



2013

Desenvolvimento de Argamassa Ecológica com Propriedades Térmicas

Cristiana Silva Bonifácio



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Desenvolvimento de Argamassa Ecológica com Propriedades Térmicas

Cristiana Bonifácio

Leiria, Novembro de 2013



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Desenvolvimento de Argamassa Ecológica com Propriedades Térmicas

Cristiana Bonifácio

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Nelson Oliveira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Novembro de 2013

Agradecimentos

A realização desta tese de mestrado, a fim de concluir o Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, apenas foi possível devido ao empenho e dedicação de um conjunto de intervenientes, aos quais quero felicitar e agradecer:

Quero agradecer ao Professor Doutor Nelson Oliveira, do Departamento de Engenharia do Ambiente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, por todo o apoio, rigor e disponibilidade, que tornaram possível a realização do presente trabalho.

Ao Professor Doutor Florindo Gaspar do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, pelas suas sugestões e conhecimento, contribuindo para uma melhor caracterização da argamassa em estudo.

Quero transmitir um sincero agradecimento ao Professor Doutor Nuno Biga do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção - ITeCons, pela sua persistência, dedicação e profissionalismo, que permitiram que conseguisse alcançar os objetivos a que me tinha proposto.

A Eng.^a Gina Matias do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITeCons, pelo acompanhamento e disponibilidade na realização dos ensaios.

Ao Diretor Geral, Michael Franco, da LENA Argamassas, pela motivação e disponibilização de tempo e meios que tornaram possível a realização da maioria dos ensaios no laboratório de controlo de qualidade e I&D da empresa.

Ao Nélio Ribeiro pela inspiração e apoio incondicional.

Aos meus pais e irmã pela compreensão, amor e carinho com que me acompanharam ao longo deste percurso.

A todos, muito obrigado!

Resumo

O principal objetivo da presente dissertação consiste em fornecer um contributo para alcançar uma construção mais sustentável. Deste modo, pretendeu-se desenvolver uma argamassa de revestimento com incorporação de resíduos resultantes da serragem da madeira e que, simultaneamente, permita melhorar a sua capacidade de isolamento térmico.

Foram realizadas várias amostras de argamassa com diferentes percentagens de incorporação de resíduo, e uma amostra Padrão (sem resíduo), tendo-se avaliado as suas propriedades quer no estado fresco quer no estado endurecido. Os ensaios realizados às amostras no estado fresco foram: determinação do teor de ar, massa volúmica e consumo (rendimento da argamassa, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{cm})$), concluindo-se que a incorporação deste resíduo aumenta o teor de ar e, conseqüentemente, reduz a massa volúmica e consumo, comparativamente à amostra Padrão.

No que diz respeito aos ensaios realizados às amostras no estado endurecido: determinação das resistências mecânicas (resistência a flexão e compressão), massa volúmica, aderência ao suporte e módulo de elasticidade dinâmico, constatou-se uma redução destes parâmetros para as amostras com resíduo em relação à amostra Padrão. Em relação aos ensaios de absorção de água por capilaridade, higroscopicidade, permeabilidade ao vapor de água, porosidade e retração, verificou-se que a adição de resíduo incrementa estes valores. A resistência aos ciclos de gelo-degelo foi também avaliada, apresentando as amostras com resíduo um excelente comportamento.

O principal ensaio realizado, a determinação da condutibilidade térmica, confirma o aumento da capacidade de isolamento térmico das argamassas que incluem na sua formulação este tipo de resíduo, tendo-se conseguido verificar a tese proposta por esta dissertação. Identificou-se como formulação ótima a amostra C que incorpora 20% do resíduo de madeira.

Palavras-chave: argamassa, resíduo de madeira, isolamento térmico, sustentabilidade.

Abstract

The main purpose of this work is to provide a contribution to achieve a more sustainable construction. Thus, we tried to develop a coating mortar with the incorporation of sawdust that, simultaneously, enables to improve its thermal insulation capacity.

There were several samples of mortar prepared with different incorporation percentages of sawdust and a standard sample (without sawdust), being its properties evaluated both in the fresh and the hardened state. The tests performed on the fresh state mortar were the following: air content, density and consumption (mortar yield, kg/m^2). It was concluded that the sawdust incorporation increases the air content and, consequently, it reduces the density and the consumption, when compared to the standard sample.

With regard to the tests performed on the hardened state, namely mechanical strength (flexural and compressive strength), density, adhesion to the substrate and elasticity modulus, it was found a reduction in these parameters in the samples with sawdust in relation to the standard sample. As far as the tests of water absorption by capillary action, hygroscopicity, water vapor permeability, porosity and shrinkage were concerned, it was found that the addition of sawdust increases these values. These samples were also exposed to freeze-thaw cycles, presenting an excellent performance.

The most important performed test was the thermal conductivity test. Its result confirms the increase of the thermal insulation capacity of the mortars that have included in their formulation this type of sawdust. Therefore, the initial purpose of the work has been achieved. The sample C, which incorporates 20% of sawdust, was identified as an optimal formulation.

Key-Words: mortar, sawdust, thermal insulation, sustainability.

Índice de Figuras

Figura 1 – Pilares do desenvolvimento sustentável.....	4
Figura 2 - Zonas climáticas de Inverno	9
Figura 3 – Isolamento Térmico pelo exterior	10
Figura 4 - Isolamento Térmico aplicado na caixa-de-ar.....	11
Figura 5 – Comportamento mecânico das argamassas com vários tipos de ligantes	16
Figura 6 – Ductilidade das argamassas com vários tipos de ligantes.....	17
Figura 7 – Transmissão de calor em paredes. (1) – Condução (2) – Convecção (3) – Radiação	19
Figura 8 – a) Porosidade aberta; b) Porosidade fechada	22
Figura 9 – Aparelho ultrassom.	24
Figura 10 - a) Transmissão direta; b) transmissão semi-direta; c) transmissão indireta	25
Figura 11 - Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa	26
Figura 12 – Higroscopicidade (Freitas, 2008).....	27
Figura 13 - Tipo de resíduos de madeira. a) Resíduo da serragem; b) Cepilho / Maravalha; c) Aparas de madeira.	29
Figura 14 – Granulado de cortiça.	34
Figura 15 – Titulador Karl Fischer.....	38
Figura 16 – Montagem dos peneiros: a) coluna de peneiros; b) distribuição do resíduo após peneiração.....	40
Figura 17 – Determinação da baridade do resíduo de madeira.	41
Figura 18 – Mesa de espalhamento e molde cónico.....	42

Figura 19 - Mistura mecânica da argamassa com água.....	43
Figura 20 – Realização do ensaio de espalhamento da argamassa.	43
Figura 21 – Realização do ensaio para determinação do teor de ar segundo método do álcool.	44
Figura 22 – Ensaio para determinação do consumo da argamassa.	46
Figura 23 – Realização dos provetes para ensaio de flexão e compressão.	47
Figura 24 - a) Ensaio de resistência à flexão; b) ensaio de resistência à compressão.....	48
Figura 25 – Estufa a 105°C para secagem dos provetes.....	49
Figura 26 – Áreas de teste circulares para ensaio de aderência ao suporte.....	50
Figura 27 – Tração das áreas de teste.....	51
Figura 28 - Selagem dos provetes com parafina para ensaio de absorção de água.....	52
Figura 29 – Provetes imersos em água.....	52
Figura 30 – Molde para realização de provete para ensaio de permeabilidade ao vapor....	53
Figura 31 – Colocação de provetes em copos circulares contendo solução de KNO ₃	54
Figura 32 – Provetes vedados com plasticina.	54
Figura 33 – Provetes para análise de porosidade aparente. a) Provetes imersos em água; b) Remoção de excesso de água; c) Pesagem dos provetes.....	56
Figura 34 – Esquema de montagem do equipamento para determinação da massa hidrostática dos provetes.....	56
Figura 35 – Molde para ensaio de retração.	57
Figura 36 – Medição da retração dos provetes.....	58
Figura 37 - a) Medição do tempo de propagação na barra de referência b) medição do tempo de propagação num provete de teste.	59
Figura 38 – Termohigrômetro.....	61
Figura 39 – Preparação da solução salina.	61

Figura 40 – Solubilidade dos sais em água, em função da temperatura.....	61
Figura 41 – Ensaio de higroscopicidade: a) provetes para ensaio de higroscopicidade; b) provetes dentro de exsiccador.	62
Figura 42 – Alguns dos provetes utilizados para ensaio.	63
Figura 43 – a) Secagem dos provetes em estufa a 105°C; b) Pesagem dos provetes; c) Pesagem dos provetes com envelope plástico.	63
Figura 44 – Esquema do aparelho de placa quente protegida λ -Meter EP500e	64
Figura 45 – Realização de ensaio de condutibilidade térmica no equipamento λ -Meter EP500e.....	65
Figura 46 – Representação gráfica da % de passado em função da malha do peneiro.	70
Figura 47 – Resultados do teor de ar para as amostras de ensaio.....	73
Figura 48 - Resultados da resistência à flexão, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.	75
Figura 49 - Resultados da resistência à compressão, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.....	75
Figura 50 - Resultados da ductilidade, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.	77
Figura 51 – Resultados da aderência ao suporte para as amostras de ensaio.	79
Figura 52 – Resultados de absorção de água para as amostras de ensaio.	80
Figura 53 – Relação entre velocidade de onda e módulo de elasticidade dinâmico para os valores do Manual Pundit.....	86
Figura 54 - Relação entre velocidade de onda e módulo de elasticidade dinâmico para as amostras de ensaio.....	86
Figura 55 – Valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, para as amostras de ensaio.....	87
Figura 56 - Curvas higroscópicas para as amostras Padrão, A, B e C.....	89
Figura 57 - Curvas higroscópicas para as amostras Padrão, D, E e F.....	89

Figura 58 – Curvas higroscópicas de adsorção da madeira	90
Figura 59 – Provetes das amostras A, B e C após 15 ciclos gelo-degelo.....	93
Figura 60 – Provetes das amostras C e amostra com granulado de cortiça (identificada como amostra D).....	93
Figura 61 – Resultados da resistência à flexão das amostras após e sem ciclos gelo-degelo.	94
Figura 62 – Resultados da resistência à compressão das amostras após e sem ciclos gelo-degelo.	94
Figura 63 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra Padrão.....	113
Figura 64 – Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra A.	113
Figura 65 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra C.	114
Figura 66 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra B.	114
Figura 67 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra D.....	114
Figura 68 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra E.	115
Figura 69 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra F.	115

Índice de Quadros

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de transmissão térmica, U (W/m^2C), de referência e máximos admissíveis, para a envolvente vertical	9
Tabela 2 – Requisitos para as argamassas endurecidas de revestimento de isolamento térmico	15
Tabela 3 – Classificação da gama de resistências à compressão	16
Tabela 4 - Tipos de rutura entre a argamassa e o suporte	17
Tabela 5 - Classificação das categorias de absorção de água por capilaridade.....	18
Tabela 6 – Valores tabelados para as resistências térmicas superficiais.....	20
Tabela 7 – Valores de condutibilidade térmica de isolantes térmicos	21
Tabela 8 – Composições das amostras ensaiadas com resíduo 1 e 3.....	42
Tabela 9- Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de propagação da onda ultrassónica	60
Tabela 10 – Ambiências utilizadas no ensaio de adsorção.	61
Tabela 11 – Fases de cada ciclo de gelo-degelo.....	66
Tabela 12 – Resultados do volume de Karl Fischer gasto na titulação com água.	67
Tabela 13 – Resultados do volume de Karl Fischer gasto na titulação das amostras de resíduo e respetivos valores de humidade.....	68
Tabela 14 – Resultados da distribuição granulométrica do resíduo de madeira.	69
Tabela 15 – Resultados da baridade para o resíduo 1 e 3.	71
Tabela 16 – Resultados de espalhamento obtidos para as amostras de ensaio.	72
Tabela 17 – Resultados de massa volúmica da pasta obtidos para as amostras de ensaio..	73

Tabela 18 – Resultados de consumo obtidos para as amostras de ensaio.	74
Tabela 19 - Resultados de massa volúmica do provete obtidos para as amostras de ensaio.	78
Tabela 20 – Desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para os 5 valores de aderência obtidos para cada amostra.....	79
Tabela 21 – Resultados do tipo de rutura para as amostras de ensaio.....	80
Tabela 22 – Resultados obtidos de permeabilidade ao vapor de água para as amostras de ensaio.....	82
Tabela 23 – Apresentação dos resultados obtidos de Porosidade para as amostras de ensaio.	83
Tabela 24 – Apresentação dos resultados obtidos de retração para as amostras de ensaio.	84
Tabela 25 – Resultados obtidos para a velocidade de onda ultrassónica para as amostras de ensaio.....	85
Tabela 26 – Resultados obtidos dos teores de humidade para as amostras de ensaio.	88
Tabela 27 – Resultados obtidos de condutibilidade e resistência térmica, para as amostras de ensaio.....	91
Tabela 28 – Preço de custo/kg da argamassa da amostra C e amostra Com granulado de cortiça.....	93
Tabela 29 – Síntese das características de desempenho da amostra C, amostra padrão e amostra com granulado de cortiça.....	100

Lista de Siglas

RCCTE – Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

FP-A – Rutura na interface argamassa/substrato

FP-B – Rutura coesiva na argamassa

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

Pundit – Portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester

CV- Coeficiente de variação

HR – Humidade relativa

Índice

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE QUADROS	XIV
LISTA DE SIGLAS	XVII
ÍNDICE.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO.....	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
2.1 A CONSTRUÇÃO CIVIL E OS SEUS IMPACTES AMBIENTAIS	3
2.2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	4
2.3 CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL.....	4
3. DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS	7
3.1 REGULAMENTAÇÃO	8
3.2 ISOLAMENTO TÉRMICO	10
4. ARGAMASSAS DE REBOCO	13
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	13
4.2 CARACTERÍSTICAS NORMATIVAS DOS REBOCOS ISOLANTES	15
4.2.1 Massa Volúmica	15
4.2.2 Resistência à Compressão	16
4.2.3 Aderência ao Suporte	17
4.2.4 Absorção de Água por Capilaridade.....	18
4.2.5 Permeabilidade ao Vapor de Água	18
4.2.6 Condutibilidade Térmica (Desempenho Térmico)	18
4.2.7 Durabilidade (resistência aos ciclos gelo-degelo).....	21
4.3 OUTRAS CARACTERÍSTICAS.....	22

