002	251,97	0,04	0,000025
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1587,16			1571,21			1588,77		
Coeficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		1,98			2,03			1,79		
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		1,93								
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))		0,10								



Absorção de água por capilaridade de M_1:5_15										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	227,77	0,00	0,0000000	222,37	0,00	0,0000000	228,13	0,00	0,0000000
3,16	10	232,78	5,01	0,0031391	227,24	4,87	0,0030031	233,4	5,27	0,0032839
5,48	30	236,46	3,68	0,0023058	230,78	3,54	0,0021830	236,89	3,49	0,0021747
7,75	60	240,7	4,24	0,0026567	234,86	4,08	0,0025160	241,05	4,16	0,0025922
9,49	90	243,74	3,04	0,0019048	237,78	2,92	0,0018007	244,14	3,09	0,0019255
13,42	180	250,39	6,65	0,0041667	244,13	6,35	0,0039158	250,68	6,54	0,0040753
17,32	300	251,87	1,48	0,0009273	245,73	1,60	0,0009867	252,39	1,71	0,0010656
21,91	480	252,01	0,14	0,0000877	245,89	0,16	0,0000987	252,53	0,14	0,0000872
37,95	1440	252,23	0,22	0,0001378	246,08	0,19	0,0001172	252,8	0,27	0,0001682
75,89	5760	252,73	0,50	0,0003133	246,52	0,44	0,0002713	253,26	0,46	0,0002866
84,85	7200	252,83	0,10	0,0000627	246,67	0,15	0,0000925	253,37	0,11	0,0000685
100,40	10080	253,09	0,26	0,0001629	246,91	0,24	0,0001480	253,59	0,22	0,0001371
107,33	11520	253,2	0,11	0,0000689	247,01	0,10	0,0000617	253,7	0,11	0,0000685
125,86	15840	253,55	0,35	0,0002193	247,37	0,36	0,0002220	254,07	0,37	0,0002306
131,45	17280	253,67	0,12	0,0000752	247,48	0,11	0,0000678	254,18	0,11	0,0000685
136,82	18720	253,8	0,13	0,0000815	247,55	0,07	0,0000432	254,26	0,08	0,0000499
141,99	20160	253,88	0,08	0,0000501	247,59	0,04	0,0000247	254,32	0,06	0,0000374
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1595,99			1621,63			1604,80			
Coefficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	1,09			1,03			1,06			
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	1,06									
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,02									
Absorção de água por capilaridade de M_1:6_15										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida ΔM (g)	Absorção capilar ΔM/S (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	215,05	0,00	0,0000000	227,86	0,00	0,0000000	211,17	0,00	0,0000000
3,16	10	221,75	6,70	0,0042361	234,76	6,90	0,0042847	217,86	6,69	0,0042173
5,48	30	226,84	5,09	0,0032182	239,86	5,10	0,0031670	222,49	4,63	0,0029187
7,75	60	232,74	5,90	0,0037303	246,00	6,14	0,0038128	228,16	5,67	0,0035743
9,49	90	237,05	4,31	0,0027250	250,49	4,49	0,0027882	232,40	4,24	0,0026728
13,42	180	239,41	2,36	0,0014921	253,78	3,29	0,0020430	234,80	2,40	0,0015129
17,32	300	239,48	0,07	0,0000443	253,88	0,10	0,0000621	234,92	0,12	0,0000756
21,91	480	239,62	0,14	0,0000885	254,02	0,14	0,0000869	234,97	0,05	0,0000315
37,95	1440	239,83	0,21	0,0001328	254,23	0,21	0,0001304	235,2	0,23	0,0001450
75,89	5760	240,36	0,53	0,0003351	254,73	0,50	0,0003105	235,69	0,49	0,0003089
84,85	7200	240,59	0,23	0,0001454	254,96	0,23	0,0001428	235,91	0,22	0,0001387
100,40	10080	240,95	0,36	0,0002276	255,34	0,38	0,0002360	236,31	0,40	0,0002522
107,33	11520	241,15	0,20	0,0001265	255,57	0,23	0,0001428	236,52	0,21	0,0001324
125,86	15840	241,55	0,40	0,0002529	255,99	0,42	0,0002608	236,97	0,45	0,0002837
131,45	17280	241,70	0,15	0,0000948	256,14	0,15	0,0000931	237,15	0,18	0,0001135
136,82	18720	241,76	0,06	0,0000379	256,21	0,07	0,0000435	237,29	0,14	0,0000883
141,99	20160	241,80	0,04	0,0000253	256,25	0,04	0,0000248	237,33	0,04	0,0000252
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1581,65			1610,38			1586,33			
Coefficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	1,53			1,54			1,45			
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	1,51									
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,04									

