

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

**Reciclagem de agregados**

**Samuel Alexandre Amaro Roque**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientadores

Prof. Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

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

**Júri**

Presidente: Prof<sup>a</sup> Maria Cristina De Oliveira Matos Silva

Orientador: Prof. Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Vogal: Prof. Luís Manuel da Rocha Evangelista

**Junho de 2019**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## Agradecimentos

A conclusão deste trabalho representa mais do que as palavras que aqui possa escrever e os agradecimentos que enuncio são tão importantes como os omissos. Deixo algumas palavras de apreço a pessoas e entidades que contribuíram de formas diversas para o encerramento deste capítulo.

Ao Prof. Dr. Jorge Manuel Calião de Brito, pela inabalável disponibilidade e prontidão em rever, analisar, corrigir e aconselhar, sempre com rigor e profissionalismo que tanto lhe são característicos.

À Dr.<sup>a</sup> Eng.<sup>a</sup> Maria do Rosário Veiga, por possibilitar o desenvolvimento de todos os trabalhos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, assim como por todo o apoio e todo o conhecimento partilhado, direta e indiretamente ao longo de todo o processo.

Ao Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, em particular ao Sr. Leonel, pela sua disponibilidade e inabalável boa disposição.

Ao Laboratório da Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa) do LNEC; à técnica Ana Maria Duarte, sempre atenta; ao Acácio Monteiro e ao Bento Sabala; à Eng.<sup>a</sup> Dora Santos e à Eng.<sup>a</sup> Rita Santos; à Eng.<sup>a</sup> Catarina Farinha. A todos estes pela sua colaboração e disponibilidade absolutamente essenciais nesta campanha experimental.

Às empresas *SGR - Sociedade Gestora de Resíduos, S.A.* e *RCD - Resíduos de Construção e Demolição S.A.* pela disponibilização dos resíduos de construção e demolição utilizados.

À Sara, um agradecimento singular por todo o apoio, mas acima de tudo pela amizade sempre presente ao longo de todo o percurso.

Ao Rabaça, ao Santos, ao Carrajola e ao Morgado; aos restantes amigos para quem a distância a nada tira valor.

À minha mãe. Por tudo.

A toda a minha família pela sua presença constante, carinho e preocupação inigualáveis.

À Catarina, pela força contagiante, pela pressão, pela estima, pelo esforço e pela dedicação.



## Resumo

A indústria da construção é responsável pela produção de resíduos de diversas tipologias, desde os devidos à produção de materiais aos associados à demolição de construções devolutas. Este cenário traduz-se num impacto ambiental significativo, cuja mitigação tem sido objeto de análise em diversos trabalhos de investigação. Neste contexto, estuda-se a viabilidade da incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de argamassas, quer como agregados, quer como aditivos.

Esta dissertação estuda a utilização de RCD de dois lotes: um composto apenas por betão triturado e um outro de resíduos não segregados, constituído por elementos de natureza diversa como tijolo, betão, plástico e material orgânico. Ambos os lotes foram manipulados para corresponderem à distribuição granulométrica do agregado de referência - areia de rio < 2,380 mm - e foram formuladas argamassas com substituição de 20, 50 e 100% do agregado natural por resíduos de construção e demolição.

A campanha experimental foi dividida em três fases: a primeira abrange a caracterização dos diversos materiais utilizados; a segunda é composta por ensaios incidentes sobre todas as composições estudadas; a terceira consiste num conjunto de ensaios realizados apenas com as argamassas selecionadas após a fase anterior.

Os resultados obtidos revelam que, além dos benefícios ambientais inerentes à utilização de materiais reciclados, é possível obter melhorias funcionais nas argamassas. Das seis formulações, destaca-se a ARM20, composta por 80% de agregado natural e 20% de agregado reciclado misto, que apresentou um desempenho idêntico ou superior ao da argamassa de referência na maioria dos parâmetros avaliados.

**Palavras-chave:** resíduos de construção e demolição; agregados reciclados; argamassas de revestimento; redução do agregado natural.

## **Abstract**

The construction industry is responsible for the production of several types of waste, from those due to the production of materials to those associated to the end of life of the buildings. This translates into a significant environmental impact whose mitigation has been object of analysis in several research works. In this context the feasibility of incorporating construction and demolition waste (CDW) in the production of mortars, either as aggregates or as additives, is studied.

This dissertation studies the incorporation of two types of CDW: one composed only of crushed concrete and another of non-segregated waste, composed of diverse constituents such as clay brick, concrete, plastic and organic material. Both lots were altered to match the grading curve of the reference aggregate - river sand <2,38 mm - and mortars were formulated replacing 20%, 50% and 100% of natural aggregate with construction and demolition waste.

The experimental campaign was divided in three stages: the first covers the characterization of the different used materials; the second stage is composed of the several tests of all the studied compositions; the third and last stage consists of a set of tests performed only with some selected mortars from the previous stage.

The obtained results show that, in addition to the environmental gains inherent to the use of recycled materials, it is possible to obtain functional improvements in mortars. Of the six different formulations, MRA20 stands out, composed of 80% of natural aggregate and 20% of mixed recycled aggregate, which performed better than the reference mortar in most evaluated parameters.

**Keywords:** construction and demolition waste; recycled aggregates; coating mortars; natural aggregate reduction.

# Índice

1. Introdução .....	1
1.1.    Considerações iniciais.....	1
1.2.    Objetivos da dissertação .....	2
1.3.    Metodologia e organização da dissertação .....	2
2. Estado da arte .....	5
2.1.    Nota introdutória .....	5
2.2.    Argamassas de revestimento.....	5
2.2.1.  Exigências funcionais.....	5
2.2.2.  Principais propriedades das argamassas no estado fresco.....	6
2.2.2.1.  Consistência e trabalhabilidade .....	6
2.2.2.2.  Retenção de água .....	6
2.2.2.3.  Teor de ar incorporado .....	6
2.2.2.4.  Massa volúmica e baridade.....	7
2.2.3.  Principais propriedades das argamassas no estado endurecido.....	7
2.2.3.1.  Módulo de elasticidade dinâmico .....	7
2.2.3.2.  Suscetibilidade à fendilhação .....	7
2.2.3.3.  Aderência ao suporte .....	7
2.2.3.4.  Permeabilidade ao vapor de água.....	8
2.3.    Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição .....	9
2.3.1.  Agregados reciclados cerâmicos .....	9
2.3.2.  Agregados reciclados de betão .....	9
2.4.    Argamassas com incorporação de agregados reciclados .....	10

2.4.1.	Utilização de agregados reciclados de betão .....	11
2.4.2.	Utilização de agregados reciclados mistos .....	14
3.	Campanha experimental .....	17
3.1.	Introdução .....	17
3.2.	Materiais constituintes.....	17
3.2.1.	Seleção dos materiais .....	18
3.2.1.1.	Ligante .....	18
3.2.1.2.	Agregados.....	18
3.3.	Composições .....	19
3.4.	Procedimentos.....	19
3.4.1.	Caracterização dos constituintes .....	19
3.4.1.1.	Massa volúmica aparente .....	20
3.4.1.2.	Análise granulométrica .....	21
3.4.1.3.	Caracterização visual dos agregados reciclados.....	22
3.4.2.	Produção de provetes de argamassa .....	22
3.4.2.1.	Amassadura .....	23
3.4.2.2.	Provetes prismáticos .....	24
3.4.2.3.	Provetes em disco .....	25
3.4.2.4.	Aplicação em tijolo .....	25
3.4.2.5.	Condições de cura .....	26
3.4.3.	Ensaio no estado fresco.....	27
3.4.3.1.	Consistência por espalhamento.....	27
3.4.3.2.	Massa volúmica no estado fresco .....	28

3.4.4.	Ensaio no estado endurecido .....	28
3.4.4.1.	Massa volúmica aparente .....	28
3.4.4.2.	Ultrassons .....	29
3.4.4.3.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	30
3.4.4.4.	Resistências à tração por flexão e à compressão .....	31
3.4.4.5.	Absorção de água por capilaridade .....	32
3.4.4.6.	Secagem .....	33
3.4.4.7.	Varição dimensional .....	34
3.4.4.8.	Porosidade aberta .....	34
3.4.4.9.	Permeabilidade ao vapor de água .....	35
3.4.4.10.	Permeabilidade à água sob pressão .....	37
3.4.4.11.	Suscetibilidade à fendilhação .....	37
3.4.4.12.	Aderência ao suporte .....	38
3.4.4.13.	Envelhecimento artificial acelerado .....	39
4.	Apresentação e análise dos resultados .....	41
4.1.	Nota introdutória .....	41
4.2.	Caracterização dos constituintes .....	41
4.2.1.	Granulometria dos agregados .....	41
4.2.2.	Composição dos agregados reciclados .....	41
4.2.3.	Massa volúmica aparente .....	42
4.3.	Ensaio às argamassas .....	42
4.3.1.	Segunda fase .....	42
4.3.1.1.	Consistência por espalhamento .....	43

4.3.1.2.	Massa volúmica no estado fresco .....	43
4.3.1.3.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	44
4.3.1.4.	Resistência à tração por flexão e à compressão.....	45
4.3.1.5.	Ultrassons.....	46
4.3.1.6.	Absorção de água por capilaridade .....	46
4.3.1.7.	Secagem.....	48
4.3.1.8.	Porosidade aberta .....	49
4.3.2.	Terceira fase .....	50
4.3.2.1.	Varição dimensional.....	50
4.3.2.2.	Permeabilidade ao vapor de água.....	51
4.3.2.3.	Aderência ao suporte.....	52
4.3.2.4.	Envelhecimento acelerado.....	53
4.4.	Considerações finais.....	55
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	59
5.1.	Considerações finais.....	59
5.2.	Conclusões gerais .....	59
5.3.	Propostas de desenvolvimentos futuros .....	62
	Referências bibliográficas .....	65
	Anexos.....	I
Anexo A:	Baridade dos componentes .....	I
Anexo B:	Composição das argamassas .....	II
Anexo C:	Consistência por espalhamento.....	II
Anexo D:	Massa volúmica aparente no estado fresco.....	III

Anexo E:	Massa volúmica aparente no estado endurecido.....	IV
Anexo F:	Módulo de elasticidade dinâmico .....	VI
Anexo G:	Ultrassons.....	VIII
Anexo H:	Resistência à compressão .....	XIV
Anexo I:	Resistência à tração por flexão .....	XVI
Anexo J:	Absorção de água por capilaridade.....	XVIII
Anexo K:	Secagem .....	XXII
Anexo L:	Porosidade aberta .....	XXVIII
Anexo M:	Variação dimensional .....	XXIX
Anexo N:	Permeabilidade ao vapor de água .....	XXXI
Anexo O:	Aderência ao suporte.....	XXXII
Anexo P:	Permeabilidade à água sob pressão.....	XXXIII

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Resíduos gerados por atividade económica em 2016 .....	1
Figura 2.1 - Ilustração de diferentes níveis de aderência reboco / suporte, por ordem crescente da esquerda para a direita (1 < 2 < 3) .....	8
Figura 2.2 - Resíduos de alvenaria de tijolo.....	9
Figura 2.3 - Observação microscópica de ARB finos .....	10
Figura 2.4 - Esquema de ensaio de aderência realizado por Corinaldesi & Moriconi .....	11
Figura 2.5 - Resistência à compressão em função da percentagem de incorporação .....	12
Figura 2.6 - Resistência à flexão em função da percentagem de incorporação .....	12
Figura 2.7 - Comparação de aparência e distribuição granulométrica de agregado natural (FNA) e produtos dos diferentes métodos de processamento utilizados (R1 e R2) .....	13
Figura 2.8 - Resistência à compressão e à flexão em função da percentagem de incorporação de agregados reciclados (adaptado de Samiei <i>et al.</i> , 2015).....	14
Figura 2.9 - Absorção de água em função da percentagem de incorporação de agregados reciclados (adaptado de Samiei <i>et al.</i> , 2015).....	14
Figura 2.10 - Resistência à compressão e consistência em estado fresco de argamassas em função da taxa de compensação de água .....	15
Figura 2.11 - Retração e idade dos provetes .....	16
Figura 3.1 - Medição da baridade de agregados.....	21
Figura 3.2 - Equipamentos para a moldagem de prismas .....	24
Figura 3.3 - Compactação da argamassa .....	24
Figura 3.4 - Regularização das superfícies de um molde .....	24
Figura 3.5 - Equipamentos para a moldagem de prismas .....	28
Figura 3.6 - Regularização da superfície de um molde .....	28
Figura 3.7 - Equipamento de medição de ultrassons .....	30

Figura 3.8 - Medição pelo método direto.....	30
Figura 3.9 - Aparelho de medição de frequências fundamentais.....	31
Figura 3.10 - <i>Software</i> do aparelho de medição de frequências fundamentais .....	31
Figura 3.11 - Esquema de ensaio de permeabilidade ao vapor de água .....	36
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados.....	41
Figura 4.2 - Materiais visíveis no agregado reciclado misto (percentagens em massa)...	42
Figura 4.3 - Água de amassadura necessária para o espalhamento definido.....	43
Figura 4.4 - Massa volúmica no estado fresco .....	44
Figura 4.5 - Módulo de elasticidade dinâmico (90 dias).....	44
Figura 4.6 - Resistência à tração por flexão (90 dias).....	45
Figura 4.7 - Resistência à compressão (90 dias).....	45
Figura 4.8 - Velocidade média de propagação de ultrassons - método indireto .....	46
Figura 4.9 - Absorção de água por capilaridade em provetes com agregados ARB.....	47
Figura 4.10 - Absorção por capilaridade em provetes com agregados ARM.....	47
Figura 4.11 - Processo de secagem dos provetes com agregado reciclado de betão .....	48
Figura 4.12 - Processo de secagem dos provetes com agregado reciclado misto .....	49
Figura 4.13 - Valores médios de porosidade aberta.....	50
Figura 4.14 - Variação dimensional dos provetes .....	51
Figura 4.15 - Variação dimensional aos 90 dias e quantidade de água de amassadura ..	51
Figura 4.16 - Permeabilidade ao vapor de água e porosidade aberta .....	52
Figura 4.17 - Água absorvida antes e após envelhecimento acelerado .....	54

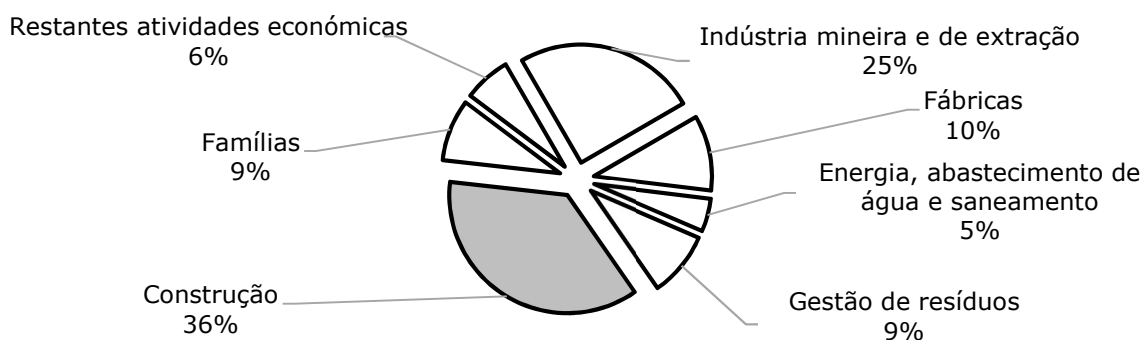
## Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Lista de estudos e respectivos tipos de agregados utilizados.....	10
Tabela 2.2 - Resistência mecânica e aderência em função da percentagem de substituição de agregado natural por agregado reciclado de betão (ARB) .....	11
Tabela 2.3 - Resistência mecânica e aderência em função da percentagem de substituição de agregado natural por agregado reciclado misto (ARM) .....	14
Tabela 3.1 - Fases de ensaios .....	17
Tabela 3.2 - Composições das argamassas estudadas .....	19
Tabela 3.3 - Disposição dos crivos utilizados .....	22
Tabela 3.4 - Tipos de provete.....	23
Tabela 3.5 - Ensaios e respectivos tipos de cura .....	26
Tabela 4.1 - Massa volúmica aparente dos diversos materiais .....	42
Tabela 4.2 - Coeficientes de capilaridade (ARB) segundo a norma EN 1015-18.....	47
Tabela 4.3 - Coeficientes de capilaridade (ARM) segundo a norma EN 1015-18 .....	48
Tabela 4.4 - Permeabilidade ao vapor de água e espessura de ar equivalente .....	52
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte.....	53
Tabela 5.1 - Comparação dos resultados das argamassas ARB com a de referência – 2ª fase .....	60
Tabela 5.2 – Exigências de rebocos para edifícios novos (adaptado do Relatório 427/05 NRI, 2005) .....	61
Tabela 5.3 - Comparação dos resultados das argamassas ARM com a de referência – 2ª fase .....	61
Tabela 5.4 - Comparação dos resultados das argamassas ARM20 e ARB100 com a de referência - 3ª fase.....	62

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

No contexto ambiental atual, é prioritário controlar a produção de resíduos. Políticas de produção sustentável e reciclagem de materiais têm sido implementadas em todo o mundo (Mak *et al.* 2018), num esforço conjunto para reduzir a pegada ecológica de todos os setores de atividade humana. Na União Europeia, a construção é a atividade económica que mais resíduos produz, constituindo mais de um terço do valor total dos 28 países (Figura 1.1). Em 2020, segundo a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu, o objetivo é que pelo menos 70% dos resíduos produzidos na construção sejam alvo de reciclagem. Em Portugal, em 2008, foi publicado o decreto-lei n.º 46/2008, de 12 de março, alterado pelo decreto-lei n.º 73/2011, de 17 de junho, regulando os processos de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos (APA, 2018).



**Figura 1.1 - Resíduos gerados por atividade económica em 2016 (adaptado de Eurostat, 2018)**

O impacto acentuado da construção na produção global de resíduos torna imperativa a investigação e a procura de possíveis formas de mitigação do problema (Nagapan *et al.*, 2011). Uma das linhas de investigação que contribui atualmente para o combate deste problema é a análise da viabilidade do uso de agregados reciclados (AR) de resíduos de construção e demolição (RCD) em betões e argamassas. Estas soluções consistem na adição / substituição total ou parcial do agregado natural por agregados reciclados de RCD, permitindo uma redução da exploração de recursos naturais, e a expansão do ciclo de vida dos materiais de construção. Existem ainda outras vertentes de investigação relacionadas com o aproveitamento de RCD que estudam o efeito de fíler da adição das parcelas mais finas de agregado reciclado e a possibilidade de reduzir a quantidade de cimento utilizada na produção de argamassas (Jesus, 2016).

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidas múltiplas campanhas experimentais com diferentes tipos de agregado reciclado, como o vidro, o betão e o tijolo. Todos estes trabalhos

permitem uma avaliação do impacto do respetivo material no desempenho dos betões e argamassas que incorporam, mas nem sempre é viável a obtenção destes materiais isolados, sem contaminações. Por esta razão, surgem alguns estudos sobre a influência de agregados reciclados mistos (ARM) nas propriedades das argamassas. A viabilidade do uso de ARM tem como vantagem o facto de não ser necessária uma triagem exaustiva dos materiais, separando-o em porções homogéneas, o que permite uma maior eficiência do processo.

## **1.2. Objetivos da dissertação**

A presente dissertação tem como objeto analisar o impacto da utilização de agregados reciclados na produção de argamassas de revestimento, substituindo agregados naturais por materiais compostos por resíduos de construção e demolição. O objetivo global deste trabalho de investigação é avaliar o desempenho de argamassas produzidas de forma mais ecológica, incorporando produtos de reciclagem oriundos do mesmo setor económico. Neste contexto, importa ressaltar que não se pretendia simplesmente aferir se a utilização de agregados reciclados é ou não viável. No lugar dessa análise binária, realizou-se uma bateria de ensaios laboratoriais cujos resultados permitem avaliar os benefícios e malefícios da utilização de diferentes quantidades de materiais reciclados em detrimento da areia de rio.

Para ser possível uma melhor e mais completa compreensão da influência da natureza dos agregados, testou-se substituições de 20, 50 e 100% do volume de agregados naturais por resíduos de construção e demolição reduzidos à mesma distribuição granulométrica da areia de rio utilizada. Estudou-se o desempenho de dois tipos de RCD com composições distintas, procurando a compreensão do impacto da natureza dos materiais utilizados.

Sumariamente, o objetivo deste trabalho de investigação é estudar os ganhos e perdas de desempenho conseguidas com a utilização de RCD, contribuindo para uma das linhas de investigação que procuram a redução da pegada ecológica da construção. Mediante a obtenção de resultados positivos, poderá ser viável reutilizar, ainda que em pequenas quantidades, materiais que de outra forma teriam atingido o seu fim de vida útil.

Em paralelo a esta dissertação, foi desenvolvido um estudo por Jesus (2016) que avaliou o impacto da utilização da parcela muito fina dos mesmos agregados reciclados quer como fíler, quer em substituição parcial do cimento.

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

O desenvolvimento deste trabalho de investigação iniciou-se com a compilação de informação sobre o problema tratado. Numa primeira fase, procurou-se informação sobre a

generalidade do tema - resíduos de construção - e posteriormente sobre a produção e o teste de diversas propriedades das argamassas. Definiu-se a estrutura da campanha experimental, estabelecendo os ensaios que seriam realizados, a composição das diferentes argamassas a avaliar e as quantidades de agregados reciclados, areia e cimento que seriam necessárias. Após esta fase de pesquisa, procurou-se e adquiriu-se todo o volume de agregados necessário para toda a campanha, de modo a que apenas fosse utilizado um único lote de cada tipo. Seguidamente, procedeu-se à planificação dos ensaios a realizar definindo a data e o local de cada um, considerando a disponibilidade dos equipamentos e os padrões de recolha de resultados associados a cada procedimento.

Deu-se início à campanha experimental que teve uma duração aproximada de 9 meses. O armazenamento, processamento e caracterização dos agregados tiveram lugar no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico e os restantes ensaios foram realizados no laboratório da Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Paralelamente ao desenvolvimento da campanha experimental, analisou-se e relacionou-se os resultados obtidos nos diversos ensaios com resultados de estudos análogos de outros autores.

Por último, compilou-se a informação obtida e produziu-se o presente documento de acordo com a seguinte estrutura:

- **capítulo 1 (Introdução)** - apresenta uma breve introdução, contextualizando o problema e a abordagem adotada, enunciando objetivos, métodos de trabalho e estruturação do estudo desenvolvido;
- **capítulo 2 (Estado da arte)** - resume o conteúdo de autores que desenvolveram trabalhos de investigação relevantes para o tema abordado neste documento. Procurou-se compilar informação sobre campanhas incidentes em agregados semelhantes aos utilizados neste estudo, permitindo a contextualização e comparação de resultados obtidos;
- **capítulo 3 (Campanha experimental)** - neste capítulo, apresenta-se a estruturação da campanha experimental, assim como todos os procedimentos de produção, ensaio e registo adotados;
- **capítulo 4 (Apresentação e análise dos resultados)** - são apresentados, explanados e comparados os resultados dos diversos ensaios. Em cada subcapítulo, procura-se estabelecer relações entre os resultados desta e de outras campanhas experimentais, associando simultaneamente os valores obtidos em diferentes ensaios;
- **capítulo 5 (Conclusões e desenvolvimentos futuros)** - neste último capítulo, sumariza-se as conclusões obtidas e sugere-se outras possíveis abordagens ao

tema estudado, com objetivo de complementar a informação obtida no decorrer desta investigação;

- **referências bibliográficas** - apresenta-se as fontes consultadas, incluindo artigos científicos, dissertações de doutoramento, livros de especialidade e normas laboratoriais;
- **anexos** - são incluídos em anexo todos os resultados obtidos nos diversos ensaios, em forma de tabela de dados, como complemento à informação sumarizada no 4º capítulo.

## **2. Estado da arte**

### **2.1. Nota introdutória**

Nos seguintes subcapítulos, procura-se contextualizar o presente estudo através da apresentação de alguns resultados de investigações de terceiros consideradas relevantes e de alguns conceitos pertinentes. Pretende-se apresentar, inicialmente, uma perspetiva abrangente do que são e do que se espera das argamassas de revestimento, aprofundando progressivamente o detalhe da informação apresentada. Faz-se a compilação de uma base factual que seja suficiente para enquadrar e validar as eventuais conclusões e suposições dos capítulos seguintes.

### **2.2. Argamassas de revestimento**

As argamassas de revestimento têm um papel importante na construção, constituindo uma barreira física que protege as construções de fatores ambientais e acidentais, desempenhando simultaneamente uma função estética de regularização de superfície.

A base de uma argamassa é composta por três constituintes: água, ligante e agregado. O foco desta dissertação é a influência da natureza do agregado no desempenho de argamassas de cimento, pelo que o presente capítulo não contemplará informação sobre argamassas constituídas por outro tipo de ligantes. A água utilizada para a produção de argamassas não é, em geral, alvo de estudo, devido ao pressuposto de que as características da água disponibilizada pela rede pública são independentes da região.

#### **2.2.1. Exigências funcionais**

Segundo Carasek (2007), um revestimento de argamassa deve desempenhar as seguintes funções:

- proteger o suporte das agressões ambientais;
- contribuir para os isolamentos térmico e acústico;
- contribuir para a estanqueidade à água das paredes revestidas;
- contribuir para a segurança ao fogo do sistema;
- proteger o suporte das ações mecânicas.

Para que estes requisitos funcionais se cumpram, devem ser obtidas argamassas de revestimento que apresentem:

- baixa retração;
- boa trabalhabilidade;
- resistência mecânica adequada ao ambiente e uso destinados;

- aderência ao suporte.

Sublinha-se a importância deste último ponto, não só pela sua influência na durabilidade do sistema revestido, mas também pela segurança do edifício, para que não ocorram des-tacamentos de placas de revestimento (Veiga, 2005).

## **2.2.2. Principais propriedades das argamassas no estado fresco**

### **2.2.2.1. Consistência e trabalhabilidade**

A trabalhabilidade de uma argamassa é a propriedade que caracteriza a sua deformação perante uma solicitação mecânica no estado fresco (Carasek, 2007). Considera-se trabalhável uma argamassa que cumpra os seguintes requisitos:

- não ocorre segregação no seu transporte;
- não existe aderência excessiva à colher de pedreiro durante o seu manuseamento e aplicação;
- possui um período de trabalhabilidade adequado;
- possui uma consistência adequada à sua aplicação e espalhamento (Krüger *et al.*, 2013).

Deve-se, portanto, procurar obter uma trabalhabilidade que permita o transporte e aplicação da argamassa com a devida aderência e compacidade, e uma viscosidade suficiente para que se mantenha estável após as atividades referidas. Os principais parâmetros que influenciam a trabalhabilidade de uma argamassa são o teor de finos dos agregados utilizados, o teor de ligante e a quantidade de água de amassadura (Veiga, 1998; Cardoso, 2009, citado por Lucas, 2014).

### **2.2.2.2. Retenção de água**

Segundo Cincotto *et al.* (1995), citados por Ferrari *et al.* (2011), a retenção de água de uma argamassa é a propriedade que permite avaliar a sua tendência para perder água, mesmo em condições desfavoráveis como o contacto direto com superfícies absorventes. Estas perdas de água podem ter consequências negativas para o processo de hidratação do ligante, prejudicando o desempenho do revestimento (Faria, 2004, citado por Farinha, 2015).

### **2.2.2.3. Teor de ar incorporado**

O teor de ar incorporado de uma argamassa é um valor percentual que relaciona o volume de ar retido em vazios com o volume total da amostra. As bolsas de ar presentes na estrutura da argamassa contribuem para a lubrificação das partículas adjacentes, influenciando a sua trabalhabilidade e melhorando a sua capacidade de retenção de água (Yoshida e Barros, 1995, citado por Braga, 2010).

#### **2.2.2.4. Massa volúmica e baridade**

A massa volúmica é o coeficiente que relaciona, a uma dada temperatura, a massa de uma argamassa com o seu volume, considerando uma distribuição de partículas sem ar incorporado, ar aprisionado ou vazios resultantes da evaporação de água. A baridade (ou massa volúmica aparente) é um coeficiente semelhante, mas considera a distribuição natural dos constituintes, com inclusão dos vazios referidos (Braga, 2010).

É natural que a adição de agregados com massa volúmica aparente inferior à dos agregados naturais possa resultar num aumento da baridade da argamassa. Isto deve-se à influência da geometria e dimensão das partículas, e a sua propensão para preencher os vazios criados pela conjugação dos restantes materiais (Farinha *et al.*, 2015).

### **2.2.3. Principais propriedades das argamassas no estado endurecido**

#### **2.2.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico**

A deformabilidade de um material é a capacidade que este tem de se deformar sem que ocorra rotura das suas ligações internas. O módulo de elasticidade permite avaliar a capacidade que uma argamassa possui de recuperar de uma deformação imposta sem que ocorra rotura de ligações e que o seu desempenho seja comprometido. A importância desta propriedade está associada à influência na propensão de um revestimento para a fissuração. (Silva *et al.*, 2008, citados por Silva *et al.*, 2015).

#### **2.2.3.2. Suscetibilidade à fendilhação**

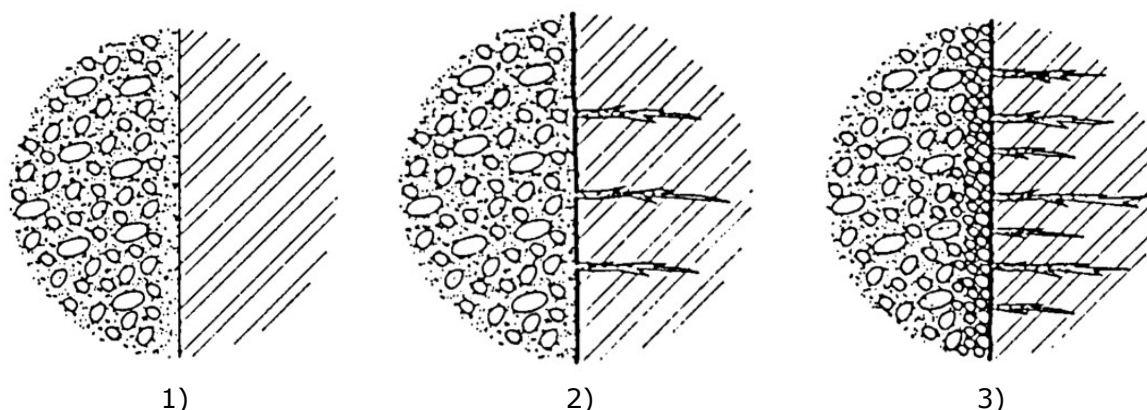
A suscetibilidade à fendilhação de uma argamassa é influenciada por diversos fatores, desde a sua composição ao clima a que está exposta. Quando fendilhado, um revestimento perde a capacidade de proteger o suporte de agentes agressivos, como a água e agentes poluentes presentes na atmosfera, e permite a sua entrada. No caso particular da água, acresce o problema da possível formação de cristais de gelo entre o suporte e o revestimento, podendo levar ao destacamento do mesmo ou no interior da sua estrutura porosa, originando fendilhação ou desagregação (Veiga, 1998).

Segundo Veiga (2004), uma argamassa pouco suscetível à fendilhação deve ser formulada com areia bem graduada e o mínimo de água de amassadura possível, desde que não comprometendo a sua trabalhabilidade. A percentagem de finos deve também ser controlada, pois uma elevada superfície específica dos agregados de uma argamassa está relacionada com uma maior tendência para fendilhar (Veiga, 1998).

#### **2.2.3.3. Aderência ao suporte**

A durabilidade de um revestimento está diretamente relacionada com a sua capacidade de

aderir ao suporte e manter essa adesão a longo prazo. Uma aderência deficiente pode resultar, por exemplo, no destacamento de placas de revestimento, ou simplesmente facilitar a penetração de agentes externos (físicos ou químicos), contribuindo para a perda de coloração ou outras propriedades estéticas e funcionais.



**Figura 2.1 - Ilustração de diferentes níveis de aderência reboco / suporte, por ordem crescente da esquerda para a direita (1 < 2 < 3) (adaptado de Veiga, 1998)**

Além das propriedades da argamassa, a natureza do suporte é igualmente relevante para a aderência do revestimento. A ligação mecânica permitida por suportes com alguma porosidade é superior à de suportes com superfície compacta por ser possível uma maior penetração – seguida de cristalização – da aguada de cimento (Figura 2.1). Contudo, uma porosidade demasiado pronunciada pode levar a uma excessiva absorção de fluidos do revestimento, secando a argamassa prematuramente e comprometendo a adequabilidade da sua cura (Veiga, 1998). A rugosidade superficial é uma propriedade distinta mas igualmente importante, que influencia a superfície efetiva de contacto entre a argamassa e o revestimento. Desta forma, suportes rugosos promovem melhor aderência do que os de superfície polida.