4.3.1 Porosidade Aparente.....	22
4.3.2 Retração	22
4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico	23
4.3.4 Higroscopicidade	25
4.4 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA EM ARGAMASSAS DE REBOCO.....	28
4.4.1 Propriedades da Madeira	28
4.4.2 Resíduos de Madeira	28
5. ESTADO DA ARTE.....	31
5.1 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA.....	31
5.1.1 Painéis de Cimento-Madeira	31
5.1.2 Betão leve	31
5.1.3 Argamassas	32
5.2 INCORPORAÇÃO DE OUTROS RESÍDUOS EM ARGAMASSAS	34
5.2.1 Resíduos de Cortiça	34
6. METODOLOGIA	37
6.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO RESÍDUO DE MADEIRA	38
6.1.1 Humidade	38
6.1.2 Granulometria	39
6.1.3 Baridade	40
6.2. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	41
6.2.1 Preparação das Argamassas.....	41
6.2.2 Consistência	42
6.2.3 Teor de Ar.....	43
6.2.4 Massa Volúmica e Consumo	45
6.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	47
6.3.1 Resistência à flexão e compressão	47
6.3.2 Massa Volúmica	49
6.3.3 Aderência ao Suporte	50
6.3.4 Absorção de Água por Capilaridade	51
6.3.5 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ).....	53
6.3.6 Porosidade Aparente.....	55

6.3.7 Retração	57
6.3.8 Módulo de Elasticidade Dinâmico	58
6.3.9 Higroscopicidade	60
6.3.10 Condutibilidade Térmica	63
6.3.10 Resistência aos ciclos gelo-degelo	66
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
7.1 PROPRIEDADES DO RESÍDUO.....	67
7.1.1 Humidade	67
7.1.2 Granulometria	69
7.1.3. Baridade	71
7.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO	71
7.2.1 Consistência	71
7.2.2 Teor de Ar	72
7.2.3 Massa Volúmica e Consumo	73
7.3. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	75
7.3.1 Resistência à flexão e compressão	75
7.3.2 Massa Volúmica	78
7.3.3 Aderência ao Suporte	78
7.3.4 Absorção de Água por Capilaridade.....	80
7.3.5 Permeabilidade ao Vapor de Água	81
7.3.6 Porosidade Aparente	83
7.3.7 Retração	84
7.3.8 Módulo de Elasticidade Dinâmico	85
7.3.9 Higroscopicidade	88
7.3.10 Condutibilidade Térmica	91
7.3.11 Resistência aos Ciclos Gelo-degelo	93
8. CONCLUSÃO.....	97
8.1 SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO	101
BIBLIOGRAFIA	103
ANEXOS	111

1. Introdução

1.1 Objetivo

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação tem como objetivo fornecer um contributo para alcançar uma construção mais sustentável, indo de encontro às necessidades atuais em termos de economia de energia e gestão de recursos.

Neste sentido, pretende-se desenvolver uma argamassa para revestimento das paredes de alvenaria dos edifícios que, para além de permitir o aproveitamento de resíduos, permita também alcançar uma melhoria nas propriedades de isolamento térmico do respetivo edificado. Com vista a minimizar o crescente consumo de recursos naturais, tem-se vindo a utilizar resíduos das mais diversas origens em diferentes setores de atividade. O setor da construção não é exceção e, neste sentido, optou-se por utilizar um resíduo da indústria madeireira, por se considerar que os principais destinos atuais deste resíduo não tiram proveito da totalidade das suas propriedades. Para além desta necessidade, a indústria da construção é também regida por um conjunto de critérios e exigências legislativas ao nível do comportamento térmico dos edifícios, o que leva ao constante desenvolvimento e procura de novas soluções com vista a alcançar, de forma otimizada, o desempenho desejado.

As argamassas de revestimento constituem um elemento importante na construção de um edifício. Para além de exercerem uma influência determinante na durabilidade das paredes, protegendo a alvenaria e a estrutura contra a ação das intempéries, fornecem também um importante contributo ao nível da impermeabilização das mesmas. Para além disso, asseguram o efeito estético da fachada.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos, correspondendo o primeiro a uma apresentação dos objetivos e da motivação que originou a presente investigação.

O segundo capítulo realiza um enquadramento do tema com as preocupações atuais ao nível da sustentabilidade na construção. O terceiro capítulo aborda as exigências ao nível do desempenho térmico dos edifícios e as soluções construtivas mais utilizadas ao nível do isolamento.

No quarto capítulo definem-se as argamassas de reboco e é efetuada uma abordagem às propriedades que as caracterizam e que contribuem para o seu desempenho final. Neste capítulo são ainda apresentadas as propriedades dos resíduos de madeira que serão incorporados nas argamassas.

O quinto capítulo faz uma abordagem ao conhecimento atual e aos estudos que foram desenvolvidos no âmbito da incorporação de resíduos de madeira em diferentes materiais construtivos, nomeadamente em argamassas. São ainda identificados outros tipos de resíduos igualmente testados em argamassas.

No sexto capítulo é apresentada a metodologia adotada para realização dos ensaios de caracterização quer do resíduo, quer da argamassa, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

No sétimo capítulo são apresentados os resultados obtidos e é realizada a respetiva interpretação e discussão. Finalmente o oitavo capítulo apresenta as principais conclusões assim como algumas sugestões para melhoria do desempenho das argamassas desenvolvidas.

2. Sustentabilidade na construção civil

2.1 A Construção Civil e os seus Impactes Ambientais

A indústria da construção constitui um dos maiores e mais ativos sectores em toda a Europa, representando 25% de toda a sua produção industrial, sendo o maior exportador, com participação de 52% no mercado (Torgal & Jalali, 2011).

De entre os vários setores de atividade da nossa sociedade, o setor da construção tem grande responsabilidade no que respeita ao impacte ambiental negativo que lhe está adjacente. Dos vários impactes que lhe estão associados, salientam-se: a produção de resíduos, o consumo de energia, emissões de CO₂ e consumo de recursos naturais (Portal da Construção Sustentável, 2013). De entre os recursos naturais destacam-se os agregados (pedra, areias, britas e argilas) que são obtidos através da exploração de pedreiras e areeiros em terra e no mar, a madeira e a água (Mateus, 2012).

Segundo a Agenda 21 (programa global que envolve 118 países e que visa promover a regeneração ambiental e o desenvolvimento social) só durante a fase de construção, são consumidos cerca de 50% dos recursos naturais extraídos da natureza, produzidos mais de 50% de resíduos, consumida mais de 40% de energia (nos países industrializados, sendo em Portugal cerca de 20% da energia total do país) e produzidas cerca de 30% das emissões de CO₂. As emissões de CO₂ derivam da produção, transporte e uso de materiais, contribuindo assim para o efeito de estufa (Portal da Construção Sustentável, 2013).

O crescimento previsível da população mundial (em 2030 é esperado um aumento de mais de 2000 milhões de pessoas) e as necessidades em termos de construção de edifícios e outras infraestruturas, fará aumentar ainda mais o consumo de matérias-primas não-renováveis, bem como a produção de resíduos (Torgal & Jalali, 2011).

Portanto, o recurso a técnicas e materiais de construção mais sustentáveis representa uma importante contribuição para a eco-eficiência da indústria da construção e, conseqüentemente, para um desenvolvimento mais sustentável.

2.2 Desenvolvimento Sustentável

O conceito “desenvolvimento sustentável” foi definido por Brundtland (1987) como o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”. Traduz-se, basicamente, pela procura de um equilíbrio entre os níveis de desenvolvimento e a quantidade existente de recursos naturais, de modo a que o desenvolvimento ocorra num nível em que não prejudique quer o ambiente quer as gerações futuras (Mateus, 2004).

Para além da proteção do ambiente, o conceito “desenvolvimento sustentável” implica também um envolvimento da componente económica e social (Figura 1). Inclui preocupações com a qualidade de vida das pessoas e, não só a nível do crescimento económico, mas também ao nível da igualdade e justiça entre pessoas e gerações. Inclui também responsabilidade social das empresas, preocupações com problemáticas sociais, sanitárias e éticas do bem-estar humano (Mateus, 2004).



Figura 1 – Pilares do desenvolvimento sustentável (Gaede, 2008).

Em suma, com o desenvolvimento sustentável pretende-se alcançar um equilíbrio ao nível das diferenças sociais, através da justiça social, ao nível económico, através da eficiência económica e ao nível ecológico, através da prudência ecológica (Mateus, 2004).

2.3 Construção Sustentável

Construção sustentável é a adoção de materiais e produtos em edifícios de construção, que exigem menos uso de recursos naturais e aumentam a reutilização de tais materiais e produtos para a mesma ou semelhante finalidade, reduzindo assim os resíduos (Building and Construction Authority, 2007).

No âmbito de uma construção mais sustentável a União Europeia estabeleceu recentemente como objetivos de médio prazo a redução de 50% dos consumos de energia, a redução de 30% das matérias-primas, a redução de 40% dos resíduos, a utilização de materiais de

construção 100% recicláveis e o aproveitamento integral dos resíduos de construção/demolição. Até 2050 estabeleceu como metas, a construção de edifícios novos sem emissões de CO₂ e a reconversão do parque edificado até 2005, com redução de 50% de consumo de energia e 75% das emissões de CO₂ (Torgal & Jalali, 2010).

A sustentabilidade da indústria da construção em geral e, a ecoeficiência dos materiais de construção, assumem desta forma um papel primordial. São exemplos de materiais ecoeficientes, materiais ligantes de baixas emissões de carbono, materiais com maior durabilidade, que permitam o reaproveitamento de resíduos, materiais recicláveis ou obtidos a partir de fontes renováveis, materiais com baixa energia ou não tóxicos e que não contaminem o ar interior das habitações (Torgal & Jalali, 2010).

3. Desempenho Energético dos Edifícios

Devido ao elevado crescimento dos consumos energéticos nos edifícios, e correspondentes custos e emissões de gases para atmosfera com efeito de estufa, têm tornado a eficiência energética dos edifícios um tema cada vez mais relevante no âmbito do desenvolvimento sustentável.

Tem-se assistido, nas últimas décadas, a um crescente desenvolvimento da sociedade o que se tem traduzido na melhoria dos níveis de conforto dos edifícios, conduzindo a um aumento dos consumos energéticos e, conseqüentemente, a custos económicos e impactes ambientais superiores. O consumo energético, no sector dos edifícios tem sido o que mais tem crescido representando, a nível nacional, 30% do total da energia consumida no país, o que equivale a cerca de 4,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano (Eficiência energética de Edifícios, 2012).

Felizmente, nos últimos anos, têm sido definidas novas estratégias (ao nível do projeto de construção) e desenvolvidos novos materiais que permitem reduzir as necessidades energéticas dos edifícios sem comprometer as condições de conforto, obtendo-se assim novos edifícios mais eficientes (Eficiência energética de Edifícios, 2012).

Ao nível dos materiais, a energia consumida para a climatização de um edifício vai depender de dois fatores: inércia térmica e isolamento térmico. Designa-se de inércia térmica, a capacidade que um edifício tem em amortecer as ações térmicas exteriores e interiores, proporcionando uma menor variação da temperatura interior. A inércia térmica é função da massa térmica do edifício, ou seja, do calor armazenado e, como tal, a variação de temperatura provocada, quer pela acumulação, quer pela libertação de energia, será menor para uma massa de corpo maior (Silva P. C., 2006). Quando o conjunto dos materiais (betão, tijolo e reboco), que constituem a inércia térmica do edifício, se encontram bem aplicados, conferem ao espaço interior uma maior estabilidade térmica e consecutivamente um maior conforto (Mateus, 2012).

O isolamento térmico constitui o material que é colocado na envolvente das paredes de um edifício e que minimiza a transferência de calor por condução entre o interior e o exterior, reduzindo assim as necessidades de aquecimento e arrefecimento, assim como o risco de condensações (Silva P. C., 2006). São considerados isolantes térmicos, materiais com condutibilidade térmica $\lambda \leq 0,065$ W/m.°C, ou com resistência térmica $R > 0,3$ m².°C/W. A condutibilidade térmica é uma propriedade térmica típica de um material homogêneo que é igual à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e de área unitárias desse material, por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces. A resistência térmica de um material traduz a dificuldade de transmissão de calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material e a sua condutibilidade térmica (Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril, 2006).

A combinação entre a inércia térmica e o isolamento térmico torna-se assim necessária, de forma a aumentar o desempenho térmico do edifício.

3.1 Regulamentação

Os Estados-Membros têm vindo a promover um conjunto de medidas com vista a promover a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios. É, neste contexto que surge a Diretiva nº 2002/91/CE de 16 de dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Esta diretiva foi transposta em 2006 para a ordem jurídica nacional através de um pacote legislativo composto por três Decretos-Lei (Mateus, 2012):

- O Decreto-Lei nº 78/2006 de 4 de abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE);
- O Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE);
- O Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este regulamento constitui uma melhoria do Decreto-lei nº40/90 aprovado 6 de fevereiro de 1990, havendo alterações ao nível das exigências, de modo a promover uma maior eficiência energética.

O principal objetivo deste novo RCCTE é garantir condições de conforto térmico no interior dos edifícios aos ocupantes sem dispêndio excessivo de energia, minimizando os efeitos patológicos provocados pela ocorrência de condensações superficiais ou internas nos elementos construtivos (Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril, 2006). Este regulamento impõe, inclusivamente, limites aos consumos energéticos para climatização e produção de águas quentes e, neste sentido, surgiu a necessidade de melhorar o isolamento da envolvente exterior do edifício (paredes, coberturas e pavimentos), nomeadamente aumentando as suas espessuras. Na Tabela 1 são apresentados os novos valores de coeficientes de transmissão térmica, U , para as paredes, em função das zonas climáticas (Figura 2) e do tipo de envolvente.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de transmissão térmica, U ($W/m^2\text{°C}$), de referência e máximos admissíveis, para a envolvente vertical (Dow, 2006).