Absorção de água por capilaridade de B_1:5_20										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	238	0,00	0,000000	242,22	0,00	0,000000	237,27	0,00	0,000000
3,16	10	241,97	3,97	0,002474	246,19	3,97	0,002478	241,04	3,77	0,002336
5,48	30	244,92	2,95	0,001839	249,26	3,07	0,001916	244,06	3,02	0,001872
7,75	60	247,55	2,63	0,001639	251,96	2,7	0,001685	246,86	2,8	0,001735
9,49	90	250,09	2,54	0,001583	254,49	2,53	0,001579	249,36	2,5	0,001549
13,42	180	252,97	2,88	0,001795	257,38	2,89	0,001804	252,34	2,98	0,001847
17,32	300	257,12	4,15	0,002587	261,46	4,08	0,002546	256,49	4,15	0,002572
21,91	480	260,42	3,30	0,002057	264,67	3,21	0,002003	259,72	3,23	0,002002
37,95	1440	264,08	3,66	0,002281	268,57	3,9	0,002434	263,11	3,39	0,002101
65,73	4320	264,38	0,30	0,000187	268,83	0,26	0,000162	263,42	0,31	0,000192
100,40	10080	264,68	0,30	0,000187	269,12	0,29	0,000181	263,73	0,31	0,000192
107,33	11520	264,7	0,02	0,000012	269,18	0,06	0,000037	263,77	0,04	0,000025
113,84	12960	264,73	0,03	0,000019	269,22	0,04	0,000025	263,78	0,01	0,000006
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1604,40			1602,40			1613,63			
Coefficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,80			0,82			0,82			
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,81									
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,01									
Absorção de água por capilaridade de B_1:6_20										
Provete		1			2			3		
Tempo de imersão		Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Água absorvida $\Delta M$ (g)	Absorção capilar $\Delta M/S$ (g/mm <sup>2</sup> )
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0,00	0	228,08	0,00	0,000000	235,26	0,00	0,000000	226,02	0,00	0,000000
3,16	10	232,85	4,77	0,002990	239,99	4,73	0,002964	230,82	4,80	0,002960
5,48	30	235,72	2,87	0,001799	243,11	3,12	0,001955	233,96	3,14	0,001936
7,75	60	239,09	3,37	0,002113	246,59	3,48	0,002181	237,46	3,50	0,002158
9,49	90	242,49	3,40	0,002131	249,95	3,36	0,002106	240,82	3,36	0,002072
13,42	180	246,03	3,54	0,002219	253,60	3,65	0,002288	244,43	3,61	0,002226
17,32	300	250,75	4,72	0,002959	258,58	4,98	0,003121	248,96	4,53	0,002793
21,91	480	252,94	2,19	0,001373	260,65	2,07	0,001297	250,36	1,40	0,000863
37,95	1440	253,47	0,53	0,000332	261,12	0,47	0,000295	250,73	0,37	0,000228
65,73	4320	253,71	0,24	0,000150	261,26	0,14	0,000088	250,94	0,21	0,000129
100,40	10080	253,92	0,21	0,000132	261,53	0,27	0,000169	251,21	0,27	0,000166
107,33	11520	253,98	0,06	0,000038	261,58	0,05	0,000031	251,24	0,03	0,000018
113,84	12960	253,97	-0,01	-0,000006	261,59	0,01	0,000006	251,28	0,04	0,000025
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1595,20			1595,60			1621,66			
Coefficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,96			0,99			0,98			
Média (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,97									
Desvio-padrão (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ))	0,01									

### Anexo P: Porosidade aberta

Argamassa	Provetete	Massa do provete seco (g)	Massa do provete saturado imerso (g)	Massa do provete saturado	Porosidade aberta (%)	Média da porosidade aberta (%)	Desvio-padrão (%)	Coefficiente de variação
REF_1:4	1	59,54	34,67	66,41	21,64	22,09	0,48	0,022
	2	71,84	41,77	80,70	22,76			
	3	66,40	38,89	74,10	21,87			
B_1:4_10	1	63,09	37,46	69,68	20,45	20,51	0,10	0,005
	2	47,71	27,70	52,85	20,44			
	3	50,69	29,36	56,24	20,65			
B_1:4_15	1	77,53	44,67	85,7	19,91	20,50	0,42	0,021
	2	79,51	45,98	88,36	20,88			
	3	66,89	38,56	74,29	20,71			
B_1:4_20	1	54,47	31,51	60,13	19,78	19,77	0,06	0,003
	2	81,47	47,09	89,9	19,69			
	3	68,45	39,50	75,62	19,85			
M_1:4_10	1	62,58	35,68	69,71	20,95	21,68	0,55	0,025
	2	50,09	28,70	56,06	21,82			
	3	56,42	32,12	63,38	22,26			
M_1:4_15	1	61,83	35,51	69,49	22,54	22,40	0,20	0,009
	2	60,51	34,69	67,84	22,11			
	3	51,80	29,90	58,17	22,53			
M_1:4_20	1	50,32	29,10	56,73	23,20	22,74	0,42	0,019
	2	56,00	32,62	62,92	22,84			
	3	41,73	24,26	46,71	22,18			
REF_1:5	1	69,21	40,05	78,12	23,40	23,60	0,15	0,006
	2	53,37	30,93	60,31	23,62			
	3	61,23	36,18	69,04	23,77			
M_1:5_15	1	43,33	24,81	48,67	22,38	22,41	0,05	0,002
	2	57,82	33,23	64,95	22,48			
	3	56,96	32,69	63,95	22,36			
B_1:5_20	1	61,00	35,10	68,14	21,61	21,07	0,38	0,018
	2	54,91	31,73	61,00	20,81			
	3	45,77	26,43	50,85	20,80			
REF_1:6	1	62,78	36,64	71,43	24,86	24,64	0,31	0,013
	2	57,13	32,98	64,84	24,20			
	3	71,57	40,79	81,75	24,85			
M_1:6_15	1	58,54	33,44	66,18	23,34	23,53	0,26	0,011
	2	60,01	34,35	68,07	23,90			
	3	58,08	33,22	65,66	23,37			
B_1:6_20	1	64,77	37,26	72,59	22,13	22,33	0,27	0,012
	2	58,86	33,96	66,18	22,72			
	3	54,47	31,54	60,99	22,14			