#### **2.2.3.4. Permeabilidade ao vapor de água**

É desejável que a água que entra em contacto com um revestimento possa ser dissipada. A capacidade de perda de água por evaporação de um revestimento é essencial para o seu desempenho e durabilidade, pois permite que não ocorra acumulação de água no seu interior durante longos períodos (Veiga, 1998 citada por Remédios *et al.*, 2016). Esta aptidão pode ser avaliada através de dois indicadores: a capacidade de secagem e a permeabilidade ao vapor de água. O primeiro é definido pelo tempo que uma argamassa demora a perder, por evaporação, água previamente absorvida. A segunda é apresentada como uma medição de fluxo de vapor por unidade de área, em condições de equilíbrio, que atravessa um provete de argamassa no estado endurecido (Brito *et al.*, 2011).

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

A norma NP EN 12620 (2004) define agregado reciclado como agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos previamente utilizados em construção, o que se associa ao conceito de RCD (resíduos de construção e demolição). Nesta definição, enquadram-se diversos materiais cuja incorporação em argamassas tem vindo a ser estudada e caracterizada por múltiplos autores em diferentes contextos. Destes materiais, destacam-se os resíduos de alvenaria cerâmica e betão triturado (Silva *et al.*, 2008).

### 2.3.1. Agregados reciclados cerâmicos

A alvenaria de tijolo é uma solução corrente para a construção de paredes não estruturais em Portugal, o que leva a uma grande abundância de material cerâmico presente em resíduos de construção e demolição. No entanto, devido ao seu processo de aplicação, os resíduos de alvenaria de tijolo estão associados à presença não só de produtos de revestimento de paredes como também de argamassa de assentamento (Figura 2.2). Por consequência, o produto reciclado originado com base nestes resíduos não pode ser analisado apenas considerando as características de materiais cerâmicos, devendo ser considerado um material heterogéneo.



Figura 2.2 - Resíduos de alvenaria de tijolo (adaptado de Ledesma *et al.*, 2015)

### 2.3.2. Agregados reciclados de betão

Os agregados reciclados de betão são compostos por uma mistura de agregado natural e pasta de cimento (Figura 2.3) cujo rácio depende não só das características do betão original como também do processo de trituração que influencia o comportamento das argamassas que incorporam. Isto deve-se ao facto de a trituração dos resíduos provocar a desagregação da pasta dos agregados, devido à diferença das propriedades dos dois componentes (Saini & Ashish, 2015; Zhao *et al.*, 2015).

A esta questão acresce a dificuldade existente na caracterização do agregado reciclado de betão (ARB) associada ao processo de tratamento dos resíduos. São recolhidos resíduos de diferentes elementos e o betão, por questões logísticas, é tratado de forma indiferenciada quanto à sua classe de resistência. A qualidade do betão original é por vezes omissa na literatura.



Figura 2.3 - Observação microscópica de ARB finos (adaptado de Fan *et al.*, 2015)

## 2.4. Argamassas com incorporação de agregados reciclados

Ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos diversos trabalhos de investigação sobre o comportamento e o desempenho de argamassas com incorporação de agregados reciclados. Neste subcapítulo, apresenta-se uma síntese do conteúdo científico considerado mais relevante no âmbito desta dissertação, associando os parâmetros estudados a autores (Tabela 2.1) e respetivas conclusões, assim como conceitos gerais de algumas propriedades das argamassas de revestimento.

Tabela 2.1 - Lista de estudos e respetivos tipos de agregados utilizados

Título do estudo	Autores	Tipo de agregado
"Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate"	Corinaldesi e Moriconi, 2009	Agregados reciclados de betão e mistos
"The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar"	Fan <i>et al.</i> , 2015	Agregados reciclados de betão
"A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars"	Martínez <i>et al.</i> , 2013	Agregados reciclados de betão e mistos
"Using fine recycled concrete aggregate for mortar production"	Neno <i>et al.</i> , 2014	Agregados reciclados de betão
"Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates"	Samiei <i>et al.</i> , 2015	Agregados reciclados de betão
"Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar"	Cuenca-Moyano <i>et al.</i> , 2014	Agregados reciclados de betão
"Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars"	Zhao <i>et al.</i> , 2015	Agregados reciclados de betão
"Estudo comparativo entre argamassas de revestimento com agregado reciclado de RCD e com agregado de britagem"	Jochem <i>et al.</i> , 2013	Agregados reciclados mistos
"Study of the consistence and mechanical behavior of recycled mortars"	Leite <i>et al.</i> , 2009	Agregados reciclados mistos
"Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar"	Lima <i>et al.</i> , 2012	Agregados reciclados mistos

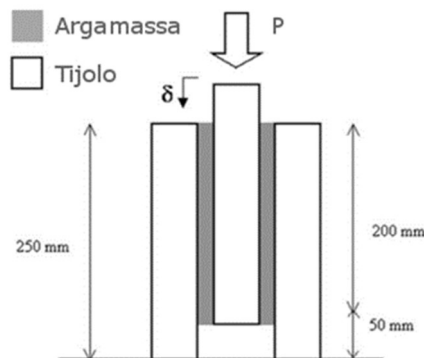
### 2.4.1. Utilização de agregados reciclados de betão

Diversos autores estudaram a influência da utilização de agregados reciclados de betão, obtendo diferentes resultados e tendências comportamentais. A Tabela 2.2 resume os resultados obtidos por alguns desses autores. Note-se que a tabela apresenta apenas resultados de ensaios, pois seria impossível incluir todas as variantes de cada estudo. Por este motivo, a compreensão dos dados apresentados não dispensa análise individual das condições de produção e ensaio de cada argamassa.

Corinaldesi & Moriconi (2009) testaram o desempenho de argamassas com substituição total do agregado natural (NA) por ARB, à semelhança do que fizeram com agregado reciclado de cerâmicos ARC. As argamassas com incorporação de ARB apresentaram valores de resistência à compressão cerca de 30% superiores aos de ARC e cerca de 30% inferiores aos de argamassas produzidas com agregados naturais. Quanto a resistência à tração, a argamassa com ARB apresentou melhores resultados do que a argamassa de referência. Estes são valores a 28 dias, para incorporações de 100%, e mostram que a relação da taxa de RCD presente nas argamassas e o seu desempenho mecânico não é linear. A aderência argamassa-tijolo foi avaliada conforme ilustra a Figura 2.4 e determinou-se ser superior nas argamassas com incorporação de ARB.

**Tabela 2.2 - Resistência mecânica e aderência em função da percentagem de substituição de agregado natural por agregado reciclado de betão (ARB)**

Estudos	Resistência à tração [MPa]		Resistência à compressão [MPa]		Aderência [MPa]	
	0%	100%	0%	100%	0%	100%
Corinaldesi e Moriconi, 2009	6,60	7,00	26,00	21,00	0,35	0,95
Fan <i>et al.</i> , 2015	-	-	32,00	22,00	-	-
Martínez <i>et al.</i> , 2013	3,20	2,80	12,00	8,70	0,47	0,45
Neno <i>et al.</i> , 2014	1,36	2,15	3,91	7,38	-	-
Samiei <i>et al.</i> , 2015	5,60	4,45	24,50	14,00	-	-
Cuenca-Moyano <i>et al.</i> , 2014	2,60	1,20	7,00	3,00	-	-
Zhao <i>et al.</i> , 2015	12,14	8,54	67,77	42,09	-	-

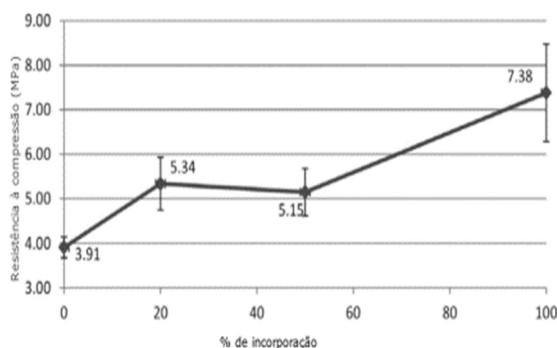


**Figura 2.4 - Esquema de ensaio de aderência realizado por Corinaldesi & Moriconi (adaptado de Corinaldesi & Moriconi, 2009)**

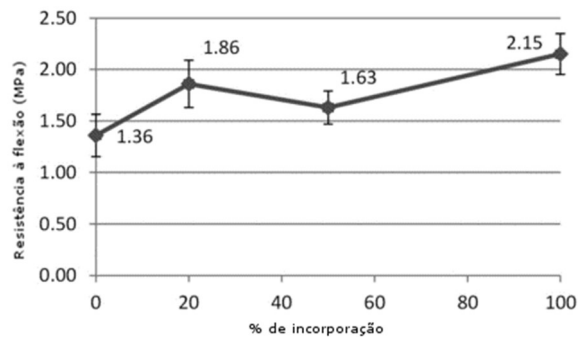
Martínez *et al.* (2013), entre outros agregados, estudaram o agregado RA3, composto

maioritariamente por betão. Este agregado, em comparação com os restantes agregados reciclados, revelou valores inferiores de absorção e retenção de água e porosidade. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica colocam RA3 entre RA1 (resíduos cerâmicos) e RA2 (resíduos mistos), com valores por vezes idênticos aos de RA2.

Neno *et al.* (2014) analisaram o desempenho de argamassas com substituições de 0, 20, 50 e 100% de agregado natural por ARB produzido em laboratório a partir de betão C30/37. A curva granulométrica usada foi transversal a todas as composições de modo a excluir a granulometria do agregado enquanto fator influenciador. As argamassas com substituições de 20 e 100% apresentaram melhores resultados do que as restantes nos parâmetros resistência à compressão e resistência à tração por flexão (Figura 2.5 e Figura 2.6).



**Figura 2.5 - Resistência à compressão em função da percentagem de incorporação (adaptado de Neno *et al.*, 2014)**

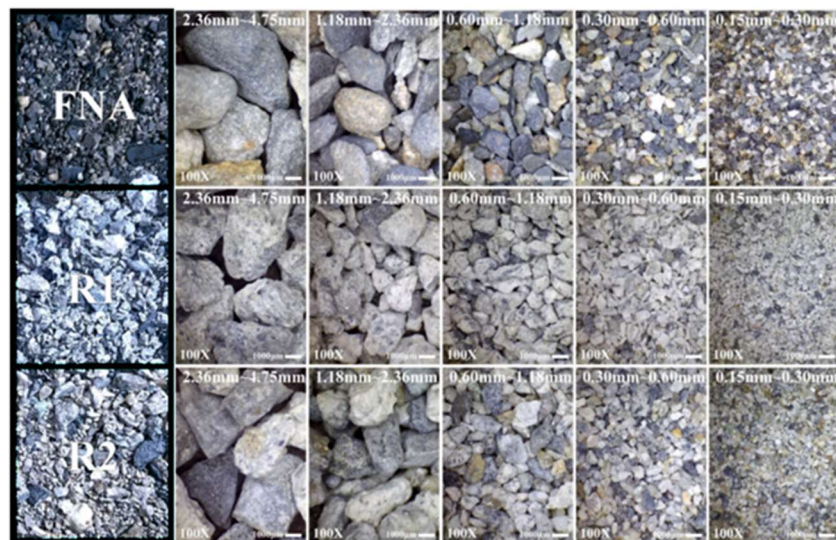


**Figura 2.6 - Resistência à flexão em função da percentagem de incorporação (adaptado de Neno *et al.*, 2014)**

A não linearidade das curvas resistência vs. percentagem de substituição pode ser justificada, segundo os autores, pelo facto de as partículas de betão possuírem maior superfície específica e serem mais angulosas e porosas do que as partículas de areia natural, permitindo uma melhor ligação do agregado à pasta de cimento. Os autores acrescentam que poderia existir cimento não hidratado no ARB que tenha terminado o processo de hidratação na presença da água de amassadura, conferindo maior coesão à argamassa resultante. Quanto à absorção por capilaridade de provetes em estado endurecido, as argamassas de 20% apresentaram resultados idênticos aos das argamassas de referência, enquanto as argamassas de 50 e 100% revelaram um acréscimo de absorção de cerca de 20%. Os autores observaram também que a argamassa com substituição de 20% apresentava melhores valores de retenção de água do que a argamassa de referência (89% e 64% respetivamente), o que representa uma melhoria considerável.

Fan *et al.* (2015) compararam o desempenho de argamassas com diferentes incorporações de ARB obtidos por dois processos de trituração diferentes (Figura 2.7). O método R1 consistiu em trituração com uma britadeira de mandíbulas, produzindo material fino no processo de obtenção de material mais grosso. O método R2 é descrito como um processo

que produz apenas finos, através da trituração repetida do material. O agregado utilizado, em ambos os casos, enquadrava-se entre 0,150 mm 4,75 mm e as curvas granulométricas eram semelhantes. Os autores testaram a consistência, porosidade, absorção de água, variações volumétricas em estado endurecido, resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons. As argamassas associadas ao método R2, quando comparadas em igual taxa de incorporação com argamassas do método R1, revelaram-se superiores em todos os parâmetros avaliados, demonstrando a relevância do método de processamento do agregado e provando a sua influência nas propriedades dos ARB e, conseqüentemente, das argamassas que estes incorporam. Para o mesmo ARB, o aumento da percentagem de incorporação deu origem a argamassas com menores valores de densidade, resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons.

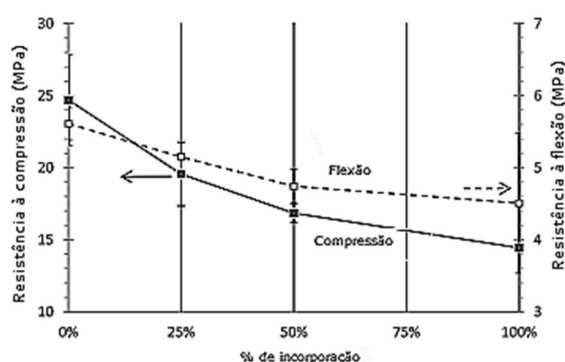


**Figura 2.7 - Comparação de aparência e distribuição granulométrica de agregado natural (FNA) e produtos dos diferentes métodos de processamento utilizados (R1 e R2) (adaptado de Fan *et al.*, 2015)**

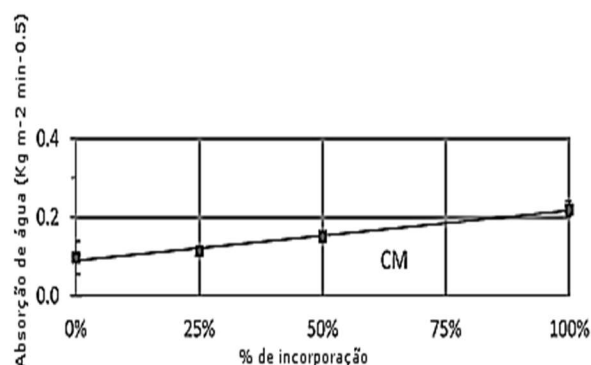
Samiei *et al.* (2015) produziram argamassas de cimento com incorporação de agregado reciclado de betão descrito como sendo de alta qualidade. As taxas de substituição de agregado natural foram de 0, 25, 50 e 100% e não houve alteração da curva granulométrica original dos materiais. Os resultados obtidos corroboram as tendências gerais mencionadas para o uso de AR: um decréscimo das resistências mecânicas e densidade e um aumento de absorção de água. As variações destes parâmetros com o aumento da taxa de substituição foram sempre quase lineares, com uma variação um pouco mais acentuada na transição de 0% para 25% (Figura 2.8 e Figura 2.9).

Zhao *et al.* (2015) compararam argamassas com substituições de 0, 10, 20, 30, 50 e 100% de AN por ARB. O agregado reciclado foi peneirado, dividido nas diferentes frações compreendidas entre 0 e 5 mm, e remisturado reproduzindo a distribuição granulométrica da areia de rio usada como agregado natural. Foram produzidas duas séries de argamassas:

uma primeira com um a/c de 0,5 e uma segunda com um a/c de 0,6. Em qualquer das séries, os valores de ambas as resistências mecânicas decresceram com o aumento da incorporação de agregados reciclados. Esta tendência foi linear, com exceção da resistência à tração por flexão das argamassas com a/c de 0,5, que apresentou um valor superior para a taxa de substituição de 10%. Noutro vetor da sua investigação, os autores testaram a resistência à compressão de argamassas em que substituíram individualmente a totalidade de cada uma das diferentes parcelas granulométricas de AN por ARB. Zhao *et al.* (2015) concluíram que existia uma redução de resistência, qualquer que fosse a parcela substituída e que a parcela com maior influência era a de 0 a 0,063 mm, provavelmente devido ao maior conteúdo de pasta de cimento.



**Figura 2.8 - Resistência à compressão e à flexão em função da porcentagem de incorporação de agregados reciclados (adaptado de Samiei *et al.*, 2015)**



**Figura 2.9 - Absorção de água em função da porcentagem de incorporação de agregados reciclados (adaptado de Samiei *et al.*, 2015)**

#### 2.4.2. Utilização de agregados reciclados mistos

Na Tabela 2.3, são apresentados resultados obtidos durante o desenvolvimento de alguns estudos onde se substituiu o convencional agregado natural por agregado reciclado de resíduos de construção e demolição. Uma vez mais, ressaltam-se as limitações da tabela mencionada e a importância da análise individual das variantes e pressupostos dos diversos trabalhos investigativos.

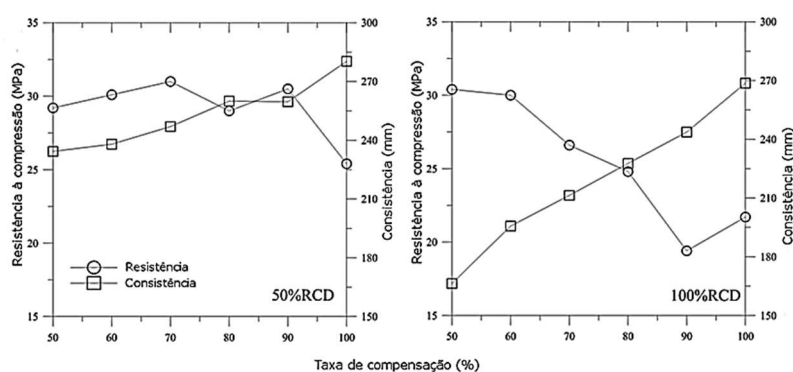
**Tabela 2.3 - Resistência mecânica e aderência em função da porcentagem de substituição de agregado natural por agregado reciclado misto (ARM)**

Estudos	Resistência à tração [MPa]		Resistência à compressão [MPa]		Aderência [MPa]	
	0%	100%	0%	100%	0%	100%
Corinaldesi e Moriconi, 2009	6,60	5,20	26,00	17,50	0,35	1,15
Jochem <i>et al.</i> , 2013	1,03	1,64	0,79	1,86	-	-
Leite <i>et al.</i> , 2009	-	-	26,10	22,00	-	-
Lima <i>et al.</i> , 2012	-	-	25,50	23,40	-	-
Martínez <i>et al.</i> , 2013	3,20	2,00	12,00	8,70	0,47	0,30

Corinaldesi e Moriconi (2009), à semelhança do que fizeram para ARC e ARB, estudaram argamassas com substituição total do agregado natural por ARM. A argamassa com ARM

foi a que apresentou melhores resultados de aderência ao tijolo, com um valor cerca de 3 vezes superior ao da argamassa de referência ( $\sim 1,15$  MPa para  $\sim 0,35$  MPa).

Jochem *et al.* (2013), utilizando um agregado reciclado misto e um agregado britado de origem granítica, observou valores de resistência superiores em todas as argamassas com incorporação do agregado reciclado, quando comparados com os valores obtidos para argamassas apenas com o agregado britado. Os valores apresentados na Tabela 2.3 para esta campanha experimental são inferiores aos de todos os restantes estudos, provavelmente devido à utilização de um traço mais pobre em ligante (1:7,5).

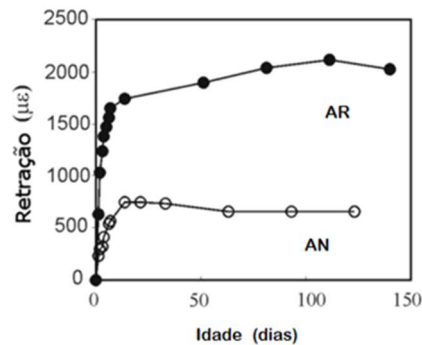


**Figura 2.10 - Resistência à compressão e consistência em estado fresco de argamassas em função da taxa de compensação de água (Leite *et al.*, 2009)**

Leite *et al.* (2009) constataram que os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) possuem uma capacidade de absorção superior à dos agregados naturais. Para obter uma trabalhabilidade comparável à da argamassa de referência, seria necessário adicionar água suplementar às restantes argamassas. Conscientes do sacrifício de desempenho mecânico em prol da trabalhabilidade, testaram diversos níveis de compensação de água em argamassas com agregados reciclados mistos (betão, argamassa e cerâmicos). Foram produzidas argamassas com taxas de compensação de água de 50, 60, 70, 80, 90 e 100%, para substituições de agregado de 50 e 100%, num total de 13 argamassas, contabilizando a argamassa de referência. Os resultados indicaram que, para uma taxa de substituição de 100%, uma compensação de água de 80% permitia obter uma argamassa sem perdas significativas relativamente à argamassa de referência. Quanto à argamassa de 50% ARM, qualquer das taxas de compensação inferior a 100% gerou valores de resistência à compressão superiores ao da argamassa de referência (21,6 MPa); contudo, apenas para compensações superiores a 70%, foi possível garantir uma consistência aceitável (Figura 2.10).

Lima e Leite (2012) produziram argamassas com substituição de 0% (NM) e 50% (RM) de agregado natural por ARM, com traços 1:4 e 1:8. Verificou-se uma redução de cerca de 8% na resistência à compressão a 28 dias de RM relativamente à argamassa de referência,

para o traço 1:4. Nas argamassas 1:8, a tendência foi inversa e observou-se um acréscimo de cerca de 15%. Segundo os autores, a resistência do agregado perde relevância com a diminuição do traço e a superior capacidade de aderência ao cimento das partículas de ARM pode justificar este aumento de resistência. Para ambos os traços, as argamassas com agregado reciclado revelaram valores de retração cerca de 185% superiores aos das argamassas de referência (Figura 2.11), devido à elevada porosidade e capacidade de absorção do agregado reciclado.



**Figura 2.11 - Retração e idade dos provetes (adaptado de Lima e Leite, 2012)**

Martínez *et al.* (2013) observaram um decréscimo nos valores de resistência à compressão e tração por flexão, ainda que pouco acentuado, com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados. A campanha experimental foi realizada com um total de 18 argamassas: nove argamassas de controlo, combinando três agregados naturais com três diferentes fíleres (calcário, cal hidratada e escória de alto forno) e outras 9 argamassas combinando três agregados reciclados com os mesmos três fíleres.

### 3. Campanha experimental

#### 3.1. Introdução

A campanha experimental teve como objetivo a obtenção de dados para a caracterização e comparação de argamassas cimentícias com diferentes taxas de incorporação de agregados reciclados de RCD.

Para possibilitar uma vasta gama de ensaios, optou-se por dividir a campanha experimental em três fases:

- a primeira consiste na identificação, processamento e caracterização dos materiais;
- a segunda consiste na caracterização geral de todas as argamassas testadas;
- a terceira consiste num conjunto de ensaios menor, apenas com as argamassas com melhores resultados na fase anterior.

A Tabela 3.1 resume os ensaios que constituíram cada uma das fases.

**Tabela 3.1 - Fases de ensaios**

Primeira fase (constituintes)	Segunda fase (argamassas)	Terceira fase (argamassas)
Análise granulométrica	Consistência por espalhamento	Variação dimensional
	Massa volúmica	Suscetibilidade à fendilhação
	Massa volúmica aparente	Aderência ao suporte
	Módulo de elasticidade dinâmico	Permeabilidade à água sob pressão
	Resistência à tração e à compressão	Permeabilidade ao vapor de água
Massa volúmica aparente	Absorção de água por capilaridade	Envelhecimento acelerado
	Secagem	
	Porosidade aberta	
	Ultrassons	

#### 3.2. Materiais constituintes

Entende-se por constituintes das argamassas a água, o ligante e os agregados que as compõem. No âmbito desta dissertação, foram utilizados, para além de um agregado natural (AN) composto por areia de rio, dois diferentes tipos de agregado reciclado: um agregado reciclado de betão (ARB) e um agregado reciclado misto (ARM). As composições do ARM e do ARB são analisadas em 3.4.1.

Com o objetivo de reduzir o número de variáveis na comparação das diferentes argamassas, optou-se por utilizar a curva granulométrica do agregado natural como curva de referência e adaptar a curva dos agregados reciclados, para garantir a coerência entre as distribuições granulométricas dos diversos materiais incorporados. Para este efeito, sepa-

rou-se as diversas frações granulométricas dos agregados reciclados e mesclou-se novamente em proporções idênticas às da distribuição granulométrica do agregado natural. Foi então determinada a baridade do agregado reciclado remisturado, permitindo o cálculo das quantidades necessárias para a amassadura de cada tipo de argamassa.

### **3.2.1. Seleção dos materiais**

Os materiais utilizados foram selecionados tendo como critério a maximização da compatibilidade com outros trabalhos de investigação e a disponibilidade global de agregados. Todos os agregados foram obtidos numa encomenda única de forma a minimizar a sua heterogeneidade. A sua seleção e processamento foram realizados em colaboração com a aluna Sara Jesus, cujo tema de dissertação de mestrado envolve os mesmos materiais constituintes.

#### **3.2.1.1. Ligante**

Foi utilizado um ligante de uso corrente em argamassas de revestimento, cimento do tipo CEM II/B-L 32,5 N da marca Secil. Este ligante é composto, segundo as indicações do fabricante, por: 65% a 79% clínquer Portland, 21% a 35% fíler calcário e 0% a 15% outros constituintes.

#### **3.2.1.2. Agregados**

O agregado natural utilizado foi areia de rio, por ser um agregado regularmente utilizado em trabalhos de investigação e na construção civil. Neste caso, foi utilizada areia do rio Tejo com granulometria no intervalo 0,000 - 2,380 mm. Para este efeito, toda a areia utilizada foi peneirada com uma malha de 2,380 mm.

Os agregados reciclados foram selecionados com base na composição e granulometria disponível. Como foi mencionado no capítulo 2, existem estudos que evidenciam a influência do método de trituração dos agregados utilizados com o desempenho das argamassas que os incorporam. Para eliminar a necessidade de alterar, em laboratório, a dimensão das partículas, e por uma questão de otimização de recursos, procurou-se empresas que disponibilizassem agregados reciclados em dimensões adequadas ao projeto. O objeto desta dissertação é o estudo do desempenho de argamassas com incorporação dos seguintes tipos de agregado reciclado:

- **agregado reciclado misto (ARM)**, resultante do processamento de RCD, sem filtragem de materiais nem remoção de contaminantes;
- **agregado reciclado de betão (ARB)**, resultante do processamento de RCD, maioritariamente composto por resíduos de betão e argamassa, e reduzida presença de contaminantes.

Os agregados reciclados foram disponibilizados pelas empresas *SGR, SA*, sediada no Seixal (ARM) e *RCD, SA*, sediada na Figueira da Foz (ARB).

### 3.3. Composições

Todas as argamassas estudadas no âmbito desta dissertação são de traço 1:4 (em volume). Para além da argamassa de referência, cuja parcela de agregado é constituída integralmente por areia de rio, estudou-se três argamassas com incorporação de diferentes percentagens de cada tipo de agregado reciclado. Os prefixos ARM e ARB correspondem, respetivamente, a argamassas com incorporação de agregado reciclado misto e agregado reciclado de betão, e os sufixos 20, 50 e 100 correspondem às taxas de substituição do respetivo tipo de agregado, como ilustra a Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Composições das argamassas estudadas**

		AN	Agregado reciclado misto			Agregado reciclado de betão		
		REF	ARM20	ARM50	ARM100	ARB20	ARB50	ARB100
Traço 1:4	80%	AN (100%)	AN (80%)	AN (50%)	ARM (100%)	AN (80%)	AN (50%)	ARB (100%)
			ARM (50%)				ARB (50%)	
	20%		ARM (20%)			ARB (20%)		
Cimento								
Água								

As percentagens de substituição foram escolhidas de forma a compatibilizar o presente estudo com outros trabalhos de investigação (capítulo 2) e visam contemplar os extremos do espectro (0% e 100%) e dois valores intermédios (20% e 50%). A quantidade de água necessária para cada formulação foi determinada com recurso a ensaios iterativos de consistência por espalhamento, procurando-se um diâmetro de  $160 \pm 5$  mm, considerado adequado para argamassas de cimento.

### 3.4. Procedimentos

Neste subcapítulo, são descritos os procedimentos dos ensaios realizados nas diversas fases experimentais.

#### 3.4.1. Caracterização dos constituintes

Todos os constituintes sólidos das argamassas (agregados e cimento) foram objeto de

ensaio de massa volúmica aparente. Adicionalmente, foi estudada a granulometria de todos os agregados e a constituição dos agregados reciclados.

#### **3.4.1.1. Massa volúmica aparente**

Este ensaio tem como objetivo determinar a massa correspondente a um volume fixo de um determinado material seco, considerando o volume de vazios que resulta da distribuição natural das suas partículas. Os valores obtidos permitem a conversão de traços volúmetrics para traços em massa, mais simples de medir e reproduzir durante toda a campanha. O ensaio foi realizado segundo o documento Cahier 2669-4 (1993).

##### Equipamentos necessários:

- dispositivo metálico constituído por um suporte, um recipiente troncocónico com obturador e um copo com capacidade de  $0,5 \text{ dm}^3$  (Figura 3.1);
- tabuleiro;
- espátula;
- concha;
- balança com precisão de  $0,1 \text{ g}$ ;
- estufa.

Foi adotado o seguinte procedimento:

- 1)** coloca-se uma amostra representativa do material, previamente seco em estufa durante 24 horas a uma temperatura de  $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , num tabuleiro e mistura-se, homogeneizando-a;
- 2)** pesa-se o copo vazio e regista-se o valor;
- 3)** com o dispositivo metálico montado e obturado, utilizando a concha e sem tocar em nenhum dos recipientes, coloca-se o material no recipiente troncocónico;
- 4)** segurando o topo do recipiente troncocónico cheio com uma mão, com a outra abre-se o obturador num movimento único e rápido para que o material caia livremente no copo;
- 5)** sem tocar com a espátula no suporte, rasa-se a superfície do copo, do meio para as extremidades;
- 6)** pesa-se o copo cheio e regista-se o valor;
- 7)** repete-se o procedimento para 5 outras amostras.



**Figura 3.1 - Medição da baridade de agregados**

O documento indica o ensaio de três amostras de cada material, mas, devido à heterogeneidade dos agregados em causa, optou-se por duplicar o número de medições. A massa volúmica aparente do material ( $\rho_i$ ) é dada pela Equação 3.1, em que  $M_t$  é a massa do copo cheio e  $M_c$  e  $V_c$  são, respetivamente, a massa e o volume do copo.

$$\rho_i = \frac{M_t - M_c}{V_c} \quad \text{Equação 3.1}$$

#### **3.4.1.2. Análise granulométrica**

Este ensaio é realizado segundo a norma europeia EN 1015-1 (1998) e tem como objetivo a obtenção da curva granulométrica do material, que representa graficamente a distribuição dimensional das partículas da amostra. Foi necessária a análise granulométrica da areia de rio para adaptar a curva granulométrica dos agregados reciclados.

##### Equipamentos necessários:

- estufa;
- tabuleiro;
- peneiros de malha quadrada;
- máquina de vibração horizontal;
- balança.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** a amostra a analisar mantém-se em estufa, num tabuleiro, a  $100 \pm 5$  °C, até que a diferença entre pesagens consecutivas espaçadas de 24 horas seja inferior a 0,2 g;
- 2)** empilha-se os peneiros, ordenados pela dimensão da sua malha e com o de 0,149 mm por baixo, por cima de um fundo;
- 3)** coloca-se uma amostra de pelo menos 3 kg no peneiro de 4,760 mm e tapa-se com a tampa adequada;
- 4)** acopla-se a coluna de peneiros (Tabela 3.3) à máquina de vibração e liga-se durante

3 minutos;

5) retira-se os peneiros e mede-se a massa de material retido em cada elemento.