	Zona climática					
	I1		I2		I3	
	Uref.	Umáx	Uref.	Umáx	Uref.	Umáx
Elementos exteriores em zona corrente	0,70	1,80	0,60	1,60	0,50	1,45
Elementos interiores em zona corrente	1,40	2,00	1,20	2,00	1,00	1,90

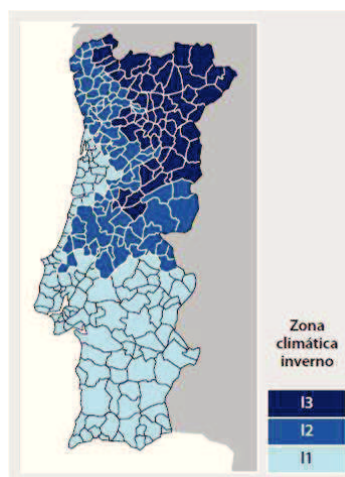


Figura 2 - Zonas climáticas de Inverno (Dow, 2006).

Estas novas exigências constituem um incentivo ao sector construtivo, no desenvolvimento de produtos que cumpram os requisitos ao nível do desempenho térmico e que simultaneamente constituam uma solução sustentável. É nesta perspetiva que se enquadra a argamassa de reboco desenvolvida na presente dissertação, em que se incorporam resíduos de madeira.

3.2 Isolamento Térmico

Define-se de isolamento térmico o material ou combinação de materiais, que têm como objetivo minimizar as perdas ou ganhos de calor indesejáveis. Os materiais de isolamento térmico mais amplamente utilizados são fibras inorgânicas (lã de vidro e lã de rocha) e materiais orgânicos espumosos (poliuretano e poliestireno expandido e extrudido). Todos os outros restantes materiais utilizados cobrem os restantes 10% do mercado (maioritariamente lã de madeira) (Dikmen, 2011).

Existem vários sistemas de isolamento disponíveis, que tiram partido dos diferentes tipos de materiais. Atualmente, o isolamento das paredes é implementado com três sistemas diferentes, de acordo com a localização do material de isolamento térmico:

- Isolamento térmico aplicado pelo exterior (paredes simples) (Figura 3), que tem como principais vantagens: eliminação das pontes térmicas, devido à obtenção de camada contínua de isolamento térmico. Entenda-se por pontes térmicas, zonas que quando não são isoladas termicamente apresentam uma resistência térmica inferior à da restante envolvente, representando uma descontinuidade onde se poderá verificar a ocorrência de

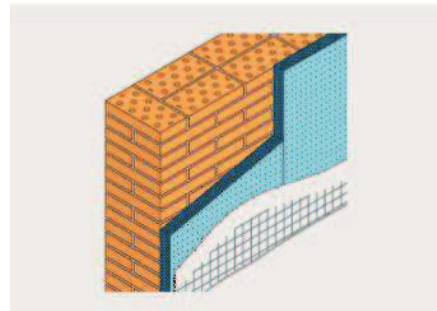


Figura 3 – Isolamento Térmico pelo exterior (Dow, 2006).

patologias. Exemplos destas zonas são os elementos estruturais (topos de laje, vigas e pilares) e vãos (p.e. caixas de estore). Para além da vantagem associada às pontes térmicas, este sistema permite um aumento da inércia térmica do edifício e o facto de se manter a parede exterior isolada, esta fica menos sujeita a variações de temperatura (Dow, 2006).

- Isolamento térmico aplicado pelo interior (parede simples). As principais desvantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo interior são a presença de pontes térmicas e a diferença de temperatura nas paredes do invólucro que não estão protegidas contra o ambiente exterior, o que pode originar uma deterioração mais rápida da alvenaria. Para além disso, este sistema tem também associados problemas de condensação de vapor de água na superfície do isolamento térmico. Este tipo de isolamento é usado em particular para o isolamento térmico dos edifícios já existentes, nos quais se torna difícil outro tipo de intervenção. Em comparação com o isolamento térmico pelo exterior, este sistema tem como

vantagens o facto de ser uma técnica de aplicação mais simples e de apresentar um custo inferior (Dikmen, 2011).

- Isolamento térmico aplicado na caixa-de-ar (paredes duplas) (Figura 4). O isolamento térmico, aplicado na caixa-de-ar, apresenta igualmente problemas tanto ao nível das pontes térmicas como da condensação do vapor de água. Em termos de inércia térmica, representa uma situação intermédia entre uma parede isolada pelo exterior (em que os elementos constituintes da parede contribuem na sua totalidade para a inércia térmica) e uma parede isolada pelo interior (em que apenas o revestimento de acabamento contribuirá).

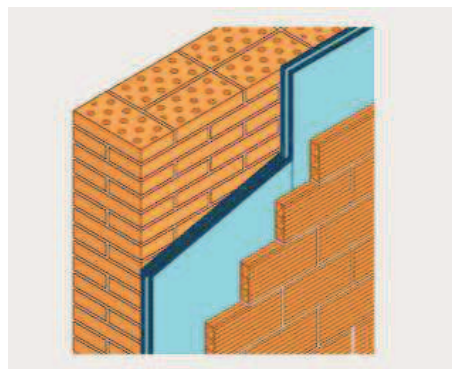


Figura 4 - Isolamento Térmico aplicado na caixa-de-ar (Dow, 2006).

Para além disso, uma vez introduzido na caixa-de-ar, o isolamento fica praticamente inacessível e, qualquer problema que ocorra no próprio material, torna-se difícil de detetar e qualquer intervenção que seja necessária torna-se dispendiosa (Dow, 2006).

O sistema de isolamento térmico aplicado pelo exterior é, sem dúvida, o sistema que melhor isola termicamente um edifício. Contudo, este sistema, apresenta também algumas desvantagens nomeadamente o facto de constituir uma solução com um custo inicial elevado e de exigir mão-de-obra especializada (APFAC, 2008). É necessário que todos os procedimentos de aplicação sejam executados corretamente, caso contrário poderão daí advir graves patologias.

A argamassa térmica desenvolvida, com incorporação de resíduos de madeira, visa a sua aplicação pelo exterior e tem como objetivo ser uma solução mais económica e que a sua aplicação não coloque em risco a eficiência térmica do sistema. Classifica-se como um reboco isolante, uma vez que incorpora grânulos dum isolante térmico, leves e de reduzida dimensão, obtendo-se argamassas em que a sua massa volúmica deve ser inferior a 600 kg/m³ (Veiga & Malanho, 2012). A incorporação destes agregados tem como objetivo reduzir a condutibilidade térmica do reboco isolante em relação às argamassas de rebocos tradicionais (Paiva et al., 2006).

Estes rebocos especiais são aplicados com espessuras superiores às dos rebocos tradicionais no entanto, a condutibilidade térmica destes rebocos não é comparável com a dos materiais

de isolamento térmico propriamente ditos. Os rebocos isolantes constituem um complemento ao isolamento térmico de um edifício, não dispensando na maioria dos casos a adoção de outras medidas em simultâneo (Paiva et al., 2006).

4. Argamassas de Reboco

4.1 Características Gerais

Define-se argamassa de reboco como uma mistura de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados e eventualmente aditivos e/ou adjuvantes, usada para revestimento interior ou exterior (NP EN 998-1, 2010).

Os ligantes inorgânicos correspondem aos seguintes ligantes minerais: cimento Portland, cimento de alto teor em alumina, cimentos especiais, cal hidráulica, cal hidratada, gesso e anidrite. De entre os agregados utilizados para a composição das argamassas podem distinguir-se: areias siliciosas, calcário, dolomita, mármore, cargas leves e fillers especiais.

Nos aditivos estão incluídos: éteres de celulose, pigmentos, agentes anti-espuma, agentes de incorporação de ar, agentes de retardamento, aceleradores, agentes espessantes, agentes hidrofóbicos, agentes de plastificação e superplastificantes (Bayer & Lutz, 2003).

O ligante tem como função aglomerar os agregados e outras partículas em conjunto e promover a adesão ao substrato. Devido às suas características físicas ou químicas de reação, os ligantes determinam a resistência final da argamassa. Os ligantes podem ainda ser classificados como hidráulicos e não-hidráulicos (ou aéreos). Os ligantes hidráulicos reagem em contacto com a água, durante o processo de mistura, como é o caso dos cimentos e cal hidráulica. Os ligantes aéreos reagem apenas ao ar, através do contacto com o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, como é o caso da cal hidratada, gesso e anidrite (Bayer & Lutz, 2003).

Os agregados são materiais em forma de grãos, geralmente inertes, sem tamanho e forma definidos e têm como objetivo conferir à argamassa resistência mecânica, resistência ao desgaste e ao intemperismo, contribuem para reduzir as variações volumétricas e o custo (Araújo, 2012). A utilização de agregados adicionais permite obter argamassas com características especiais, nomeadamente a utilização de agregados como a perlite, vermiculite, “foamglass[®]” (vidro celular), argila expandida e pedra-pome, permite obter

argamassas com uma redução na sua densidade e um aumento da capacidade de isolamento (Bayer & Lutz, 2003).

Os aditivos podem ser de origem orgânica ou inorgânica, muitas vezes de origem polimérica e as suas percentagens de incorporação variam, tipicamente, entre 0,1 a 10%. A incorporação de aditivos confere às argamassas determinadas propriedades que sem eles seriam impossíveis de alcançar. Estes podem ser utilizados para melhorar a mistura da argamassa em pó com água, para melhorar as propriedades da argamassa em pasta tais como, comportamento reológico ou a trabalhabilidade assim como as propriedades da argamassa endurecida, incluindo o comportamento de secagem (Bayer & Lutz, 2003).

Os éteres de celulose são os aditivos de maior importância na formulação de uma argamassa, apesar da sua baixa percentagem de incorporação (normalmente entre 0,0,2 – 0,07%). São utilizados como agentes de espessamento e retentores de água. Os éteres de celulose maioritariamente utilizados em argamassas são metil-hidroxietilcelulose (MHEC) e metil-hidroxipropilcelulose (MHPC). Juntos, representam 90% do mercado das argamassas. Outros éteres de celulose, tecnicamente relevantes, mas com pequena participação no mercado, são as etil-hidroxietilceluloses (EHEC) e hidroxietilceluloses (HEC).

É ainda de salientar os agentes hidrofóbicos, que são aditivos particularmente importantes na formulação de argamassas de reboco exterior. Estes aditivos evitam a penetração da água através da argamassa sem contudo comprometer a difusão do vapor de água. O desempenho destes agentes hidrofóbicos pode ser avaliado através do ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo a EN 1015-18. Existem disponíveis no mercado dois grupos de agentes hidrofóbicos: sais metálicos de ácidos gordos (ex.: estearato de zinco, estearato de cálcio ou oleato de sódio) e polímeros redispersáveis em pó com propriedades hidrofóbicas. Os do primeiro grupo são os mais comumente utilizados e têm a vantagem de permitir a incorporação de baixas percentagens (0,1 – 1%). Os do segundo grupo têm a vantagem de apresentar uma durabilidade significativamente superior, uma vez que estes não são removidos da argamassa por ação da chuva, mesmo após anos (Bayer & Lutz, 2003).

4.2 Características Normativas dos Rebocos Isolantes

Em termos normativos, os rebocos isolantes enquadram-se na atual norma NP EN 998-1 onde têm a designação de argamassas de revestimento de isolamento térmico. A Tabela 2 apresenta os requisitos que esta norma exige para este tipo de argamassa.

Tabela 2 – Requisitos para as argamassas endurecidas de revestimento de isolamento térmico (NP EN 998-1, 2010).

Característica	Classes	Exigência NP EN 998-1
Massa Volúmica (kg/m³)	-	Valor médio declarado
Resistência à compressão (categorias)	CSI a CSIV	CSI a CSIV
Aderência ao suporte (N/mm² e padrão de rutura (FP) A, B ou C)	-	≥ Valor declarado e padrão de rutura (FP)
Absorção de água por capilaridade (categorias)	W0, W1 e W2	W1
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ)	-	≤ 15
Condutibilidade Térmica (W/(m.K))	T1, T2	T1 ≤ 0,10 T2 ≤ 0,20
Reação ao fogo (classes)	A a F	Classe declarada
Durabilidade	-	Durabilidade declarada

Foram avaliados todos estes requisitos, constantes da Tabela 2, à exceção da reação ao fogo.

4.2.1 Massa Volúmica

A massa volúmica, que traduz a quantidade de argamassa contida por unidade de volume, é uma característica que deve ser avaliada, e torna-se particularmente importante quantificá-la quando se pretendem aplicar espessuras de argamassa mais espessas. Segundo Veiga & Malanho (2012), estas argamassas térmicas devem apresentar massas volúmicas inferiores a 600 kg/m³.

4.2.2 Resistência à Compressão

O ensaio da resistência à compressão permite aferir acerca das resistências mecânicas das argamassas, que se traduz através da força máxima exercida por unidade de área. Consoante as resistências alcançadas, a argamassa poderá inserir-se desde a categoria de resistência mais baixa - CS-I, à categoria mais alta - CS-IV, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação da gama de resistências à compressão (NP EN 998-1, 2010).

	Categorias	Valores (N/mm ²)
Gama de resistências à compressão após 28 dias	CS I	0,4 a 2,5
	CS II	1,5 a 5,0
	CS III	3,5 a 7,5
	CS IV	≥6

Estas resistências mecânicas das argamassas são avaliadas após 28 dias, que é considerado o tempo de cura total do(s) ligante(s). O maior incremento das resistências mecânicas verifica-se durante este período de tempo, no entanto, após os 28 dias verifica-se ainda um acréscimo mas de forma mais atenuada (Figura 5).