### Anexo Q: Teor de ar incorporado

Argamassa	Provetete	Teor de ar incorporado (%)	Média do teor de ar (%)	Desvio-padrão (%)	Coefficiente de variação
REF_1:4	1	7,00	7,13	0,13	0,02
	2	7,25			
B_1:4_20	1	8,75	8,88	0,13	0,01
	2	9,00			
M_1:4_15	1	14,00	13,88	0,13	0,01
	2	13,75			
REF_1:5	1	7,75	7,63	0,13	0,02
	2	7,50			
M_1:5_15	1	14,75	14,75	0,00	0,00
	2	14,75			
REF_1:6	1	7,00	7,13	0,13	0,02
	2	7,25			
B_1:6_20	1	10,00	10,00	0,00	0,00
	2	10,00			

**Anexo R: Variação dimensional (retração)**

Provete	REF_1:4												Média de $\epsilon$ (%)
	1				2				3				
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	493,05	6,931	0,000	0,000	488,29	7,143	0,000	0,000	488,65	6,899	0,000	0,000	0,000
3	484,01	6,927	-0,004	-0,003	479,03	7,119	-0,024	-0,015	480,09	6,877	-0,022	-0,014	-0,010
6	475,87	6,906	-0,021	-0,016	473,99	7,103	-0,016	-0,025	476,36	6,873	-0,004	-0,016	-0,019
7	474,83	6,874	-0,032	-0,036	473,69	7,037	-0,066	-0,066	476,04	6,856	-0,017	-0,027	-0,043
10	474,03	6,848	-0,026	-0,052	472,42	7,030	-0,007	-0,071	474,52	6,855	-0,001	-0,027	-0,050
14	473,64	6,833	-0,015	-0,061	472,18	7,024	-0,006	-0,074	474,05	6,846	-0,009	-0,033	-0,056
21	474,24	6,831	-0,002	-0,062	472,89	7,027	0,003	-0,072	474,65	6,849	0,003	-0,031	-0,055
28	474,70	6,823	-0,008	-0,067	473,31	7,028	0,001	-0,072	475,12	6,857	0,008	-0,026	-0,055
35	474,88	6,830	0,007	-0,063	473,61	7,035	0,007	-0,067	475,420	6,840	-0,017	-0,037	-0,056
41	475,29	6,839	0,009	-0,057	473,75	7,041	0,006	-0,064	475,830	6,840	0,000	-0,037	-0,053
50	475,51	6,841	0,002	-0,056	474,14	7,043	0,002	-0,062	476,040	6,842	0,002	-0,036	-0,051
56	475,65	6,847	0,006	-0,052	474,29	7,034	-0,009	-0,068	476,220	6,847	0,005	-0,032	-0,051
70	476,05	6,835	-0,012	-0,060	474,65	7,030	-0,004	-0,071	476,550	6,849	0,002	-0,031	-0,054
80	476,24	6,841	0,006	-0,056	474,82	7,034	0,004	-0,068	476,790	6,842	-0,007	-0,036	-0,053
90	476,32	6,836	-0,005	-0,059	474,83	7,040	0,006	-0,064	476,890	6,837	-0,005	-0,039	-0,054

Provete	M_1:4_15												Média de $\epsilon$ (%)
	1				2				3				
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	494,78	6,623	0,000	0,000	493,10	7,674	0,000	0,000	491,58	6,839	0,000	0,000	0,000
3	485,83	6,618	-0,005	-0,003	485,79	7,670	-0,004	-0,003	485,85	6,836	-0,003	-0,002	-0,003
6	474,59	6,578	-0,040	-0,028	475,53	7,627	-0,043	-0,029	472,02	6,791	-0,045	-0,030	-0,029
7	473,20	6,537	-0,041	-0,054	474,61	7,607	-0,020	-0,042	471,06	6,771	-0,020	-0,043	-0,046
10	472,22	6,525	-0,012	-0,061	473,78	7,589	-0,018	-0,053	470,16	6,749	-0,022	-0,056	-0,057
14	472,04	6,523	-0,002	-0,063	473,66	7,578	-0,011	-0,060	470,04	6,744	-0,005	-0,059	-0,061
21	472,79	6,512	-0,011	-0,069	474,43	7,578	0,000	-0,060	470,82	6,742	-0,002	-0,061	-0,063
28	473,35	6,517	0,005	-0,066	474,99	7,584	0,006	-0,056	471,34	6,753	0,011	-0,054	-0,059
35	473,59	6,479	-0,038	-0,090	475,26	7,549	-0,035	-0,078	471,60	6,743	-0,010	-0,060	-0,076
41	473,98	6,483	0,004	-0,088	475,67	7,555	0,006	-0,074	471,99	6,729	-0,014	-0,069	-0,077
50	474,22	6,496	0,013	-0,079	475,84	7,573	0,018	-0,063	472,16	6,735	0,006	-0,065	-0,069
56	474,39	6,504	0,008	-0,074	476,00	7,579	0,006	-0,059	472,25	6,740	0,005	-0,062	-0,065
70	474,69	6,493	-0,011	-0,081	476,27	7,564	-0,015	-0,069	472,58	6,725	-0,015	-0,071	-0,074
80	474,83	6,484	-0,009	-0,087	476,39	7,557	-0,007	-0,073	472,69	6,721	-0,004	-0,074	-0,078
90	474,86	6,488	0,004	-0,084	476,39	7,554	-0,003	-0,075	472,75	6,717	-0,004	-0,076	-0,079