**Tabela 3.3 - Disposição dos crivos utilizados**

	<b>Tampa</b>
Crivos [mm]	4,760
	2,380
	1,190
	0,590
	0,297
	0,149
	<b>Fundo</b>

A curva granulométrica é a representação gráfica, em escala logarítmica, da percentagem acumulada de material passado em cada crivo.

#### **3.4.1.3. Caracterização visual dos agregados reciclados**

Por serem resíduos de construção e demolição, os agregados reciclados utilizados são compostos por mais do que um material. Não se enquadra no âmbito desta dissertação realizar uma análise exaustiva de todos os componentes de cada agregado, mas reconhece-se a importância de conhecer a composição dos agregados para que seja possível analisar de forma competente os resultados obtidos na campanha experimental. Para responder a esta necessidade, adotou-se um método composto por inspeção ocular, separação dos diferentes materiais e pesagem das frações obtidas, permitindo estimar a percentagem de cada tipo de material presente na amostra. O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** criva-se o material com malha de 2,380 mm até se obter uma amostra de  $2500 \pm 100$  g de material retido;
- 2)** manualmente, separa-se cada partícula de material em diferentes recipientes, com base na sua natureza;
- 3)** mede-se a massa de cada fração;
- 4)** repete-se o procedimento 3 vezes.

Este método permite obter uma percentagem aproximada de cada tipo de material presente no RCD. No entanto, reconhece-se que este procedimento não reflete de forma exata a composição do agregado, uma vez que é possível que existam grandes diferenças de composição entre frações granulométricas.

#### **3.4.2. Produção de provetes de argamassa**

A Tabela 3.4 indica o tipo de provete associado a cada ensaio.

**Tabela 3.4 - Tipos de provete**

Fase	Norma	Ensaio	Tipo de provete	Dimensões [mm]
2	Cahier 2669-4	Massa volúmica aparente	Prisma	160 x 40 x 40
	NP EN 14146	Módulo de elasticidade dinâmico		
	EN 1015-11	Resistência à tração por flexão e à compressão		
	NP EN 1936	Porosidade aberta		
	NBR8802	Ultrassons	Semi-prisma	80 x 40 x 40
	EN 1015-18	Absorção de água por capilaridade		
-	Secagem			
3	Cahier 2669-4	Varição dimensional	Prisma	160 x 40 x 40
	-	Suscetibilidade à fendilhação	Aplicação em tijolo	-
	EN 1015-12	Aderência ao suporte		
	EN 1015-21	Permeabilidade à água sob pressão		
	EN 1015-19	Permeabilidade ao vapor de água	Disco	100 x 25

Neste subcapítulo, é descrito o processo de amassadura, comum a todas as argamassas produzidas, e os procedimentos correspondentes à realização de cada tipo de provete.

### 3.4.2.1. Amassadura

Equipamentos necessários:

- misturadora (EN 1015-2 (1998));
- balança com precisão de 0,1 g;
- proveta e garrafa de esguicho;
- colher de pedreiro.

Por se tratar de misturas de agregados distintos, optou-se por aumentar o tempo de amassadura para 3 minutos e o procedimento seguido foi o seguinte:

- 1)** pesa-se os constituintes sólidos na cuba metálica da misturadora, em dosagens previamente calculadas;
- 2)** mede-se o volume de água necessário, previamente determinado, com recurso a uma proveta e uma garrafa de esguicho;
- 3)** com a cuba metálica devidamente colocada, liga-se a misturadora e mistura-se os constituintes sólidos durante cerca de 10 segundos;
- 4)** inicia-se a cronometragem e acrescenta-se a totalidade da água, com auxílio da proveta, durante um período de 10 a 15 segundos;
- 5)** aos 2 minutos e 30 segundos, desliga-se a misturadora e, com uma colher de pedreiro, mistura-se a argamassa manualmente para garantir que não existe material preso no fundo da cuba metálica;
- 6)** coloca-se novamente a cuba metálica na misturadora e a argamassa é misturada durante 30 segundos adicionais.

Terminado o processo, a argamassa deve ser novamente mexida com uma colher de pedreiro para garantir a homogeneidade da mistura.

### 3.4.2.2. Provetes prismáticos

Equipamentos necessários (Figura 3.2):

- molde metálico de 3 prismas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>;
- óleo descofrante e pincel para a sua aplicação;
- talocha metálica;
- pilão;
- colher de pedreiro.

O volume dos provetes prismáticos resultantes é de 0,256 dm<sup>3</sup> e a sua moldagem foi executada segundo a norma europeia EN 1015-11 (1999), com o seguinte procedimento:

- 1) com o pincel, aplica-se óleo descofrante em todos os elementos do molde metálico, montando-o de seguida;
- 2) com a colher de pedreiro, preenche-se cerca de metade do volume de cada provete com argamassa;
- 3) aplica-se 25 pancadas com o pilão, distribuídas por toda a superfície de cada provete (Figura 3.3);
- 4) preenche-se o restante volume, com algum excesso de argamassa, e repete-se o passo 3;
- 5) eleva-se e deixa-se cair cada um dos vértices do molde, individualmente, com o objetivo de evitar a existência de bolhas de ar no provete;
- 6) com a talocha, rasa-se e alisa-se a superfície superior do molde (Figura 3.4);
- 7) limpa-se o excesso de argamassa e coloca-se o molde nas condições de cura adequadas.



**Figura 3.2 - Equipamentos para a moldagem de prismas**



**Figura 3.3 - Compactação da argamassa**



**Figura 3.4 - Regularização das superfícies de um molde**

Existem também moldes prismáticos específicos para provetes que se destinam a ensaios de variação dimensional. Estes moldes, além das características já mencionadas, possuem pernos

metálicos que se destinam à colocação dos provetes no aparelho de medição de variação dimensional. Para prevenir a rotura dos provetes na zona envolvente dos pernos, é necessário garantir uma boa compactação da argamassa em seu redor durante a moldagem.

#### **3.4.2.3.Provetes em disco**

Este tipo de provete foi utilizado unicamente para ensaios de permeabilidade ao vapor de água, realizados segundo as indicações da norma EN 1015-19 (1998).

##### Equipamentos necessários:

- molde em formato de disco com  $20 \pm 10$  mm de altura (foram utilizados moldes de 20 mm);
- óleo descofrante e pincel para a sua aplicação;
- colher de pedreiro;
- talocha metálica.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** com o pincel, aplica-se óleo descofrante em todos os elementos do molde metálico, montando-o de seguida;
- 2)** com a colher de pedreiro, coloca-se a argamassa pressionando-a contra o molde;
- 3)** com a talocha, rasa-se e alisa-se a superfície superior do molde;
- 4)** limpa-se o excesso de argamassa e coloca-se o molde nas condições de cura adequadas.

#### **3.4.2.4.Aplicação em tijolo**

##### Equipamentos necessários:

- tijolo cerâmico;
- tábuas de madeira;
- grampos metálicos;
- borrifador;
- régua graduada;
- régua de madeira;
- colher de pedreiro.

Este tipo de provete foi realizado segundo a metodologia adotada pela Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa) do LNEC, respeitando o seguinte procedimento:

- 1)** recorrendo aos grampos metálicos e à régua graduada fixa-se as tábuas de madeira às faces longitudinais do tijolo, de forma a que possam cofrar uma espessura de 20

mm de argamassa;

- 2) borrifa-se, com água, a face superior do tijolo e as faces interiores das tábuas de madeira, para minimizar a absorção de água de amassadura;
- 3) com a colher de pedreiro, aplica-se a argamassa pressionando-a contra o tijolo, até preencher a totalidade do molde criado;
- 4) com a régua de madeira, regulariza-se a superfície do molde, garantindo que não se altera a posição das tábuas laterais;
- 5) passados 10 a 15 minutos, retira-se as tábuas laterais e coloca-se o conjunto nas condições de cura adequadas.

### 3.4.2.5. Condições de cura

Foram utilizados três diferentes processos de cura, denominados de A, B e C (Tabela 3.5). Entre os diferentes tipos de cura, variam os valores de temperatura e humidade relativa, assim como os tempos de exposição às diferentes condições ambientais:

**Tabela 3.5 - Ensaio e respetivos tipos de cura**

Ensaio	Tipo de cura
Ultrassons	A
Massa volúmica aparente	
Módulo de elasticidade dinâmico	
Resistência à flexão e à compressão	
Absorção de água por capilaridade	
Secagem	
Permeabilidade à água sob pressão	B
Aderência ao suporte	
Varição dimensional	C
Suscetibilidade à fendilhação	
Permeabilidade ao vapor de água	

- **cura A:** o molde é mantido dentro de um saco de polietileno durante 2 dias, a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $95 \pm 5\%$ ; os provetes são então desmoldados e mantidos nas mesmas condições durante 5 dias; pós este período, retira-se os provetes dos sacos de polietileno e os mesmos são mantidos numa sala à temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  durante 21 dias adicionais;
- **cura B:** os moldes são colocados num ambiente com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ ; após 2 dias, os provetes são desmoldados e mantidos nas mesmas condições;
- **cura C:** os moldes são colocados dentro de um saco de polietileno, mantendo a humidade relativa a  $95 \pm 5\%$ , numa sala com temperatura de  $23 \pm 2$  °C; passados 2 dias, os provetes são desmoldados e retirados dos sacos de polietileno, permanecendo numa sala condicionada com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ .

### **3.4.3. Ensaio no estado fresco**

O presente subcapítulo descreve os equipamentos necessários e procedimentos adotados para todos os ensaios realizados às argamassas no estado fresco.

#### **3.4.3.1. Consistência por espalhamento**

Este ensaio permite medir a consistência das argamassas, através da medição da sua deformação diametral no estado fresco, quando sujeita a uma solicitação normalizada na norma EN 1015-3 (1999). O ensaio foi realizado com o objetivo de compatibilizar a consistência das diversas argamassas para que existisse menos uma variável na comparação do seu desempenho, considerando que fixar a trabalhabilidade através da consistência por espalhamento é mais representativo do que fixar o teor de água de amassadura.

##### Equipamentos necessários:

- mesa de espalhamento - EN 1015-3 (1999);
- molde tronco-cônico - EN 1015-3 (1999);
- pilão;
- colher de pedreiro;
- craveira.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** se o equipamento não tiver sido utilizado nas últimas 24 horas, devem ser dadas 10 pancadas com a mesa de espalhamento para garantir operacionalidade da mesma;
- 2)** enche-se o molde, previamente centrado na mesa de espalhamento, em duas camadas de argamassa individualmente compactadas por 10 pancadas com o pilão;
- 3)** rasa-se o excesso de argamassa com a colher de pedreiro e limpa-se a mesa em redor do molde;
- 4)** dá-se 15 pancadas com a mesa de espalhamento, com um ritmo de aproximadamente 1 pancada por segundo;
- 5)** com a craveira, mede-se o diâmetro de espalhamento da argamassa em duas direções perpendiculares e regista-se os valores.

O espalhamento considerado é a média aritmética dos valores medidos no passo 5. O ensaio considera-se inválido se a diferença entre os valores obtidos for superior a 10% do valor médio. Nesta situação, deve-se repetir o ensaio e, se for considerado inválido pelo mesmo motivo, deve-se realizar uma nova amassadura.

### 3.4.3.2. Massa volúmica no estado fresco

A realização deste ensaio permite avaliar a influência dos agregados reciclados na massa de um volume fixo de argamassa. Foi utilizado o método de compactação por choque, descrito na alínea 7.2.2 da norma EN 1015-6 (1998).

#### Equipamentos necessários:

- copo metálico com capacidade de 1 l;
- colher de pedreiro;
- pano húmido;
- balança com precisão de 0,1 g.

O procedimento seguido no ensaio foi o seguinte:

- 1) mede-se a massa do copo vazio e regista-se o valor;
- 2) com a colher de pedreiro, enche-se cerca de metade do copo com argamassa;
- 3) oscila-se e solta-se o copo em diversas direções, num total de 10 vezes, compactando a argamassa por choque (Figura 3.5);
- 4) preenche-se o copo com argamassa, com um ligeiro excesso, e repete-se o passo 3;
- 5) rasa-se a superfície, limpa-se o copo com o pano húmido e mede-se a massa do copo cheio (Figura 3.6).



Figura 3.5 - Equipamentos para a moldagem de prismas



Figura 3.6 - Regularização da superfície de um molde

O valor da massa volúmica  $\rho_i$  é dado pela Equação 3.2 em que em que  $M_t$  é a massa do copo cheio de argamassa e  $M_c$  e  $V_c$  são, respectivamente, a massa e o volume do copo. Para efeitos de comparação, utiliza-se o valor médio de 3 ensaios.

$$\rho_i = \frac{M_t - M_c}{V_c} \quad \text{Equação 3.2}$$

### 3.4.4. Ensaio no estado endurecido

#### 3.4.4.1. Massa volúmica aparente

Analogamente ao que se pretendia com a determinação da massa volúmica no estado

fresco (3.4.3.2), este ensaio teve como objetivo avaliar a influência dos agregados reciclados na massa dos provetes endurecidos. A norma EN 1015-10 (1999) indica que o volume dos provetes deve ser determinado pelo método hidrostático. No entanto, por se tratar de provetes com formas regulares e pequenas tolerâncias dimensionais, é possível obter resultados semelhantes de uma forma mais expedita, recorrendo a uma craveira digital para a determinação das suas dimensões. O ensaio foi realizado nas idades 28 e 90 dias, seguindo o procedimento correntemente utilizado no URPa (LNEC).

#### Equipamentos necessários:

- craveira digital;
- balança com precisão de 0,1 g.

O procedimento foi o seguinte:

- 1)** mede-se o comprimento do provete e, de seguida, a sua altura e largura nas extremidades e a meio comprimento;
- 2)** mede-se a massa do provete na balança.

O volume do provete é dado pela multiplicação das suas três dimensões, em milímetros, em que a largura e a altura são a média dos três valores medidos. A massa volúmica aparente, em  $\text{kg/m}^3$ , é dada pelo quociente entre a massa do provete, em kg, e o volume calculado, em  $\text{m}^3$ .

#### **3.4.4.2. Ultrassons**

O ensaio de ultrassons foi realizado de acordo com a ficha de ensaio Fe Pa 43 (2010), do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) do Departamento de Edifícios do LNEC, baseada na norma brasileira NBR8802 (1994).

Este ensaio permite determinar a velocidade de propagação de uma onda ultrassónica num provete prismático. O aparelho de medição indica o tempo que a onda, emitida pelo terminal transmissor, demora a atingir o terminal recetor e existem dois métodos de determinação: direto e indireto. O método direto avalia a propagação da onda entre dois terminais alinhados em faces opostas do prisma. Por sua vez, o método indireto avalia a velocidade de propagação da onda entre terminais posicionados na mesma face do provete. O ensaio foi realizado nas idades de 28 e 90 dias.

#### Equipamentos necessários:

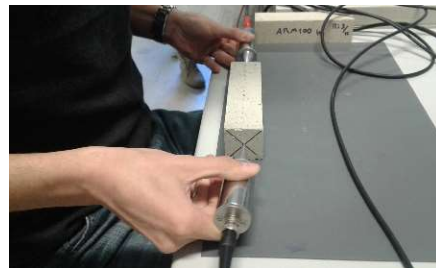
- régua e marcador;
- aparelho de ultrassons (Figura 3.7).

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1) marca-se os provetes: nas extremidades traça-se as diagonais, marcando o centro das faces, e numa das faces longitudinais, a meia espessura, marca-se 14 pontos espaçados de 10 mm;
- 2) pelo método direto: mede-se a velocidade de propagação da onda entre as faces extremas do provete (Figura 3.8); a medição é realizada 5 vezes;
- 3) pelo método indireto: coloca-se o terminal transmissor no primeiro ponto marcado na face longitudinal e o terminal recetor no segundo ponto, ambos a cerca de 45° em sentidos opostos, e mede-se a velocidade de propagação;
- 4) sem mover o terminal transmissor, coloca-se o terminal recetor em cada um dos pontos marcados, fazendo 3 leituras em cada ponto.



**Figura 3.7 - Equipamento de medição de ultrassons**



**Figura 3.8 - Medição pelo método direto**

A velocidade de propagação da onda ultrassónica é representada em km/s. No caso do método direto, para cada medição, trata-se do quociente entre a distância entre os dois pontos (mm) e o tempo medido pelo aparelho ( $\mu\text{s}$ ). No caso do método indireto, a velocidade é determinada através da reta de tendência definida pelos pontos de medição no gráfico tempo de propagação / distância, como o inverso do declive dessa reta.

#### **3.4.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico**

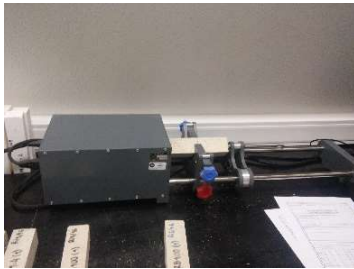
Este ensaio permite medir a frequência de ressonância dos provetes no estado endurecido e, como tal, a sua frequência própria de vibração. O módulo de elasticidade dinâmico, calculado a partir desta frequência, é um parâmetro que possibilita a avaliação da rigidez das argamassas, que por sua vez é um indicador do seu comportamento resistente. Um módulo de elasticidade elevado indicia maior resistência mecânica, mas também maior rigidez, o que pode refletir-se em maior suscetibilidade à fissuração.

O ensaio foi realizado com base na norma NP EN 14146 (2006) e é apenas necessário o aparelho de medição de frequências fundamentais ligado a um computador com o respetivo *software* (Figura 3.10). O ensaio foi realizado nas idades de 28 e 90 dias com o seguinte procedimento:

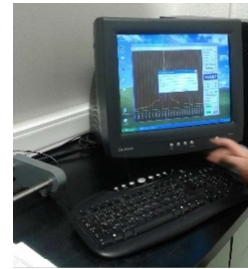
- 1) os provetes são colocados no aparelho (Figura 3.9) com uma extremidade em contacto com o terminal emissor, e o sensor recetor é ajustado para que fique a 1mm da outra extremidade do provete;
- 2) introduz-se as dimensões e a massa do provete no *software* e liga-se o oscilador de frequência variável;
- 3) observa-se as curvas resultantes e regista-se o valor da frequência mais baixa associada a um pico de amplitude.
- 4) O módulo de elasticidade dinâmico é dado pela Equação 3.3.

$$E_{d_i} = \frac{4L_i^2 \times F_i^2 \times \rho_i \times 10^{-6}}{g}$$

**Equação 3.3**



**Figura 3.9 - Aparelho de medição de frequências fundamentais**



**Figura 3.10 - Software do aparelho de medição de frequências fundamentais**

Em que:

- $E_{d_i}$  - módulo de elasticidade dinâmico do provete i (MPa);
- $F_i$  - frequência de ressonância longitudinal do provete i (Hz);
- $L_i^2$  - comprimento do provete i (mm);
- $\rho_i$  - peso volúmico do provete i (N/mm<sup>3</sup>);
- $g$  - aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

#### **3.4.4.4. Resistências à tração por flexão e à compressão**

Os ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão são normalizados pela norma EN 1015-11 (1999) e foram ambos realizados na mesma máquina, associada a um computador com o respetivo *software*, utilizando dois diferentes acessórios para a aplicação dos esforços. O ensaio foi realizado nas idades 28 e 90 dias.

Resistência à tração por flexão:

O *output* deste ensaio é a carga pontual, aplicada a meio vão, necessária para provocar a rotura de um provete prismático simplesmente apoiado.

Procedimento:

- 1) coloca-se o provete na máquina, centrado na horizontal;

- 2) submete-se o provete a um aumento de carga de 10 a 15 N/s, para que a rotura ocorra após entre 30 e 90 segundos de ensaio;
- 3) quando o provete cede, desativa-se a máquina e regista-se a força máxima aplicada.

A resistência à tração por flexão de um provete  $i$  ( $f_i$  em MPa) de secção  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ , com apoios espaçados de 100 mm é dada pela Equação 3.4, em que (N) é a força máxima suportada pelo provete  $i$  durante o ensaio.

$$f_i = 1,5 \times \frac{F_i \times 100}{40 \times 40^2} \quad \text{Equação 3.4}$$

#### Resistência à compressão:

Este ensaio permite obter o valor de carga, em compressão, que provoca a rotura dos provetes.

Procedimento:

- 1) coloca-se um semi-provete prismático, proveniente do procedimento anterior, no acessório para a determinação de resistência à compressão;
- 2) submete-se o provete a um aumento de carga de 50 a 500 N/s, para que a rotura ocorra após entre 30 e 90 segundos de ensaio;
- 3) quando o provete cede, desativa-se a máquina e regista-se a força máxima aplicada.

A resistência à compressão de um provete  $i$  ( $c_i$  em MPa) de secção  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  é dada pela Equação 3.5, em que  $F_i$  (N) é a força máxima suportada pelo provete  $i$  durante o ensaio.

$$c_i = \frac{F_i}{40 \times 40} \quad \text{Equação 3.5}$$

#### **3.4.4.5. Absorção de água por capilaridade**

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-18 (2002) e avalia a capacidade de absorção capilar de um provete de argamassa, permitindo inferir sobre o seu desempenho quando aplicada sobre um suporte. Um coeficiente de absorção superior indicia um pior desempenho do revestimento, pois terá maior tendência a facilitar a penetração da água até ao suporte. O ensaio foi realizado aos 28 dias.

#### Equipamentos necessários:

- rebarbadora;
- estufa;
- pincel e parafina derretida;

- exsicador;
- recipiente com barras de vidro com espessura de 10 mm no fundo;
- balança com precisão de 0,1 g.

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1) 2 dias antes da data de ensaio, coloca-se os provetes na estufa durante 24 horas, para que atinjam massa constante;
- 2) com a rebarbadora, corta-se os provetes em duas partes;
- 3) sela-se as faces laterais de metade de cada provete com parafina líquida e coloca-se os provetes selados no exsicador durante 24 horas;
- 4) pesa-se os provetes e coloca-se no recipiente, com a superfície de corte apoiada nas barras de vidro e submersa em cerca de 10 mm de água;
- 5) repete-se as pesagens aos 10, 30, 60, 90, 180, 300, 480, 1440 minutos e em intervalos de 24 horas até que a massa seja constante em medições consecutivas.

A variação da massa dos provetes nos primeiros 90 minutos é aproximadamente linear, pelo que a expressão de cálculo do coeficiente de absorção por capilaridade (Equação 3.6) apenas contempla esse intervalo. No entanto, deve-se traçar as curvas para confirmar a validade da equação em cada caso.

$$C_i = 0,1 \times (M_{2_i} - M_{1_i}) \quad \text{Equação 3.6}$$

Em que:

- $C_i$  - coeficiente de absorção por capilaridade do provete  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ );
- $M_{2_i}$  - massa do provete  $i$  aos 90 minutos de ensaio (g);
- $M_{1_i}$  - massa do provete  $i$  aos 10 minutos de ensaio (g).

#### 3.4.4.6. Secagem

Considera-se relevante a análise do tempo de secagem de uma argamassa, pois influencia o tempo que a água eventualmente absorvida é mantida no revestimento, podendo provocar anomalias. Este ensaio é realizado na sequência do ensaio de absorção por capilaridade (3.4.4.5) e foi seguido o procedimento correntemente utilizado pela URPa do Núcleo de Revestimentos do LNEC.

Equipamentos necessários:

- barras de vidro com 10 mm de espessura;
- balança com precisão de 0,1 g.

O procedimento foi o seguinte:

- 1) coloca-se os prismas sobre as barras de vidro, numa superfície seca e plana;
- 2) mede-se a massa dos provetes aos 30, 60, 90, 270, 450, 1440 minutos e em intervalos de 24 horas até que atinjam massa constante entre pesagens consecutivas.

Com os valores medidos, é possível traçar a curva de secagem de cada argamassa, utilizando a média dos valores obtidos para cada um dos três provetes ensaiados.

#### **3.4.4.7. Variação dimensional**

Este ensaio procura quantificar a retração livre das argamassas estudadas, analisando a variação do comprimento de um provete prismático produzido segundo o descrito sobre provetes para este efeito, em 3.4.2.2, e mantido em cura B. A retração pode provocar fissuração, que é a origem de diversos problemas estéticos e funcionais dos revestimentos, pelo que a sua quantificação é relevante para o estudo do desempenho de uma argamassa. O processo seguiu as indicações do documento Cahier 2669-4 (1993).

##### Equipamentos necessários:

- defletómetro;
- balança com precisão de 0,01 g.

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1) mede-se o provete no defletómetro e pesa-se na balança;
- 2) repete-se o ponto 1) ao 5º, 7º, 9º, 12º, 14º, 16º, 21º, 28º, 35º, 40º, 49º, 56º, 63º, 70º, 77º, 80º e 90º dias.

Os valores obtidos no defletómetro são expressos em micrómetros e a variação específica do comprimento de cada provete é dada pelo quociente entre a variação dimensional e o comprimento inicial do provete. Este resultado é multiplicado por 100 e expresso em percentagem. Para cada argamassa, considera-se a média dos valores obtidos para os três respetivos provetes ensaiados.

#### **3.4.4.8. Porosidade aberta**

O ensaio de porosidade aberta permite estimar, em percentagem, o volume de vazios interconectáveis de uma amostra de argamassa. Esta informação sobre a sua estrutura interna é importante para compreender o comportamento de uma argamassa quando sujeita à presença de água e outros agentes agressores. O ensaio foi realizado aos 90 dias

de idade, de acordo com a norma NP EN 1936 (2008), e foram utilizadas amostras resultantes dos ensaios de resistência à compressão.

#### Equipamentos necessários:

- balança com precisão de 0,01 g;
- balança com pesagem hidrostática;
- estufa;
- exsiccador;
- bomba de vácuo.

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1)** coloca-se as amostras na estufa, a  $60 \pm 5$  °C, até que atinjam massa constante (cerca de 24 horas);
- 2)** pesa-se as amostras (já a temperatura ambiente) ( $m_{1_i}$ ) e coloca-se num exsiccador acoplado a uma bomba de vácuo, gerando uma pressão de cerca de -400 mbar no seu interior;
- 3)** após 24 horas, introduz-se lentamente água no exsiccador até que as amostras fiquem submersas; este processo deverá demorar cerca de 15 minutos e a pressão deve manter-se;
- 4)** após 24 horas, desliga-se a bomba de vácuo e abre-se a válvula do exsiccador para que o seu interior fique à pressão atmosférica durante as 24 horas seguintes;
- 5)** faz-se a pesagem hidrostática ( $m_{2_i}$ ), remove-se o excesso de água da superfície das amostras e pesa-se novamente ( $m_{3_i}$ ).

O valor da porosidade aberta é dado pela Equação 3.7.

$$P_i = \frac{m_{3_i} - m_{1_i}}{m_{3_i} - m_{2_i}} \times 100 \quad \text{Equação 3.7}$$

Em que:

- $P_i$  - porosidade aberta do provete i (%);
- $m_{1_i}$  - massa do provete i seco (g);
- $m_{2_i}$  - massa do provete i saturado imerso (g);
- $m_{3_i}$  - massa do provete saturado (g).

#### **3.4.4.9. Permeabilidade ao vapor de água**

Este ensaio permite avaliar a permeabilidade ao vapor de água de uma argamassa. Esta é

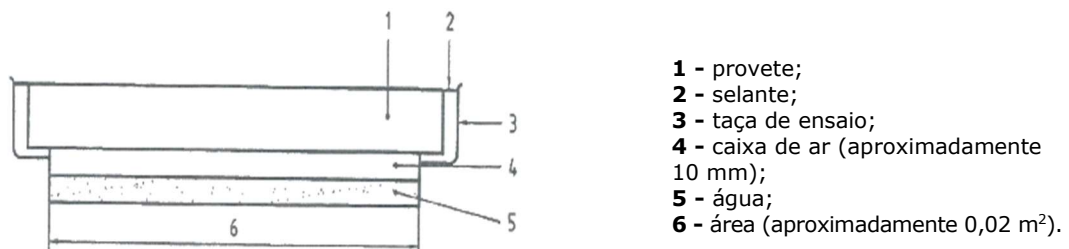
uma propriedade importante numa argamassa de revestimento, pois é um requisito funcional que a mesma permita a saída de vapor do interior das construções. O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-19 (1998), aos 28 dias.

Equipamentos necessários:

- taças de ensaio circulares, de material anticorrosivo;
- balança com precisão de 0,01 g;
- pincel e parafina derretida.

O ensaio incidu sobre provetes em disco (3.4.2.3) curados em cura do tipo C e o procedimento foi o seguinte:

- 1) coloca-se 600 ml de água na taça de ensaio e posiciona-se o provete na parte superior da taça;
- 2) aplicando a parafina, isola-se o bordo da taça em contacto com o provete, para que a libertação do vapor de água ocorra unicamente através da argamassa;
- 3) coloca-se o conjunto em ambiente condicionado a uma temperatura de  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $50 \pm 2\%$
- 4) pesa-se o conjunto (Figura 3.11) diariamente, durante um período mínimo de 15 dias, de modo a ter um conjunto de variações de massa constantes.



- 1 - provete;
- 2 - selante;
- 3 - taça de ensaio;
- 4 - caixa de ar (aproximadamente 10 mm);
- 5 - água;
- 6 - área (aproximadamente 0,02 m<sup>2</sup>).

**Figura 3.11 - Esquema de ensaio de permeabilidade ao vapor de água**

A permeabilidade ao vapor de água do provete *i* é dada pela Equação 3.8.

$$W_{vp_i} = \frac{1}{A_i \times \Delta p / \left(\frac{\Delta G}{\Delta t}\right) - R_A} \times t_i \quad \text{Equação 3.8}$$

Em que:

- $W_{vp_i}$  - permeabilidade ao vapor de água do provete *i* (kg/m.s.Pa);
- $A_i$  - 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);
- $\frac{\Delta G}{\Delta t}$  - 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

$(0,048 \times 10^9 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$  por cada 10 mm de caixa-de-ar);

- $t_i$  - espessura do provete  $i$  (m).

#### **3.4.4.10. Permeabilidade à água sob pressão**

Este ensaio permite avaliar a resistência que a argamassa oferece à absorção de água sob pressão, complementando a informação obtida nos ensaios de absorção de água por capilaridade (3.4.4.5). O ensaio é normalizado pela norma EN 1015-21 (2002), mas foi realizado com algumas alterações, em conformidade com o que é praticado na URPa do Núcleo de Revestimentos do LNEC. As adaptações do esquema de ensaio afetam a área de absorção do provete, que é assim reduzida de 314 cm<sup>2</sup> para 227 cm<sup>2</sup>. Os provetes foram ensaiados aos 28 dias e após serem sujeitos ao processo de envelhecimento acelerado (3.4.4.13), tendo sido produzidos de acordo com o descrito em 3.4.2.4 com cura do tipo A.

##### Equipamentos necessários:

- tubo de PVC com 85 mm de diâmetro interno e 115 mm de comprimento;
- selante;
- tubo de vidro graduado.

O procedimento seguido foi o seguinte:

- 1)** com o silicone, fixa-se o tubo de PVC ao suporte, na vertical;
- 2)** coloca-se 10 mm de água no tubo de PVC e acopla-se ao tubo de vidro graduado, acrescentando uma coluna de água de cerca de 1000 ml, que permitirá controlar o volume absorvido pelo provete;
- 3)** mede-se a variação do nível da água às 3, 8, 24, 27 e 48 horas de ensaio.

Os resultados do ensaio permitem a construção de um gráfico através do qual é possível avaliar o ritmo de absorção de água do provete.

#### **3.4.4.11. Suscetibilidade à fendilhação**

Este ensaio baseia-se na observação a olho nu de uma amostra de argamassa aplicada sobre um tijolo cerâmico, avaliando o eventual desenvolvimento de fendilhação ao longo do tempo. A fissuração de um revestimento condiciona o seu desempenho e compromete a sua durabilidade, pois expõe o seu interior aos agentes agressores, como a água.

Seguiu-se o procedimento recomendado pela Unidade de Revestimentos de Paredes do Núcleo de Revestimentos, LNEC, que dispensa equipamento específico. Foi criado um provete para cada argamassa, como descrito em 3.4.2.4 com cura B, e observou-se o seu

estado após 28 dias. Registou-se a eventual ocorrência de fendilhação. Observou-se também os provetes realizados para o ensaio de envelhecimento acelerado (3.4.4.13), submetidos a cura do tipo A.

#### **3.4.4.12. Aderência ao suporte**

Este ensaio permite avaliar a resistência à tração da argamassa e a sua capacidade de aderência ao suporte. Foram ensaiados provetes produzidos segundo o procedimento 3.4.2.4 e submetidos a cura do tipo A, na idade de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado (3.4.4.13). A norma utilizada foi a EN 1015-12 (2000).