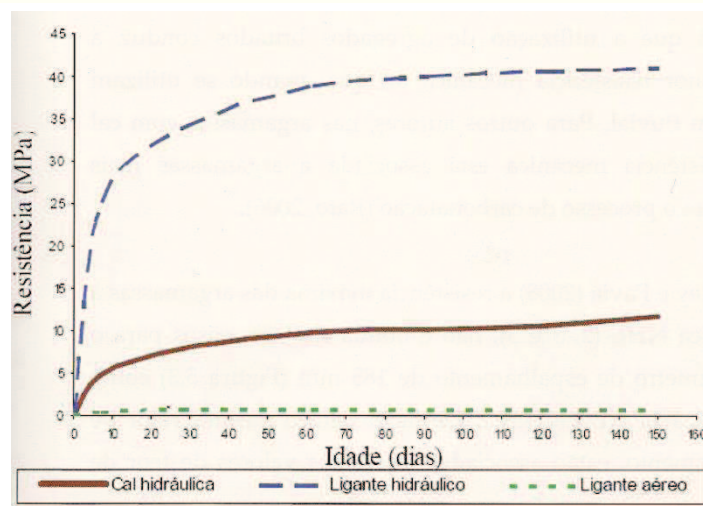


Figura 5 – Comportamento mecânico das argamassas com vários tipos de ligantes (Coelho *et al.*, 2009).

Para além da resistência à compressão, as resistências mecânicas são também avaliadas através da resistência à flexão. Do quociente entre a resistência à flexão e a resistência à compressão, resulta a ductilidade da argamassa. A ductilidade indica a capacidade da

argamassa se deformar consoante as solicitações mecânicas a que está sujeita. Consoante o tipo de ligante utilizado, uma argamassa poderá ser mais ou menos dúctil (Figura 6).

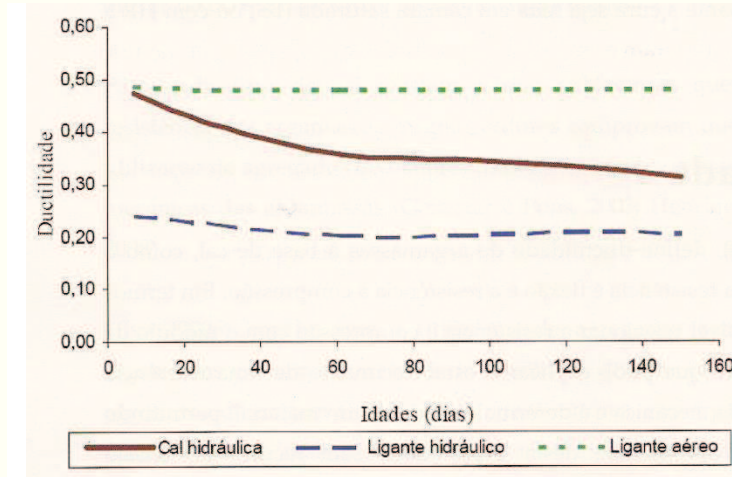


Figura 6 – Ductilidade das argamassas com vários tipos de ligantes (Coelho *et al.*, 2009).

4.2.3 Aderência ao Suporte

A aderência ao suporte é avaliada não só em termos quantitativos (força exercida por unidade de área), mas também em termos qualitativos, avaliação do tipo de rutura entre a argamassa e o suporte. As três classificações possíveis para o tipo de rutura encontram-se representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de rutura entre a argamassa e o suporte (EN 1015-12, 2000).

		<p>Rutura Adesiva (FP-A) – Rutura na interface, entre a argamassa e o substrato.</p>
		<p>Rutura Coesiva (FP-B) – Rutura ocorre pela argamassa.</p>
		<p>Rutura Coesiva (FP-C) – Rutura no material do substrato.</p>

4.2.4 Absorção de Água por Capilaridade

Outro parâmetro de estudo foi a absorção de água por capilaridade, que pretende avaliar a humidade que é proveniente da ascensão capilar através de fundações e paredes. A capilaridade ocorre quando um material poroso é posto em contato com água em fase líquida, sendo tanto maior quanto mais poroso for o material (Freitas, 2008). Existem diferentes categorias, dependendo do teor de água absorvido (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação das categorias de absorção de água por capilaridade (NP EN 998-1, 2010).

	Categorias	Valores (kg/(m².min^{0,5}))
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não especificado
	W 1	$C \leq 0,40$
	W 2	$C \leq 0,20$

4.2.5 Permeabilidade ao Vapor de Água

A permeabilidade ao vapor de água, representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete de material, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as suas faces (Freitas, 2008). Este parâmetro, que permite avaliar a capacidade de uma argamassa resistir à passagem do vapor de água é traduzido pelo valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor, μ . Esta propriedade, adimensional, é inversamente proporcional à permeabilidade ao vapor de água e, deste modo, um μ elevado significa alta resistência à transmissão do vapor.

4.2.6 Condutibilidade Térmica (Desempenho Térmico)

A determinação da condutibilidade térmica é a propriedade que ganha maior ênfase quando se pretende avaliar o desempenho térmico de uma argamassa. Seguidamente será efetuada uma breve abordagem ao processo de transferência de calor e aos conceitos envolvidos.

A envolvente de um edifício deve ser concebida de forma a minimizar as perdas de energia para o exterior sob a forma de calor. Sempre que se estabelece uma diferença de temperaturas entre dois elementos, ocorre uma transferência de energia, no sentido da temperatura mais elevada para a mais baixa.

Admitem-se três processos distintos de transmissão de calor, que podem ocorrer em simultâneo: condução; convecção e radiação. A condução é a forma típica de transmissão de calor nos corpos sólidos, que ocorre em virtude da diferença de temperatura entre dois pontos do corpo. A convecção é a forma corrente de transmissão de calor no interior de um fluido, ou entre este e uma superfície sólida, e que ocorre devido ao movimento do fluido. A radiação corresponde à quantidade de energia emitida por um corpo, função da sua temperatura absoluta e do estado da sua superfície (Sousa & Silva, 2000).

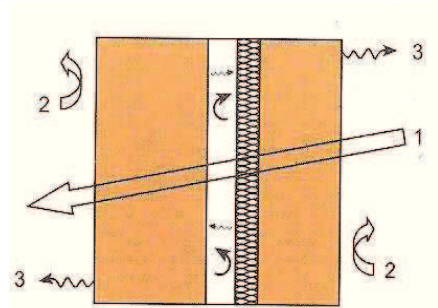


Figura 7 – Transmissão de calor em paredes. (1) – Condução (2) – Convecção (3) – Radiação (Sousa & Silva, 2000).

As transferências térmicas através de uma superfície, independentemente do processo, exprimem-se através do coeficiente de transmissão térmica – U. Este representa o fluxo de calor que atravessa um m² da superfície para uma diferença de temperatura de 1°C entre o interior e o exterior. Quanto mais pequeno é o coeficiente U, mais reduzidas serão as perdas térmicas e conseqüentemente melhor será o isolamento térmico da superfície. Este parâmetro pode ser determinado a partir da seguinte equação (Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril, 2006):

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

R_j – resistência térmica da camada j, (m².°C/W);

R_{si}, R_{se} – resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente, (m².°C/W).

A resistência térmica, R_j , de materiais homogéneos pode ser calculada da seguinte forma (Sousa & Silva, 2000):

$$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

R_j – resistência térmica da camada homogénea j , [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$];

e_j – espessura da camada homogénea j , (m);

λ_j – coeficiente de condutibilidade térmica da camada homogénea j , [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$].

Para camadas não homogéneas (ex. alvenarias, lajes aligeiradas, espaços de ar), o valor da resistência térmica pode obter-se diretamente a partir de tabelas que constam da publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Coeficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (ITE50). Os valores de condutibilidade térmica λ_j podem ser fornecidos com base em ensaios experimentais ou então, caso sejam materiais correntes da construção, podem também ser consultados neste documento do LNEC.

A resistência térmica superficial, que traduz o efeito da convecção e da radiação, obtém-se a partir de valores tabelados, em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor (Tabela 6) (Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril, 2006).

Tabela 6 – Valores tabelados para as resistências térmicas superficiais.

Sentido do fluxo de calor	Exterior	Interior
	R_{se}	R_{si}
Horizontal	0,04	0,13
Vertical		
Ascendente	0,04	0,10
Descendente	0,04	0,17

Seguidamente são apresentados os valores de condutibilidade térmica para os isolamentos mais vulgarmente conhecidos e utilizados (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores de condutibilidade térmica de isolantes térmicos (Santos, 2006).

Isolante Térmico	Massa Volúmica [kg/m³]	Coefficiente de condutibilidade térmica [W/(m.°C)]
Aglomerado de cortiça expandida (ICB)	90-140	0,045
Poliestireno expandido (EPS)	>20	0,037
Poliestireno extrudido (XPS)	25-40	0,037
Espuma de poliuretano em placas (PUR)	20-50	0,040
Lã de rocha	20-35	0,045

4.2.7 Durabilidade (resistência aos ciclos gelo-degelo)

A durabilidade das argamassas é um fator muito importante e, esta dependerá da sua capacidade em resistir a agentes de degradação que atuam sobre ela. Os ciclos de gelo-degelo são uma das principais causas de degradação das argamassas em climas frios. Estes ciclos caracterizam-se pelo congelamento da água na argamassa mediante arrefecimento, seguido do descongelamento por aquecimento. Esta fase de transição, acompanhada por variações dimensionais, pode provocar fissuração do material (Cao & Chung, 2002).

A capacidade de uma argamassa de resistir aos ciclos de gelo-degelo está dependente de vários fatores, nomeadamente:

- Resistir à penetração de água;
- Libertar rapidamente a água de forma a evitar a saturação;
- Possuir uma estrutura porosa que permita resistir à tensão provocada pelo aumento de volume quando a água cristaliza.

A utilização de agentes de incorporação de ar nas argamassas, permite que estas resistam de uma forma mais eficaz a este tipo de degradação (Botas & Rato, 2010).

A realização destes ensaios de resistência a ciclos de gelo-degelo tem, geralmente como objetivo, determinar o efeito destes ciclos nas características de desempenho das argamassas, nomeadamente nas resistências à flexão e compressão, módulos de elasticidade, variações de massas e volumes.

4.3 Outras Características

Para além destes requisitos normativos, foram também avaliadas outras características, que são a seguir apresentadas, igualmente importantes para um bom desempenho da argamassa.

4.3.1 Porosidade Aparente

A estrutura das argamassas é composta por um determinado volume de espaços vazios, volume livre, que se apresentam distribuídos na forma de poros. Os poros podem ser abertos ou fechados (Figura 8), dependendo se têm ou não têm conexão com a superfície exterior do material, respetivamente (Silva, 2012).

A soma total destes espaços vazios designa-se de porosidade, característica fundamental que afeta diversas propriedades físicas do material. Os poros fechados, completamente isolados da superfície exterior, têm influência principalmente na densidade e propriedades mecânicas e térmicas do

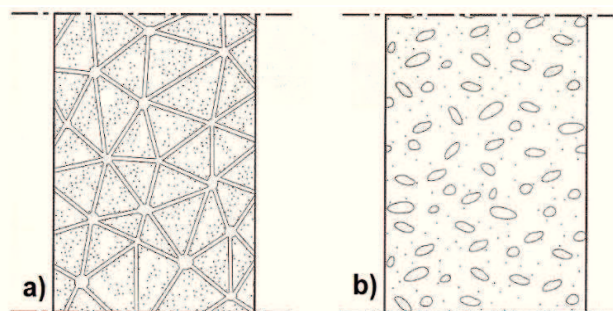


Figura 8 – a) Porosidade aberta; b) Porosidade fechada (Freitas, 2008).

material. Os poros abertos, estando em contato direto com o exterior, permitem o acesso de água e, conseqüentemente, apresentam uma relação direta com o fenómeno de deterioração (McDowall & Rockwell, 1999).

A porosidade aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra, sendo a sua medição efetuada pelo método gravimétrico (Santiago, 2009).

4.3.2 Retração

A retração é uma propriedade relacionada com a diminuição de volume de uma argamassa, quer por evaporação da água de amassadura, quer por fenómenos relacionados com a hidratação e carbonatação do ligante (cimento) (Coelho et al., 2009). O processo de hidratação do cimento contribui para a retração devido à formação de novos compostos, à

ocorrência de algumas reações químicas exotérmicas e ao consumo de água dos poros durante as reações. O processo de carbonatação também contribui para a retração das argamassas. Este ocorre quando o dióxido de carbono da atmosfera se combina com os componentes hidratados do cimento (especialmente hidróxido de cálcio) originando compostos sólidos, como o carbonato de cálcio, cujo volume total é inferior à soma dos volumes dos componentes do cimento que entraram na reação, mas cuja massa é superior (Veiga & Souza, 2004).

A retração nas argamassas conduz a patologias de fissuração, permitindo, conseqüentemente, o acesso de substâncias agressivas que podem contribuir para a sua degradação, condicionando assim a durabilidade da argamassa.

A determinação da retração pode ser feita por medição da variação das dimensões dos provetes de argamassa (retração livre) ou pela observação da existência ou não de fendilhação numa argamassa aplicada sobre determinado suporte (retração restringida) (Coelho, et al., 2009).

4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade das argamassas é o parâmetro que permite aferir acerca da sua deformabilidade e, da capacidade daquelas para acomodarem deformações do suporte.

Esta propriedade pode ser determinada através da medição da velocidade de ondas ultrassônicas através do material. A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas depende da massa volúmica e das propriedades elásticas do sólido, como é descrito pela equação (CNS Farnell):

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \times (1-2\nu)}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

V – Velocidade (Km/s);

E – Módulo de elasticidade dinâmico (MN/m²);

ρ – Massa volúmica (kg/m^3);

ν – Coeficiente de poisson.

A medição da velocidade de propagação das ondas é efetuada através de um equipamento de ultrassom, composto por uma fonte geradora de impulsos elétricos e por dois transdutores piezoelétricos de contato (transmissor e recetor) (Figura 9).