Provete	B_1:4_20												Média de $\epsilon$ (%)
	1				2				3				
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	507,70	7,499	0,000	0,000	504,92	7,430	0,000	0,000	517,13	6,509	0,000	0,000	0,000
3	502,24	7,471	-0,028	-0,017	497,00	7,398	-0,032	-0,020	508,82	6,498	-0,011	-0,007	-0,015
6	499,41	7,459	-0,012	-0,025	493,83	7,394	-0,004	-0,022	505,27	6,486	-0,012	-0,014	-0,021
7	496,78	7,407	-0,052	-0,057	491,79	7,336	-0,058	-0,059	503,39	6,472	-0,014	-0,023	-0,046
10	494,15	7,392	-0,015	-0,067	489,36	7,335	-0,001	-0,059	500,58	6,437	-0,035	-0,045	-0,057
14	493,14	7,376	-0,016	-0,077	488,15	7,295	-0,040	-0,084	499,23	6,416	-0,021	-0,058	-0,073
21	493,51	7,355	-0,021	-0,090	488,42	7,282	-0,013	-0,092	499,45	6,413	-0,003	-0,060	-0,081
28	493,79	7,355	0,000	-0,090	488,71	7,292	0,010	-0,086	499,63	6,414	0,001	-0,059	-0,079
35	493,83	7,333	-0,022	-0,104	488,69	7,297	0,005	-0,083	499,62	6,378	-0,036	-0,082	-0,090
41	494,22	7,334	0,001	-0,103	489,08	7,286	-0,011	-0,090	499,93	6,380	0,002	-0,081	-0,091
50	494,29	7,349	0,015	-0,094	489,11	7,298	0,012	-0,082	499,98	6,401	0,021	-0,067	-0,081
56	494,45	7,356	0,007	-0,089	489,28	7,305	0,007	-0,078	500,10	6,410	0,009	-0,062	-0,076
70	494,80	7,345	-0,011	-0,096	489,61	7,297	-0,008	-0,083	500,39	6,398	-0,012	-0,069	-0,083
80	494,94	7,341	-0,004	-0,099	489,77	7,288	-0,009	-0,089	500,53	6,390	-0,008	-0,074	-0,087
90	495,14	7,335	-0,006	-0,102	489,98	7,285	-0,003	-0,091	500,73	6,389	-0,001	-0,075	-0,089

Provete	REF_1:5												Média de $\epsilon$ (%)
	1				2				3				
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	483,04	7,799	0,000	0,000	475,93	7,665	0,000	0,000	479,78	7,892	0,000	0,000	0,000
3	475,29	7,792	-0,007	-0,004	467,34	7,655	-0,010	-0,006	470,26	7,888	-0,004	-0,003	-0,004
6	468,91	7,793	0,001	-0,004	460,56	7,656	0,001	-0,006	462,67	7,879	-0,009	-0,008	-0,006
7	467,20	7,799	0,006	0,000	459,14	7,610	-0,046	-0,034	461,61	7,884	0,005	-0,005	-0,013
10	465,49	7,748	-0,051	-0,032	457,15	7,604	-0,006	-0,038	460,37	7,834	-0,050	-0,036	-0,035
14	465,37	7,756	0,008	-0,027	457,13	7,616	0,012	-0,031	460,45	7,846	0,012	-0,029	-0,029
21	465,51	7,761	0,005	-0,024	457,15	7,622	0,006	-0,027	460,61	7,853	0,007	-0,024	-0,025
28	465,82	7,757	-0,004	-0,026	457,40	7,616	-0,006	-0,031	460,85	7,848	-0,005	-0,028	-0,028
35	466,08	7,760	0,003	-0,024	457,64	7,620	0,004	-0,028	461,07	7,849	0,001	-0,027	-0,026
41	466,22	7,751	-0,009	-0,030	457,84	7,610	-0,010	-0,034	461,24	7,839	-0,010	-0,033	-0,032
50	466,38	7,748	-0,003	-0,032	457,99	7,609	-0,001	-0,035	461,48	7,837	-0,002	-0,034	-0,034
56	466,48	7,742	-0,006	-0,036	458,02	7,610	0,001	-0,034	461,54	7,831	-0,006	-0,038	-0,036
70	466,33	7,737	-0,005	-0,039	458,07	7,600	-0,010	-0,041	461,60	7,827	-0,004	-0,041	-0,040
80	466,15	7,733	-0,004	-0,041	458,04	7,593	-0,007	-0,045	461,36	7,824	-0,003	-0,043	-0,043
90	466,00	7,729	-0,004	-0,044	457,89	7,590	-0,003	-0,047	461,200	7,820	-0,004	-0,045	-0,045