##### Equipamentos necessários:

- caroteadora;
- pastilhas;
- resina epóxida;
- aparelho de arrancamento.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** marca-se, pelo menos, 5 circunferências distribuídas pela superfície dos provetes ensaiados e, com a caroteadora, efetua-se os entalhes com 2 cm de profundidade;
- 2)** limpa-se toda a superfície e cola-se as pastilhas nos círculos definidos pelos entalhes; aguarda-se 24 horas para garantir a secagem do adesivo;
- 3)** acopla-se o aparelho de arrancamento, nivelado, a cada uma das pastilhas e aplica-se uma força de tração com incremento uniforme entre 0,003 e 0,100 N/mm<sup>2</sup>; procura-se que a rotura ocorra após entre 20 e 60 segundos de ensaio.

Regista-se o tipo de rotura observável e a força correspondente. Existem três tipos de rotura:

- rotura adesiva, quando esta ocorre na interface entra a argamassa e o suporte; neste caso, a força registada é a força de aderência;
- rotura coesiva, quando esta ocorre no interior da argamassa ou do suporte; neste caso, a força registada é um minorante da força de aderência;
- rotura pela cola, quando a pastilha se solta da argamassa; neste caso, o ensaio não é válido.

A tensão de aderência do arrancamento  $i$  é dada pela Equação 3.9.

$$f_i = \frac{F_i}{A}$$

**Equação 3.9**

Em que:

- $f_i$  – tensão de aderência do arrancamento  $i$  (N/mm<sup>2</sup>);
- $F_i$  – força de aderência do arrancamento  $i$  (N);
- $A$  – área da pastilha (mm<sup>2</sup>).

#### **3.4.4.13. Envelhecimento artificial acelerado**

O envelhecimento artificial acelerado de provetes tem como objetivo simular o desgaste originado pela exposição de uma argamassa aos agentes atmosféricos. O processo tem início aos 28 dias de idade e envolve a submissão dos provetes a 8 ciclos de calor-gelo e humidade-gelo, definidos na norma EN 1015-21 (2002). No entanto este ensaio não tem o mesmo objetivo de verificação de compatibilidade com um suporte heterogéneo e, contrariamente ao definido na norma, foram utilizados provetes de tijolo (3.4.2.4, cura A) e não muretes de alvenaria.

##### Equipamentos necessários:

- arca frigorífica;
- câmara de envelhecimento.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- 1)** aquece-se os provetes na câmara de envelhecimento, por infravermelhos, a uma temperatura de  $60 \pm 2$  °C durante 8 horas  $\pm$  15 minutos;
- 2)** coloca-se os provetes em ambiente condicionado com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  durante  $30 \pm 2$  minutos;
- 3)** coloca-se os provetes na arca frigorífica a uma temperatura de  $-15 \pm 1$  °C durante 15 horas  $\pm$  15 minutos e repete-se o ponto 2);
- 4)** repete-se os pontos 1), 2) e 3) (ciclo calor-gelo) 7 vezes; concluídos os 8 ciclos definidos pela norma, mantém-se os provetes em ambiente condicionado com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  durante, no mínimo, 48 horas;
- 5)** inicia-se um ciclo de humidade-gelo deixando os provetes sob aspersão de água a temperatura de  $20 \pm 2$  °C durante 8 horas  $\pm$  15 minutos;
- 6)** repete-se os pontos 2) e 3);
- 7)** repete-se os pontos 5) e 6) até que se completem 8 ciclos de humidade-gelo.

Ao longo das várias fases do processo, devem ser registadas eventuais anomalias, como a ocorrência de fissuração. Após o processo de envelhecimento, os provetes são submetidos ao ensaio de permeabilidade à água sob pressão (3.4.4.10). Os provetes são então mantidos a  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  durante 4 dias, após os quais se realiza o ensaio de aderência ao suporte de acordo com o descrito em 3.4.4.12.



## 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1. Nota introdutória

No presente capítulo, são apresentados de forma sintética os resultados da campanha experimental desenvolvida. Os resultados de cada ensaio são analisados isoladamente e de forma coletiva, procurando estabelecer relações não só com os restantes ensaios deste estudo, mas também com resultados de outros autores no mesmo ensaio.

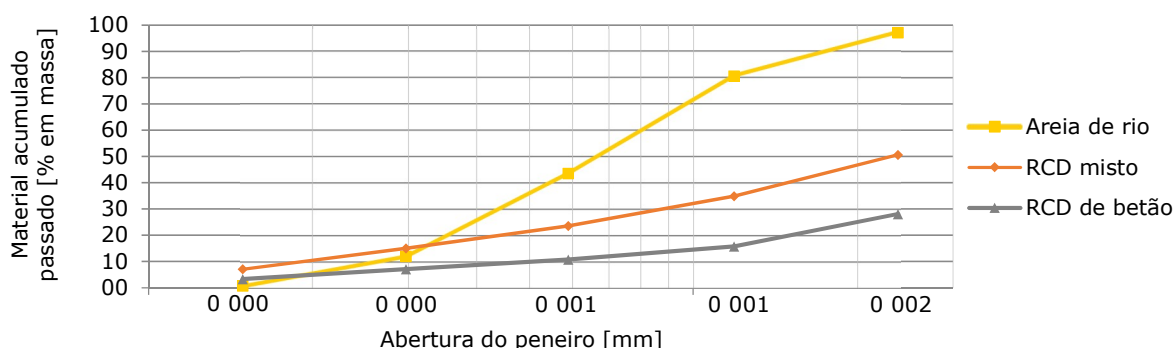
A informação está disposta em conformidade com a estrutura apresentada no subcapítulo 3.1, separada em três fases de ensaios em que a primeira consiste na caracterização dos agregados utilizados e as duas restantes caracterizam as argamassas estudadas.

Todos os resultados podem ser consultados em formato de tabela nos anexos deste documento.

### 4.2. Caracterização dos constituintes

#### 4.2.1. Granulometria dos agregados

Foi realizada uma análise granulométrica à areia de rio e aos dois agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) utilizados (Figura 4.1).

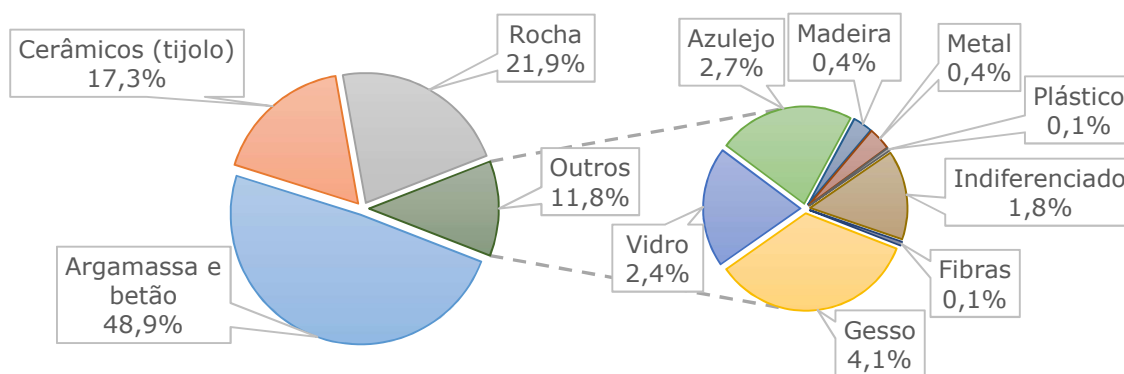


**Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados**

Os agregados reciclados foram adaptados à granulometria do agregado natural, pelo que, apesar de a curva granulométrica da areia de rio ter sido a única realmente importante para o desenvolvimento da campanha experimental, o conhecimento da granulometria dos agregados reciclados permitiu, numa fase preliminar, calcular as necessidades de material, permitindo uma correta preparação dos trabalhos.

#### 4.2.2. Composição dos agregados reciclados

Utilizando o processo descrito no Capítulo 3, analisou-se amostras dos dois agregados reciclados, procurando-se listar os diferentes materiais identificáveis por inspeção ocular.



**Figura 4.2 - Materiais visíveis no agregado reciclado misto (percentagens em massa)**

A Figura 4.2 permite avaliar a constituição do agregado reciclado misto utilizado nas composições ARM. Observou-se que cerca de metade da massa das amostras era composta por partículas de argamassa e betão, contrastando com cerca de 99% observados no agregado reciclado de betão. É relevante ressaltar que esta observação foi apenas ocular e que, por esse motivo, apenas estão representadas as frações de granulometria superior a 2,38 mm.

#### 4.2.3. Massa volúmica aparente

Com o objetivo de obter uma melhor compreensão dos materiais estudados, realizou-se uma medição da massa volúmica aparente dos diversos materiais, conforme se pode observar na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Massa volúmica aparente dos diversos materiais**

Componentes	Massa volúmica aparente [kg/dm <sup>3</sup> ]
Cimento	1029,7
Areia de rio	1471,4
Agregado reciclado de betão	1257,3
Agregado reciclado misto	1161,7

A análise efetuada aos agregados naturais e reciclados incidiu apenas na fração granulométrica inferior a 2,38 mm.

### 4.3. Ensaio às argamassas

Neste subcapítulo, apresenta-se os resultados dos ensaios realizados às argamassas nos estados fresco e endurecido, organizados e divididos entre a segunda e a terceira fase da campanha experimental.

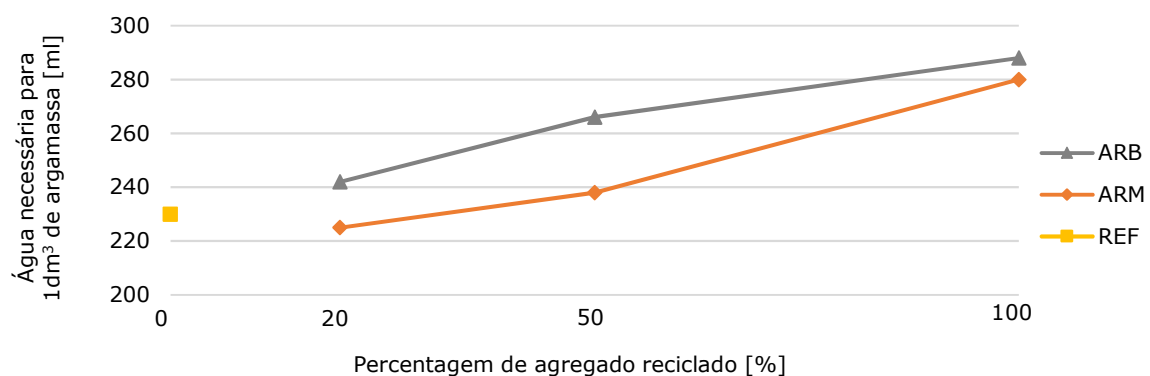
#### 4.3.1. Segunda fase

Nesta fase da campanha experimental, todas as formulações foram testadas de igual forma. Procurou-se detetar padrões e discrepâncias, possibilitando a identificação das argamassas com melhor desempenho e das que apresentam menor potencial para utilização na construção.

#### 4.3.1.1. Consistência por espalhamento

O primeiro ensaio realizado no estado fresco, e que pode ser considerado parte do trabalho preparatório, foi o de consistência por espalhamento. Foi este o método de determinação da quantidade de água a utilizar na amassadura das diferentes argamassas, através de um processo iterativo de adição progressiva de água até se obter a trabalhabilidade desejada.

Seguiu-se o procedimento da norma europeia EN 1015-03 (1999), mas observou-se que, para que todas as argamassas apresentassem uma boa trabalhabilidade com o mesmo diâmetro de espalhamento, seria necessário considerar um espalhamento de  $160 \pm 3$  mm, em vez de  $175 \pm 3$  mm.



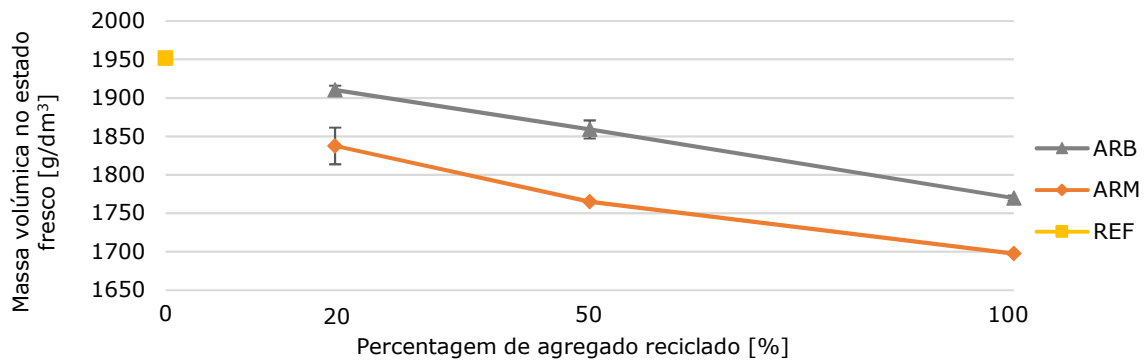
**Figura 4.3 - Água de amassadura necessária para o espalhamento definido**

Os resultados apresentados na Figura 4.3 mostram que as argamassas com incorporação de agregados reciclados de betão necessitam de mais água de amassadura do que as restantes argamassas estudadas. Esta tendência é possivelmente justificável pela diferença de capacidade de absorção dos materiais e pela presença de cimento não hidratado nos resíduos de betão utilizados. A hidratação desse cimento consome parte da água disponível durante o processo de amassadura, diminuindo a sua trabalhabilidade e tornando necessária a adição de água suplementar.

As argamassas com incorporação de agregados reciclados mistos apresentam uma tendência semelhante às anteriores com exceção da mistura ARM20, que necessitou de uma quantidade de água inferior à argamassa de referência.

#### 4.3.1.2. Massa volúmica no estado fresco

Os resultados ilustrados na Figura 4.4 são coerentes com o observado no subcapítulo 4.2.3. Pode-se observar que a substituição de uma fração da areia de rio por qualquer um dos restantes agregados, com menor baridade, traduz-se numa redução da massa volúmica da argamassa resultante.

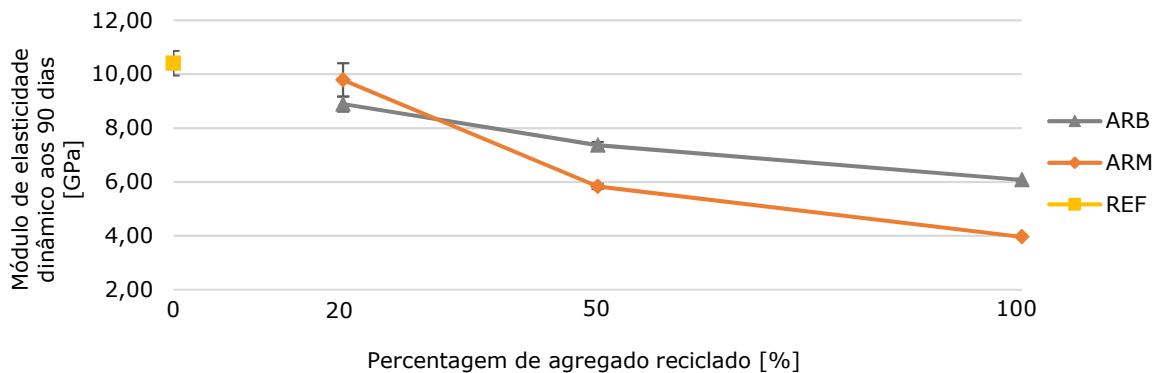


**Figura 4.4 - Massa volúmica no estado fresco**

A massa volúmica inferior é um fator positivo, pois permite o desenvolvimento de argamassas de revestimento mais leves, reduzindo a massa global dos edifícios e diminuindo as tensões que contribuem para o seu destacamento do suporte.

#### 4.3.1.3. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é um indicador da capacidade de uma argamassa se deformar e recuperar a sua forma, mantendo as suas propriedades e desempenho. Este ensaio foi realizado nas idades de 28 e 90 dias.



**Figura 4.5 - Módulo de elasticidade dinâmico (90 dias)**

Conforme apresentado na Figura 4.5, a argamassa de referência apresentou um valor médio próximo de 10 GPa, o que é coerente com os valores obtidos por outros autores como Farinha *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2015). Em ambos os casos, os provetes com agregados reciclados apresentam um módulo de elasticidade inicialmente próximo do valor de referência, afastando-se de forma decrescente com o aumento da taxa de substituição da areia de rio.

Em análise isolada deste parâmetro, todas as argamassas ensaiadas com exceção da argamassa de referência apresentam valores aceitáveis, inferiores a 10 GPa (Veiga, 2005).

#### 4.3.1.4. Resistência à tração por flexão e à compressão

Os ensaios de resistência à tração e compressão foram executados nas idades de 28 e 90 dias. Na Figura 4.6 e na Figura 4.7, apresenta-se os resultados de ambos os ensaios.

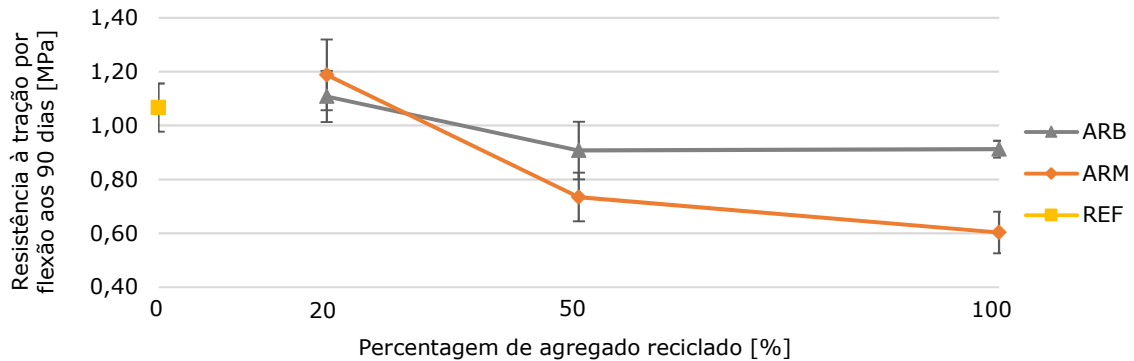


Figura 4.6 - Resistência à tração por flexão (90 dias)

Ambos os gráficos revelam tendências semelhantes, com os valores das incorporações mais reduzidas a apresentar valores próximos da argamassa de referência. O aumento do rácio de agregados reciclados conduz a uma redução significativa de ambas as resistências, com o agregado reciclado misto a atingir a quebra mais acentuada, com um desvio cerca de 50% face ao valor de referência.

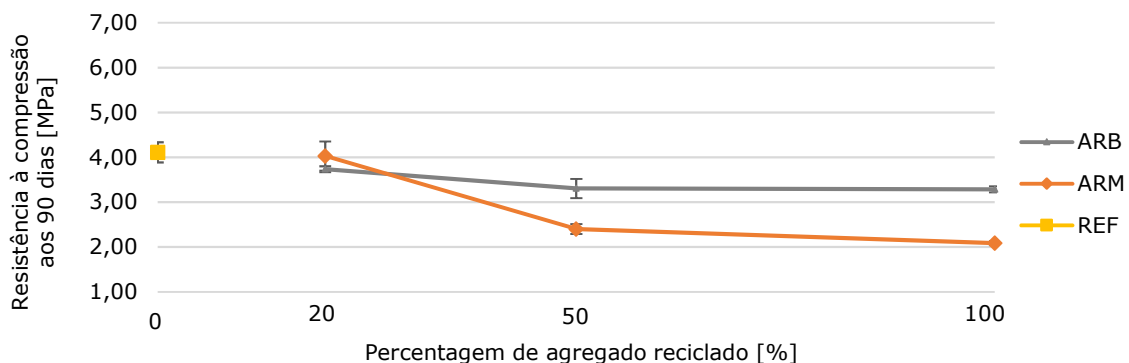
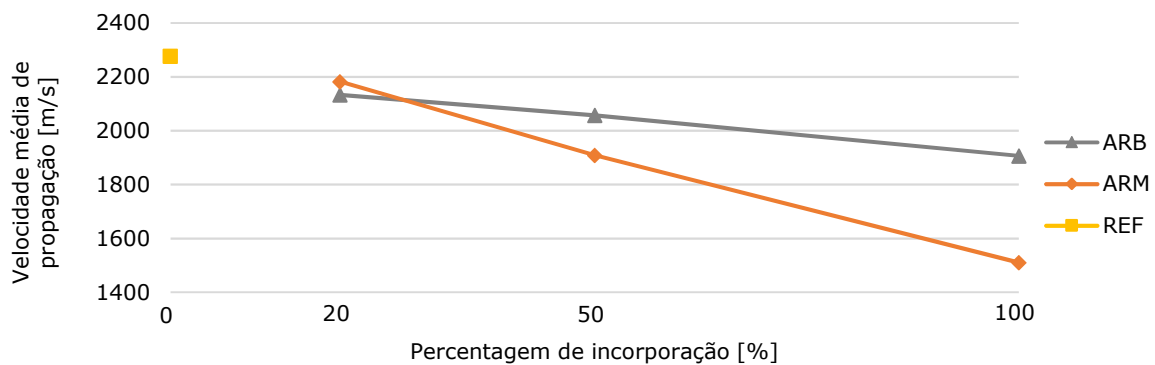


Figura 4.7 - Resistência à compressão (90 dias)

Os provetes com 20% de agregado reciclado misto apresentam valores de resistência à tração marginalmente superiores ao da argamassa de referência, o que pode ser explicado pela existência de materiais fibrosos, como resíduos de plástico (Al-Tulaian *et al.*, 2016) e madeira, na constituição do ARM. Em incorporações de 20%, existe um equilíbrio entre o benefício dos materiais fibrosos e o prejuízo proveniente da natureza dos restantes componentes do agregado, como o tijolo vermelho (Ledesma *et al.*, 2015). Por sua vez, as argamassas com agregados reciclados de betão obtiveram resultados menos dispersos, com perdas sempre inferiores a 25% em ambos os ensaios, apesar de terem revelado perdas de resistência entre 40 e 50% de 28 para 90 dias de idade.

#### 4.3.1.5. Ultrassons

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um indicador da compacidade das argamassas no estado sólido. Este ensaio consiste na leitura do tempo de propagação de ondas através de um provete prismático de argamassa no estado endurecido, entre extremidades - método direto - ou entre dois pontos da mesma face - método indireto. A relevância desta informação deriva da diferença da velocidade de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos e meios gasosos. Uma velocidade de propagação inferior indica um maior volume acumulado de vazios interconectados, ou seja, menor compacidade.



**Figura 4.8 - Velocidade média de propagação de ultrassons - método indireto**

Na Figura 4.8, pode-se observar que a tendência é semelhante às observadas nos ensaios de resistência mecânica e de módulo de elasticidade dinâmico. Em todos os casos, a incorporação de agregados reciclados teve um efeito negativo na velocidade de propagação dos impulsos, o que pode ser justificado pela elevada porosidade dos agregados reciclados utilizados em comparação com o agregado natural. Um volume de vazios superior resulta numa argamassa menos compacta e, por consequência, numa transmissão mais lenta das ondas ultrassônicas.

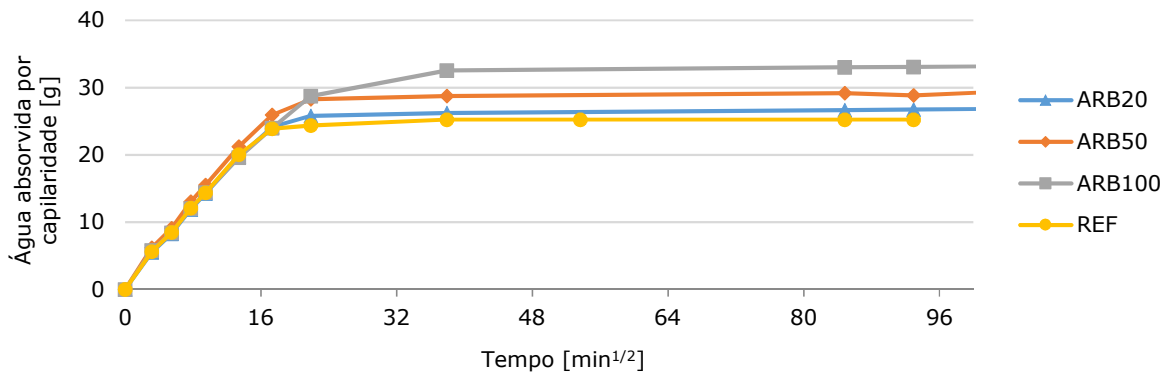
#### 4.3.1.6. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias de idade dos provetes. Após atingirem massa constante em estufa, as faces laterais dos provetes foram isoladas com parafina para que a absorção de água ocorresse segundo uma secção constante e de forma unidirecional.

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 ilustram a quantidade de água absorvida, respetivamente, pelos provetes com agregados reciclados de betão e mistos, sob a forma de variação de massa ao longo do tempo.

Os provetes com agregados reciclados de betão apresentam uma progressão muito semelhante não só entre si como também à dos provetes de referência (Tabela 4.2).

Apenas após 300 (17,3<sup>2</sup>) minutos ocorre uma divergência nos valores obtidos, revelando que as diferentes argamassas estabilizam com diferentes quantidades de água absorvida, diretamente proporcionais ao rácio ARB/AN utilizado. Contrariamente, Neno *et al.* (2014) obtiveram um coeficiente de capilaridade inferior a todas as restantes argamassas testadas, apesar de os resultados a longo prazo serem semelhantes aos apresentados: o aumento da taxa de incorporação de agregado reciclado de betão corresponde a volumes de água absorvidos superiores.

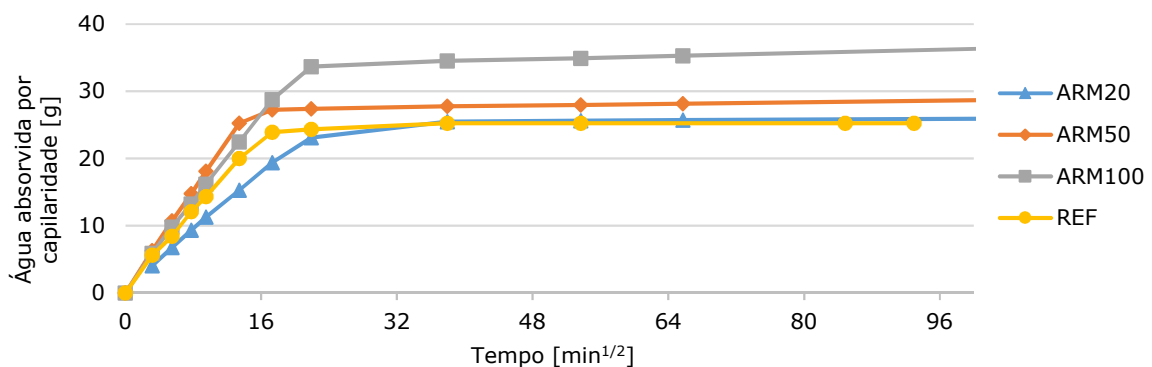


**Figura 4.9 - Absorção de água por capilaridade em provetes com agregados ARB**

**Tabela 4.2 - Coeficientes de capilaridade (ARB) segundo a norma EN 1015-18**

Provetes	C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]
<b>REF</b>	0,9
<b>ARB20</b>	0,9
<b>ARB50</b>	0,9
<b>ARB100</b>	0,9

Contrariamente às argamassas com agregados de betão, os provetes com agregados reciclados mistos revelam uma maior disparidade de resultados (Figura 4.10). Os provetes ARM100 revelam uma capacidade de absorção superior a qualquer outra formulação estudada.



**Figura 4.10 - Absorção por capilaridade em provetes com agregados ARM**

Estes resultados são compatíveis com os obtidos por Ledesma *et al.* (2015) em argamassas com incorporação de resíduos de alvenaria de tijolo, também presentes no agregado ARM.

Com o aumento da percentagem de agregado reciclado misto, aumenta também a quantidade de água absorvida. No entanto, argamassas com incorporações de 20% revelam um desempenho mais favorável do que as argamassas de referência: ainda que para longos períodos de exposição não se observem diferenças significativas, em exposições inferiores a 24 horas, a argamassa ARM20 absorve um menor volume de água do que a argamassa de referência (Tabela 4.3). Silva *et al.* (2010) obtiveram resultados semelhantes para incorporações de 20 a 30%.

**Tabela 4.3 - Coeficientes de capilaridade (ARM) segundo a norma EN 1015-18**

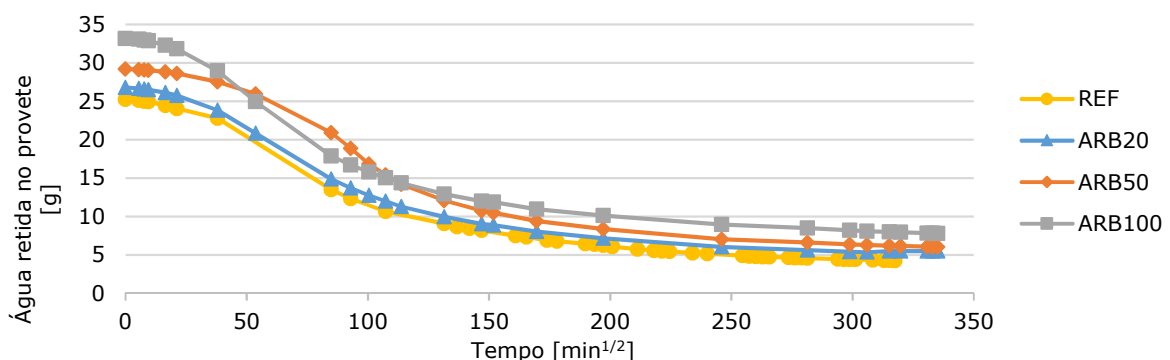
Provetes	C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]
<b>REF</b>	0,9
<b>ARM20</b>	0,8
<b>ARM50</b>	1,0
<b>ARM100</b>	1,2

Em suma, pode-se concluir que a utilização de qualquer um dos agregados reciclados estudados prejudica o comportamento das argamassas no contexto da absorção de água por capilaridade, com exceção da mistura ARM20 que revela uma velocidade de absorção ligeiramente inferior à da argamassa de referência.

#### 4.3.1.7. Secagem

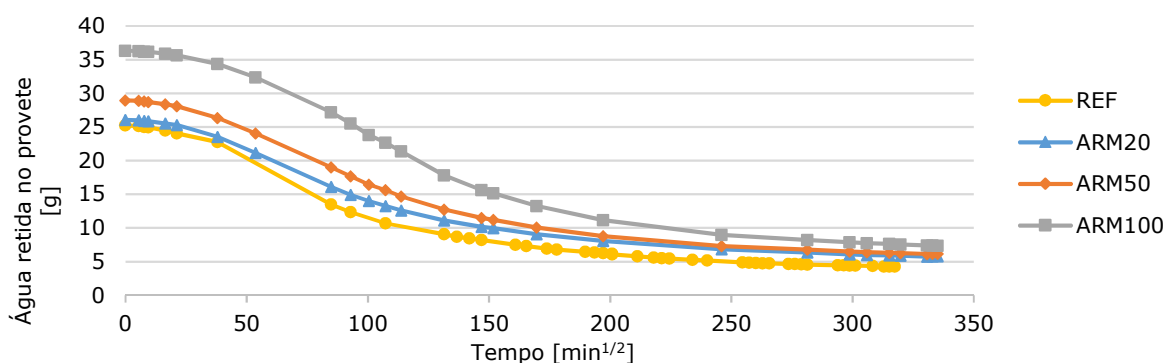
Sabe-se que a presença de água em revestimentos de argamassa é um fator com impacto acentuado na sua degradação, estando relacionada com diversos fenómenos como o desenvolvimento de fungos e cristalização de sais. Em prol da sua durabilidade, é vantajoso que uma dada argamassa seja capaz de perder rapidamente qualquer excedente de água a que seja sujeita.

O ensaio de secagem consiste na medição das perdas de água dos provetes utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade. Ao contrário do ensaio anterior, que pretende avaliar a absorção de água de um provete, este tem como objeto o tempo de permanência da água absorvida.



**Figura 4.11 - Processo de secagem dos provetes com agregado reciclado de betão**

As argamassas com incorporação de agregado reciclado de betão (Figura 4.11) apresentam um comportamento próximo do da argamassa de referência. Do conjunto ARB, a argamassa ARB50 destaca-se pela geometria da sua curva de secagem, uma vez que, apesar de apresentar uma velocidade de absorção superior, a sua rapidez de secagem é inferior à das restantes argamassas comparadas. A curva da argamassa ARB100 é praticamente paralela à das restantes após as primeiras 48 horas, revelando que, apesar de a quantidade de água inicialmente presente no provete ser superior, a rapidez de secagem é semelhante à das restantes.