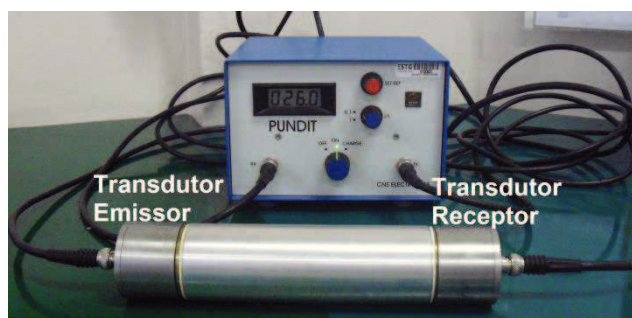


Figura 9 – Aparelho ultrassom.

Os transdutores baseiam-se na propriedade piezoelétrica do cristal de quartzo que, quando deformado elasticamente, gera uma potencial eléctrico em seus terminais.

O funcionamento geral do equipamento consiste inicialmente na emissão de impulsos eléctricos repetidos, a partir do gerador de impulsos, através do cabo de conexão para o transdutor emissor. O transdutor emissor recebe os impulsos eléctricos e transforma-os em ondas de impacto de energia mecânica, que percorrem o provete numa distância conhecida, até serem recebidas pelo transdutor recetor. Os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície do provete pois, caso isso não aconteça, a camada de ar existente introduzirá erros na medição do tempo.

O transdutor recetor converte novamente esta energia mecânica em impulsos eléctricos, os quais são detetados, por um dispositivo electrónico que cronometra o intervalo de tempo decorrido entre a emissão e a receção do impulso, que é mostrado através do mostrador digital (Nepomuceno, 1999) (Bandeira, 2009).

A transmissão dos pulsos pode ser realizada através de diferentes métodos, dependendo da forma como os transdutores se dispõem na superfície do material. A Figura 10 representa esses diferentes métodos: direto, indireto ou semidirecto (CNS Farnell).

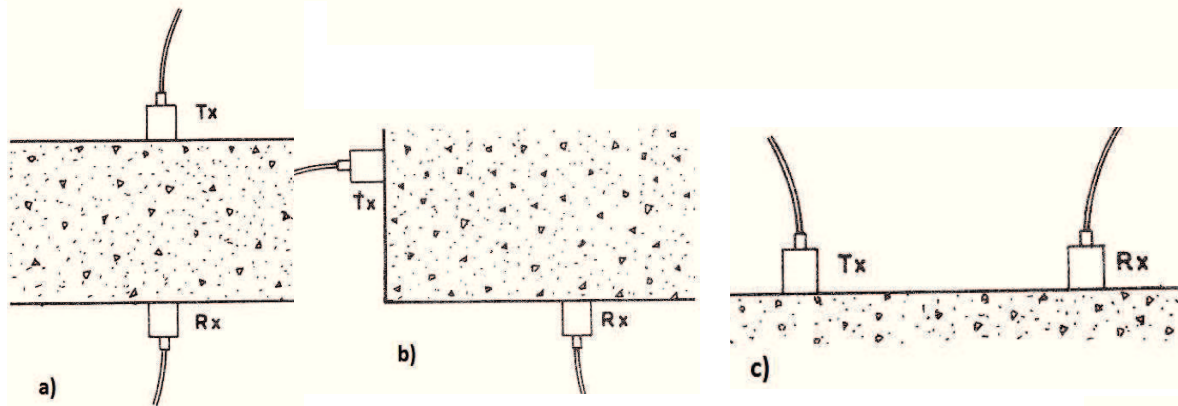


Figura 10 - a) Transmissão direta; b) transmissão semi-direta; c) transmissão indireta (CNS Farnell).

O método direto é o mais satisfatório, uma vez que, os pulsos longitudinais que saem do transmissor são propagados maioritariamente na direção normal à face do transdutor.

4.3.4 Higroscopicidade

A presença de humidade nos edifícios representa um grave problema, pois, para além de encurtar o tempo de vida útil dos materiais atingidos, representa também uma diminuição do nível de conforto e até da salubridade nos espaços afetados. Deste modo, torna-se importante avaliar o risco de aparecimento de tais manifestações de humidade.

Para além da avaliação da humidade de absorção por capilaridade, o presente trabalho aborda também a humidade relativa a fenómenos de higroscopicidade dos materiais.

A higroscopicidade traduz o comportamento higroscópico dos materiais, que é caracterizado pela capacidade de fixar moléculas de água por adsorção e de as restituir ao ambiente em que se encontra (desadsorção), em função das variações da humidade relativa do mesmo. A humidade relativa define-se como sendo o quociente entre a pressão de vapor existente e a pressão de saturação, para uma dada temperatura (Freitas, 2008).

Um material pode então ser classificado como não higroscópico, quando a sua massa se mantém praticamente constante, qualquer que seja a humidade relativa da ambiência em que

se encontra. Ou pode ser classificado como higroscópico, quando a quantidade de água fixada por adsorção é relativamente importante (Freitas, 2008). Um material higroscópico atinge a humidade de equilíbrio, após estar em contato com o meio envolvente durante um período de tempo prolongado, em condições termodinâmicas e de humidade relativa estáveis (Gonçalves, 2011).

O fenómeno é representado graficamente pela Figura 11 e é atribuído às forças intermoleculares ou de Van der Waals que atuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros (Freitas, 2008).

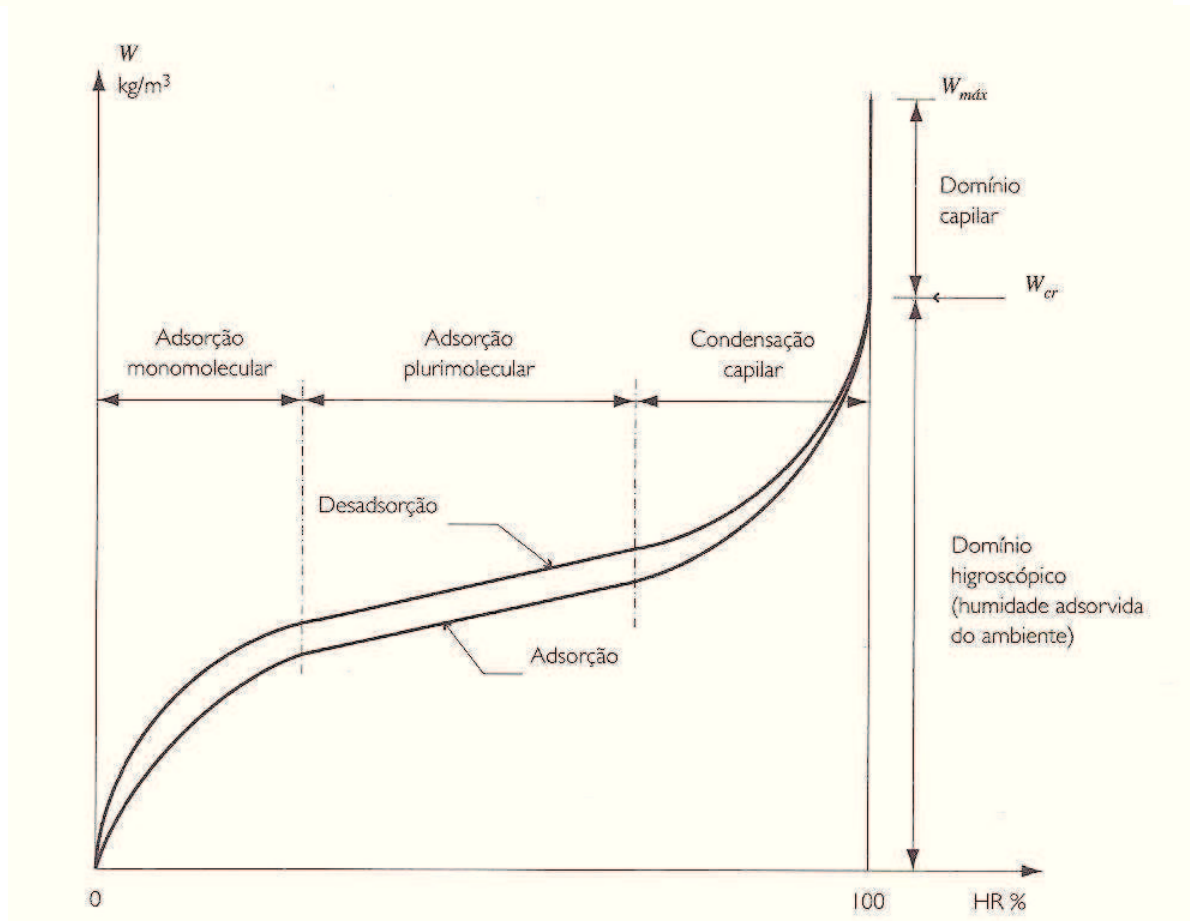


Figura 11 - Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa (Freitas, 2008).

Numa primeira etapa do processo de adsorção, identificada por adsorção monomolecular, ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros, seguindo-se a segunda etapa, adsorção plurimolecular, onde existe a deposição de várias camadas de moléculas. A terceira e última etapa identifica-se pela condensação capilar, que

ocorre quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno e há junção das camadas plurimoleculares (Figura 12) (Freitas, 2008).

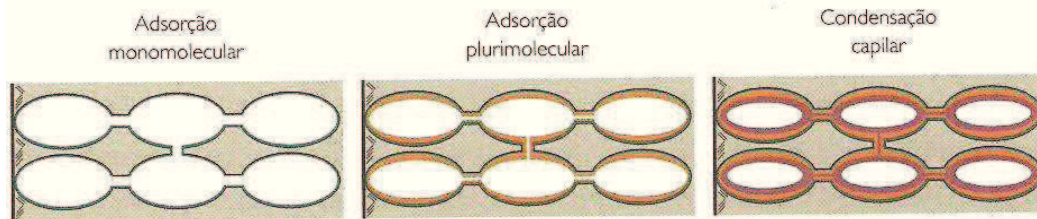


Figura 12 – Higroscopicidade (Freitas, 2008).

Conforme referido anteriormente a higroscopicidade de um material é avaliada não só pela capacidade de adsorção como também de desadsorção. Este processo de desadsorção consiste na libertação de moléculas de água do material saturado para a atmosfera em que se encontra. Este fenómeno ocorre em duas etapas: na primeira etapa ocorre a libertação das moléculas de água dos poros de maiores dimensões para a superfície do material por ação capilar e, na segunda etapa, ocorre a eliminação das moléculas dos poros de menores dimensões, por difusão superficial.

A higroscopicidade dos materiais é ainda caracterizada por um fenómeno de histerese, associado ao fato da curva de desadsorção ser superior à de adsorção, conforme representa a Figura 11. A justificação deste fenómeno ainda não se encontra bem definida, existem apenas hipóteses sendo uma delas baseada na geometria do espaço poroso. Admite-se que, na fase de adsorção são os poros de maior raio que ditam a velocidade de adsorção das moléculas ao passo que na desadsorção são os poros de menor raio, ocorrendo por isso a uma velocidade inferior.

A outra hipótese é baseada na diferença dos ângulos de contato das moléculas de água com os poros. Uma vez que na desadsorção a superfície encontra-se humidificada o ângulo de contato da gota com a superfície do poro será menor do que no caso da adsorção, tornando-se mais difícil a libertação das moléculas de água no caso da desadsorção do que na adsorção (Gonçalves, 2011).

No entanto, um estudo realizado por Kunzel (1995) mostrou que, para a maioria dos materiais da construção, o efeito de histerese é pouco significativo e que as isotérmicas de adsorção são suficientes para caracterizar o comportamento higroscópico do material.

4.4 Incorporação de Resíduos de Madeira em Argamassas de Reboco

4.4.1 Propriedades da Madeira

A madeira é um material orgânico, sólido, de composição complexa onde predominam as fibras de celulose (40-50%) e hemicelulose (15-25%) unidas por lignina (15-30%). É usualmente classificada como madeira dura – madeira de árvores latifoliadas (carvalho) – e madeira macia – madeira de coníferas (pinho) (Coelho, 2007).

Utilizada como material de construção, a madeira apresenta inúmeras vantagens nomeadamente, o facto de ser um produto disponível a baixo custo e em grande abundância, é um material natural, de fácil obtenção e renovável. Para além disso, apresenta ótimas propriedades ao nível da resistência mecânica (tração e compressão), baixa massa específica, boa elasticidade, baixa condutividade térmica e capacidade de isolamento dielétrico (impede a passagem de corrente elétrica). Em contrapartida, a madeira no seu estado natural apresenta algumas desvantagens: é um material higroscópico (absorve e devolve a humidade do ar ambiente), combustível, suscetível à deterioração, resistência unidirecional, retratilidade (alteração dimensional, de acordo com a humidade e temperatura), material anisotrópico (as suas propriedades mecânicas dependem da disposição das fibras) e estrutura heterogénea (Joinville, 2013).

4.4.2 Resíduos de Madeira

Da indústria do processamento da madeira, resultam vários tipos de resíduos (Figura 13) que, dependendo do processo, podem ser classificados de:

- **Serradura** – resíduo proveniente da operação das serras, obtido pelas operações de corte.
- **Cepilho** (também conhecido como **maravalha**) – resíduo originado pelas plainas nas indústrias de processamento da madeira em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros, etc.
- **Lenha** – resíduo de maiores dimensões, composto por costaneiras, aparas, refilos, resíduos de topo de tora, restos de lâminas (Hillig et al., 2006).



Figura 13 - Tipo de resíduos de madeira. a) Resíduo da serragem (GetDomainVids.com, 2013); b) Cepilho / Maravalha (Alibaba.com, 2013); c) Aparas de madeira.

O presente estudo vai incidir no aproveitamento dos resíduos industriais da madeira de pinho na forma de **serradura**. Segundo a classificação europeia dos resíduos é-lhe atribuído o código LER 03 01 05 - Serradura, aparas, fitas de aplainamento, madeira, aglomerados e folheados (portaria nº209/2004).

O destino final dos resíduos sólidos do sector da madeira é maioritariamente a valorização energética e a reutilização por outros subsectores, como é o caso da indústria dos aglomerados e contraplacados, indústria agrícola, florestal avícola e pecuária (Claro, 2007).