M_1:5_15													
Provete	1				2				3				Média de $\epsilon$ (%)
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	473,86	7,481	0,000	0,000	471,96	7,557	0,000	0,000	479,65	7,647	0,000	0,000	0,000
3	466,41	7,470	-0,011	-0,007	463,50	7,541	-0,016	-0,010	470,53	7,631	-0,016	-0,010	-0,009
6	460,36	7,418	-0,052	-0,039	457,70	7,499	-0,042	-0,036	465,53	7,589	-0,042	-0,036	-0,037
7	460,11	7,427	0,009	-0,034	457,27	7,507	0,008	-0,031	465,18	7,594	0,005	-0,033	-0,033
10	460,18	7,376	-0,051	-0,066	457,19	7,454	-0,053	-0,064	465,10	7,545	-0,049	-0,064	-0,065
14	460,59	7,385	0,009	-0,060	457,64	7,465	0,011	-0,058	465,50	7,560	0,015	-0,054	-0,057
21	460,95	7,390	0,005	-0,057	457,98	7,468	0,003	-0,056	465,86	7,560	0,000	-0,054	-0,056
28	461,30	7,384	-0,006	-0,061	458,31	7,462	-0,006	-0,059	466,22	7,548	-0,012	-0,062	-0,061
35	461,61	7,380	-0,004	-0,063	458,60	7,454	-0,008	-0,064	466,51	7,551	0,003	-0,060	-0,063
41	461,84	7,373	-0,007	-0,067	458,84	7,459	0,005	-0,061	466,75	7,544	-0,007	-0,064	-0,064
50	462,04	7,370	-0,003	-0,069	459,05	7,450	-0,009	-0,067	466,94	7,536	-0,008	-0,069	-0,069
56	462,12	7,366	-0,004	-0,072	459,06	7,440	-0,010	-0,073	467,02	7,532	-0,004	-0,072	-0,072
70	462,15	7,357	-0,009	-0,077	459,07	7,436	-0,004	-0,076	467,07	7,525	-0,007	-0,076	-0,076
80	462,08	7,354	-0,003	-0,079	458,98	7,428	-0,008	-0,081	466,89	7,521	-0,004	-0,079	-0,080
90	461,83	7,349	-0,005	-0,082	458,78	7,427	-0,001	-0,081	466,77	7,515	-0,006	-0,083	-0,082

REF_1:6													
Provete	1				2				3				Média de $\epsilon$ (%)
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	472,15	7,528	0,000	0,000	473,64	7,503	0,000	0,000	478,24	7,518	0,000	0,000	0,000
3	456,84	7,524	-0,004	-0,002	460,10	7,486	-0,017	-0,011	464,33	7,509	-0,009	-0,006	-0,006
6	450,82	7,512	-0,012	-0,010	452,93	7,471	-0,015	-0,020	458,32	7,500	-0,009	-0,011	-0,014
7	450,08	7,520	0,008	-0,005	452,61	7,481	0,010	-0,014	457,85	7,508	0,008	-0,006	-0,008
10	449,83	7,476	-0,044	-0,032	452,54	7,438	-0,043	-0,041	457,62	7,465	-0,043	-0,033	-0,035
14	449,93	7,487	0,011	-0,026	452,69	7,448	0,010	-0,034	457,78	7,477	0,012	-0,026	-0,028
21	450,19	7,504	0,017	-0,015	452,95	7,458	0,010	-0,028	458,04	7,486	0,009	-0,020	-0,021
28	450,41	7,489	-0,015	-0,024	453,24	7,453	-0,005	-0,031	458,30	7,480	-0,006	-0,024	-0,026
35	450,54	7,494	0,005	-0,021	453,39	7,458	0,005	-0,028	458,40	7,485	0,005	-0,021	-0,023
41	450,62	7,484	-0,010	-0,027	453,44	7,449	-0,009	-0,034	458,46	7,477	-0,008	-0,026	-0,029
50	450,63	7,483	-0,001	-0,028	453,49	7,448	-0,001	-0,034	458,46	7,476	-0,001	-0,026	-0,030
56	450,59	7,482	-0,001	-0,029	453,45	7,442	-0,006	-0,038	458,39	7,470	-0,006	-0,030	-0,032
70	450,47	7,475	-0,007	-0,033	453,41	7,437	-0,005	-0,041	458,33	7,461	-0,009	-0,036	-0,037
80	450,36	7,467	-0,008	-0,038	453,34	7,435	-0,002	-0,043	458,08	7,464	0,003	-0,034	-0,038
90	450,24	7,468	0,001	-0,037	453,29	7,431	-0,004	-0,045	458,01	7,461	-0,003	-0,036	-0,039