**Figura 4.12 - Processo de secagem dos provetes com agregado reciclado misto**

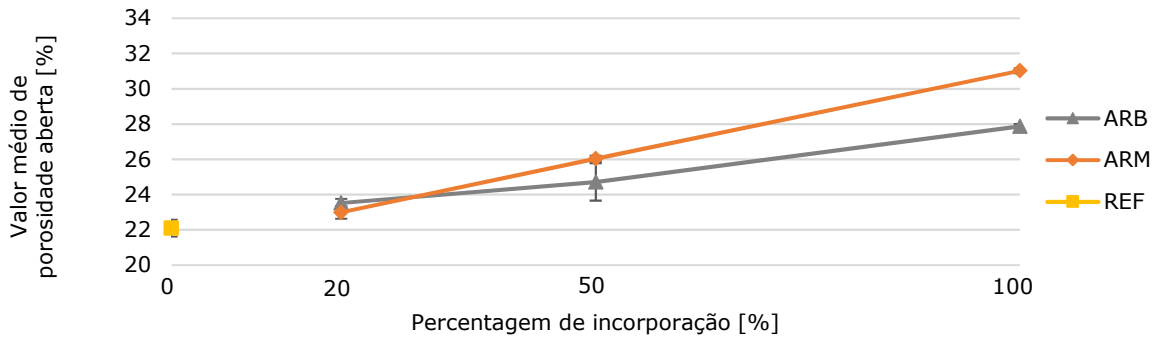
Com exceção da mistura ARM100, os comportamentos ilustrados na Figura 4.12 são bastante similares entre si, e compatíveis com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água. Os provetes ARM100 absorveram um volume de água superior aos restantes, o que justifica o afastamento da respetiva curva na zona inicial do gráfico.

De uma forma geral, todas as argamassas apresentam um comportamento regular e coerente com os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

#### **4.3.1.8. Porosidade aberta**

A porosidade aberta é o índice percentual que representa o volume de vazios interligados em relação ao volume total de um dado provete. A Figura 4.13 apresenta os resultados deste ensaio para cada uma das argamassas testadas.

As argamassas com incorporação de agregado reciclado misto apresentam valores de porosidade aberta mais elevados do que as restantes, com diferenças crescentes com o aumento da taxa de incorporação. Estes resultados corroboram os obtidos em ensaios anteriores, como o de absorção por capilaridade, em que foram também as argamassas ARM que apresentaram maior capacidade de absorção de água.



**Figura 4.13 - Valores médios de porosidade aberta**

Estes valores são explicáveis, em parte, pela quantidade de água utilizada na produção das argamassas. Em ambos os casos (ARM e ARB), a porcentagem de porosidade aberta aumenta com a incorporação de agregado reciclado, analogamente ao que acontece com a necessidade de água de amassadura das diferentes formulações (subcapítulo 4.3.1.1). No entanto, pode-se observar que as composições ARB apresentam porosidade aberta inferior à das ARM, apesar de a quantidade de água utilizada na amassadura ser em todos os casos superior. Conclui-se que a quantidade de água utilizada, além de não ser o único fator impactante nesta propriedade, não é o predominante, estando provavelmente aliado à diferente geometria das partículas dos agregados utilizados e aos compostos formados pela evolução da hidratação de partículas de cimento.

#### **4.3.2. Terceira fase**

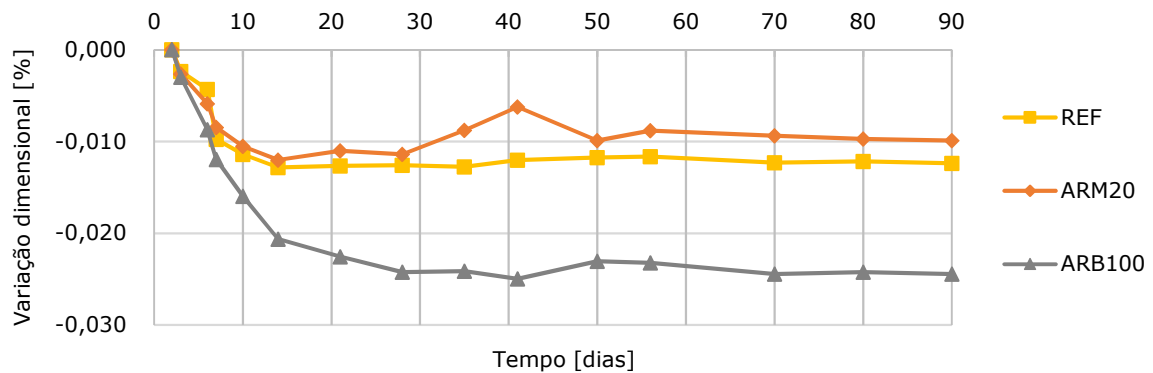
Para a terceira fase experimental, foram selecionadas duas argamassas, uma da família ARB e outra da família ARM. O critério de seleção das argamassas a utilizar teve como base a melhor relação entre vantagens e desvantagens, relativamente à argamassa de referência.

Na família ARB, selecionou-se a argamassa ARB100 por apresentar um bom desempenho nos ensaios de resistência com completa dispensa de agregados naturais, podendo eventualmente ser utilizada em situações de baixa exposição a agressões higrotérmicas. Por sua vez, da família ARM, a argamassa ARM20 foi, das três estudadas, a que mais se aproximou da argamassa de referência, pelo que apresentou potencial para ser uma alternativa viável a uma composição com agregado 100% natural.

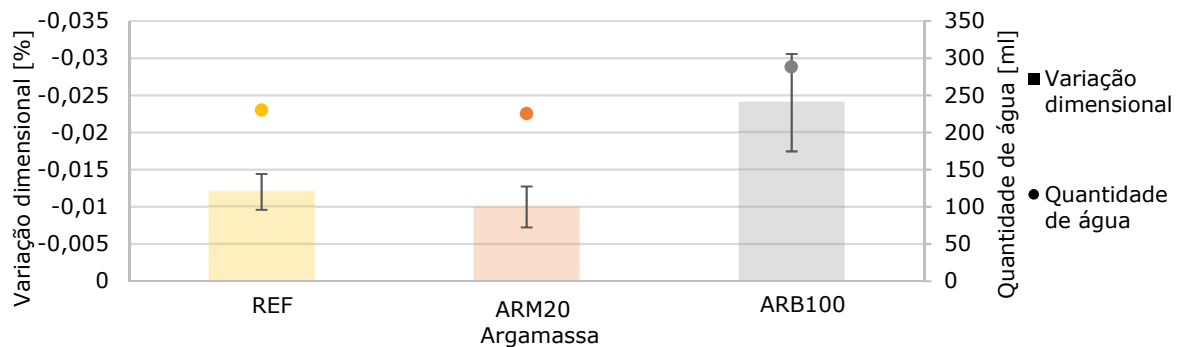
##### **4.3.2.1. Variação dimensional**

O ensaio de variação dimensional (retração) visa medir, ao longo do tempo, as alterações dimensionais (longitudinais) sofridas pelos provetes. Foram realizadas medições entre 2 e 90 dias de idade e os resultados são sumarizados na Figura 4.14.

Uma vez mais, a argamassa ARM20 apresenta resultados próximos da argamassa de referência, com variações a médio prazo até ligeiramente inferiores. Estes resultados são suportados pelo facto de a argamassa de referência requerer uma quantidade superior de água de amassadura à da ARM20, o que resulta num maior volume de água evaporável. Analogamente, pode-se associar a discrepância dos resultados da argamassa ARB100 ao facto de esta composição incorporar um volume de água cerca de 30% superior ao utilizado nas restantes composições.



**Figura 4.14 - Variação dimensional dos provetes**



**Figura 4.15 - Variação dimensional aos 90 dias e quantidade de água de amassadura**

Na Figura 4.15, pode-se observar a relação entre a quantidade de água de amassadura e a retração observada, em percentagem, aos 90 dias de idade. Apesar de não se tratar de uma relação linear, as composições apresentam variação dimensional tanto maior quanto maior o volume de água utilizado.

#### 4.3.2.2. Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água pretende avaliar a capacidade de uma argamassa ser permeada, quando as condições higrotérmicas o permitem, por vapor de água presente na sua envolvente. Esta acumulação pode provir de humidades acumuladas e sua posterior evaporação ou, em situações de cozinhas e zonas de banho, de exposição direta ao vapor (Baía & Sabbatini, 2000).

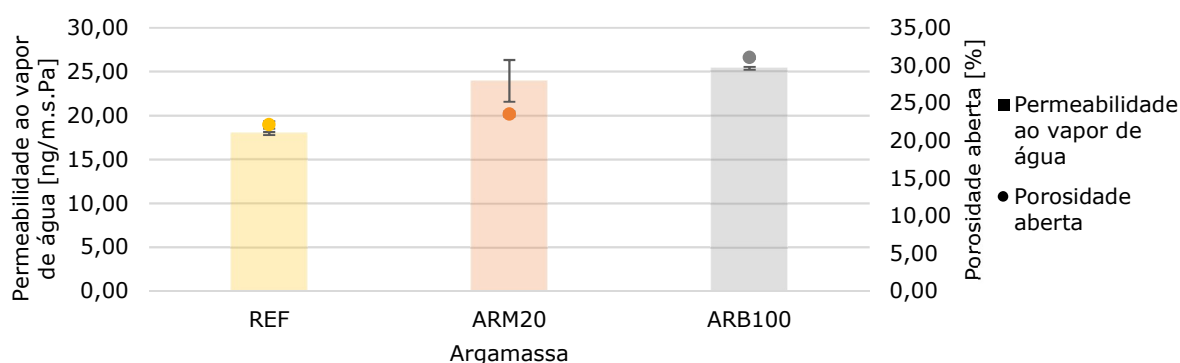
Na Tabela 4.4, são apresentados os valores médios obtidos neste ensaio para as três argamassas em estudo.

Pode-se observar que a argamassa sem agregados reciclados apresenta uma resistência à passagem de vapor de água superior à das restantes, seguida da argamassa com incorporação de agregados mistos e, por último, da argamassa com incorporação total de agregados de betão.

**Tabela 4.4 - Permeabilidade ao vapor de água e espessura de ar equivalente**

Argamassa	Permeabilidade [ng/m.s.Pa]	Desvio-padrão [ng/m.s.Pa]	Espessura da camada de ar equivalente [m]
<b>REF</b>	17,95	0,18	0,21
<b>ARM20</b>	23,94	2,38	0,16
<b>ARB100</b>	25,38	0,17	0,15

Estes resultados são análogos aos do ensaio de porosidade aberta (Figura 4.16), que por sua vez são também compatíveis com os valores de água absorvida por capilaridade. A tendência semelhante dos resultados deve-se à relação entre as propriedades em causa, que são ambas afetadas pela microestrutura dos poros da argamassa (Corinaldesi, 2012), sendo a comunicação entre poros (expressa pelo índice de porosidade aberta) responsável pela passagem de vapor de água, quantificada neste ensaio.



**Figura 4.16 - Permeabilidade ao vapor de água e porosidade aberta**

Os resultados obtidos são compatíveis com os de Silva *et. al* (2010) que também observaram um aumento na permeabilidade ao vapor de água com o aumento da percentagem de agregados reciclados. Lucas *et al.* (2015) obtiveram também valores de permeabilidade superiores com a incorporação de agregado reciclado de betão, apontando a sua porosidade como causa provável.

#### 4.3.2.3. Aderência ao suporte

O ensaio de aderência ao suporte, conforme a norma EN 215-12 (2000), simula uma solicitação de tração no revestimento aplicado sobre um suporte, avaliando quantitativamente a tensão de rotura e qualitativamente o material / interface em que ocorre. Apesar

de ser um ensaio sem equivalência direta a um estímulo real de uma argamassa de revestimento em utilização, os seus resultados (Tabela 4.5) são relevantes para a compreensão e comparação do comportamento de diferentes composições.

O resultado desejável é uma rotura coesiva pelo revestimento (tipo B). Em todas as argamassas testadas, o mecanismo de rotura predominante consistiu numa combinação de roturas do tipo adesivas, tipo A, e coesivas pela argamassa, tipo B.

**Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte**

Argamassa	Tensão de aderência média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Tipo de rotura predominante
<b>REF</b>	0,54	0,11	A/B
<b>ARM20</b>	0,48	0,04	A/B
<b>ARB100</b>	0,90	0,07	A/B

As argamassas de referência e com agregados reciclados mistos apresentam comportamentos semelhantes, destacando-se apenas a mistura com agregados de betão, com um valor médio de tensão de aderência cerca de 77% superior ao da argamassa com agregados naturais. Analisando os valores obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão em provetes com 28 dias de idade, pode-se observar que não existe uma relação linear entre os resultados dos dois ensaios: apesar de a argamassa ARB100 apresentar as tensões mais elevadas em ambos, a mistura ARM20, em comparação com a argamassa de referência, revelou uma resistência à tração superior e uma tensão de aderência inferior. Pode-se concluir então que, apesar de o ensaio de aderência ao suporte ter resultado sempre em mecanismos de rotura mistos, as tensões de rotura obtidas refletem não só a resistência intrínseca das argamassas, mas também as diferentes capacidades de aderência ao suporte, conforme se pretendia avaliar.

#### **4.3.2.4. Envelhecimento acelerado**

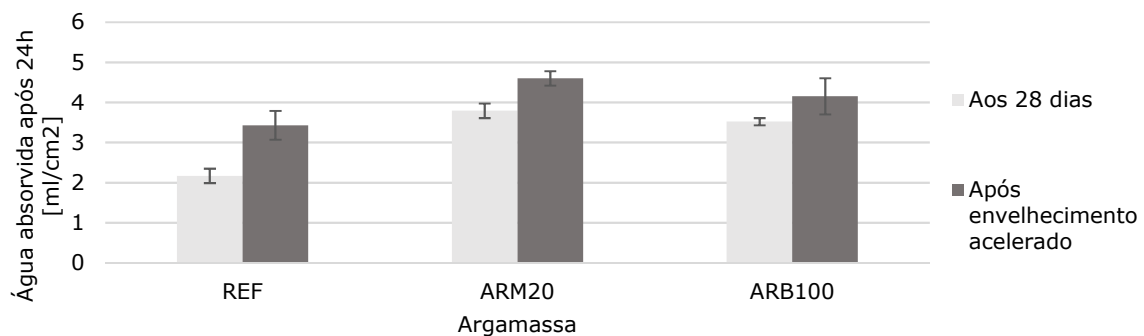
O processo de envelhecimento acelerado submete os provetes a uma sequência de ciclos que pretendem simular a exposição prolongada aos fatores ambientais, como a chuva, gelo e calor. O objetivo é, de forma expedita, avaliar comparativamente a redução de desempenho das argamassas ao longo do tempo, quando expostas às ações climáticas.

##### **a) Permeabilidade à água sob pressão**

O ensaio de permeabilidade à água sob pressão foi realizado antes e depois do processo de envelhecimento acelerado, permitindo avaliar a evolução do comportamento das argamassas. À semelhança da permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e porosidade aberta, os resultados deste ensaio estão relacionados com a estrutura interna dos provetes.

Na Figura 4.17, pode-se observar que todas as argamassas sofreram uma redução de desempenho, absorvendo uma maior quantidade de água após o processo de envelhecimento acelerado. As argamassas com agregados reciclados, apesar de apresentarem sempre níveis de absorção superiores, sofreram perdas inferiores com o envelhecimento.

O aumento da capacidade de absorção das argamassas é potenciado pelos ciclos de humidade / gelo / calor, que fazem com que os poros saturem com água que é posteriormente congelada, dilatando. A repetição deste processo permite que se criem novas ligações entre poros adjacentes através de pequenas roturas internas, aumentando a permeabilidade do revestimento. Uma parte deste efeito é contrabalançada pela existência já referida de ligante não hidratado nos agregados reciclados que, uma vez exposto à água dos ciclos de envelhecimento, hidrata, aumentando a compacidade da argamassa e anulando parte do efeito descrito.



**Figura 4.17 - Água absorvida antes e após envelhecimento acelerado**

Lucas (2015), por exemplo, observou o efeito contrário. As argamassas com incorporação de agregados reciclados de loiça sanitária (50%) apresentaram um aumento de permeabilidade após envelhecimento acelerado superior ao da argamassa de referência. Esta diferença entre resultados pode ser explicada pelo facto de os agregados de loiça sanitária não possuírem ligantes desidratados cuja hidratação durante o ensaio pudesse contrariar o efeito dos ciclos de gelo / calor.

### **b) Suscetibilidade à fendilhação**

Este ensaio consiste numa simples avaliação visual da deterioração da superfície das argamassas após o processo de envelhecimento acelerado. Nenhum provete das três argamassas apresentou fendilhação visível após a sujeição aos ciclos de calor / gelo, permitindo a conclusão de que esta não é uma propriedade afetada de modo muito significativo pela utilização deste tipo de agregados reciclados.

#### **4.4. Considerações finais**

Todos os ensaios realizados neste estudo contribuíram para uma profunda compreensão da influência da natureza dos agregados utilizados nas argamassas. Um elemento importante para a relevância dos resultados apresentados é o facto de as argamassas terem sido idealizadas com o objetivo de minimizar as variáveis, mitigando as diferenças granulométricas entre os agregados e valorizando o rigor científico na repetição dos diversos processos.

O ensaio de consistência por espalhamento foi utilizado não só para definir a quantidade de água que seria utilizada em cada formulação, mas também para estabelecer o segundo ponto comum entre as diferentes argamassas: a trabalhabilidade, avaliada pelo diâmetro de espalhamento das amostras. Tornou-se evidente a disparidade entre as propriedades das diferentes argamassas pelas diferenças na quantidade de água necessária para que cada uma atingisse uma trabalhabilidade comparável. O aumento da taxa de agregados reciclados, em ambos os casos, implicou um acréscimo substancial de água às misturas, evidenciando as diferenças de porosidade e geometria das partículas de cada agregado. As argamassas com agregado reciclado de betão requereram uma quantidade de água superior, atribuindo-se a responsabilidade à porosidade elevada das partículas de argamassa e à eventual presença de cimento não completamente hidratado. Por sua vez, o agregado reciclado misto, apesar de ser constituído em grande parte por partículas de betão e argamassa, possui uma grande percentagem de pedra e outros constituintes de baixa porosidade, que contribui para uma porosidade global inferior, reduzindo a quantidade de água necessária.

A massa volúmica no estado fresco segue a tendência observada nos resultados do ensaio de baridade dos agregados. Quanto mais elevada é a massa volúmica aparente dos agregados utilizados, mais elevada é a massa volúmica da argamassa em pasta. A redução de massa volúmica das argamassas, apesar de não ter grande expressão na sua utilização prática, é um fator positivo, contribuindo não só para a execução de revestimentos mais leves, como facilitando os seus processos de transporte e aplicação.

No estado endurecido, o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de propagação de ultrassons revelaram, como esperado, tendências semelhantes: os valores decrescem com o aumento da percentagem de agregado reciclado, e as argamassas ARB possuem maior compacidade do que as ARM equivalentes. Nos ensaios de resistência à tração por flexão, ambas as argamassas com 20% de incorporação de agregados reciclados apresentaram resultados melhores do que os provetes com 0%. Este benefício na utilização de pequenas percentagens de agregados reciclados deve-se possivelmente à existência de partículas

fibrosas que aumentam a tensão de rotura dos provetes. Com a incorporação de percentagens mais elevadas, a presença destas fibras perde expressão, dando lugar à influência da inferior resistência mecânica das partículas recicladas e, conseqüentemente, valores decrescentes de resistência à flexão. Pode-se ainda observar que as argamassas com agregados de betão não apresentam perdas de resistência entre as taxas de 50 e 100%, contrariamente às da família ARM que continuam em declínio com o aumento da quantidade de agregado reciclado. A relação entre os valores de resistência à compressão das diferentes argamassas é semelhante, com a exceção do valor da argamassa de referência, que supera o das restantes. Refira-se que a presença de materiais fibrosos não contribui para o aumento da capacidade de resistência dos provetes a esforços de compressão.

O comportamento das argamassas na presença de água de origem externa é determinado pela sua estrutura interna. A quantidade e configuração dos poros, assim como a existência ou ausência de ligações entre si, determina o volume e a rapidez com que as argamassas absorvem e perdem água, tanto no estado líquido como no estado gasoso. Por capilaridade, determinou-se que a argamassa ARM20 é única que apresenta resultados melhores do que a argamassa de referência, pois, apesar de o volume total de água absorvida ser semelhante, a velocidade de absorção é menor, conferindo-lhe vantagens em exposições com duração inferior a oito horas. No ensaio de porosidade aberta, os valores menores foram obtidos para a argamassa de referência, observando-se uma tendência crescente análoga ao aumento da incorporação de agregados reciclados, quer mistos, quer de betão. Esta distribuição, associada aos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade e de secagem, permite inferir que a vantagem da composição ARM20 não se deve a uma estrutura interna mais fechada. Uma justificação possível é a ocorrência de uma concentração mais elevada de partículas muito finas nas fronteiras do provete, originando poros mais pequenos à superfície e atenuando a velocidade de absorção, mas permitindo a absorção de volumes totais de água semelhantes aos valores de referência.

Após os ensaios da segunda fase da campanha experimental, sumarizam-se os resultados da seguinte forma:

- na generalidade dos ensaios, a incorporação de agregados reciclados penaliza moderadamente o desempenho das argamassas;
- o incremento da taxa de incorporação de agregados reciclados tem como consequência um afastamento dos valores de referência.

Com o objetivo de prosseguir com a análise de uma composição de cada tipo de agregado, selecionou-se uma argamassa de cada família: ARM e ARB. Do conjunto com incorporação de agregados reciclados mistos, selecionou-se a argamassa ARM20 por apresentar os valores

mais próximos da argamassa de referência na generalidade dos ensaios e pela inferior velocidade de absorção de água em curtas exposições. Entre as formulações com agregados reciclados de betão, nenhuma das três apresentou ganhos significativos em comparação com a de referência. Selecionou-se a argamassa ARB100, conciliando a maximização da percentagem de agregados reciclados com o seu desempenho mecânico aceitável, considerando-a potencialmente útil para aplicação em situações de baixa exposição a agentes climáticos.

Nos ensaios de retração longitudinal - variação dimensional - mantém-se a tendência observada nas fases anteriores, com a composição ARM20 a obter valores muito próximos dos da referência e a ARB100 a destacar-se, neste caso, pela negativa. É possível estabelecer um paralelismo com a quantidade de água de amassadura necessária em cada formulação: quanto maior o volume de água utilizado na amassadura, maior é a variação dimensional obtida nos respetivos provetes. No entanto, apesar da elevada retração observada nos provetes prismáticos da composição ARB100, não foi possível detetar fendilhação superficial visível nos provetes em tijolo, mesmo após o processo de envelhecimento acelerado.

No ensaio de permeabilidade ao vapor de água, observou-se que os provetes ARB100 e ARM20 permitem uma permeação semelhante, sendo em ambos os casos superior ao valor de referência. Estes resultados são corroborados pelos valores de porosidade aberta, sendo a permeabilidade tanto maior quando a percentagem de poros interconectados medida.

A argamassa ARB100 apresentou a mais elevada tensão de aderência ao tijolo vermelho. Este resultado, associado à sua reduzida massa volúmica aparente, sustentam a teoria de que esta composição poderá ser uma alternativa viável para situações em que se pretende um revestimento particularmente leve e com baixo risco de destacamento do suporte. Por sua vez, a argamassa ARM20 evidenciou uma resistência cerca de 10% inferior ao valor de referência, o que, apesar de refletir uma desvantagem, pode ser considerado um desempenho semelhante.

Os valores de quantidade de água absorvida sob pressão são análogos aos do índice de porosidade aberta das argamassas. A argamassa sem agregados reciclados, cujos valores de absorção foram os mais reduzidos, foi também a composição cujo desempenho foi mais prejudicado pelo processo de envelhecimento acelerado. Após a exposição aos ciclos de calor / gelo, a diferença entre os valores da argamassa de referência e a composição ARM20 desceu cerca de 40%, destacando-se a segunda por apresentar a menor perda de desempenho das três formulações estudadas.



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

### **5.1. Considerações finais**

Com a aproximação do ano 2020, aumenta a pressão para que se cumpra o objetivo definido pela União Europeia da valorização de 70% dos Resíduos de Construção e Demolição. Apesar das diversas recomendações e decretos-lei já publicados, uma parte destes resíduos é ainda abandonada ou depositada indevidamente em aterros indiscriminados, impedindo assim a sua valorização.

A investigação de possíveis formas de promover o aproveitamento de RCD é um elemento determinante para a sustentabilidade ambiental do setor da Construção e o desenvolvimento de formas de rentabilizar a reciclagem deste tipo de resíduos poderá ter um papel tão ou mais impactante do que qualquer obrigatoriedade legal imposta. Neste contexto, os trabalhos apresentados nesta dissertação e nas demais da mesma linha de investigação compõem um contributo importante da comunidade académica para o cumprimento dos objetivos traçados. A incorporação dos resíduos de construção e demolição em argamassas de revestimento, como agregados, é não só uma forma eficaz de reciclagem, atribuindo maior valor ao devido depósito e tratamento dos RCD, como é simultaneamente um método de redução do consumo de matéria-prima natural - areia.

Por se reconhecer a importância do problema ambiental associado aos resíduos da construção, espera-se que as conclusões obtidas no presente trabalho possam potenciar de alguma forma a criação de mais e melhores soluções para o reaproveitamento destes produtos. Refira-se ainda que a utilização de agregados reciclados não envolve exclusivamente os resíduos produzidos na construção, pois existem também estudos que tratam a utilização de outros produtos como a borracha, o vidro e a cortiça, presentes em variados setores económicos.

### **5.2. Conclusões gerais**

O objetivo desta dissertação passa pela validação de soluções pouco restritivas, que permitam o reaproveitamento de resíduos sem recorrer a extensos processos de separação. Para o efeito, utilizou-se como agregado de argamassa, um agregado reciclado de betão, por ser frequente a demolição de grandes elementos de betão armado, e um agregado reciclado misto, produto de depósitos indiferenciados que dispensara triagens e separações extensivas.

Os resultados obtidos com as argamassas ARB (com reciclados de betão) são comparados com os valores de referência na Tabela 5.1. Pode-se observar que a incorporação deste tipo de agregados apresenta diversas vantagens e desvantagens face ao uso de agregados

naturais, e que ambas se acentuam com o aumento de agregado reciclado.

No âmbito do consumo de recursos, observa-se que o aumento de agregado reciclado de betão implica a utilização de mais água na produção das argamassas. Analisando este binómio, pode-se estabelecer uma relação de 12,7 dm<sup>3</sup> de agregado natural poupado por cada litro de água adicional despendido, o que equivale a um consumo de aproximadamente 0,08 m<sup>3</sup> de água por cada metro cúbico de areia natural substituído. Apesar de se compararem bens diferentes, importa referir que a extração de areia natural, além do custo energético associado, tem como consequência a erosão acelerada de leitos e dunas, comprometendo por vezes não só a integridade de alguns ecossistemas como a qualidade da água adjacente.

**Tabela 5.1 - Comparação dos resultados das argamassas ARB com a de referência – 2ª fase**

Ensaio	REF	ARB20		ARB50		ARB100	
Exigência de água [razão a/c]	1,12	1,18	5,36%	1,29	15,18%	1,40	25,00%
Massa volúmica no estado fresco [kg/m <sup>3</sup> ]	1952	1910	-2,13%	1859	-4,74%	1770	-9,32%
Massa volúmica no estado endurecido (28 dias) [kg/m <sup>3</sup> ]	1854	1793	-3,30%	1707	-7,94%	1617	-12,78%
Módulo de elasticidade dinâmico (90 dias) [GPa]	10,41	8,89	-14,60%	7,36	-29,30%	6,08	-41,59%
Ultrassons - método indireto (90 dias) [m/s]	2276	2133	-6,28%	2057	-9,62%	1906	-16,26%
Resistência à compressão (90 dias) [MPa]	4,11	3,73	-9,25%	3,31	-19,46%	3,29	-19,95%
Resistência à tração por flexão (90 dias) [MPa]	1,07	1,11	3,74%	0,91	-14,95%	0,91	-14,95%
Absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ]	0,90	0,90	0,00%	0,90	0,00%	0,90	0,00%
Porosidade aberta [%]	22,09	23,52	6,47%	24,72	11,91%	27,87	26,17%

**Legenda:** vermelho - diferenças com impacte negativo; verde - diferenças com impacte positivo; cinzento - variações de valor absoluto inferior a 5%.

Ainda que por margens reduzidas, a utilização de agregados de betão originou argamassas com massa volúmica inferior à de referência. Relativamente às restantes propriedades avaliadas, destaca-se a redução da resistência mecânica observada com o incremento da utilização destes agregados. Cruzando os resultados obtidos com os critérios apresentados na Tabela 5.2, pode-se afirmar que a única vantagem das argamassas ARB é o seu reduzido módulo de elasticidade, que permite o cumprimento da exigência do LNEC ( $\leq 10$  GPa) e que poderá refletir-se numa menor suscetibilidade à fendilhação, contribuindo para uma durabilidade superior. Refira-se ainda que os coeficientes de absorção de água por capilaridade são semelhantes por apenas serem representativos dos 90 minutos iniciais do ensaio – todas as argamassas ARB absorveram quantidades de água mais elevadas do que os provetes de referência na duração total do ensaio.

Contrariamente ao conjunto anterior, na família ARM (argamassas com reciclados mistos)

existe uma composição que se destaca pela positiva: todos os valores obtidos com a argamassa ARM20 com diferenças superiores a 5% face ao valor de referência são considerados vantajosos (Tabela 5.3). As incorporações de 50 e 100% acentuam estas vantagens, tais como o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica aparente, mas comprometem não só a resistência mecânica como o comportamento perante a presença de água, expressado pelos elevados valores de absorção capilar e porosidade aberta.

**Tabela 5.2 – Exigências de rebocos para edifícios novos (adaptado do Relatório 427/05 NRI, 2005)**

Característica ou verificação	Especificação ou recomendação	Base da exigência
Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	CS I: 0,4 a 2,5 CS II: 1,5 a 5,0 CS III: 3,5 a 7,5 CS IV: ≥ 6	EN 998-1
Coefficiente de capilaridade (kg/m <sup>2</sup> .min 0,5)	w0: sem exigência w1: C≤0,40 w2: C≤0,20	Exigências complementares do LNEC
Permeabilidade à água sob pressão (ml/cm <sup>2</sup> )	≤ 1 após 48 h	
Módulo de elasticidade (MPa)	≤ 10 000	
Retração	Sem exigência (preferencialmente moderada)	
Resistência à tração	Sem exigência (preferencialmente média)	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 0,10 m de reboco (m)	≤ 0,15 m	
Resistência ao arrancamento	≥ 0,3 MPa ou rotura coesiva	

Avaliando a vertente ambiental do uso dos agregados reciclados mistos e efetuando uma análise análoga à anterior, conclui-se que com a composição ARM20 pode conciliar-se a redução do uso de agregado natural com a redução de água de amassadura (Tabela 5.3).

**Tabela 5.3 - Comparação dos resultados das argamassas ARM com a de referência – 2ª fase**

Ensaio	REF	ARM20		ARM50		ARM100	
Exigência de água [razão a/c]	1,12	1,09	-2,68%	1,16	3,57%	1,36	21,43%
Massa volúmica no estado fresco [kg/m <sup>3</sup> ]	1952	1838	-5,85%	1765	-9,56%	1698	-13,01%
Massa volúmica no estado endurecido (28 dias) [kg/m <sup>3</sup> ]	1854	1780	-4,02%	1662	-10,36%	1532	-17,36%
Módulo de elasticidade dinâmico (90 dias) [GPa]	10,41	7,79	-25,17%	5,84	-43,90%	3,96	-61,96%
Ultrassons - método indireto (90 dias) [m/s]	2276	2182	-4,13%	1818	-20,12%	1510	-33,66%
Resistência à compressão (90 dias) [MPa]	4,11	4,03	-1,95%	2,40	-41,61%	2,09	-49,15%
Resistência à tração por flexão (90 dias) [MPa]	1,07	1,19	11,21%	0,73	-31,78%	0,60	-43,93%
Absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ]	0,90	0,75	-16,67%	1,20	33,33%	1,00	11,11%
Porosidade aberta [%]	22,09	22,99	4,07%	26,04	17,88%	31,02	40,43%

**Legenda:** vermelho – diferenças com impacte negativo; verde – diferenças com impacte positivo; cinzento – variações de valor absoluto inferior a 5%.