5. Estado da Arte

Conforme referido anteriormente, os resíduos de madeira têm vindo a ser reutilizados e incorporados em vários tipos de materiais construtivos. Seguidamente será realizada uma abordagem a esses materiais, apresentando-se as respetivas vantagens e desvantagens que a inclusão deste resíduo acarreta.

5.1 Incorporação de Resíduos de Madeira

5.1.1 Painéis de Cimento-Madeira

Têm sido investigados compósitos de cimento-madeira, e fabricados industrialmente a nível mundial, principalmente sob a forma de painéis. Segundo Jorge, et al. (2004), estes compósitos de madeira-cimento apresentam elevada durabilidade contra a intempérie natural ou envelhecimento acelerado, elevada estabilidade dimensional e elevada resistência contra incêndio e biodegradação, nomeadamente contra fungos. Neste artigo é identificada uma incompatibilidade entre alguns materiais lignocelulósicos e o cimento. Esta incompatibilidade reflete-se no processo de hidratação do cimento, isto é, se o processo químico de endurecimento do cimento não é alterado, ou alterado em pequena dimensão, diz-se que a madeira e o cimento são compatíveis, se o processo for significativamente alterado, diz-se que a madeira e o cimento são incompatíveis. A origem da incompatibilidade foi atribuída ao teor e tipo de extrativos da madeira.

5.1.2 Betão leve

Outro tipo de material construtivo que tem sido investigado para incorporar madeira é o betão. Sales, et al. (2010) apresentam um estudo que incorpora o resíduo da serragem da madeira e lodo, proveniente do tratamento de águas, no betão. A utilização de agregados leves, como é o caso do resíduo da serragem da madeira, oferece várias vantagens, sobretudo relativamente às estruturas que se tornam mais leves, conduzindo a uma redução no peso dos

edifícios. Permite ainda uma melhoria em termos de isolamento térmico assim como uma resistência ao fogo superior. Foram avaliadas várias propriedades térmicas, tendo-se identificado a principal diferença na condutividade térmica, sendo no caso do betão com resíduo de madeira e lodo, 23% inferior à condutividade térmica do betão de referência.

Coatanlem, et al. (2005) utilizam as aparas da madeira para incorporação no betão. O estudo foi levado a cabo com amostras produzidas usando uma mistura de cimento, aparas de madeira e água. Dos resultados obtidos é de salientar uma diminuição das resistências mecânicas de amostras expostas, por um longo período de tempo, a condições atmosféricas ambiente e húmidas. Esta degradação é mais acentuada no caso de exposição à humidade, evidenciando-se a elevada sensibilidade da madeira em ambientes húmidos e uma limitação da utilização deste material. Contudo, o betão apresenta uma resistência e durabilidade razoáveis depois de 16 meses de exposição, independentemente do ambiente e está em conformidade com a classe III – especificação RILEM para betão leve. Neste artigo é ainda referido que a mistura de silicatos e resíduos de madeira tem-se apresentado como uma forma de melhorar a resistência contra o ataque de insetos e fungos.

Bederina, et al. (2006), apresentam um estudo sobre a condutividade térmica de betões que incorporam o resíduo cepilho. As misturas estudadas eram constituídas por cimento, areia, filler, cepilho e água. O aumento do teor em cepilho, para além de reduzir a densidade do betão, reduz a sua condutividade térmica, permitindo a sua utilização como material de isolamento. Para além desta aplicação, a inclusão deste resíduo permite a utilização do betão em estruturas com baixa capacidade de carga, no caso de o teor de madeira ser suficientemente elevado, pois constata-se novamente que com o aumento do teor de madeira as resistências mecânicas decrescem.

5.1.3 Argamassas

Ao nível das argamassas foi identificado um estudo com mais de 80 anos de existência, acerca da incorporação de resíduos da serragem de madeira. Graf & Johnson (1930) apresentam um estudo da incorporação de duas amostras distintas de resíduo de serragem em que, uma delas inclui resíduo da casca da madeira e a outra não inclui (ou inclui em quantidades vestigiais). De salientar que a incorporação do resíduo que contém casca traduz-

se num efeito retardador na presa do cimento, conduzindo a uma redução das resistências mecânicas mais acentuada, quando comparando com a argamassa com o resíduo sem casca. A adição de outros aditivos ao sistema cimento-resíduo mostrou ser vantajosa, como é o caso da adição de cal, na medida em que permite neutralizar os constituintes ácidos da madeira e prevenir o possível efeito que podem ter na hidratação do cimento. No que diz respeito à condutibilidade térmica, o resíduo de serragem constitui um bom isolante, possuindo como valor de condutibilidade térmica $\lambda=0,037 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$. Das proporções (cimento:areia:resíduo) ensaiadas, a que apresentou melhores resultados foi a de 1 parte de cimento para 2 partes de resíduo (sem areia), obtendo-se um coeficiente de condutibilidade de $\lambda=0,20 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$. Constatou-se que a areia prejudica a capacidade de isolamento da argamassa, conduzindo a valores de condutibilidade superiores.

Foi igualmente avaliada a resistência à corrosão e, submetendo argamassas com e sem resíduo, às mesmas condições de exposição, não é identificado nenhum efeito negativo devido à presença do resíduo. Aparentemente o cimento protege as partículas de resíduo da corrosão. A idade do resíduo de serragem é também um importante parâmetro a ter em consideração pois, a madeira quando exposta à humidade apodrece e, como tal, é de esperar que a incorporação de resíduo de serragem antigo possa enfraquecer a argamassa. A utilização de resíduo exposto ao tempo durante três meses não apresentou influência significativa.

Hoxha (2012) apresenta também um estudo em que é incorporado resíduo da serragem da madeira em argamassas aplicadas em técnicas construtivas ecológicas. Foram testadas várias formulações, aumentando a percentagem de resíduo de serragem e diminuindo a dosificação de cimento. Tal como seria de esperar, as resistências mecânicas são menores para maiores quantidades de resíduo incorporado. Foi igualmente avaliado o parâmetro de permeabilidade ao vapor de água, apresentando valores superiores para maiores percentagens de incorporação de resíduo, tornando-se por isso mais vantajosa. É constatada a necessidade de resolver o problema da estabilidade mecânica da argamassa, referindo que se encontram pesquisas em curso com o objetivo de obter uma argamassa otimizada do ponto de vista térmico, hidráulico e mecânico.

Da pesquisa efetuada constatou-se que a incorporação de resíduos de madeira não é propriamente um tema recente, contudo, até à data, não existe ainda nenhuma argamassa desta natureza que apresente o desempenho desejado. Neste sentido, o presente trabalho terá

como objetivo desenvolver uma argamassa de reboco com incorporação do resíduo de serragem que cumpra todos os requisitos exigidos de forma a se tornar numa realidade comercial.

5.2 Incorporação de Outros Resíduos em Argamassas

Dadas as restrições atuais em termos de consumo de recursos naturais e, com vista à obtenção de produtos sustentáveis, com reduzidos impactes para o ambiente, têm sido desenvolvidos vários estudos com incorporação dos mais variadíssimos tipos de resíduos. A seguir é efetuada uma breve apresentação de alguns desses estudos e respetivos resultados.

5.2.1 Resíduos de Cortiça

Uma realidade comercializada atualmente é a incorporação de resíduos de cortiça nas argamassas (Figura 14). A cortiça é um material celular, leve e natural extraído da casca do sobreiro apresentando propriedades bastante interessantes nomeadamente: baixa densidade, baixa condutividade térmica, boa absorção sonora e resistência à água. A cortiça tem variadíssimas aplicações, sendo que, existe uma fração significativa de desperdício da indústria da cortiça sob a forma de granulados (Panesar, 2012). Karade (2010) refere que estes granulados incorporados em argamassas, para além de reduzirem consideravelmente a densidade do produto, apresentam uma boa ligação com a pasta de cimento. A argamassa final apresenta bom desempenho, tanto a nível higrotérmico, como a nível térmico e acústico. Os resultados indicam que os grânulos de 2-3 mm são os mais compatíveis com o cimento, contudo originam produtos com resistências à compressão inferiores. O pó de cortiça, isto é, grânulos <0,2 mm originam resistências moderadas, mas afetam a hidratação nos tempos iniciais.



Figura 14 – Granulado de cortiça.

5.2.2 Resíduos de Plástico

Saikia (2012) apresenta um estudo sobre a incorporação de resíduos plásticos nas argamassas. Estes resíduos plásticos, provenientes das mais diversas fontes, depois de transformados em granulados, podem incorporar as argamassas substituindo parcialmente o agregado natural que a constitui. Estas argamassas apresentam alterações nas suas propriedades, nomeadamente uma redução na densidade assim como uma redução nas propriedades mecânicas, devido à fraca ligação existente entre a superfície das partículas plásticas e a pasta de cimento. Para além disso, dependendo do tipo de plástico, da sua forma e tamanho os resultados apresentam variações, não só ao nível mecânico como também em termos de trabalhabilidade. É ainda referido que a incorporação de resíduos plásticos favorece o comportamento à permeabilidade, tornando-o mais durável face a um ataque químico agressivo, sendo, contudo, penalizador ao nível da retração.

6. Metodologia

O resíduo de madeira utilizado no presente estudo foi disponibilizado pela serração SOPROMAD, da qual foram recolhidas duas amostras. Uma amostra de resíduo “seco” (resíduo 1) e uma amostra de resíduo “húmido” (resíduo 2). O resíduo “seco” é obtido da serração da madeira previamente seca em estufas, e o resíduo dito “húmido” é obtido diretamente da madeira sem qualquer secagem prévia. Em termos de quantidades produzidas, o resíduo “seco” obtém-se em muito menor quantidade do que o resíduo húmido, constituindo cerca de 1/3 da quantidade do resíduo “húmido”. Para realização dos ensaios, utilizou-se uma terceira amostra de resíduo (resíduo 3) que corresponde ao resíduo 2 seco em estufa laboratorial a 105°C durante 24 horas.

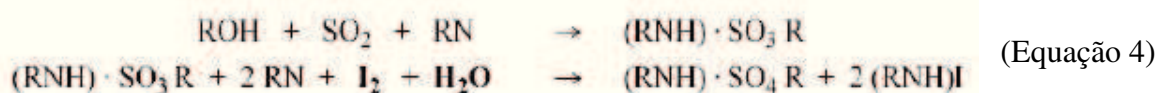
A maioria dos ensaios foram realizados no Laboratório de Controlo de Qualidade e Investigação & Desenvolvimento da empresa LENA Argamassas, à exceção dos ensaios de determinação do teor de humidade do resíduo e do módulo de elasticidade dinâmico que foram realizados no Laboratório da ESTG do Instituto Politécnico de Leiria, e dos ensaios de condutibilidade térmica e resistência aos ciclos de gelo-degelo que foram realizados no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITeCons.

Seguidamente serão apresentados todos procedimentos de ensaio realizados para a determinação das propriedades das amostras de resíduo assim como, para a determinação das características das várias argamassas estudadas, tanto no estado fresco como endurecido.

6.1 Avaliação das Propriedades do Resíduo de Madeira

6.1.1 Humidade

A humidade ou teor em água presente nas amostras de resíduo de madeira foi determinada através do método de Titulação volumétrica de Karl Fischer. Este método consiste na titulação da amostra diluída em metanol, com o reagente Karl Fischer, que é uma solução à base de iodo, dióxido de enxofre e piridina. A água reage com este reagente num processo de duas etapas, no qual uma molécula de iodo desaparece por cada molécula de água presente – Reação de Karl Fischer (Equação 4) (Guimarães, 2006).



Para este processo utilizou-se um titulador automático (Metrohm, 701 KF Titrino, 703 Ti Stand) para monitorizar a titulação com recurso a eléctrodos detetores, tal como apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Titulador Karl Fischer.

Inicialmente foi realizada a titulação com água, introduzindo-se 30,0 ($\pm 0,5$) μl de água no metanol. A titulação ocorre, com a adição automática do reagente Karl Fischer, até se observar a mudança de cor de amarelo para uma coloração parda. Neste momento, a titulação termina e regista-se o valor do volume de reagente gasto. Esta titulação inicial com água é realizada com o objetivo de determinar o título, isto é a massa de água (mg) por volume de reagente Karl Fischer (ml).

Conhecido este parâmetro, procedeu-se à titulação das amostras (resíduo 1, resíduo 2 e resíduo 3), previamente pesadas e registadas as suas massas. O procedimento foi o mesmo, aquando da titulação com água, tendo-se realizado para cada amostra o ensaio em triplicado e determinado as suas médias e incertezas padrão.

O teor de água existente em cada amostra foi determinado a partir da seguinte equação:

$$\%H_2O = \frac{m_{H_2O}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

m_{H_2O} – massa de água (g), que se obtém a partir de: $m_{H_2O} = V_{KF} \times \text{Título} \times 10^{-3}$

V_{KF} – volume de reagente Karl Fischer (ml);

Título – mg de água / mL de reagente Karl Fischer, gastos na titulação com água;

$m_{amostra}$ – massa da amostra (g).

6.1.2 Granulometria

A análise granulométrica ao resíduo de madeira foi realizada segundo a norma NP EN 933-1:2000. Este ensaio consiste basicamente, na separação por meio de um conjunto de peneiros, de um material em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente (NP EN 933-1, 2000).

Os peneiros utilizados foram os especificados na norma NP EN 933-2:1999 com as seguintes aberturas: 0,063 mm; 0,125 mm; 0,250 mm; 0,500 mm; 1 mm e 2 mm. Na coluna de peneiros (Filtro, FT-200M) estes encontram-se dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o fundo e a tampa (Figura 16).



Figura 16 – Montagem dos peneiros: a) coluna de peneiros; b) distribuição do resíduo após peneiração.

Começou-se por secar a amostra a uma temperatura de $110 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ até alcançar uma massa constante. Após arrefecimento, removeu-se o resíduo com granulometria superior a 2 mm, e registou-se a massa da amostra restante que é sujeita à peneiração. Introduziu-se o material na coluna de peneiros e após agitação mecânica da coluna procedeu-se à pesagem dos peneiros e ao respetivo registo da massa do material retido em cada deles segundo a norma NP EN 933-1, 2000.