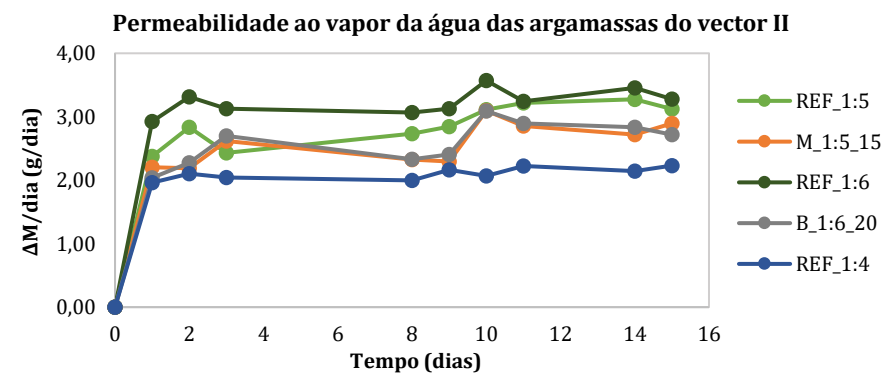
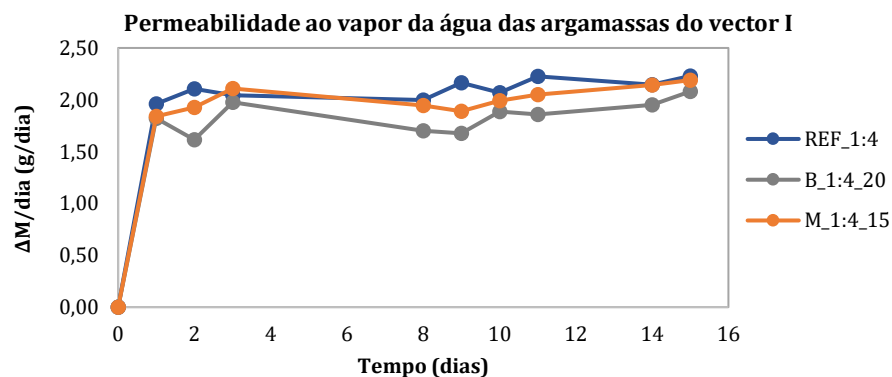
B_1:6_20													
Provete	1				2				3				Média de $\epsilon$ (%)
Idade (dias)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	Massa (g)	Leitura (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon$ (%)	
2	481,08	8,034	0,000	0,000	489,11	7,789	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000
3	469,44	8,008	-0,026	-0,016	477,32	7,764	-0,025	-0,016	-	-	-	-	-0,016
6	466,42	7,978	-0,030	-0,035	474,35	7,745	-0,019	-0,027	-	-	-	-	-0,031
7	465,77	7,999	0,021	-0,022	473,58	7,752	0,007	-0,023	-	-	-	-	-0,023
10	465,02	7,989	-0,010	-0,028	472,73	7,740	-0,012	-0,031	-	-	-	-	-0,029
14	464,70	7,982	-0,007	-0,033	472,41	7,733	-0,007	-0,035	-	-	-	-	-0,034
21	464,71	7,974	-0,008	-0,038	472,42	7,726	-0,007	-0,039	-	-	-	-	-0,038
28	464,76	7,975	0,001	-0,037	472,49	7,728	0,002	-0,038	-	-	-	-	-0,038
35	464,89	7,968	-0,007	-0,041	472,63	7,718	-0,010	-0,044	-	-	-	-	-0,043
41	464,98	7,962	-0,006	-0,045	472,67	7,714	-0,004	-0,047	-	-	-	-	-0,046
50	465,00	7,955	-0,007	-0,049	472,72	7,707	-0,007	-0,051	-	-	-	-	-0,050
56	465,04	7,955	0,000	-0,049	472,78	7,710	0,003	-0,049	-	-	-	-	-0,049
70	465,08	7,944	-0,011	-0,056	472,86	7,700	-0,010	-0,056	-	-	-	-	-0,056
80	465,06	7,939	-0,005	-0,059	472,88	7,693	-0,007	-0,060	-	-	-	-	-0,060
90	465,03	7,938	-0,001	-0,060	472,82	7,693	0,000	-0,060	-	-	-	-	-0,060

Nota: com exceção da argamassa B\_1:6\_20%, este ensaio foi realizado a três provetes de cada argamassa. Para a referida argamassa, à data do desmolde, um dos provetes cedeu pela zona dos pernos, possivelmente devido a uma deficiente compactação dos provetes nessa zona, impossibilitando a sua utilização neste ensaio.

### Anexo S: Permeabilidade ao vapor de água

Tempo (dias)	REF_1:4					B_1:4_20					M_1:4_15				
	1	2	Média			1	2	Média			1	2	Média		
	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$
0	2458,02	0,00	2462,13	0,00	<b>0,00</b>	2576,06	0,00	2532,32	0,00	<b>0,00</b>	2508,34	0,00	2483,00	0,00	<b>0,00</b>
1	2455,97	2,05	2460,26	1,87	<b>1,96</b>	2574,30	1,76	2530,44	1,88	<b>1,82</b>	2506,60	1,74	2481,06	1,94	<b>1,84</b>
2	2453,89	2,08	2458,13	2,13	<b>2,11</b>	2572,73	1,57	2528,78	1,66	<b>1,62</b>	2504,79	1,81	2479,02	2,04	<b>1,92</b>
3	2451,92	1,97	2456,01	2,12	<b>2,04</b>	2570,86	1,87	2526,70	2,08	<b>1,98</b>	2502,72	2,07	2476,87	2,15	<b>2,11</b>
8	2442,11	1,96	2445,83	2,04	<b>2,00</b>	2563,11	1,55	2517,45	1,85	<b>1,70</b>	2493,46	1,85	2466,68	2,04	<b>1,94</b>
9	2439,90	2,21	2443,71	2,12	<b>2,17</b>	2561,52	1,59	2515,69	1,76	<b>1,67</b>	2491,64	1,82	2464,72	1,96	<b>1,89</b>
10	2437,91	1,99	2441,56	2,15	<b>2,07</b>	2559,67	1,85	2513,77	1,92	<b>1,88</b>	2489,71	1,93	2462,67	2,05	<b>1,99</b>
11	2435,52	2,39	2439,50	2,06	<b>2,22</b>	2557,78	1,89	2511,94	1,83	<b>1,86</b>	2487,72	1,99	2460,56	2,11	<b>2,05</b>
14	2428,83	2,23	2433,32	2,06	<b>2,14</b>	2552,06	1,91	2505,95	2,00	<b>1,95</b>	2481,53	2,06	2453,89	2,22	<b>2,14</b>
15	2426,55	2,28	2431,14	2,18	<b>2,23</b>	2550,03	2,03	2503,82	2,13	<b>2,08</b>	2479,21	2,32	2451,83	2,06	<b>2,19</b>