Na Tabela 5.4 apresentam-se os resultados da última fase de ensaios, incidentes apenas sobre as argamassas ARM20 e ARB100. Deste conjunto destacam-se apenas os valores de retração (variação dimensional) e os de aderência ao suporte: a composição ARM20 apresentou valores de retração inferiores à referência, contrastando com o valor 100% superior da argamassa ARB100; opostamente, esta última revelou uma capacidade de aderência ao suporte cerca de 67% superior ao valor de referência, enquanto a ARM20 resistiu a tensões inferiores - -11% - ao mesmo valor.

**Tabela 5.4 - Comparação dos resultados das argamassas ARM20 e ARB100 com a de referência - 3ª fase**

Ensaio	REF	ARM20		ARB100	
Varição dimensional [%]	0,01	0,01	-16,67%	0,02	100,00%
Suscetibilidade à fendilhação	Não	Não	-	Não	-
Permeabilidade ao vapor de água [ng/m.s.Pa]	17,95	23,94	33,37%	25,38	41,39%
Permeabilidade à água sob pressão [ml/cm <sup>2</sup> ]	2,17	3,52	62,21%	3,79	74,65%
Permeabilidade à água sob pressão - após e.a. [ml/cm <sup>2</sup> ]	3,43	4,15	20,99%	4,60	34,11%
Aderência ao suporte [Mpa]	0,54	0,48	-11,11%	0,90	66,67%

Destaca-se o facto de nenhuma destas argamassas ter apresentado fendilhação visível, apesar dos díspares e acentuados afastamentos dos valores de referência em múltiplos ensaios. No entanto, dada a área limitada da aplicação, o ensaio realizado é pouco sensível, destinando-se principalmente a verificar se existe uma tendência muito significativa para a fendilhação.

### 5.3. Propostas de desenvolvimentos futuros

O desenvolvimento do presente estudo permitiu a ampliação do conhecimento não só sobre os agregados estudados, como sobre a sustentabilidade na construção de forma geral. Espera-se que os resultados obtidos e a interpretação efetuada contribuam positivamente para o desenvolvimento de mais e melhores soluções de revestimentos, e que a curto prazo seja possível reduzir a infame pegada ecológica do setor da construção. Para que tal seja possível, é necessário manter o fluxo de trabalhos de investigação e aprofundar o entendimento da influência de cada parâmetro alterável.

Por conseguinte, seguem-se algumas sugestões para trabalhos futuros, algumas derivantes deste, outras abordando diferentes ângulos da temática geral.

- estudos da influência da utilização de diferentes curvas granulométricas obtidas com os mesmos materiais;
- estudos com os mesmos tipos de agregados reciclados, utilizando diferentes ligantes;

- estudos similares com incorporação de agregados reciclados mistos provenientes de outras fontes, permitindo avaliar a sensibilidade dos resultados às ligeiras variações de composição dos agregados;
- estudos com agregados reciclados mistos, envolvendo a aplicação de argamassas em paredes no exterior, em ambientes expostos a agentes poluentes, avaliando o seu envelhecimento e eventual fendilhação;
- estudos com argamassas de diferentes traços;
- avaliação da influência de plastificantes e adições em argamassas com agregados reciclados mistos e de betão;
- estudos de impacte económico e ambiental da utilização de agregados reciclados em detrimento da areia de rio em Portugal;
- estudos similares utilizando agregado reciclado de betão nos moldes em que utilizou a areia de rio, como base.



## Referências bibliográficas

**Agência Portuguesa do Ambiente (APA)**, *Resíduos de Construção e Demolição*, 2018. Disponível em <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283> (consultado em Janeiro de 2019);

**Al-Tulaian, B.S.; Al-Shannag, M. J.; Al-Hozaimy, A.R.**, *Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar*, *Construction and Building Materials*, V. 127, 2016;

**Baía, L. L. M.; Sabbatini, F. H.**, *Projeto e execução de revestimento de argamassa*, 4ª edição, 2000;

**Braga, M.**, *Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão - Efeito de fíler e pozolânico*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010;

**Brito, V.; Gonçalves, T. D.; Faria, P.**, *Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*, *Journal of Coatings Technology Research*, V. 8, 2011, pp. 513-525;

**Carasek, H.**, *Argamassas*, *Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia de materiais*, Editor Geraldo C. Isaia, V.2, São Paulo, Brasil, 2007;

**Cardoso, F.**, *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009;

**Cincotto, M. A.; Silva, M. A. C.; Carasek, H.**, *Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio*; Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1995, (Boletim 68 IPT);

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

**European commission (Eurostat)**, *Generation of waste by economic activity*, 2018. Disponível em <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (consultado em janeiro de 2019);

**Fan, C.; Huang, R.; Hwang, H.; Chao, S.**, *The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar*, *Materials*, 2015, V. 8, pp. 2658–2672;

**Faria, P.**, *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - contribuição para o estudo da influência dos ligantes*, Tese de Doutoramento em Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2004;

**Farinha, C.**, *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de loiça sanitária - Efeito de fíler e efeito pozolânico*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015;

**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;

**Ferrari, S.; Pereira, E; da Costa, M. R. M. M.; Siva, I. J.; Niebel, P. R.**, *Análise da retenção de água em argamassas colantes de mercado*, IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2011;

**Jesus, S.**, *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*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016;

**Jochem, L. F.; 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, 2013;

**Krüger, P.; Souza, A. B., Konofal, W. U.**, *Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD*; 8º Encontro de Tecnologia dos campos gerais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, agosto de 2013;

**Ledesma, E. F.; Jiménez, J. R.; Ayuso, 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;

**Leite, M.; Lima, P.; Santos, A.**, *Study of the consistence and mechanical behavior of recycled mortars*, 2<sup>nd</sup> International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo, 2009;

**Lima, P.; Leite, M.**, *Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar*, *Open Journal of Civil Engineering*, V. 2, 2012, pp. 53-57;

**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 2015.

**Lucas, J.,** *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de loiça sanitária – Reciclagem de agregados,* Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015;

**Lucas, J.; Brito, J. de; Veiga, R.; Farinha, C.,** *The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance,* 2015;

**Mak, T.; Yu, I.; Wang, L.; Hsu, S.; Tsang, D.; Li, C.; Yeung, T.; Zhang, R.; Poon, C.,** *Extended theory of planned behaviour for promoting construction waste recycling in Hong Kong,* 2018;

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

**Nagapan, S.; Rahman, I.; Asmi, A.,** *Factors contributing to physical and non-physical waste generation in construction industry,* International Journal of Advances in Applied Sciences, V. 1, 2012, pp. 1-10;

**Neno, C.; Brito, J. de; Veiga, R.,** *Using fine recycled concrete aggregate for mortar production.* Materials Research, V. 17, 2014, pp. 168-177;

**Remédios, N.; Faria, P.,** *Code 2.2.11 Avaliação de sistemas de acabamento para rebocos de edifícios antigos,* REHABEND, Burgos, Espanha, maio de 2016;

**Saini, P.; Ashish, D. K.,** *A review on recycled concrete aggregates,* SSRG-IJCE, 2015, pp. 71-75;

**Samiei, R.; Daniotti, B.; Pelosato, R.; Dotelli, G.,** *Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates,* Construction and Building Materials, V. 84, 2015, pp. 84-94;

**Silva, A.; Soares, A; Flores-Colen, I.; Brito, J. de,** *Avaliação de propriedades mecânicas de revestimento através do módulo de elasticidade dinâmico - Ensaios em provetes de dimensões reduzidas,* PATORREB, março de 2015;

**Silva, J.; Brito, J. de; Veiga, M. R.,** *Características mecânicas de argamassas com incorporação de agregados reciclados cerâmicos*, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Mecânica Experimental, V. 15, 2008, pp. 13-22;

**Silva, R.V.; Dhir, R.; Brito, J. de,** *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*, Construction and Building Materials, V. 65, 2014, pp. 201M217;

**Veiga, M. R.,** *Comportamento à fendilhação de rebocos: avaliação e melhoria*, Cadernos Edifícios n.º 3, Lisboa, LNEC, 2004;

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

**Veiga, M. R.,** *Comportamento de revestimentos de fachadas com base em ligante mineral*, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal, APFAC, novembro de 2005;

**Yoshida, A.; Barros, M.,** *Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas*, I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, Brasil, 1995, pp. 53-62;

**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.

## **Normas**

**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 1015-10**, 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 ultrassons*, 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 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.

## **Legislação**

**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;

**Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 19 de novembro de 2008, Jornal Oficial da União Europeia.

## Anexos

### Anexo A: Baridade dos componentes

Componente	Massa medida [g]	Volume do recipiente	Mv aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Média [g]	Desvio-padrão [kg/m <sup>3</sup> ]	Coefficiente de variação
<b>Cimento</b>	893,0	0,5	1027,2	1029,7	3,4	0,003
	896,9		1035,0			
	895,8		1032,8			
	893,5		1028,2			
	894,6		1030,4			
	891,8		1024,8			
<b>Areia de rio</b>	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			
<b>ARM &lt; 2,38mm</b>	959,9	0,5	1161,0	1161,7	7,9	0,007
	955,6		1152,4			
	955,0		1151,2			
	961,7		1164,6			
	965,9		1173,0			
	963,4		1168,0			
<b>ARB &lt; 2,38mm</b>	1007,4	0,5	1256,0	1257,3	2,1	0,002
	1008,9		1259,0			
	1008,0		1257,2			
	1009,9		1261,0			
	1007,1		1255,4			
	1007,1		1255,4			

Massa do copo: 379,4 g.

## Anexo B: Composição das argamassas

Argamassa	Agregado reciclado [%]	Traço	Cimento [dm <sup>3</sup> ]	Areia [dm <sup>3</sup> ]	RCD [dm <sup>3</sup> ]	Cimento [g]	Areia [g]	ARM	ARB [g]
REF	0	1:4	0,200	0,800	0,000	205,9	1177,1	0,0	0,0
ARB20	20	1:4	0,200	0,640	0,160	205,9	941,7	201,2	201,2
ARB50	50	1:4	0,200	0,400	0,400	205,9	588,6	502,9	502,9
ARB100	100	1:4	0,200	0,000	0,800	205,9	0,0	1005,8	1005,8
ARM20	20	1:4	0,200	0,640	0,160	205,9	941,7	201,2	185,9
ARM50	50	1:4	0,200	0,400	0,400	205,9	588,6	502,9	464,7
ARM100	100	1:4	0,200	0,000	0,800	205,9	0,0	1005,8	929,4

## Anexo C: Consistência por espalhamento

Argamassa	Agregado reciclado [%]	Razão a/c	Água [ml/dm <sup>3</sup> ]	Espalhamento 1 [mm]	Espalhamento 2 [mm]	Espalhamento médio [mm]	Desvio-padrão [mm]	Coefficiente de variação
REF	0	1,12	230	157,0	162,0	159,5	2,5	0,016
ARB20	20	1,18	242	158,0	161,0	159,5	1,5	0,009
ARB50	50	1,29	266	161,0	162,0	161,5	0,5	0,003
ARB100	100	1,40	288	159,0	161,0	160,0	1,0	0,006
ARM20	20	1,09	225	160,0	159,0	159,5	0,5	0,003
ARM50	50	1,16	238	160,0	159,0	159,5	0,5	0,003
ARM100	100	1,36	280	160,0	158,0	159,0	1,0	0,006

## Anexo D: Massa volúmica aparente no estado fresco

Argamassa	Massa total [g]	Massa volúmica [g/m <sup>3</sup> ]	Massa volúmica média [kg/m <sup>3</sup> ]	Desvio-padrão [kg/m <sup>3</sup> ]	Coefficiente de variação
<b>REF</b>	2416,30	1952,7	1951,6	4,3	0,002
	2419,80	1956,2			
	2409,50	1945,9			
<b>ARB20</b>	2366,60	1903,0	1910,1	5,6	0,003
	2380,40	1916,8			
	2374,20	1910,6			
<b>ARB50</b>	2309,10	1845,5	1859,0	11,7	0,006
	2337,60	1874,0			
	2321,10	1857,5			
<b>ARB100</b>	2230,70	1767,1	1769,8	3,2	0,002
	2237,90	1774,3			
	2231,50	1767,9			
<b>ARM20</b>	2309,90	1846,3	1837,5	23,9	0,013
	2325,00	1861,4			
	2268,50	1804,9			
<b>ARM50</b>	2228,40	1764,8	1765,1	0,4	0,000
	2229,30	1765,7			
	2228,30	1764,7			
<b>ARM100</b>	2159,00	1695,4	1697,6	1,6	0,001
	2162,80	1699,2			
	2161,90	1698,3			

Massa do recipiente: 463,6 g; Volume do recipiente: 1 dm<sup>3</sup>.

## Anexo E: Massa volúmica aparente no estado endurecido

28 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Massa [g]	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Média [kg/m <sup>3</sup> ]	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
REF	39,45	40,18	159,80	462,46	1825,98	1836,05	10,10	0,0055
	40,07	40,09	160,00	470,95	1832,31			
	40,08	39,93	159,93	473,55	1849,85			
ARB20	39,72	40,18	159,87	459,15	1799,57	1809,45	7,01	0,0039
	39,96	40,06	159,81	464,37	1815,05			
	39,59	40,02	159,80	459,21	1813,73			
ARB50	40,12	40,12	159,91	448,62	1743,08	1730,09	11,62	0,0067
	39,72	40,25	159,74	437,91	1714,87			
	39,83	40,22	159,75	443,40	1732,33			
ARB100	40,13	40,31	159,65	425,66	1648,21	1660,69	9,87	0,0059
	40,51	40,17	159,78	432,01	1661,53			
	40,03	40,18	159,81	429,82	1672,34			
ARM20	40,61	40,07	159,85	458,61	1763,25	1777,47	10,18	0,0057
	40,24	40,15	159,78	461,15	1786,54			
	40,16	40,04	159,83	458,15	1782,63			
ARM50	40,60	40,15	159,97	428,59	1643,31	1649,30	8,37	0,0051
	40,38	40,02	159,85	429,07	1661,15			
	40,68	40,02	159,88	427,77	1643,45			
ARM100	40,13	40,09	159,97	403,24	1566,56	1562,18	9,36	0,0060
	40,32	40,01	159,93	399,75	1549,16			
	40,05	40,03	159,81	402,52	1570,81			

a: altura; b: largura; c: comprimento.

**90 dias de idade**

<b>Argamassa</b>	<b>a [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>c [mm]</b>	<b>Massa [g]</b>	<b>Massa volúmica aparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Média [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Coefficiente de variação</b>
<b>REF</b>	39,90	40,00	159,99	476,87	1867,87	1854,13	14,02	0,0076
	40,21	39,97	160,25	472,54	1834,88			
	39,63	40,14	160,17	473,74	1859,64			
<b>ARB20</b>	39,80	40,04	160,03	456,27	1789,14	1792,91	9,58	0,0053
	39,94	40,11	160,08	463,16	1806,06			
	39,88	40,08	160,10	456,41	1783,53			
<b>ARB50</b>	39,84	40,19	159,85	435,21	1700,39	1706,85	6,49	0,0038
	39,45	40,04	159,84	433,15	1715,73			
	39,40	40,17	159,77	430,92	1704,42			
<b>ARB100</b>	40,22	40,11	159,65	415,90	1614,96	1617,25	3,97	0,0025
	40,23	40,21	159,76	419,40	1622,84			
	40,20	40,06	159,68	415,03	1613,96			
<b>ARM20</b>	40,35	40,31	159,81	465,45	1790,51	1779,53	8,41	0,0047
	40,02	40,31	159,88	456,50	1770,08			
	40,16	40,15	159,83	458,29	1778,00			
<b>ARM50</b>	40,33	40,13	159,90	428,08	1654,03	1661,97	5,67	0,0034
	40,65	40,10	159,93	434,02	1664,99			
	40,26	40,22	160,06	432,02	1666,88			
<b>ARM100</b>	40,73	40,17	159,61	401,58	1537,66	1532,27	4,64	0,0030
	40,40	40,22	159,89	398,30	1532,83			
	40,79	40,20	159,78	399,90	1526,33			

a: altura; b: largura; c: comprimento.

## Anexo F: Módulo de elasticidade dinâmico

28 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Massa [g]	Peso volúmico [N/m <sup>3</sup> ]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	Média [GPa]	Desvio-padrão [GPa]	Coefficiente de variação
REF	39,45	40,18	159,80	462,48	17894,60	7616,40	10,82	11,01	0,22	0,020
	40,07	40,09	160,00	470,95	17956,66	7616,40	10,88			
	40,08	39,93	159,93	473,55	18128,53	7735,70	11,33			
ARB20	39,72	40,18	159,87	459,15	17635,79	7398,10	10,07	10,24	0,15	0,014
	39,96	40,06	159,81	464,37	17787,45	7500,20	10,43			
	39,59	40,02	159,80	459,21	17774,54	7431,30	10,23			
ARB50	40,12	40,12	159,91	448,62	17082,18	7125,80	9,05	8,86	0,20	0,022
	39,72	40,25	159,74	437,91	16805,76	7005,00	8,59			
	39,83	40,22	159,75	443,40	16976,81	7114,50	8,95			
ARB100	40,13	40,31	159,65	425,66	16152,44	6856,10	7,90	8,25	0,26	0,032
	40,51	40,17	159,78	432,01	16282,97	7007,50	8,33			
	40,03	40,18	159,81	429,82	16388,88	7062,10	8,52			
ARM20	40,61	40,07	159,85	458,61	17279,88	7458,50	10,03	10,76	0,53	0,049
	40,24	40,15	159,78	461,15	17508,08	7853,10	11,25			
	40,16	40,04	159,83	458,15	17469,79	7769,90	11,00			
ARBM50	40,60	40,15	159,97	428,59	16104,46	6066,30	6,19	6,36	0,35	0,054
	40,38	40,02	159,85	429,07	16279,25	6350,60	6,85			
	40,68	40,02	159,88	427,77	16105,85	6002,50	6,05			
ARM100	40,13	40,09	159,97	403,24	15352,31	5388,30	4,66	4,53	0,15	0,032
	40,32	40,01	159,93	399,75	15181,81	5226,80	4,33			
	40,05	40,03	159,81	402,52	15393,92	5363,50	4,62			

a: altura; b: largura; c: comprimento.

90 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Massa [g]	Peso volúmico [N/m <sup>3</sup> ]	Frequência [Hz]	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	Média [GPa]	Desvio-padrão [GPa]	Coefficiente de variação
REF	39,90	40,00	159,99	476,87	18305,13	7596,80	11,04	10,41	0,46	0,044
	40,21	39,97	160,25	472,54	17981,86	7268,10	9,96			
	39,63	40,14	160,17	473,74	18224,52	7324,30	10,24			
ARB20	39,80	40,04	160,03	456,27	17533,54	6867,90	8,64	8,89	0,28	0,032
	39,94	40,11	160,08	463,16	17699,43	7083,20	9,29			
	39,88	40,08	160,10	456,41	17478,61	6915,20	8,74			
ARB50	39,84	40,19	159,85	435,21	16663,84	6530,60	7,41	7,36	0,12	0,016
	39,45	40,04	159,84	433,15	16814,14	6530,60	7,48			
	39,40	40,17	159,77	430,92	16703,30	6430,60	7,20			
ARB100	40,22	40,11	159,65	415,90	15826,59	6087,10	6,10	6,08	0,04	0,007
	40,23	40,21	159,76	419,40	15903,85	6026,50	6,02			
	40,20	40,06	159,68	415,03	15816,77	6094,30	6,11			
ARM20	40,35	40,31	159,81	465,45	17547,00	7616,40	10,61	9,79	0,62	0,064
	40,02	40,31	159,88	456,50	17346,79	7296,10	9,63			
	40,16	40,15	159,83	458,29	17424,36	7081,20	9,11			
ARBM50	40,33	40,13	159,90	428,08	16209,49	5801,70	5,69	5,84	0,10	0,017
	40,65	40,10	159,93	434,02	16316,86	5886,80	5,90			
	40,26	40,22	160,06	432,02	16335,46	5881,60	5,91			
ARM100	40,73	40,17	159,61	401,58	15069,06	5006,60	3,93	3,96	0,03	0,007
	40,40	40,22	159,89	398,30	15021,73	5047,70	3,99			
	40,79	40,20	159,78	399,90	14958,06	5039,40	3,96			

a: altura; b: largura; c: comprimento.

## Anexo G: Ultrassons

### Método indireto

REF			
28 dias			
Afastamento [mm]	T1 [ $\mu$ s]	T2 [ $\mu$ s]	T3 [ $\mu$ s]
10	16,4	16,4	16,6
20	23,2	22,7	22,5
30	26,5	26,3	26,1
40	33,1	32,4	31,7
50	36,7	37,0	37,0
60	40,8	40,8	41,1
70	44,0	44,0	44,0
80	48,2	48,7	48,5
90	53,9	53,8	53,9
100	57,2	57,2	57,6
110	60,9	60,9	61,1
120	64,2	64,7	64,5
130	68,2	68,2	68,7
140	74,0	73,4	73,6
90 dias			
Afastamento [mm]	T1 [ $\mu$ s]	T2 [ $\mu$ s]	T3 [ $\mu$ s]
10	17,3	17,5	17,5
20	21,1	21,3	21,3
30	25,0	25,0	25,0
40	29,7	29,9	29,9
50	33,8	33,8	33,8
60	38,7	38,7	38,7
70	43,4	43,7	43,7
80	48,7	48,2	48,7
90	53,3	53,3	53,1
100	56,6	56,6	56,6
110	59,5	59,7	59,9
120	64,8	64,8	64,7
130	69,4	69,4	69,4
140	74,2	74,2	74,0

ARB20					ARB50				ARB100			
-------	--	--	--	--	-------	--	--	--	--------	--	--	--

**28 dias**

Afastamento [mm]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]
10	15,7	15,7	15,7	15,7	15,3	15,3	15,1	15,2	17,1	17,1	17,1	17,1
20	21,8	22,1	21,6	21,8	19,7	19,7	19,7	19,7	22,6	22,8	22,8	22,7
30	27,0	26,8	26,8	26,9	25,0	25,0	25,0	25,0	26,9	26,9	27,3	27,0
40	32,6	31,4	31,8	31,9	29,5	29,9	29,9	29,8	30,9	30,9	31,1	31,0
50	35,5	35,2	35,5	35,4	33,2	33,2	33,2	33,2	35,3	35,3	35,3	35,3
60	39,3	39,1	39,1	39,2	37,9	37,7	37,7	37,8	41,1	40,7	41,3	41,0
70	45,0	44,6	44,9	44,8	42,0	42,4	42,4	42,3	45,0	45,0	45	45,0
80	47,4	48,0	48,3	47,9	46,5	46,5	46,5	46,5	49,6	50,3	50,3	50,1
90	53,0	53,5	53,5	53,3	51,0	51,0	51,0	51,0	52,7	52,3	52,7	52,6
100	57,4	56,8	57,4	57,2	55,3	55,3	55,3	55,3	58,0	58,0	58,2	58,1
110	60,5	60,5	60,5	60,5	60,0	60,0	60,0	60,0	61,8	61,8	62,6	62,1
120	64,1	63,1	62,7	63,3	63,9	64,0	64,2	64,0	66,5	66,5	66,5	66,5
130	67,0	67,8	67,0	67,3	71,2	71,2	71,2	71,2	69,8	71,7	71,7	71,1
140	71,9	71,3	71,5	71,6	74,9	73,4	73,5	73,9	74,9	74,9	74,9	74,9

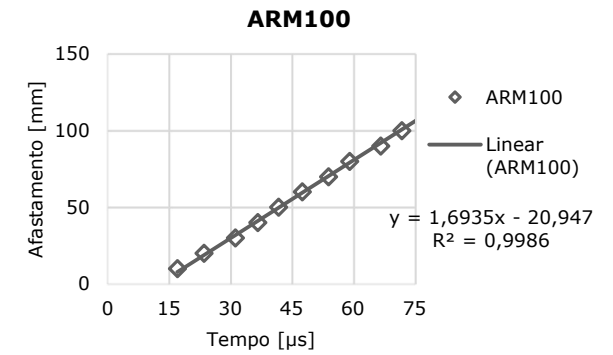
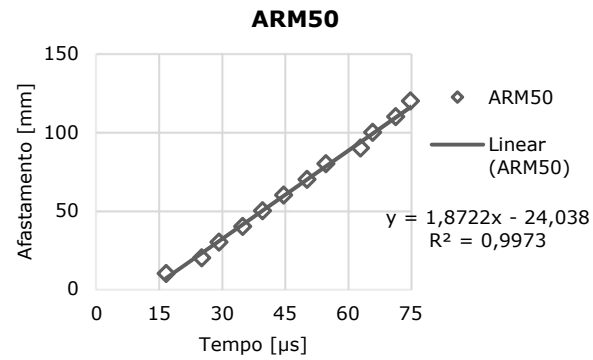
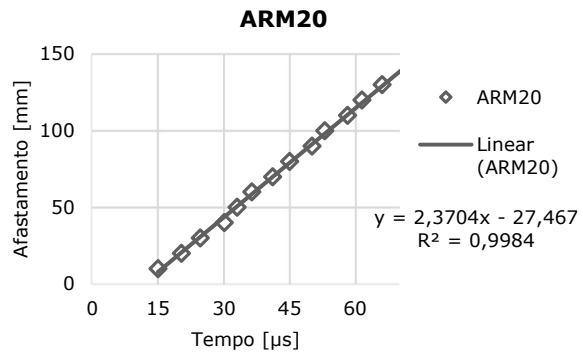
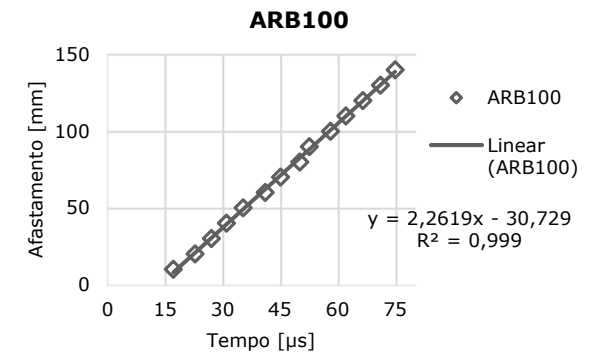
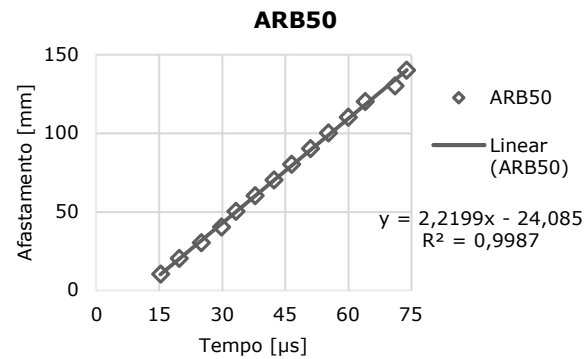
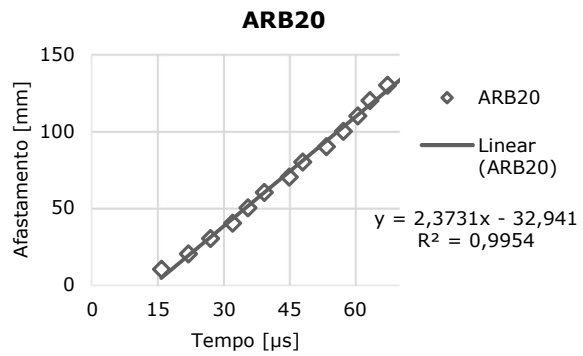
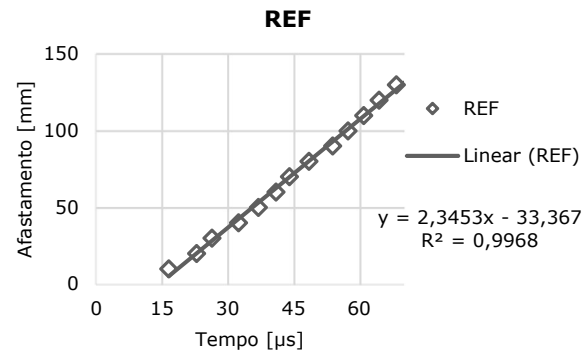
**90 dias**

Afastamento [mm]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]
10	16,1	16,1	16,0	16,1	18,3	18,2	18,2	18,2	17,9	18,2	18,2	18,1
20	23,0	22,8	22,6	22,8	23,2	23,0	23,3	23,2	23,8	23,9	23,9	23,9
30	28,3	27,8	27,7	27,9	27,9	27,9	28,3	28,0	30,4	30,4	30,4	30,4
40	33,7	33,7	33,7	33,7	32,5	32,5	32,5	32,5	34,8	34,8	34,2	34,6
50	36,7	36,3	36,5	36,5	39,4	38,2	38,2	38,6	39,3	39,3	39,3	39,3
60	41,2	41,5	41,6	41,4	43,8	43,9	43,6	43,8	46,2	45,6	45,9	45,9
70	45,5	45,4	45,4	45,4	48,8	48,5	48,7	48,7	50,1	50,0	50,1	50,1
80	51,0	51,7	51,4	51,4	53,4	53,2	53,2	53,3	55,8	55,8	55,9	55,8
90	55,9	55,9	55,8	55,9	59,6	58,5	58,6	58,9	61,6	61,7	61,6	61,6
100	59,6	59,6	59,5	59,6	63,5	63,4	63,2	63,4	66,0	66,2	66,3	66,2
110	64,7	64,3	64,7	64,6	67,0	66,9	67,0	67,0	72,0	71,3	71,7	71,7
120	69,4	69,3	69,1	69,3	71,2	71,3	71,4	71,3	76,1	75,9	75,9	76,0
130	74,3	74,0	74,3	74,2	76,0	76,1	75,6	75,9	81,1	82,4	82,6	82,0
140	78,2	78,5	78,8	78,5	82,1	81,2	81,6	81,6	87,1	86,4	85,8	86,4

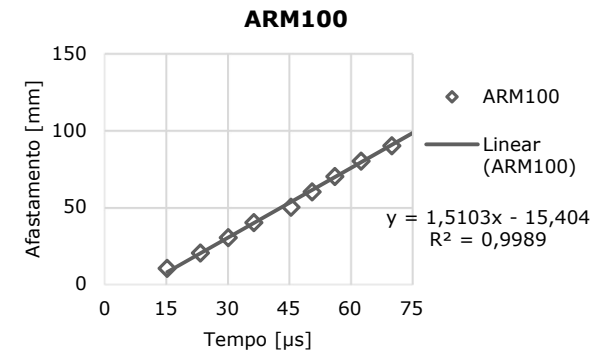
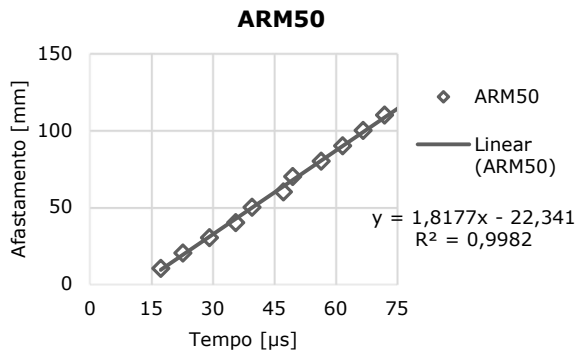
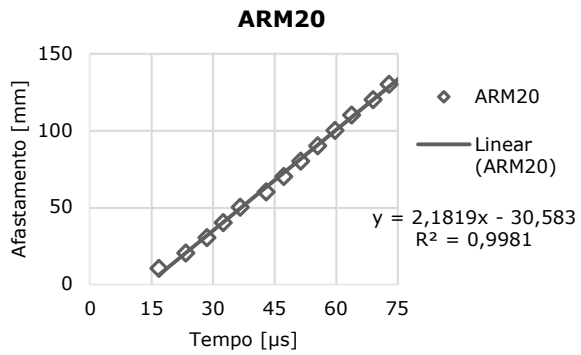
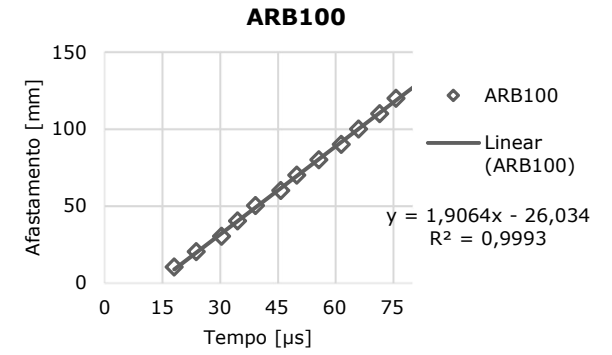
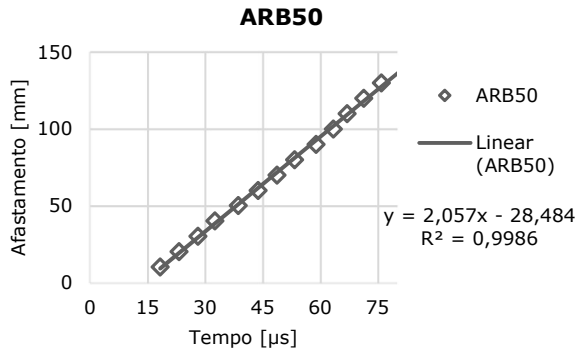
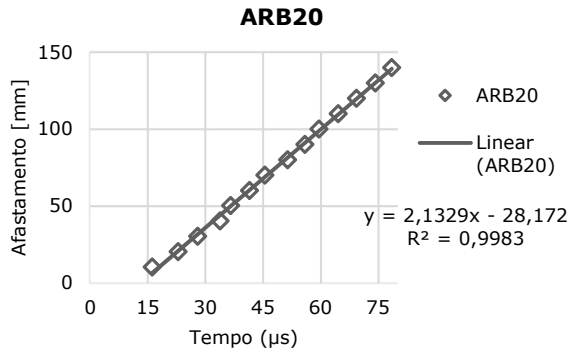
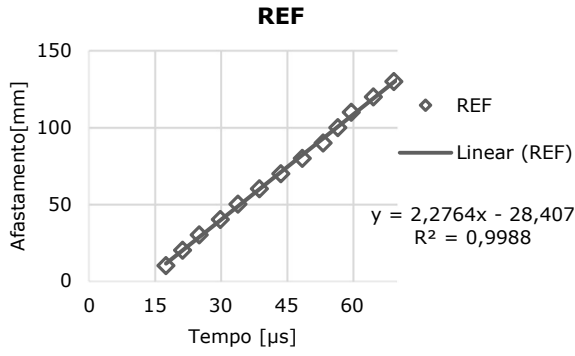
X