6.1.3 Baridade

A baridade define-se como a massa volúmica aparente do material, dada pelo quociente da massa do inerte pelo volume por este ocupado. O ensaio foi realizado segundo a norma NP-955:1973 e consistiu basicamente em encher um recipiente de $1,000 (\pm 0,001)$ L com o resíduo de madeira. O resíduo foi deixado cair de um nível não superior a 5 cm da boca do recipiente, tendo efetuado o enchimento completo até extravasar. Nivelou-se a superfície do material pelo plano da boca do recipiente, tendo o cuidado de garantir o preenchimento de eventuais vazios superficiais existentes (Figura 17).

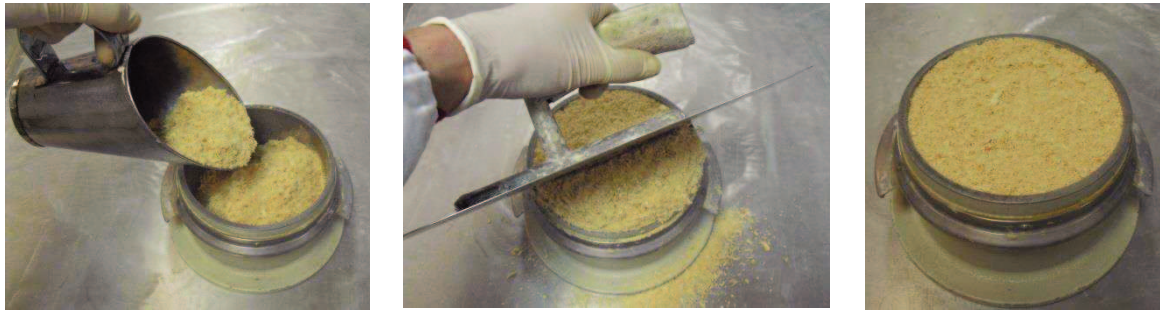


Figura 17 – Determinação da baridade do resíduo de madeira.

Posto isto, pesou-se o recipiente cheio e determinou-se a baridade (NP 955, 1973):

$$\frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

m_1 – massa do recipiente (kg);

m_2 – massa do recipiente cheio com o inerte (kg);

V – capacidade do recipiente (L).

O resultado da baridade apresenta-se arredondado às dezenas.

6.2. Avaliação das propriedades da argamassa no estado fresco

6.2.1 Preparação das Argamassas

As argamassas de reboco formuladas para realização dos ensaios são compostas pelos ligantes (cimento Portland, cal hidráulica e cal hidratada), pelo agregado (areia siliciosa) e pelos aditivos (éteres de celulose e agentes hidrofóbicos). Para cada amostra de resíduo, realizaram-se três formulações diferentes com 10%, 15% e 20% de incorporação, substituindo, em cada uma delas, a areia siliciosa.

Identificou-se como amostra Padrão, a argamassa de reboco que não incorpora qualquer percentagem de resíduo. Na Tabela 8 são apresentadas as composições em termos percentuais (em peso) das argamassas testadas.

Tabela 8 – Composições das amostras ensaiadas com *resíduo 1 e 3*.

Composição	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Ligantes	50,1%	50,1%	50,1%	50,1%	50,1%	50,1%	50,1%
Areia siliciosa	49,4%	39,4%	34,4 %	29,4%	39,4%	34,4%	29,4%
Resíduo	-	10,0% resíduo 1	15,0% resíduo 1	20,0% resíduo 1	10,0% resíduo 3	15,0% resíduo 3	20,0% resíduo 3
Aditivos	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%

6.2.2 Consistência

A consistência avalia a fluidez da argamassa no seu estado fresco e permite identificar o teor de água a incorporar na argamassa de forma a garantir uma boa trabalhabilidade (EN 1015-3, 1999). A trabalhabilidade é uma propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea.

O ensaio de consistência foi realizado segundo a EN 1015-3:1999. Para este ensaio utiliza-se uma mesa de espalhamento com um disco de 300 mm e um molde cônico truncado, conforme apresentado na Figura 18.

Começou-se por lubrificar o molde com óleo e colocou-se no centro do disco da mesa de espalhamento.



Figura 18 – Mesa de espalhamento e molde cônico.



Seguidamente efetuou-se a adição de água à argamassa e procedeu-se à sua mistura mecânica (Figura 19) por um período de 15 s, a baixa velocidade ($140 (\pm 5)$ r/min). O processo de mistura fica completo após mais 75 s à mesma velocidade.

Figura 19 - Mistura mecânica da argamassa com água.

Seguidamente a argamassa foi introduzida no molde cónico por 2 camadas, sendo cada camada compactada com pelo menos 10 “pancadas”, de forma a assegurar o preenchimento uniforme do molde. Removeu-se o excesso de argamassa e limpou-se a superfície livre do molde. Após, aproximadamente 15 s, removeu-se o molde lentamente na vertical e espalhou-se a argamassa sobre o disco, sacudindo a mesa 15 vezes a uma frequência constante de aproximadamente uma por segundo. Mediu-se o diâmetro da argamassa em duas direções perpendiculares uma à outra, usando um paquímetro. Registou-se o valor em mm e calculou-se a média (Figura 20) (EN 1015-3, 1999/A2).



Figura 20 – Realização do ensaio de espalhamento da argamassa.

6.2.3 Teor de Ar

Os poros que as argamassas apresentam no estado fresco, devem-se aos agentes introdutores de ar que estas apresentam na sua composição, assim como, ao ar que é adsorvido na

superfície das partículas. É importante avaliar esta propriedade, na medida em que influência outros parâmetros diretamente relacionados com o desempenho da argamassa (Bayer & Lutz, 2003).

A determinação do teor de ar foi realizada segundo a norma EN 1015-7:1998, que apresenta dois métodos distintos para a realização do ensaio, dependendo se o teor de ar é $<20\%$ ou $\geq 20\%$. Para as argamassas com incorporação de resíduo esperavam-se obter teores de ar superiores a 20% , tendo-se utilizado o método do álcool. Este método consiste na preparação prévia de uma mistura com 60% em volume de álcool etílico e 40% em volume de água.

Encheu-se uma proveta de 500 ml de capacidade com cerca de 200 ml de argamassa em pasta com recurso a um funil, tendo o cuidado de evitar a formação de vazios na argamassa. Nivelou-se a superfície da argamassa e registou-se o volume, $V_{m,i}$, aproximado à unidade de ml. Verteu-se a mistura de álcool e água, cuidadosamente, para a proveta até perfazer os 500 ml. Selou-se a proveta com uma rolha e inverteu-se 20 vezes para a dispersão completa da argamassa na mistura álcool-água. Deixou-se a mistura repousar durante 5 min e registou-se o nível da superfície resultante, $V_{m,f}$, aproximado à unidade de ml. Repetiu-se este procedimento até que duas leituras consecutivas não difiram mais de 1 ml (Figura 21).

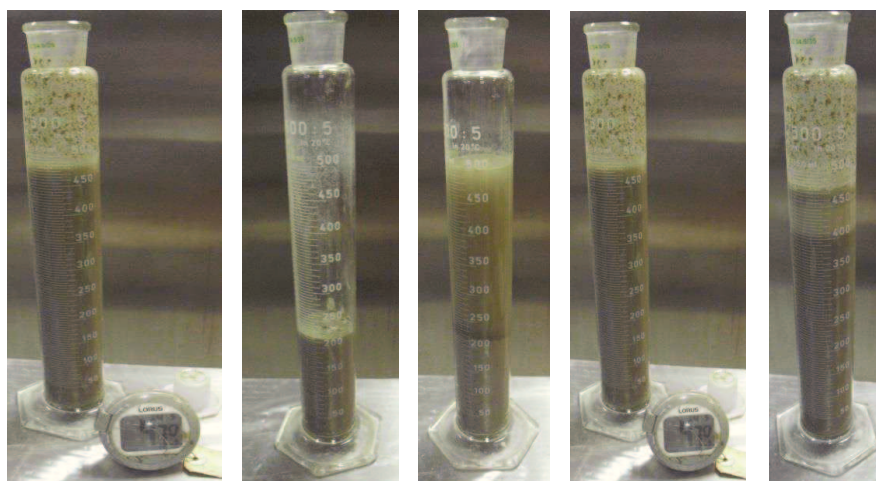


Figura 21 – Realização do ensaio para determinação do teor de ar segundo método do álcool.

O cálculo do teor de ar, de cada amostra, é aproximado à décima de percentagem (0,1%) e é realizado segundo a seguinte fórmula:

$$L = \frac{(500 - V_{m,f})}{V_{m,i}} \times 100\% \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

L – Teor de ar da argamassa (%);

$V_{m,i}$ – Volume inicial da argamassa, em ml;

$V_{m,f}$ – Volume final da argamassa, com a mistura álcool-água, em ml.

Calcula-se a média de duas medições, aproximadas a 0,5%. Se os dois valores individuais se afastarem do seu valor médio menos de 10%, usar o valor médio como sendo o valor do teor de ar da argamassa. Se os dois valores individuais se afastarem do seu valor médio mais de 10%, repetir o teste usando mais argamassa (EN 1015-7, 1998).

6.2.4 Massa Volúmica e Consumo

A rentabilidade de uma argamassa é um parâmetro decisivo no momento da escolha do produto a utilizar. É desejável uma argamassa com elevado rendimento, isto é, que o consumo de argamassa por m^2 seja o menor possível. Para se alcançar esse objetivo são requeridas argamassas leves, com baixos valores de massa volúmica.

Para determinação da massa volúmica da pasta foi seguido o procedimento segundo a norma EN 1015-6:1998. Esta normativa distingue o tipo de procedimento em função do espalhamento da argamassa. Assim, considerando os valores de espalhamento obtidos, na ordem dos 140/145 mm, seguiu-se o procedimento de enchimento e compactação através do método de vibração.

Consistiu basicamente em encher um recipiente de 1,000 ($\pm 0,001$) L com a argamassa em pasta, até que esta ultrapassasse ligeiramente o seu nível. Seguidamente, este recipiente foi colocado numa mesa vibratória até que nenhuma sedimentação adicional fosse observada. Durante a vibração foi adicionada mais argamassa até que esta ultrapassasse novamente o nível do recipiente. Utilizando uma espátula removeu-se o excesso, deixando a superfície da argamassa plana e nivelada com o topo superior do recipiente. Posteriormente, procedeu-se à sua pesagem e à determinação da respetiva massa volúmica (Equação 8).

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

ρ_m – massa volúmica da argamassa em pasta, (kg/m³);

m_1 – massa do recipiente vazio (g);

m_2 – massa do recipiente cheio com argamassa (g);

V_v – volume do recipiente (L).

Realizaram-se duas repetições e calculou-se a média destes valores arredondados a 10 kg/m³ (EN 1015-6, 1998/A1).

Procedeu-se também à determinação do consumo da argamassa, isto é, a quantidade de argamassa necessária (em kg) para revestir uma área de 1 m², com uma espessura de argamassa de 1 cm (Figura 22). O ensaio consiste basicamente em determinar a massa da argamassa em pasta necessária para encher um tabuleiro de dimensões (24,8 × 24,8 × 1,0) cm.

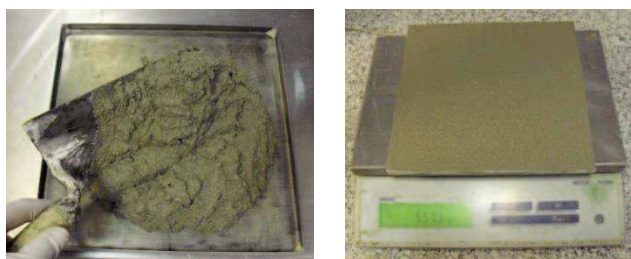


Figura 22 – Ensaio para determinação do consumo da argamassa.

Conhecendo a massa em pasta, determina-se o consumo da argamassa através da seguinte equação:

$$\text{Consumo} = \frac{m_{\text{pasta}} \times (1 - H_2O_{\text{amassadura}})}{A_{\text{tabuleiro}}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

Consumo – consumo da argamassa, (kg/(m².cm));

$$m_{\text{pasta}} = m_{\text{tabuleiro+argamassa}} - m_{\text{tabuleiro vazio}}, \text{ (kg)};$$

$$H_2O_{\text{amassadura}} = \% \text{ água de amassadura} \times 10^{-2};$$

$$A_{\text{tabuleiro}} - \text{área do tabuleiro, (0,061504 m}^2\text{)}.$$

6.3. Avaliação das propriedades da argamassa no estado endurecido

6.3.1 Resistência à flexão e compressão

Para realização deste ensaio recorreu-se à norma de ensaio EN 1015-11:2006. Começou-se por preparar os provetes de argamassa em moldes prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm. Os moldes são cheios em duas camadas aproximadamente iguais, cada camada é compactada com 25 pancadas do calcador. Posto isto, é retirado o excesso de argamassa com uma espátula, deixando a superfície plana e ao nível do topo do molde.

Posteriormente, o molde é colocado durante 2 dias dentro de um saco de polietileno fechado, garantindo assim uma humidade relativa 95 (± 5) % (Figura 23).

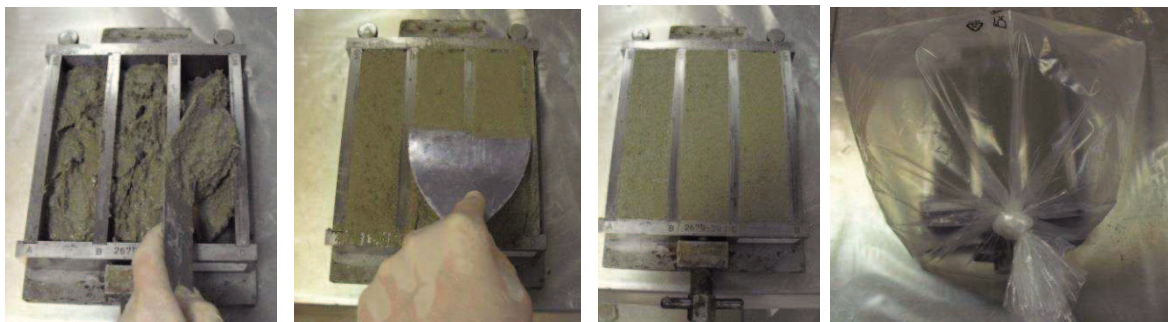


Figura 23 – Realização dos provetes para ensaio de flexão e compressão.