Tempo (dias)	REF_1:5					M_1:5_15					REF_1:6					B_1:6_20				
	1	2	Média			1	2	Média			1	2	Média			1	2	Média		
	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	Massa (g)	$\Delta M/\text{dia}$	$\Delta M/\text{dia}$
0	2428,36	0,00	2366,09	0,00	<b>0,00</b>	2508,68	0,00	2482,83	0,00	<b>0,00</b>	2389,90	0,00	2483,31	0,00	<b>0,00</b>	2468,89	0,00	2477,86	0,00	<b>0,00</b>
1	2426,12	2,24	2363,58	2,51	<b>2,38</b>	2506,57	2,11	2480,53	2,30	<b>2,20</b>	2386,59	3,31	2480,77	2,54	<b>2,92</b>	2466,85	2,04	2475,82	2,04	<b>2,04</b>
2	2423,33	2,79	2360,70	2,88	<b>2,84</b>	2504,39	2,18	2478,33	2,20	<b>2,19</b>	2383,44	3,15	2477,29	3,48	<b>3,32</b>	2464,75	2,10	2473,37	2,45	<b>2,28</b>
3	2420,76	2,57	2358,41	2,29	<b>2,43</b>	2501,89	2,50	2475,59	2,74	<b>2,62</b>	2380,36	3,08	2474,12	3,17	<b>3,13</b>	2462,04	2,71	2470,68	2,69	<b>2,70</b>
8	2407,38	2,68	2344,44	2,79	<b>2,73</b>	2491,17	2,14	2463,05	2,51	<b>2,33</b>	2365,24	3,02	2458,59	3,11	<b>3,07</b>	2450,41	2,33	2459,00	2,34	<b>2,33</b>
9	2404,43	2,95	2341,70	2,74	<b>2,85</b>	2489,02	2,15	2460,61	2,44	<b>2,30</b>	2362,12	3,12	2455,46	3,13	<b>3,13</b>	2448,09	2,32	2456,51	2,49	<b>2,40</b>
10	2401,26	3,17	2338,65	3,05	<b>3,11</b>	2485,99	3,03	2457,45	3,16	<b>3,10</b>	2358,76	3,36	2451,68	3,78	<b>3,57</b>	2444,76	3,33	2453,66	2,85	<b>3,09</b>
11	2398,01	3,25	2335,46	3,19	<b>3,22</b>	2483,45	2,54	2454,28	3,17	<b>2,85</b>	2355,46	3,30	2448,49	3,19	<b>3,25</b>	2441,60	3,16	2451,03	2,63	<b>2,89</b>
14	2387,84	3,39	2325,98	3,16	<b>3,28</b>	2476,15	2,43	2445,26	3,01	<b>2,72</b>	2345,86	3,20	2437,36	3,71	<b>3,45</b>	2433,61	2,66	2442,02	3,00	<b>2,83</b>
15	2384,72	3,12	2322,86	3,12	<b>3,12</b>	2473,42	2,73	2442,2	3,06	<b>2,90</b>	2342,64	3,22	2434,02	3,34	<b>3,28</b>	2430,94	2,67	2439,25	2,77	<b>2,72</b>



Argamassa	Pro-vete	Média da espessura (mm)	$\Delta M/\text{dia}$ (g/dia)	Fluxo (kg/s)x10 <sup>-9</sup>	Permeância (kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa))	Permeabilidade (ng/m.s.Pa)	Média da permeabilidade (ng/m.s.Pa)	Desvio-padrão (ng/m.s.Pa)	Coefficiente de variação	Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 20 mm de argamassa (m)	Média da espessura da camada de ar de difusão equivalente a 20 mm de argamassa (m)
REF_1:4	1	19,71	1,92	22,18	901,04	17,76	17,52	0,24	0,01	0,21	0,21
	2	19,62	1,87	21,67	880,54	17,27				0,21	
B_1:4_20	1	20,16	1,60	18,54	753,14	15,18	15,67	0,48	0,03	0,24	0,24
	2	20,08	1,71	19,80	804,40	16,15				0,23	
M_1:4_15	1	20,32	1,76	20,36	827,37	16,81	17,21	0,40	0,02	0,22	0,22
	2	20,16	1,86	21,49	873,27	17,61				0,21	
REF_1:5	1	20,17	2,62	30,27	1229,92	24,81	24,64	0,16	0,01	0,15	0,15
	2	20,23	2,57	29,78	1210,07	24,48				0,15	
M_1:5_15	1	20,47	2,18	25,25	1025,90	21,00	22,44	1,45	0,06	0,18	0,17
	2	20,67	2,46	28,45	1156,03	23,89				0,16	
REF_1:6	1	20,28	2,88	33,29	1352,55	27,42	27,63	0,21	0,01	0,14	0,13
	2	20,11	2,94	34,08	1384,62	27,84				0,13	
B_1:6_20	1	19,94	2,33	26,99	1096,53	21,86	22,06	0,19	0,01	0,17	0,17
	2	20,35	2,33	26,92	1093,71	22,25				0,17	