ARM20					ARM50				ARM100			
28 dias												
Afastamento [mm]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]
10	14,9	14,9	14,9	14,9	16,6	16,5	16,6	16,6	17,0	17,0	17,0	17,0
20	20,2	20,2	20,3	20,2	24,9	24,9	25,4	25,1	23,5	23,5	23,5	23,5
30	24,4	24,5	24,7	24,5	28,8	29,2	29,4	29,1	31,2	31,2	31,2	31,2
40	30,0	30,0	30,0	30,0	35,2	34,6	34,6	34,8	36,9	36,6	36,6	36,7
50	32,8	33,0	33,0	32,9	39,1	39,8	39,8	39,6	41,7	41,7	41,9	41,8
60	36,1	36,4	36,5	36,3	44,4	44,6	44,8	44,6	47,5	47,6	47,6	47,6
70	41,1	41,0	41,0	41,0	50,2	50,0	50,2	50,1	54,0	53,9	53,9	53,9
80	45,0	44,8	45,0	44,9	54,8	54,8	54,4	54,7	59,2	59,2	59,1	59,2
90	49,7	50,1	50,3	50,0	62,5	63,2	63,1	62,9	66,7	66,7	66,7	66,7
100	52,7	52,8	53,4	53,0	65,9	65,9	65,7	65,8	71,9	71,9	71,8	71,9
110	58,1	58,2	58,1	58,1	71,5	71,3	71,2	71,3	78,3	78,7	78,2	78,4
120	61,5	61,5	61,3	61,4	74,9	74,8	74,9	74,9	83,4	83,4	83,4	83,4
130	66,4	65,8	65,9	66,0	82,5	84,1	84,7	83,8	89,2	89,1	88,8	89,0
140	71,8	71,7	71,6	71,7	86,7	87,3	88,0	87,3	93,2	92,6	93,0	92,9
90 dias												
Afastamento [mm]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]	T1 [µs]	T2 [µs]	T3 [µs]	Média [µs]
10	16,8	16,5	16,8	16,7	598,8	17,2	17,3	17,3	17,3	15,0	15,5	15,3
20	23,3	23,2	23,3	23,3	859,6	22,6	22,6	22,6	22,6	23,5	23,4	23,3
30	28,3	28,4	28,5	28,4	1056,3	29,1	29,2	29,1	29,1	30,3	30,2	30,0
40	32,5	32,4	32,4	32,4	1233,3	35,5	35,5	35,6	35,5	36,3	36,5	36,6
50	36,8	36,5	36,4	36,6	1367,4	39,7	39,5	39,5	39,6	45,5	45,6	45,5
60	42,8	43,3	42,7	42,9	1397,5	46,9	47,4	47,2	47,2	50,7	50,8	50,6
70	47,2	47,1	47,2	47,2	1484,1	49,4	49,4	49,5	49,4	55,9	56,4	56,4
80	51,4	51,3	51,4	51,4	1557,4	56,4	56,4	56,5	56,4	62,9	62,5	62,5
90	55,8	55,8	55,0	55,5	1620,6	61,7	61,7	61,7	61,7	69,7	70,1	70,7
100	59,8	59,7	59,6	59,7	1675,0	66,5	66,7	66,9	66,7	77,2	76,1	76,7
110	63,6	64,2	63,6	63,8	1724,1	72,1	71,7	72,1	72,0	84,5	83,1	84,1
120	69,3	68,9	68,9	69,0	1738,3	79,3	79,4	81,2	80,0	88,3	88,3	88,9
130	73,4	72,7	72,7	72,9	1782,4	83,1	83,1	83,4	83,2	95,4	95,5	95,9
140	77,7	77,5	77,7	77,6	1803,3	8,7	89,6	88,9	62,4	102,7	102,9	102,7

## Representação gráfica: 28 dias de idade



**Representação gráfica: 90 dias de idade**



## Método direto

### 28 dias de idade

Argamassa	Tempo [ $\mu$ s]					Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	
REF	73,0	73,0	73,3	73,0	72,6	73,0
ARB20	73,8	74,5	74,5	74,5	74,7	74,4
ARB50	75,2	75,2	75,2	74,9	74,9	75,1
ARB100	78,0	77,6	78,2	78,2	78,2	78,0
ARM20	71,8	71,2	71,3	71,2	71,3	71,4
ARM50	90,6	90,6	90,7	90,6	90,6	90,6
ARM100	99,0	99,1	98,9	98,9	99,0	99,0

### 90 dias de idade

Argamassa	Tempo [ $\mu$ s]					Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	
REF	74,0	74,2	74,2	74,2	74,4	74,2
ARB20	80,6	80,6	80,3	80,3	80,3	80,4
ARB50	85,1	84,9	85,1	85,1	85,1	85,1
ARB100	87,6	87,6	87,7	87,5	87,7	87,6
ARM20	78,0	77,8	77,8	77,8	77,7	77,8
ARM50	99,2	91,0	91,2	91,0	91,2	92,7
ARM100	108,0	107,9	107,8	107,8	107,9	107,9

## Anexo H: Resistência à compressão

28 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	Carga esq. [N]	Carga dir. [N]	Carga média [N]	Tensão esq. [MPa]	Tensão dir. [MPa]	Tensão média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Coefficiente de variação
REF	39,45	40,18	6352	6341	6656,7	4,01	4,00	4,17	0,13	0,03
	40,07	40,09	6931	6928		4,31	4,31			
	40,08	39,93	6664	6724		4,16	4,20			
ARB20	39,72	40,18	10284	10066	10266,2	6,44	6,31	6,44	0,31	0,05
	39,96	40,06	10880	10214		6,80	6,38			
	39,59	40,02	9343	10810		5,90	6,82			
ARB50	40,12	40,12	10273	10009	9586,0	6,38	6,22	5,98	0,38	0,06
	39,72	40,25	9223	8387		5,77	5,25			
	39,83	40,22	10020	9604		6,25	5,99			
ARB100	40,13	40,31	9590	10340	10404,0	5,93	6,39	6,43	0,25	0,04
	40,51	40,17	10961	10540		6,74	6,48			
	40,03	40,18	10595	10398		6,59	6,47			
ARM20	40,61	40,07	6581	6162	6829,5	4,04	3,79	4,22	0,26	0,06
	40,24	40,15	7182	7235		4,45	4,48			
	40,16	40,04	7179	6638		4,46	4,13			
ARM50	40,60	40,15	4107	4023	4876,0	2,52	2,47	3,00	0,53	0,18
	40,38	40,02	4430	4600		2,74	2,85			
	40,68	40,02	5774	6322		3,55	3,88			
ARM100	40,13	40,09	6326	6057	6046,7	3,93	3,76	3,76	0,13	0,03
	40,32	40,01	5958	5756		3,69	3,57			
	40,05	40,03	5932	6251		3,70	3,90			

a: altura; b: largura.

90 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	Carga esq. [N]	Carga dir. [N]	Carga média [N]	Tensão esq. [MPa]	Tensão dir. [MPa]	Tensão média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Coefficiente de variação
REF	39,90	40,00	7129	6503	6561,5	4,47	4,07	4,11	0,23	0,05
	40,21	39,97	6236	6232		3,88	3,88			
	39,63	40,14	6913	6356		4,35	4,00			
ARB20	39,80	40,04	5883	6061	5968,2	3,69	3,80	3,73	0,07	0,02
	39,94	40,11	5894	5934		3,68	3,70			
	39,88	40,08	6149	5888		3,85	3,68			
ARB50	39,84	40,19	4782	4882	5246,3	2,99	3,05	3,31	0,21	0,06
	39,45	40,04	5533	5594		3,50	3,54			
	39,40	40,17	5343	5344		3,38	3,38			
ARB100	40,22	40,11	5401	5176	5304,3	3,35	3,21	3,29	0,07	0,02
	40,23	40,21	5267	5409		3,26	3,34			
	40,20	40,06	5416	5157		3,36	3,20			
ARM20	40,35	40,31	7044	7118	6518,0	4,33	4,38	4,03	0,32	0,08
	40,02	40,31	6525	6800		4,05	4,22			
	40,16	40,15	5644	5977		3,50	3,71			
ARM50	40,33	40,13	3774	4100	3896,2	2,33	2,53	2,40	0,11	0,05
	40,65	40,10	3608	3987		2,21	2,45			
	40,26	40,22	4072	3836		2,51	2,37			
ARM100	40,73	40,17	3382	3450	3410,3	2,07	2,11	2,09	0,05	0,02
	40,40	40,22	3405	3539		2,10	2,18			
	40,79	40,20	3351	3335		2,04	2,03			

a: altura; b: largura.

## Anexo I: Resistência à tração por flexão

28 dias de idade

Argamassa	a [mm]	b [mm]	Carga [N]	Carga média [N]	Tensão [MPa]	Tensão média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Coefficiente de variação
REF	39,45	40,18	630	631,7	1,51	1,49	0,04	0,03
	40,07	40,09	616		1,44			
	40,08	39,93	649		1,52			
ARB20	39,72	40,18	522	487,3	1,24	1,15	0,06	0,05
	39,96	40,06	478		1,12			
	39,59	40,02	462		1,10			
ARB50	40,12	40,12	555	557,0	1,29	1,31	0,04	0,03
	39,72	40,25	578		1,37			
	39,83	40,22	538		1,26			
ARB100	40,13	40,31	655	682,7	1,51	1,57	0,04	0,03
	40,51	40,17	700		1,59			
	40,03	40,18	693		1,61			
ARM20	40,61	40,07	590	671,7	1,34	1,55	0,18	0,12
	40,24	40,15	771		1,78			
	40,16	40,04	654		1,52			
ARM50	40,60	40,15	412	424,3	0,93	0,97	0,08	0,08
	40,38	40,02	467		1,07			
	40,68	40,02	394		0,89			
ARM100	40,13	40,09	378	340,3	0,88	0,79	0,15	0,19
	40,32	40,01	251		0,58			
	40,05	40,03	392		0,92			

a: altura; b: largura.

**90 dias de idade**

<b>Argamassa</b>	<b>a [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>Carga [N]</b>	<b>Carga média [N]</b>	<b>Tensão [MPa]</b>	<b>Tensão média [MPa]</b>	<b>Desvio-padrão [MPa]</b>	<b>Coefficiente de variação</b>
<b>REF</b>	39,90	40,00	500	453,3	1,18	1,07	0,09	0,08
	40,21	39,97	413		0,96			
	39,63	40,14	447		1,06			
<b>ARB20</b>	39,80	40,04	467	470,7	1,10	1,11	0,09	0,09
	39,94	40,11	424		0,99			
	39,88	40,08	521		1,23			
<b>ARB50</b>	39,84	40,19	385	380,0	0,91	0,91	0,11	0,12
	39,45	40,04	323		0,78			
	39,40	40,17	432		1,04			
<b>ARB100</b>	40,22	40,11	397	394,7	0,92	0,91	0,03	0,03
	40,23	40,21	411		0,95			
	40,20	40,06	376		0,87			
<b>ARM20</b>	40,35	40,31	594	515,0	1,36	1,19	0,13	0,11
	40,02	40,31	503		1,17			
	40,16	40,15	448		1,04			
<b>ARM50</b>	40,33	40,13	314	321,0	0,72	0,73	0,09	0,12
	40,65	40,10	279		0,63			
	40,26	40,22	370		0,85			
<b>ARM100</b>	40,73	40,17	227	266,7	0,51	0,60	0,08	0,13
	40,40	40,22	306		0,70			
	40,79	40,20	267		0,60			

a: altura; b: largura.

### Anexo J: Absorção de água por capilaridade

Tempo de imersão		REF_1			REF_2			REF_3		
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
0	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	0,003500	240,07	5,07	0,00317	238,68	6,14	0,003838
5,48	30	236,76	3,08	0,001925	242,80	2,73	0,00171	241,42	2,74	0,001712
7,75	60	240,54	3,78	0,002363	246,25	3,45	0,00216	245,13	3,71	0,002319
9,49	90	242,90	2,36	0,001475	248,28	2,03	0,00127	247,49	2,36	0,001475
13,42	180	249,05	6,15	0,003844	253,36	5,08	0,00318	253,29	5,80	0,003625
17,32	300	252,63	3,58	0,002237	257,41	4,05	0,00253	257,28	3,99	0,002494
21,91	480	252,99	0,36	0,000225	257,93	0,52	0,00032	257,77	0,49	0,000306
37,95	1440	253,34	0,35	0,000219	259,90	1,97	0,00123	258,10	0,33	0,000206
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	0,000162
92,95	8640	253,84	0,18	0,000113	260,26	0,08	0,00005	258,51	0,08	0,000050
100,40	10080	253,92	0,08	0,000050	260,31	0,05	0,00003	258,57	0,06	0,000038
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		0,90			0,80			0,90		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					0,90					
Desvio padrão					0,05					

Tempo de imersão		ARB20_1			ARB20_2			REF_20_3		
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
0	0	225,05	0,00	0,000000	222,08	0,00	0,000000	222,93	0,00	0,000000
3,16	10	230,02	4,97	0,003106	227,96	5,88	0,003675	228,70	5,77	0,003606
5,48	30	232,71	2,69	0,001681	230,78	2,82	0,001763	231,33	2,63	0,001644
7,75	60	236,10	3,39	0,002119	234,64	3,86	0,002412	235,05	3,72	0,002325
9,49	90	238,29	2,19	0,001369	237,10	2,46	0,001538	237,51	2,46	0,001537
13,42	180	243,27	4,98	0,003113	242,84	5,74	0,003588	243,07	5,56	0,003475
17,32	300	247,54	4,27	0,002669	247,35	4,51	0,002819	247,53	4,46	0,002788
21,91	480	250,08	2,54	0,001588	248,49	1,14	0,000713	248,89	1,36	0,000850
37,95	1440	250,65	0,57	0,000356	248,81	0,32	0,000200	249,29	0,40	0,000250
53,67	2880	251,05	0,40	0,000250	249,27	0,46	0,000288	249,73	0,44	0,000275
84,85	7200	251,19	0,14	0,000087	249,37	0,10	0,000062	249,78	0,05	0,000031
92,95	8640	251,20	0,01	0,000006	249,44	0,07	0,000044	249,86	0,08	0,000050
100,40	10080	225,05	0,00	0,000000	222,08	0,00	0,000000	222,93	0,00	0,000000
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		0,85			0,90			0,90		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					0,90					
Desvio padrão					0,02					

		ARB50_1			ARB50_2			ARB50_3		
Tempo de imersão		Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0	0	211,90	0,00	0,000000	210,41	0,00	0,000000	212,97	0,00	0,000000
3,16	10	218,31	6,41	0,004006	216,11	5,70	0,003563	219,37	6,40	0,004000
5,48	30	221,34	3,03	0,001894	218,85	2,74	0,001712	222,28	2,91	0,001819
7,75	60	225,47	4,13	0,002581	222,63	3,78	0,002363	226,32	4,04	0,002525
9,49	90	228,02	2,55	0,001594	225,00	2,37	0,001481	228,84	2,52	0,001575
13,42	180	234,03	6,01	0,003756	230,31	5,31	0,003319	234,59	5,75	0,003594
17,32	300	238,93	4,90	0,003063	234,71	4,40	0,002750	239,41	4,82	0,003013
21,91	480	241,10	2,17	0,001356	237,65	2,94	0,001838	241,27	1,86	0,001163
37,95	1440	241,55	0,45	0,000281	238,28	0,63	0,000394	241,67	0,40	0,000250
53,67	2880	241,94	0,39	0,000244	238,70	0,42	0,000262	242,13	0,46	0,000288
84,85	7200	241,09	-0,85	-0,000531	238,67	-0,03	-0,000019	242,09	-0,04	-0,000025
92,95	8640	242,02	0,93	0,000581	238,78	0,11	0,000069	242,17	0,08	0,000050
100,40	10080	211,90	0,00	0,000000	210,41	0,00	0,000000	212,97	0,00	0,000000
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		0,95			0,90			0,95		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					0,90					
Desvio padrão					0,02					

		ARB100_1			ARB100_2			ARB100_3		
Tempo de imersão		Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta$ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0	0	203,70	0,00	0,000000	200,19	0,00	0,000000	205,56	0,00	0,000000
3,16	10	209,29	5,59	0,003494	206,35	6,16	0,003850	211,21	5,65	0,003531
5,48	30	211,80	2,51	0,001569	209,09	2,74	0,001713	213,84	2,63	0,001644
7,75	60	215,31	3,51	0,002194	212,93	3,84	0,002400	217,37	3,53	0,002206
9,49	90	217,57	2,26	0,001412	215,50	2,57	0,001606	219,68	2,31	0,001444
13,42	180	222,59	5,02	0,003138	220,83	5,33	0,003331	224,86	5,18	0,003238
17,32	300	226,90	4,31	0,002694	225,39	4,56	0,002850	229,14	4,28	0,002675
21,91	480	231,58	4,68	0,002925	230,26	4,87	0,003044	233,87	4,73	0,002956
37,95	1440	235,98	4,40	0,002750	232,73	2,47	0,001544	238,45	4,58	0,002862
53,67	2880	236,45	0,47	0,000294	233,16	0,43	0,000269	238,95	0,50	0,000313
84,85	7200	236,45	0,00	0,000000	233,22	0,06	0,000038	239,03	0,08	0,000050
92,95	8640	236,55	0,10	0,000063	233,29	0,07	0,000044	239,05	0,02	0,000013
100,40	10080	203,70	0,00	0,000000	200,19	0,00	0,000000	205,56	0,00	0,000000
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		0,85			0,90			0,85		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					0,90					
Desvio padrão					0,02					

Tempo de imersão		ARM20_1			ARM20_2			ARM20_3		
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
0	0	223,55	0,00	0,000000	237,42	0,00	0,000000	232,03	0,00	0,000000
3,16	10	227,76	4,21	0,002631	241,57	4,15	0,002594	235,84	3,81	0,002381
5,48	30	230,72	2,96	0,001850	244,32	2,75	0,001719	238,23	2,39	0,001494
7,75	60	233,46	2,74	0,001713	247,03	2,71	0,001694	240,56	2,33	0,001456
9,49	90	235,57	2,11	0,001319	249,00	1,97	0,001231	242,37	1,81	0,001131
13,42	180	239,48	3,91	0,002444	253,24	4,24	0,002650	246,18	3,81	0,002381
17,32	300	244,13	4,65	0,002906	257,29	4,05	0,002531	249,77	3,59	0,002244
21,91	480	247,46	3,33	0,002081	261,36	4,07	0,002544	253,49	3,72	0,002325
37,95	1440	248,12	0,66	0,000412	263,72	2,36	0,001475	257,57	4,08	0,002550
53,67	2880	248,28	0,16	0,000100	263,90	0,18	0,000112	257,77	0,20	0,000125
84,85	7200	248,36	0,08	0,000050	263,98	0,08	0,000050	257,85	0,08	0,000050
92,95	8640	248,54	0,18	0,000112	264,25	0,27	0,000169	257,95	0,10	0,000062
100,40	10080	248,74	0,20	0,000125	264,33	0,08	0,000050	258,08	0,13	0,000081
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		0,80			0,75			0,65		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					0,75					
Desvio padrão					0,06					

Tempo de imersão		ARM50_1			ARM50_2			ARM50_3		
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
0	0	221,51	0,00	0,000000	208,06	0,00	0,000000	208,74	0,00	0,000000
3,16	10	227,84	6,33	0,003956	214,17	6,11	0,003819	215,23	6,49	0,004056
5,48	30	232,59	4,75	0,002969	218,47	4,30	0,002688	219,47	4,24	0,002650
7,75	60	236,57	3,98	0,002487	222,43	3,96	0,002475	223,66	4,19	0,002619
9,49	90	239,88	3,31	0,002069	225,71	3,28	0,002050	227,04	3,38	0,002113
13,42	180	247,03	7,15	0,004469	232,88	7,17	0,004481	234,08	7,04	0,004400
17,32	300	249,77	2,74	0,001713	234,93	2,05	0,001281	235,32	1,24	0,000775
21,91	480	249,96	0,19	0,000119	235,06	0,13	0,000081	235,46	0,14	0,000088
37,95	1440	250,33	0,37	0,000231	235,45	0,39	0,000244	235,89	0,43	0,000269
53,67	2880	250,55	0,22	0,000137	235,63	0,18	0,000113	236,02	0,13	0,000081
84,85	7200	250,78	0,23	0,000144	235,80	0,17	0,000106	236,23	0,21	0,000131
92,95	8640	251,31	0,53	0,000331	236,37	0,57	0,000356	236,7	0,47	0,000294
100,40	10080	251,43	0,12	0,000075	236,46	0,09	0,000056	237,02	0,32	0,000200
C [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]		1,20			1,15			1,20		
C̄ [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )]					1,20					
Desvio padrão					0,02					

Tempo de imersão		ARM100_1			ARM100_2			ARM100_3		
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	Δ Massa [g]	Abs. capilar [g/mm <sup>2</sup> ]
<b>0</b>	<b>0</b>	203,34	0,00	0,000000	198,35	0,00	0,000000	202,33	0,00	0,000000
<b>3,16</b>	<b>10</b>	209,3	5,96	0,003725	204,31	5,96	0,003725	208,12	5,79	0,003619
<b>5,48</b>	<b>30</b>	213,22	3,92	0,002450	208,22	3,91	0,002444	211,96	3,84	0,002400
<b>7,75</b>	<b>60</b>	216,74	3,52	0,002200	211,65	3,43	0,002144	215,36	3,40	0,002125
<b>9,49</b>	<b>90</b>	219,73	2,99	0,001869	214,59	2,94	0,001838	218,23	2,87	0,001794
<b>13,42</b>	<b>180</b>	226,17	6,44	0,004025	220,90	6,31	0,003944	224,38	6,15	0,003844
<b>17,32</b>	<b>300</b>	232,65	6,48	0,004050	227,23	6,33	0,003956	230,52	6,14	0,003838
<b>21,91</b>	<b>480</b>	237,35	4,70	0,002937	231,93	4,70	0,002938	235,70	5,18	0,003237
<b>37,95</b>	<b>1440</b>	238,17	0,82	0,000512	232,80	0,87	0,000544	236,62	0,92	0,000575
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	238,60	0,43	0,000269	233,18	0,38	0,000237	237,00	0,38	0,000237
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	238,95	0,35	0,000219	233,53	0,35	0,000219	237,43	0,43	0,000269
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	240,04	1,09	0,000681	234,50	0,97	0,000606	238,46	1,03	0,000644
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	240,14	0,10	0,000062	234,68	0,18	0,000113	238,58	0,12	0,000075
<b>C [kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)]</b>		1,05			1,05			1,00		
<b>C̄ [kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)]</b>					1,00					
<b>Desvio padrão</b>					0,02					

## Anexo K: Secagem

Tempo de secagem		REF_1	REF_2	REF_3
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos	Massa [g]	Massa [g]	Massa [g]
0,00	0	253,92	260,31	258,57
5,48	30	253,79	260,21	258,47
7,75	60	253,67	260,12	258,35
9,49	90	253,62	260,06	258,25
16,43	270	253,13	259,57	257,75
21,21	450	252,67	259,17	257,34
37,95	1440	251,36	257,93	256,13
84,85	7200	241,66	249,28	246,67
92,95	8640	240,50	248,21	245,39
107,33	11520	238,83	246,52	243,72
131,45	17280	237,23	244,96	242,16
136,82	18720	236,85	244,51	241,76
141,99	20160	236,68	244,29	241,52
146,97	21600	236,37	244,04	241,24
161,00	25920	235,71	243,39	240,52
165,41	27360	235,51	243,20	240,31
173,90	30240	235,09	242,80	239,92
177,99	31680	234,97	242,68	239,78
189,74	36000	234,65	242,36	239,48
193,49	37440	234,57	242,27	239,37
197,18	38880	234,44	242,13	239,25
200,80	40320	234,35	242,01	239,16
200,80	40320	234,26	241,93	239,07
211,28	44640	233,96	241,66	238,76
217,99	47520	233,78	241,48	238,61
221,27	48960	233,71	241,39	238,51
224,50	50400	233,66	241,31	238,43
233,92	54720	233,49	241,12	238,26
240,00	57600	233,39	240,99	238,14
254,56	64800	233,13	240,77	237,87
257,37	66240	233,10	240,71	237,82
260,15	67680	233,05	240,65	237,79
262,91	69120	233,03	240,62	237,72
265,63	70560	232,99	240,58	237,71
273,64	74880	232,92	240,51	237,63
276,26	76320	232,89	240,47	237,59
278,85	77760	232,89	240,45	237,60
281,42	79200	232,84	240,40	237,54
293,94	86400	232,72	240,28	237,41
296,38	87840	232,72	240,27	237,39
298,80	89280	232,72	240,26	237,39
301,20	90720	232,69	240,24	237,39
308,29	95040	232,63	240,16	237,31
312,92	97920	232,56	240,11	237,23
315,21	99360	232,56	240,11	237,25
317,49	100800	232,56	240,08	237,23

Provete		ARB20_1			ARB20_2			ARB20_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0	0	251,20	0,00	0,000000	249,44	0,00	0,000000	249,86	0,00	0,000000
5,48	30	251,03	-0,17	-0,000105	249,29	-0,15	-0,000094	249,74	-0,12	-0,000008
7,75	60	250,98	-0,05	-0,000031	249,20	-0,09	-0,000056	249,64	-0,10	-0,000006
9,49	90	250,89	-0,09	-0,000056	249,13	-0,07	-0,000044	249,57	-0,07	-0,000004
16,43	270	250,48	-0,41	-0,000254	248,75	-0,38	-0,000237	249,20	-0,37	-0,000203
21,21	450	250,11	-0,37	-0,000229	248,40	-0,35	-0,000219	248,86	-0,34	-0,000201
37,95	1440	248,03	-2,08	-0,001289	246,45	-1,95	-0,001218	247,05	-1,81	-0,001114
53,67	2880	244,71	-3,32	-0,002057	243,44	-3,01	-0,001881	244,47	-2,58	-0,00162
84,85	7200	239,53	-5,18	-0,003209	237,36	-6,08	-0,003799	237,77	-6,70	-0,00421
92,95	8640	238,29	-1,24	-0,000768	236,10	-1,26	-0,000787	236,75	-1,02	-0,00064
100,40	10080	237,48	-0,81	-0,000502	235,11	-0,99	-0,000619	235,72	-1,03	-0,00065
107,33	11520	236,81	-0,67	-0,000415	234,25	-0,86	-0,000537	235,02	-0,70	-0,00044
113,84	12960	236,02	-0,79	-0,000489	233,61	-0,64	-0,000400	234,35	-0,67	-0,00042
131,45	17280	234,88	-1,14	-0,000706	232,16	-1,45	-0,000906	232,86	-1,49	-0,00094
146,97	21600	233,92	-0,96	-0,000595	231,21	-0,95	-0,000594	232,03	-0,83	-0,00052
151,79	23040	233,74	-0,18	-0,000112	231,05	-0,16	-0,000100	231,84	-0,19	-0,00012
169,71	28800	232,97	-0,77	-0,000477	230,19	-0,86	-0,000537	230,98	-0,86	-0,00054
197,18	38880	232,15	-0,82	-0,000508	229,30	-0,89	-0,000556	230,11	-0,87	-0,00055
245,93	60480	231,04	-1,11	-0,000688	228,16	-1,14	-0,000712	229,01	-1,10	-0,00069
281,42	79200	230,63	-0,41	-0,000254	227,74	-0,42	-0,000262	228,56	-0,45	-0,00028
298,80	89280	230,41	-0,22	-0,000136	227,53	-0,21	-0,000131	228,37	-0,19	-0,00012
305,94	93600	230,36	-0,05	-0,000031	227,48	-0,05	-0,000031	228,29	-0,08	-0,00005
315,21	99360	230,28	-0,08	-0,000050	227,41	-0,07	-0,000044	228,83	0,54	0,00034
319,75	102240	230,26	-0,02	-0,000012	227,38	-0,03	-0,000019	228,20	-0,63	-0,00040
330,82	109440	230,15	-0,11	-0,000068	227,27	-0,11	-0,000069	228,11	-0,09	-0,00006
332,99	110880	230,16	0,01	0,000006	227,28	0,01	0,000006	228,09	-0,02	-0,00001
335,14	112320	230,16	0,00	0,000000	227,26	-0,02	-0,000012	228,10	0,01	0,00001

Provete		ARB50_1			ARB50_2			ARB50_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
0	0	242,02	0,00	0,0000000	238,78	0,00	0,0000000	242,17	0,00	0,0000000
5,48	30	241,94	-0,08	-0,0000506	238,69	-0,09	-0,0000557	242,08	-0,09	-0,000056
7,75	60	241,88	-0,06	-0,0000379	238,63	-0,06	-0,0000372	242,00	-0,08	-0,000050
9,49	90	241,84	-0,04	-0,0000253	238,59	-0,04	-0,0000248	241,99	-0,01	-0,000006
16,43	270	241,58	-0,26	-0,0001643	238,40	-0,19	-0,0001177	241,78	-0,21	-0,000130
21,21	450	241,38	-0,20	-0,0001264	238,24	-0,16	-0,0000991	241,58	-0,20	-0,000124
37,95	1440	240,13	-1,25	-0,0007901	237,27	-0,97	-0,0006008	240,53	-1,05	-0,000650

Provete		ARB50_1			ARB50_2			ARB50_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	238,28	-1,85	-0,0011694	235,87	-1,40	-0,0008672	238,95	-1,58	-0,000979
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	232,87	-5,41	-0,0034197	231,56	-4,31	-0,0026697	233,64	-5,31	-0,003289
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	230,83	-2,04	-0,0012895	229,69	-1,87	-0,0011583	231,34	-2,30	-0,001425
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	228,90	-1,93	-0,0012200	227,59	-2,10	-0,0013008	229,23	-2,11	-0,001307
<b>107,33</b>	<b>11520</b>	227,53	-1,37	-0,0008660	226,14	-1,45	-0,0008981	227,81	-1,42	-0,000880
<b>113,84</b>	<b>12960</b>	226,16	-1,37	-0,0008660	224,83	-1,31	-0,0008114	226,95	-0,86	-0,000533
<b>131,45</b>	<b>17280</b>	224,15	-2,01	-0,0012705	222,60	-2,23	-0,0013813	224,83	-2,12	-0,001313
<b>146,97</b>	<b>21600</b>	222,63	-1,52	-0,0009608	221,15	-1,45	-0,0008981	223,78	-1,05	-0,000650
<b>151,79</b>	<b>23040</b>	222,43	-0,20	-0,0001264	220,94	-0,21	-0,0001301	223,45	-0,33	-0,000204
<b>169,71</b>	<b>28800</b>	221,42	-1,01	-0,0006384	219,82	-1,12	-0,0006937	222,31	-1,14	-0,000706
<b>197,18</b>	<b>38880</b>	220,34	-1,08	-0,0006827	218,76	-1,06	-0,0006566	221,32	-0,99	-0,000613
<b>245,93</b>	<b>60480</b>	218,99	-1,35	-0,0008534	217,44	-1,32	-0,0008176	220,00	-1,32	-0,000818
<b>281,42</b>	<b>79200</b>	218,52	-0,47	-0,0002971	216,97	-0,47	-0,0002911	219,63	-0,37	-0,000229
<b>298,80</b>	<b>89280</b>	218,28	-0,24	-0,0001517	216,69	-0,28	-0,0001734	219,41	-0,22	-0,000136
<b>305,94</b>	<b>93600</b>	218,19	-0,09	-0,0000569	216,65	-0,04	-0,0000248	219,33	-0,08	-0,000050
<b>315,21</b>	<b>99360</b>	218,11	-0,08	-0,0000506	216,57	-0,08	-0,0000496	219,26	-0,07	-0,000043
<b>319,75</b>	<b>102240</b>	218,03	-0,08	-0,0000506	216,50	-0,07	-0,0000434	219,20	-0,06	-0,000037
<b>330,82</b>	<b>109440</b>	217,96	-0,07	-0,0000442	216,43	-0,07	-0,0000434	219,10	-0,10	-0,000062
<b>332,99</b>	<b>110880</b>	217,94	-0,02	-0,0000126	216,41	-0,02	-0,0000124	219,09	-0,01	-0,000006
<b>335,14</b>	<b>112320</b>	217,95	0,01	0,0000063	216,39	-0,02	-0,0000124	219,08	-0,01	-0,000006