#### Anexo T: Permeabilidade à água sob pressão

Argamassa	Provete	Sem envelhecimento - aos 28 dias							Após envelhecimento acelerado								
		Quantidade de água absorvida sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )					Média após 48 horas (ml/cm <sup>2</sup> )	Desvio-padrão (ml/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variação	Quantidade de água absorvida sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )					Média após 48 horas (ml/cm <sup>2</sup> )	Desvio-padrão (ml/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variação
		1 h	2 h	6 h	24 h	48 h				1 h	2 h	6 h	24 h	48 h			
REF_1:4	1	0,36	0,54	0,72	1,62	2,35	2,17	0,18	0,08	0,36	0,54	1,44	0,00	3,79	3,43	0,36	0,11
	2	0,36	0,36	0,54	0,90	1,98				0,54	0,72	0,00	0,00	3,07			
B_1:4_20	1	0,17	0,17	0,34	0,67	1,85	1,77	0,08	0,05	0,27	0,36	0,90	0,00	1,98	2,09	0,10	0,05
	2	0,17	0,34	0,67	1,01	1,68				0,25	0,50	1,01	0,00	2,19			
M_1:4_15	1	0,00	0,17	0,67	1,01	2,19	1,86	0,33	0,18	0,18	0,54	0,81	1,53	2,08	2,57	0,50	0,19
	2	0,18	0,36	0,54	0,90	1,53				0,18	0,72	1,08	1,98	3,07			
REF_1:5	1	0,50	0,84	2,02	4,71	7,23	7,05	0,19	0,03	0,45	0,81	1,62	3,61	6,86	7,67	0,81	0,11
	2	0,36	0,72	1,62	4,15	6,86				0,45	0,90	1,80	4,87	8,48			
M_1:5_15	1	0,36	0,67	1,01	2,36	4,21	4,75	0,55	0,12	0,54	0,90	1,26	3,16	5,14	5,01	0,14	0,03
	2	0,17	0,93	1,60	3,28	5,30				0,54	1,08	1,53	3,07	4,87			
REF_1:6	1	0,63	1,26	3,07	5,41	8,30	8,52	0,22	0,03	0,72	1,26	2,35	0,00	8,84	8,93	0,09	0,01
	2	1,01	1,68	3,36	6,06	8,75				0,54	1,08	2,53	0,00	9,02			
B_1:6_20	1	0,42	0,42	0,67	2,19	4,29	4,49	0,20	0,04	0,72	0,99	1,98	0,00	7,04	6,63	0,41	0,06
	2	0,18	0,45	1,08	2,71	4,69				0,84	1,18	1,85	0,00	6,22			

## Anexo U: Aderência ao suporte

Arga- massa	Ca- rote	Sem envelhecimento acelerado - aos 28 dias							Após envelhecimento acelerado						
		Força de ar- rancamento lida (N)	Força de arran- camento corrigida (N)	Tensão de aderência (MPa)	Tipolo- gia da rotura	Média da tensão de aderência (MPa)	Desvio- padrão (MPa)	Coeffi- ciente de variação	Força de ar- rancamento lida (N)	Força de arran- camento corrigida (N)	Tensão de aderência (MPa)	Tipolo- gia da rotura	Média da tensão de aderência (MPa)	Desvio- padrão (MPa)	Coeffi- ciente de variação
REF_1:4	1	750	748	0,38	A/B	0,54	0,11	0,20	1300	1296	0,66	B	0,55	0,06	0,10
	2	1350	1346	0,69	A/B				1050	1047	0,53	B			
	3	1250	1246	0,63	A/B				1000	997	0,51	B			
	4	1000	997	0,51	A/B				1000	997	0,51	B			
	5	1000	997	0,51	A				1050	1047	0,53	B			
B_1:4_20	1	1600	1595	0,81	A/C	0,87	0,07	0,08	1450	1446	0,74	A	0,66	0,05	0,08
	2	1950	1944	0,99	A/C				1150	1147	0,58	A/C			
	3	1600	1595	0,81	A/C				1250	1246	0,63	A			
	4	1650	1645	0,84	A/C				1300	1296	0,66	A/C			
	5	1800	1795	0,91	A				1300	1296	0,66	A			
M_1:4_15	1	1400	1396	0,71	A	0,66	0,10	0,16	1400	1396	0,71	A	0,64	0,07	0,11
	2	1300	1296	0,66	A/B				1150	1147	0,58	A			
	3	1600	1595	0,81	A				1300	1296	0,66	B			
	4	1050	1047	0,53	A				1400	1396	0,71	A/B			
	5	1100	1097	0,56	A				1050	1047	0,53	A			
REF_1:5	1	850	848	0,43	B	0,39	0,07	0,18	1100	1097	0,56	B	0,41	0,08	0,21
	2	900	897	0,46	B				800	798	0,41	B			
	3	900	897	0,46	B				750	748	0,38	B			
	4	600	598	0,30	B				600	598	0,30	B			
	6	600	598	0,30	B				750	748	0,38	B			
	1	900	897	0,46	B				1300	1296	0,66	B			
M_1:5_15	2	900	897	0,46	B	0,44	0,02	0,06	1250	1246	0,63	A/B	0,56	0,08	0,15
	3	800	798	0,41	B				1000	997	0,51	A/B			
	4	800	798	0,41	B				850	848	0,43	A/B			
	5	900	897	0,46	B				1150	1147	0,58	B			
	1	550	548	0,28	B				0,29	0,01	0,04	450			
2	600	598	0,30	B	400	399	0,20	B							
3	600	598	0,30	B	450	399	0,20	B							
4	600	598	0,30	B	800	798	0,41	B							
5	550	548	0,28	B	600	598	0,30	B							
B_1:6_20	1	1400	1396	0,71	A/B	0,66	0,05	0,07	1350	1346	0,69	B	0,63	0,05	0,08
	2	1200	1197	0,61	A/B				1350	1346	0,69	A/B			
	3	1200	1197	0,61	A/B				1200	1197	0,61	B/C			
	4	1400	1396	0,71	A				1100	1097	0,56	B			
	5	1250	1246	0,63	A/B				1050	1197	0,61	B			

Área dos carotes - 1963,50 mm<sup>2</sup>.

Tipologias de rotura: A - rotura adesiva (na interface); B - rotura coesiva (no seio do revestimento); C - rotura coesiva (no seio do suporte)