Provete		ARB100_1			ARB100_2			ARB100_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>0</b>	<b>0</b>	236,50	0,00	0,0000000	233,29	0,00	0,0000000	239,05	0,00	0,0000000
<b>5,48</b>	<b>30</b>	236,44	-0,06	-0,0000372	233,21	-0,08	-0,0000500	238,94	-0,11	-0,000069
<b>7,75</b>	<b>60</b>	236,34	-0,10	-0,0000620	233,11	-0,10	-0,0000625	238,87	-0,07	-0,000044
<b>9,49</b>	<b>90</b>	236,20	-0,14	-0,0000867	233,00	-0,11	-0,0000687	238,77	-0,10	-0,000063
<b>16,43</b>	<b>270</b>	235,53	-0,67	-0,0004151	232,44	-0,56	-0,0003499	238,33	-0,44	-0,000276
<b>21,21</b>	<b>450</b>	235,12	-0,41	-0,0002540	231,95	-0,49	-0,0003062	237,77	-0,56	-0,000352
<b>37,95</b>	<b>1440</b>	232,61	-2,51	-0,0015552	229,02	-2,93	-0,0018308	234,58	-3,19	-0,002003
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	227,72	-4,89	-0,0030298	225,06	-3,96	-0,0024744	231,45	-3,13	-0,001966
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	221,52	-6,20	-0,0038414	217,71	-7,35	-0,0045926	223,77	-7,68	-0,004823
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	220,40	-1,12	-0,0006939	216,52	-1,19	-0,0007436	222,53	-1,24	-0,000779
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	219,48	-0,92	-0,0005700	215,60	-0,92	-0,0005749	221,67	-0,86	-0,000540
<b>107,33</b>	<b>11520</b>	218,64	-0,84	-0,0005205	214,91	-0,69	-0,0004311	220,97	-0,70	-0,000440
<b>113,84</b>	<b>12960</b>	217,96	-0,68	-0,0004213	214,25	-0,66	-0,0004124	220,26	-0,71	-0,000446
<b>131,45</b>	<b>17280</b>	216,49	-1,47	-0,0009108	212,83	-1,42	-0,0008873	218,83	-1,43	-0,000898

Provete		ARB100_1			ARB100_2			ARB100_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>146,97</b>	<b>21600</b>	215,49	-1,00	-0,0006196	211,95	-0,88	-0,0005499	217,97	-0,86	-0,000540
<b>151,79</b>	<b>23040</b>	215,36	-0,13	-0,0000805	211,79	-0,16	-0,0001000	217,80	-0,17	-0,000107
<b>169,71</b>	<b>28800</b>	214,48	-0,88	-0,0005452	210,95	-0,84	-0,0005249	216,89	-0,91	-0,000571
<b>197,18</b>	<b>38880</b>	213,60	-0,88	-0,0005452	210,12	-0,83	-0,0005186	216,08	-0,81	-0,000509
<b>245,93</b>	<b>60480</b>	212,34	-1,26	-0,0007807	208,99	-1,13	-0,0007061	214,88	-1,20	-0,000754
<b>281,42</b>	<b>79200</b>	211,98	-0,36	-0,0002231	208,50	-0,49	-0,0003062	214,39	-0,49	-0,000308
<b>298,80</b>	<b>89280</b>	211,68	-0,30	-0,0001859	208,23	-0,27	-0,0001687	214,05	-0,34	-0,000214
<b>305,94</b>	<b>93600</b>	211,54	-0,14	-0,0000867	208,14	-0,09	-0,0000562	213,94	-0,11	-0,000069
<b>315,21</b>	<b>99360</b>	211,48	-0,06	-0,0000372	208,04	-0,10	-0,0000625	213,86	-0,08	-0,000050
<b>319,75</b>	<b>102240</b>	211,43	-0,05	-0,0000310	207,99	-0,05	-0,0000312	213,78	-0,08	-0,000050
<b>330,82</b>	<b>109440</b>	211,30	-0,13	-0,0000805	207,88	-0,11	-0,0000687	213,67	-0,11	-0,000069
<b>332,99</b>	<b>110880</b>	211,30	0,00	0,0000000	207,87	-0,01	-0,0000062	213,66	-0,01	-0,000006
<b>335,14</b>	<b>112320</b>	211,28	-0,02	-0,0000124	207,84	-0,03	-0,0000187	213,64	-0,02	-0,000013

Provete		ARM20_1			ARM20_2			ARM20_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>0</b>	<b>0</b>	248,68	0,00	0,0000000	264,36	0,00	0,0000000	258,10	0,00	0,0000000
<b>5,48</b>	<b>30</b>	248,58	-0,10	-0,0000623	264,31	-0,05	-0,0000310	258,05	-0,05	-0,000031
<b>7,75</b>	<b>60</b>	248,52	-0,06	-0,0000374	264,26	-0,05	-0,0000310	257,98	-0,07	-0,000043
<b>9,49</b>	<b>90</b>	248,46	-0,06	-0,0000374	264,21	-0,05	-0,0000310	257,93	-0,05	-0,000031
<b>16,43</b>	<b>270</b>	248,04	-0,42	-0,0002617	263,91	-0,30	-0,0001858	257,66	-0,27	-0,000168
<b>21,21</b>	<b>450</b>	247,79	-0,25	-0,0001557	263,69	-0,22	-0,0001362	257,30	-0,36	-0,000223
<b>37,95</b>	<b>1440</b>	245,65	-2,14	-0,0013332	262,02	-1,67	-0,0010342	255,84	-1,46	-0,000906
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	243,94	-1,71	-0,0010653	258,69	-3,33	-0,0020621	253,76	-2,08	-0,001291
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	239,99	-3,95	-0,0024608	254,02	-4,67	-0,0028919	247,31	-6,45	-0,004004
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	238,64	-1,35	-0,0008410	252,90	-1,12	-0,0006936	246,24	-1,07	-0,000664
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	237,54	-1,10	-0,0006853	251,91	-0,99	-0,0006131	245,51	-0,73	-0,000453
<b>107,33</b>	<b>11520</b>	236,78	-0,76	-0,0004735	251,14	-0,77	-0,0004768	244,80	-0,71	-0,000441
<b>113,84</b>	<b>12960</b>	236,08	-0,70	-0,0004361	250,44	-0,70	-0,0004335	244,18	-0,62	-0,000385
<b>131,45</b>	<b>17280</b>	234,62	-1,46	-0,0009096	248,86	-1,58	-0,0009784	242,80	-1,38	-0,000857
<b>146,97</b>	<b>21600</b>	233,66	-0,96	-0,0005981	247,93	-0,93	-0,0005759	241,90	-0,90	-0,000559
<b>151,79</b>	<b>23040</b>	233,46	-0,20	-0,0001246	247,70	-0,23	-0,0001424	241,72	-0,18	-0,000112
<b>169,71</b>	<b>28800</b>	232,57	-0,89	-0,0005545	246,77	-0,93	-0,0005759	240,91	-0,81	-0,000503
<b>197,18</b>	<b>38880</b>	231,56	-1,01	-0,0006292	245,76	-1,01	-0,0006255	239,94	-0,97	-0,000602
<b>245,93</b>	<b>60480</b>	230,26	-1,30	-0,0008099	244,40	-1,36	-0,0008422	238,79	-1,15	-0,000714
<b>281,42</b>	<b>79200</b>	229,73	-0,53	-0,0003302	243,97	-0,43	-0,0002663	238,41	-0,38	-0,000236
<b>298,80</b>	<b>89280</b>	229,41	-0,32	-0,0001994	243,68	-0,29	-0,0001796	238,14	-0,27	-0,000168
<b>305,94</b>	<b>93600</b>	229,34	-0,07	-0,0000436	243,57	-0,11	-0,0000681	238,08	-0,06	-0,000037

Provete		ARM20_1			ARM20_2			ARM20_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>315,21</b>	<b>99360</b>	229,25	-0,09	-0,0000561	243,53	-0,04	-0,0000248	238,01	-0,07	-0,000043
<b>319,75</b>	<b>102240</b>	229,20	-0,05	-0,0000311	243,46	-0,07	-0,0000433	237,96	-0,05	-0,000031
<b>330,82</b>	<b>109440</b>	229,08	-0,12	-0,0000748	243,34	-0,12	-0,0000743	237,82	-0,14	-0,000087
<b>332,99</b>	<b>110880</b>	229,09	0,01	0,0000062	243,36	0,02	0,0000124	237,85	0,03	0,000019
<b>335,14</b>	<b>112320</b>	229,09	0,00	0,0000000	243,35	-0,01	-0,0000062	237,86	0,01	0,000006

Provete		ARM50_1			ARM50_2			ARM50_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>0</b>	<b>0</b>	251,52	0,00	0,0000000	236,58	0,00	0,0000000	237,04	0,00	0,000000
<b>5,48</b>	<b>30</b>	251,47	-0,05	-0,0000311	236,52	-0,06	-0,0000372	236,98	-0,06	-0,000037
<b>7,75</b>	<b>60</b>	251,39	-0,08	-0,0000498	236,43	-0,09	-0,0000557	236,87	-0,11	-0,000068
<b>9,49</b>	<b>90</b>	251,30	-0,09	-0,0000561	236,35	-0,08	-0,0000495	236,81	-0,06	-0,000037
<b>16,43</b>	<b>270</b>	250,97	-0,33	-0,0002056	236,04	-0,31	-0,0001920	236,48	-0,33	-0,000205
<b>21,21</b>	<b>450</b>	250,69	-0,28	-0,0001744	235,77	-0,27	-0,0001672	236,19	-0,29	-0,000180
<b>37,95</b>	<b>1440</b>	248,91	-1,78	-0,0011089	234,03	-1,74	-0,0010775	234,40	-1,79	-0,001111
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	246,49	-2,42	-0,0015076	231,81	-2,22	-0,0013748	232,21	-2,19	-0,001360
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	241,24	-5,25	-0,0032707	226,93	-4,88	-0,0030220	227,11	-5,10	-0,003166
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	239,85	-1,39	-0,0008659	225,62	-1,31	-0,0008112	225,87	-1,24	-0,000770
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	238,57	-1,28	-0,0007974	224,41	-1,21	-0,0007493	224,67	-1,20	-0,000745
<b>107,33</b>	<b>11520</b>	237,65	-0,92	-0,0005731	223,63	-0,78	-0,0004830	223,86	-0,81	-0,000503
<b>113,84</b>	<b>12960</b>	236,82	-0,83	-0,0005171	222,68	-0,95	-0,0005883	222,81	-1,05	-0,000652
<b>131,45</b>	<b>17280</b>	234,79	-2,03	-0,0012647	220,73	-1,95	-0,0012076	221,00	-1,81	-0,001124
<b>146,97</b>	<b>21600</b>	233,63	-1,16	-0,0007227	219,47	-1,26	-0,0007803	219,70	-1,30	-0,000807
<b>151,79</b>	<b>23040</b>	233,36	-0,27	-0,0001682	219,14	-0,33	-0,0002044	219,44	-0,26	-0,000161
<b>169,71</b>	<b>28800</b>	232,21	-1,15	-0,0007164	217,91	-1,23	-0,0007617	218,33	-1,11	-0,000689
<b>197,18</b>	<b>38880</b>	230,97	-1,24	-0,0007725	216,58	-1,33	-0,0008236	217,15	-1,18	-0,000733
<b>245,93</b>	<b>60480</b>	229,43	-1,54	-0,0009594	215,07	-1,51	-0,0009351	215,73	-1,42	-0,000882
<b>281,42</b>	<b>79200</b>	228,82	-0,61	-0,0003800	214,61	-0,46	-0,0002849	215,18	-0,55	-0,000341
<b>298,80</b>	<b>89280</b>	228,54	-0,28	-0,0001744	214,40	-0,21	-0,0001300	214,90	-0,28	-0,000174
<b>305,94</b>	<b>93600</b>	228,38	-0,16	-0,0000997	214,30	-0,10	-0,0000619	214,84	-0,06	-0,000037
<b>315,21</b>	<b>99360</b>	228,28	-0,10	-0,0000623	214,25	-0,05	-0,0000310	214,78	-0,06	-0,000037
<b>319,75</b>	<b>102240</b>	228,22	-0,06	-0,0000374	214,20	-0,05	-0,0000310	214,72	-0,06	-0,000037
<b>330,82</b>	<b>109440</b>	228,08	-0,14	-0,0000872	214,08	-0,12	-0,0000743	214,59	-0,13	-0,000081
<b>332,99</b>	<b>110880</b>	228,10	0,02	0,0000125	214,11	0,03	0,0000186	214,63	0,04	0,000025
<b>335,14</b>	<b>112320</b>	228,10	0,00	0,0000000	214,10	-0,01	-0,0000062	214,62	-0,01	-0,000006

Provete		ARM100_1			ARM100_2			ARM100_3		
Tempo		Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]	Massa [g]	$\Delta M$ [g]	$\Delta M/S$ [g/mm <sup>2</sup> ]
Minutos <sup>1/2</sup>	Minutos									
<b>0</b>	<b>0</b>	240,23	0,00	0,0000000	234,85	0,00	0,0000000	238,62	0,00	0,0000000
<b>5,48</b>	<b>30</b>	240,17	-0,06	-0,0000374	234,77	-0,08	-0,0000495	238,56	-0,06	-0,000037
<b>7,75</b>	<b>60</b>	240,10	-0,07	-0,0000436	234,68	-0,09	-0,0000557	238,51	-0,05	-0,000031
<b>9,49</b>	<b>90</b>	240,05	-0,05	-0,0000311	234,63	-0,05	-0,0000310	238,47	-0,04	-0,000025
<b>16,43</b>	<b>270</b>	239,75	-0,30	-0,0001869	234,39	-0,24	-0,0001486	238,26	-0,21	-0,000130
<b>21,21</b>	<b>450</b>	239,45	-0,30	-0,0001869	234,15	-0,24	-0,0001486	238,06	-0,20	-0,000124
<b>37,95</b>	<b>1440</b>	237,95	-1,50	-0,0009345	232,87	-1,28	-0,0007927	236,91	-1,15	-0,000714
<b>53,67</b>	<b>2880</b>	235,96	-1,99	-0,0012397	231,27	-1,60	-0,0009908	234,57	-2,34	-0,001453
<b>84,85</b>	<b>7200</b>	230,24	-5,72	-0,0035635	226,11	-5,16	-0,0031954	229,86	-4,71	-0,002924
<b>92,95</b>	<b>8640</b>	228,49	-1,75	-0,0010902	224,51	-1,60	-0,0009908	228,28	-1,58	-0,000981
<b>100,40</b>	<b>10080</b>	226,68	-1,81	-0,0011276	222,93	-1,58	-0,0009784	226,59	-1,69	-0,001049
<b>107,33</b>	<b>11520</b>	225,55	-1,13	-0,0007040	221,83	-1,10	-0,0006812	225,31	-1,28	-0,000795
<b>113,84</b>	<b>12960</b>	224,37	-1,18	-0,0007351	220,42	-1,41	-0,0008732	224,14	-1,17	-0,000726
<b>131,45</b>	<b>17280</b>	221,01	-3,36	-0,0020932	216,70	-3,72	-0,0023036	220,45	-3,69	-0,002291
<b>146,97</b>	<b>21600</b>	219,08	-1,93	-0,0012024	214,39	-2,31	-0,0014305	218,08	-2,37	-0,001471
<b>151,79</b>	<b>23040</b>	218,60	-0,48	-0,0002990	213,91	-0,48	-0,0002972	217,64	-0,44	-0,000273
<b>169,71</b>	<b>28800</b>	216,71	-1,89	-0,0011774	211,94	-1,97	-0,0012199	215,76	-1,88	-0,001167
<b>197,18</b>	<b>38880</b>	214,75	-1,96	-0,0012210	209,77	-2,17	-0,0013438	213,74	-2,02	-0,001254
<b>245,93</b>	<b>60480</b>	212,70	-2,05	-0,0012771	207,46	-2,31	-0,0014305	211,45	-2,29	-0,001422
<b>281,42</b>	<b>79200</b>	211,88	-0,82	-0,0005108	206,71	-0,75	-0,0004644	210,76	-0,69	-0,000428
<b>298,80</b>	<b>89280</b>	211,50	-0,38	-0,0002367	206,37	-0,34	-0,0002105	210,43	-0,33	-0,000205
<b>305,94</b>	<b>93600</b>	211,35	-0,15	-0,0000934	206,24	-0,13	-0,0000805	210,31	-0,12	-0,000074
<b>315,21</b>	<b>99360</b>	211,28	-0,07	-0,0000436	206,13	-0,11	-0,0000681	210,21	-0,10	-0,000062
<b>319,75</b>	<b>102240</b>	211,15	-0,13	-0,0000810	206,07	-0,06	-0,0000372	210,13	-0,08	-0,000050
<b>330,82</b>	<b>109440</b>	211,01	-0,14	-0,0000872	205,94	-0,13	-0,0000805	209,99	-0,14	-0,000087
<b>332,99</b>	<b>110880</b>	210,99	-0,02	-0,0000125	205,91	-0,03	-0,0000186	209,97	-0,02	-0,000012
<b>335,14</b>	<b>112320</b>	210,98	-0,01	-0,0000062	205,90	-0,01	-0,0000062	209,96	-0,01	-0,000006

## Anexo L: Porosidade aberta

Argamassa	M - seco [g]	M - saturado imerso [g]	M - saturado [g]	Porosidade aberta [%]	Média da porosidade aberta [%]	Desvio padrão [%]	Coefficiente de variação
REF	59,54	34,67	66,41	21,64	22,09	0,48	0,022
	71,84	41,77	80,70	22,76			
	66,40	38,89	74,10	21,87			
ARB20	43,96	25,63	49,70	23,85	23,52	0,24	0,010
	51,26	29,84	57,82	23,45			
	68,52	39,68	77,27	23,28			
ARB50	40,83	20,37	47,02	23,23	24,72	1,06	0,043
	56,38	32,41	64,64	25,63			
	51,97	29,38	59,62	25,30			
ARB100	51,02	28,61	59,70	27,92	27,87	0,14	0,005
	63,75	35,87	74,42	27,68			
	60,06	33,91	70,23	28,00			
ARM20	56,57	32,58	63,53	22,49	22,99	0,36	0,016
	66,68	38,35	75,30	23,33			
	69,70	39,93	78,67	23,15			
ARBM50	53,01	29,92	61,24	26,28	26,04	0,17	0,006
	56,27	31,84	64,82	25,92			
	61,57	34,82	70,93	25,92			
ARM100	49,82	27,66	59,71	30,86	31,02	0,14	0,004
	56,14	31,24	67,43	31,20			
	49,18	27,57	58,89	31,00			

M: massa.

## Anexo M: Variação dimensional

Idade [dias]	REF_1				REF_2				REF_3				Média
	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	$\epsilon$ [%]
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	-0,001	479,03	7,119	-0,024	-0,003	480,09	6,877	-0,022	-0,003	-0,002
6	475,87	6,906	-0,025	-0,004	473,99	7,103	-0,040	-0,006	476,36	6,873	-0,026	-0,004	-0,004
7	474,83	6,874	-0,057	-0,008	473,69	7,037	-0,106	-0,015	476,04	6,856	-0,043	-0,006	-0,010
10	474,03	6,848	-0,083	-0,012	472,42	7,030	-0,113	-0,016	474,52	6,855	-0,044	-0,006	-0,011
14	473,64	6,833	-0,098	-0,014	472,18	7,024	-0,119	-0,017	474,05	6,846	-0,053	-0,008	-0,013
21	474,24	6,831	-0,100	-0,014	472,89	7,027	-0,116	-0,016	474,65	6,849	-0,050	-0,007	-0,013
28	474,70	6,823	-0,108	-0,016	473,31	7,028	-0,115	-0,016	475,12	6,857	-0,042	-0,006	-0,013
35	474,88	6,830	-0,101	-0,015	473,61	7,035	-0,108	-0,015	475,42	6,840	-0,059	-0,009	-0,013
41	475,29	6,839	-0,092	-0,013	473,75	7,041	-0,102	-0,014	475,83	6,840	-0,059	-0,009	-0,012
50	475,51	6,841	-0,090	-0,013	474,14	7,043	-0,100	-0,014	476,04	6,842	-0,057	-0,008	-0,012
56	475,65	6,847	-0,084	-0,012	474,29	7,034	-0,109	-0,015	476,22	6,847	-0,052	-0,008	-0,012
70	476,05	6,835	-0,096	-0,014	474,65	7,030	-0,113	-0,016	476,55	6,849	-0,050	-0,007	-0,012
80	476,24	6,841	-0,090	-0,013	474,82	7,034	-0,109	-0,015	476,79	6,842	-0,057	-0,008	-0,012
90	476,32	6,836	-0,095	-0,014	474,83	7,040	-0,103	-0,014	476,89	6,837	-0,062	-0,009	-0,012

Idade [dias]	ARB100_1				ARB100_2				ARB100_3				Média
	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Variação [mm]	$\epsilon$ [%]	$\epsilon$ [%]
2	441,55	7,327	0,000	0,000	444,44	7,830	0,000	0,000	449,21	6,874	0,00	0,000	0,000
3	431,69	7,304	-0,023	-0,003	429,87	7,807	-0,023	-0,003	429,28	6,854	-0,02	-0,003	-0,003
6	429,31	7,270	-0,057	-0,008	427,70	7,780	-0,050	-0,006	428,18	6,792	-0,08	-0,012	-0,009
7	427,05	7,241	-0,086	-0,012	425,79	7,754	-0,076	-0,010	426,99	6,775	-0,10	-0,014	-0,012
10	424,07	7,211	-0,116	-0,016	423,10	7,720	-0,110	-0,014	425,01	6,750	-0,12	-0,018	-0,016
14	420,99	7,172	-0,155	-0,021	420,04	7,684	-0,146	-0,019	422,95	6,722	-0,15	-0,022	-0,021
21	420,74	7,147	-0,180	-0,025	419,77	7,675	-0,155	-0,020	422,93	6,714	-0,16	-0,023	-0,023
28	420,66	7,124	-0,203	-0,028	419,70	7,669	-0,161	-0,021	422,89	6,706	-0,17	-0,024	-0,024
35	420,73	7,111	-0,216	-0,029	419,64	7,672	-0,158	-0,020	422,80	6,718	-0,16	-0,023	-0,024
41	420,51	7,081	-0,246	-0,034	419,45	7,676	-0,154	-0,020	422,72	6,725	-0,15	-0,022	-0,025
50	420,32	7,076	-0,251	-0,034	419,26	7,700	-0,130	-0,017	422,63	6,748	-0,13	-0,018	-0,023
56	420,30	7,084	-0,243	-0,033	419,21	7,694	-0,136	-0,017	422,64	6,742	-0,13	-0,019	-0,023
70	420,27	7,088	-0,239	-0,033	419,20	7,685	-0,145	-0,019	422,60	6,721	-0,15	-0,022	-0,024
80	420,26	7,086	-0,241	-0,033	419,22	7,689	-0,141	-0,018	422,57	6,724	-0,15	-0,022	-0,024
90	420,25	7,081	-0,246	-0,034	419,19	7,687	-0,143	-0,018	422,53	6,726	-0,15	-0,022	-0,024

Idade [dias]	ARM20_1				ARM20_2				ARM20_3				Média
	Massa [g]	Leitura [mm]	Varição [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Varição [mm]	$\epsilon$ [%]	Massa [g]	Leitura [mm]	Varição [mm]	$\epsilon$ [%]	$\epsilon$ [%]
<b>2</b>	466,30	6,170	0,000	0,000	468,66	6,650	0,000	0,000	462,02	6,854	0,000	0,000	0,000
<b>3</b>	454,53	6,145	-0,025	-0,004	458,37	6,632	-0,018	-0,003	458,03	6,846	-0,008	-0,001	-0,003
<b>6</b>	452,81	6,126	-0,044	-0,007	456,55	6,605	-0,045	-0,007	456,44	6,828	-0,026	-0,004	-0,006
<b>7</b>	451,98	6,119	-0,051	-0,008	454,95	6,577	-0,073	-0,011	454,40	6,812	-0,042	-0,006	-0,008
<b>10</b>	451,13	6,107	-0,063	-0,010	453,70	6,562	-0,088	-0,013	453,36	6,798	-0,056	-0,008	-0,011
<b>14</b>	450,67	6,098	-0,072	-0,012	453,21	6,550	-0,100	-0,015	452,87	6,790	-0,064	-0,009	-0,012
<b>21</b>	451,32	6,096	-0,074	-0,012	453,86	6,552	-0,098	-0,015	453,55	6,811	-0,043	-0,006	-0,011
<b>28</b>	451,75	6,100	-0,070	-0,011	454,31	6,561	-0,089	-0,013	454,03	6,789	-0,065	-0,009	-0,011
<b>35</b>	451,81	6,117	-0,053	-0,009	454,53	6,570	-0,080	-0,012	454,29	6,815	-0,039	-0,006	-0,009
<b>41</b>	452,01	6,132	-0,038	-0,006	454,80	6,598	-0,052	-0,008	454,70	6,822	-0,032	-0,005	-0,006
<b>50</b>	452,20	6,097	-0,073	-0,012	454,99	6,567	-0,083	-0,012	454,85	6,817	-0,037	-0,005	-0,010
<b>56</b>	452,41	6,116	-0,054	-0,009	455,00	6,569	-0,081	-0,012	454,87	6,816	-0,038	-0,006	-0,009
<b>70</b>	452,43	6,113	-0,057	-0,009	454,94	6,565	-0,085	-0,013	454,92	6,812	-0,042	-0,006	-0,009
<b>80</b>	452,39	6,111	-0,059	-0,010	454,96	6,562	-0,088	-0,013	454,96	6,810	-0,044	-0,006	-0,010
<b>90</b>	452,37	6,105	-0,065	-0,011	454,89	6,564	-0,086	-0,013	454,96	6,811	-0,043	-0,006	-0,010

## Anexo N: Permeabilidade ao vapor de água

Tempo [dias]	REF					ARB100					ARM20				
	1		2		Média	1		2		Média	1		2		Média
	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	$\Delta M$ [g/dia]	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	$\Delta M$ [g/dia]	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	Massa [g]	$\Delta M$ [g/dia]	$\Delta M$ [g/dia]
0	2458,02	0,00	2462,13	0,00	0,00	2409,12	0,00	2415,31	0,00	0,00	2448,87	0,00	2497,00	0,00	0,00
1	2455,97	2,05	2460,26	1,87	1,96	2407,75	1,37	2413,38	1,93	1,65	2447,49	1,38	2494,96	2,04	1,71
2	2453,89	2,08	2458,13	2,13	2,11	2406,01	1,74	2411,30	2,08	1,91	2445,91	1,58	2492,90	2,06	1,82
3	2451,92	1,97	2456,01	2,12	2,04	2404,00	2,01	2409,13	2,17	2,09	2444,21	1,70	2490,85	2,05	1,88
4	2449,95	1,97	2453,97	2,04	2,01	2401,68	2,32	2406,86	2,27	2,30	2441,63	2,58	2489,02	1,83	2,20
7	2444,15	5,80	2447,87	6,10	5,95	2392,93	8,75	2398,19	8,67	8,71	2433,47	8,16	2481,96	7,06	7,61
8	2442,11	2,04	2445,83	2,04	2,04	2390,69	2,24	2395,98	2,21	2,22	2431,60	1,87	2479,95	2,01	1,94
9	2439,90	2,21	2443,71	2,12	2,16	2387,58	3,11	2392,21	3,77	3,44	2428,81	2,79	2476,29	3,66	3,22
10	2437,91	1,99	2441,56	2,15	2,07	2384,28	3,30	2388,81	3,40	3,35	2426,32	2,49	2472,52	3,78	3,13
11	2435,52	2,39	2439,50	2,06	2,22	2380,98	3,30	2385,41	3,40	3,35	2423,83	2,49	2468,74	3,78	3,13
14	2428,83	6,69	2433,32	6,18	6,43	2369,71	11,27	2375,57	9,84	10,55	2415,71	8,12	2456,90	11,84	9,98
15	2426,55	2,28	2431,14	2,18	2,23	2365,96	3,75	2372,50	3,07	3,41	2412,30	3,41	2452,95	3,95	3,68
16	2424,26	2,29	2428,93	2,21	2,25	2362,03	3,93	2369,42	3,08	3,50	2408,97	3,33	2449,39	3,56	3,45

	t [mm]	$\Delta M$ [g/dia]	Fluxo de v.a. [kg/s.10 <sup>-9</sup> ]	Pva [ng/m.s.Pa]	Pva média[ng/m.s.Pa]	Desvio-padrão [ng/m.s.Pa]	Desvio-padrão [m]
REF	19,71	2,10	24,282	18,13	17,95	0,18	0,21
	19,62	2,07	23,912	17,77			
ARB100	19,80	2,94	34,064	25,55	25,38	0,17	0,15
	20,05	2,87	33,196	25,21			
ARM20	19,72	2,49	28,863	21,56	23,94	2,38	0,16
	20,18	2,98	34,440	26,33			

t: espessura média do provete; v.a.: vapor de água; PVA: permeabilidade ao vapor de água.

## Anexo O: Aderência ao suporte

Argamassa	Força de arrancamento [N]	Força de arrancamento corrigida [N]	Tensão de aderência [MPa]	Tipo de rotura	Tensão média [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coefficiente de variação
REF	750	748	0,38	A/B	0,54	0,11	0,20
	1350	1346	0,69	A/B			
	1250	1246	0,63	A/B			
	1000	997	0,51	A/B			
	1000	997	0,51	A			
ARB100	1600	1595	0,81	A/B	0,90	0,11	0,12
	2000	1994	1,02	A/B			
	2000	1994	1,02	A/B			
	1800	1795	0,91	A/B			
	1500	1496	0,76	A/B			
ARM20	900	897	0,46	A/B	0,48	0,07	0,16
	1000	997	0,51	A/B			
	800	798	0,41	A/B			
	800	798	0,41	B			
	1200	1197	0,61	B			

## Anexo P: Permeabilidade à água sob pressão

	Aos 28 dias					Média 48 horas [ml/cm <sup>2</sup> ]	Desvio- -padrão [ml/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de variação	Após envelhecimento acelerado					Média 48 horas [ml/cm <sup>2</sup> ]	Desvio- -padrão [ml/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de variação
	Água absorvida sob pressão [ml/cm <sup>2</sup> ]								Água absorvida sob pressão [ml/cm <sup>2</sup> ]							
<b>Argamassa</b>	1 h	2 h	6 h	24 h	48 h				1 h	2 h	6 h	24 h	48 h			
<b>REF</b>	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
	0,36	0,36	0,54	0,90	1,98				0,54	0,72	0,00	0,00	3,07			
<b>ARB100</b>	0,18	0,54	1,26	3,07	3,97	3,79	0,18	0,05	0,18	0,45	1,44	3,25	5,05	4,60	0,45	0,10
	0,36	0,72	1,62	2,71	3,61				0,36	0,72	1,35	2,89	4,15			
<b>ARM20</b>	0,54	0,72	1,53	0,00	3,43	3,52	0,09	0,03	0,54	0,90	1,62	0,00	4,33	4,15	0,18	0,04
	0,72	0,90	1,62	0,00	3,61				0,36	0,72	1,26	0,00	3,97			