Passados 2 dias, os provetes são removidos do molde e imersos em água durante 5 dias. Passado este tempo são colocados numa câmara climatizada, com humidade relativa 65 (± 5) % e temperatura 20 (± 2) °C. Os provetes ficam armazenados nestas condições por mais 21 dias (para ensaio após 28 dias de cura) e mais 83 dias (para ensaio após 90 dias de cura).

O ensaio de resistência à flexão e o de resistência à compressão realiza-se na mesma máquina de ensaios (Proeti S.A., HM-S/CPC) sendo apenas necessário trocar os acessórios (Figura 24).

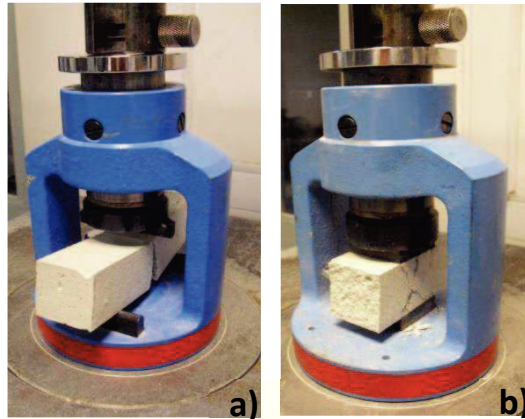


Figura 24 - a) Ensaio de resistência à flexão; b) ensaio de resistência à compressão.

Inicia-se pelo ensaio de resistência à flexão, no qual é aplicada uma carga a uma velocidade uniforme compreendida de 10 N/s a 50 N/s, até a rutura ocorrer. Posto isto, é registada a carga máxima aplicada, em N, e calculada a resistência à flexão, f , segundo a seguinte equação:

$$f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

F – carga máxima aplicada no provete (N);

l – distância entre os apoios do acessório (mm);

b – comprimento do provete (mm);

d – lado da seção quadrada do provete (mm).

Calcula-se a resistência à flexão para cada provete aproximando o valor a 0,05 N/mm². A média deve ser calculada aproximada a 0,1 N/mm².

De cada provete ensaiado à flexão, obtêm-se dois meios prismas que são utilizados para o ensaio de resistência à compressão. Neste ensaio é aplicada uma carga que aumenta continuamente a uma velocidade compreendida de 50 N/s a 500 N/s, até a rutura ocorrer.

Após registo da carga máxima aplicada, procede-se ao cálculo da resistência à compressão, c , segundo a (Equação 11).

$$c = \frac{F}{d^2} \quad (\text{Equação 11})$$

Tal como anteriormente, os valores da resistência à compressão de cada provete devem ser aproximados a 0,05 N/mm² e a média a 0,1 N/mm².

6.3.2 Massa Volúmica

O procedimento para determinação da massa volúmica do provete no estado endurecido foi realizado segundo EN 1015-10:1999. Cada amostra é constituída por 3 provetes, que são preparados e armazenados segundo a EN 1015-11, conforme referido anteriormente. Após os 28 dias, os provetes são colocados na estufa à temperatura de 105 (±5) °C até alcançarem massa constante (Figura 25).



Figura 25 – Estufa a 105°C para secagem dos provetes.

Considera-se que o provete atinge massa constante quando após 2 pesagens consecutivas, com 2 h de intervalo, não difiram entre si mais de 0,2 %. Regista-se a massa do provete seco, em kg, e calcula-se a massa volúmica segundo a seguinte fórmula de cálculo (EN 1015-10, 1999/A1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

ρ – massa volúmica, em kg/m³

m – massa do provete, em kg

V – volume do provete (256×10^{-6} m³)

6.3.3 Aderência ao Suporte

O ensaio de aderência ao suporte foi efetuado segundo a norma EN 1015-12:2000, tendo-se utilizado como suporte o tijolo cerâmico. A primeira etapa consiste na aplicação da argamassa fresca sobre o tijolo, aplicando-se uma camada com cerca de 10 (± 1) mm de espessura. Posto isto, procede-se ao acondicionamento das amostras, que ocorre num saco de plástico fechado, durante 7 dias, a 20 (± 2) °C. Passados os 7 dias retiram-se os provetes dos sacos e armazenam-se na câmara de cura a uma temperatura de 20 (± 2) °C e a uma humidade relativa de 65 (± 5) %, durante mais 21 dias. Terminado o tempo de cura, retiram-se os provetes da câmara e realizam-se áreas de teste circulares com recurso a um engenho de furar e acessório adequado com 50 mm de diâmetro interno. O corte penetra o substrato em cerca de 2 mm de profundidade. Para cada amostra realizaram-se 5 ensaios, registando-se o diâmetro exato de cada área de teste circular.

Posto isto, são coladas peças metálicas no centro das áreas de teste (Figura 26) e são ensaiadas na máquina de ensaios (Proeti).

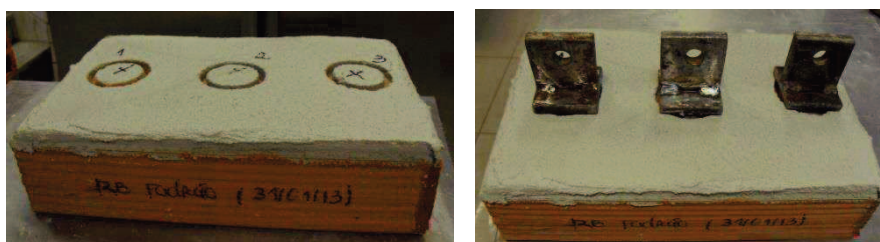


Figura 26 – Áreas de teste circulares para ensaio de aderência ao suporte.

Através das peças metálicas, é aplicada uma força de tração com velocidade constante, perpendicular à área de teste (Figura 27).

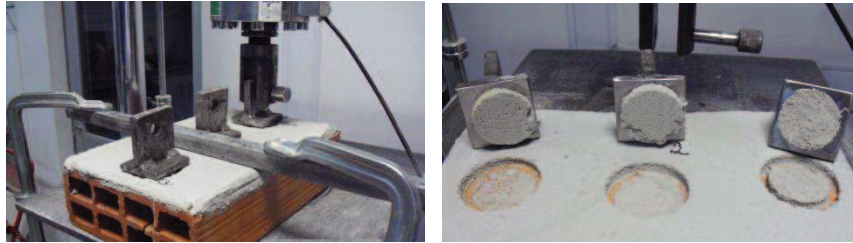


Figura 27 – Tração das áreas de teste.

Depois de ocorrer a rutura, regista-se a respetiva força de tração. Sempre que a rutura ocorre entre a peça metálica e a argamassa o valor deve ser rejeitado.

A força de adesão individual é arredondada a 0,05 N/mm² e é determinada a partir da seguinte fórmula:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

f_u – força de adesão (N/mm²);

F_u – força de tração (N);

A – área de teste da amostra cilíndrica, mm²

O valor médio da força de adesão é calculado a partir dos 5 valores individuais, arredondados a 0,1N/mm².

6.3.4 Absorção de Água por Capilaridade

O procedimento para determinação da absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a EN 1015-18:2002. Cada amostra é constituída por 3 provetes, que são igualmente preparados e armazenados segundo a EN 1015-11.

Terminado o tempo total de cura, os provetes são quebrados em duas metades, sendo as quatro faces de cada metade seladas com parafina (Figura 28).

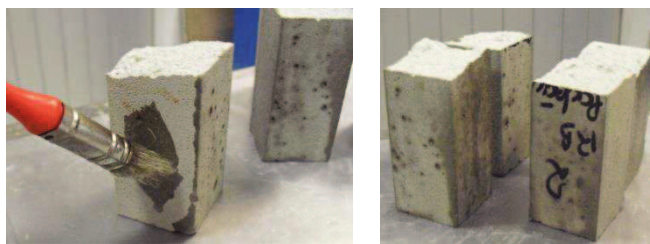


Figura 28 - Selagem dos provetes com parafina para ensaio de absorção de água.

Posto isto, os provetes são secos na estufa à temperatura de $60 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, até alcançarem massa constante. Considera-se que o provete atinge massa constante quando após 2 pesagens consecutivas, com 24 h de intervalo, não difiram entre si mais de 0,2 % da massa total.

Posteriormente colocam-se os provetes num tabuleiro, com as faces partidas viradas para baixo, sobre pano esponjoso, imersas em 5 mm a 10 mm de água (Figura 29).



Figura 29 – Provetes imersos em água.

Os provetes são imersos de forma inclinada, de modo a assegurar a total imersão da face do provete partida e evitar a formação de bolhas de ar. Posto isto, inicia-se a contagem do tempo, tendo o cuidado de garantir o nível da água constante ao longo do ensaio. Passados 10 min removem-se os provetes do tabuleiro, limpando a água em excesso com pano húmido. Após pesagem dos provetes regista-se o valor de massa, M1 e voltam-se a colocar imediatamente no tabuleiro. Decorridos 90 min, repete-se o processo, registando a massa M2.

Procede-se ao cálculo da absorção de água por capilaridade, segundo a seguinte equação (EN 1015-18, 2002):

$$C = 0,1 \times (M2 - M1) \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

C – coeficiente de absorção de água, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$;

M1 – massa do provete após imersão durante 10 min, g;

M2 – massa do provete após imersão durante 90 min, g.

6.3.5 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ)

O ensaio para determinação da permeabilidade ao vapor de água foi realizado segundo a NP EN 1015-19:2008.

O procedimento inicia-se com a preparação dos provetes, que neste caso são circulares com cerca de 16,5 cm de diâmetro e 2 cm de espessura. Os provetes são realizados sobre uma base de betão celular autoclavado com uma densidade de $550 (\pm 50) \text{ kg}/\text{m}^3$. Sobre esta base é colocada uma rede e posteriormente aplicada a argamassa, conforme representado na Figura 30.



Figura 30 – Molde para realização de provete para ensaio de permeabilidade ao vapor.

Foi realizado um provete para cada amostra e armazenado durante 2 dias à temperatura de $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ e à humidade relativa de $95 (\pm 5) \%$. Passados estes 2 dias os provetes foram separados da base e desmoldados. Foram armazenados durante os restantes 26 dias de cura à temperatura de $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $50 (\pm 5) \%$. Decorridos os 28 dias os provetes são ensaiados quanto à permeabilidade ao vapor de água.

Para realização do ensaio foi necessária a preparação de uma solução saturada de nitrato de potássio (KNO_3), que fornece uma humidade relativa de 93,2% a uma temperatura de $20 ^\circ\text{C}$. Esta solução foi introduzida no copo de ensaio e posteriormente foi colocado o provete, apoiado nas paredes do copo, de tal modo que este não entra em contacto com a superfície da solução, garantindo uma folga de ar de $10 (\pm 5) \text{ mm}$ (Figura 31).



Figura 31 – Colocação de provetes em copos circulares contendo solução de KNO_3 .

Os topos foram posteriormente vedados (com plasticina) e armazenados a $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ (Figura 32).



Figura 32 – Provetes vedados com plasticina.

Os copos de ensaio foram sendo pesados, em intervalos de tempo adequados e traçou-se o gráfico da relação entre a massa do copo e o tempo. Quando se obtêm 3 pontos em linha reta, considera-se que as condições são estáveis, isto é, que a quantidade de vapor de água a passar pelo provete por unidade de tempo é constante.

Procedeu-se ao cálculo da permeância, a partir da seguinte fórmula (NP EN 1015-19, 2008):

$$\Lambda = \frac{1}{(A \times \Delta_p) / (\frac{\Delta G}{\Delta t}) - R_A} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

Λ - permeância do vapor de água, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$;

A - área da abertura do copo de ensaio ($0,02 \text{ m}^2$);

Δ_p - diferença de pressão do vapor de água entre o ar ambiente e a solução salina, Pa (valores obtidos a partir de diagrama psicrométrico);

$\Delta G/\Delta t$ - fluxo de vapor de água, kg/s (corresponde ao declive da reta);

R_A – resistência do vapor de água da folga de ar entre o provete e a solução salina ($0,048 \times 10^9$ Pa.m².s/kg por 10 mm de folga de ar).

A permeabilidade do vapor de água é determinada pelo produto da permeância pela espessura do provete (NP EN 1015-19, 2008):

$$W_{vp} = \Delta \times t \quad (\text{Equação 16})$$

Onde

W_{vp} – permeabilidade do vapor de água (kg/ (m.s.Pa));

t – espessura do provete (0,02 m).

Por fim, calcula-se o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, μ (adimensional) através da seguinte equação (NP EN 998-1, 2010):

$$\mu = \frac{1,94 \times 10^{-10}}{W_{vp}} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde $1,94 \times 10^{-10}$ corresponde ao equivalente ar do fator de permeabilidade ao vapor de água para uma temperatura de 20 °C e 1 atm (101325 Pa) (NP EN 998-1, 2010).

6.3.6 Porosidade Aparente

A porosidade aparente foi determinada por pesagem hidrostática, por adaptação da norma NBR 12766 – “Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d’água aparente”.

A primeira etapa consiste na secagem dos provetes. Para isso colocaram-se os provetes na estufa a 100 (± 5) °C durante 24 horas. Ao fim deste tempo colocaram-se os provetes num exsiccador para arrefecimento e, passada 1 hora, pesaram-se as amostras, A, com a precisão de 0,01 g. A segunda etapa consiste no processo de saturação à pressão atmosférica. Começou-se por colocar os provetes num recipiente, adicionando água até cerca de 1/3 da sua altura e, passadas 4h adicionou-se água até cerca de 2/3 da altura dos provetes. Decorrido este tempo completou-se a submersão dos provetes, perfazendo o tempo total de 24h. Após este período de tempo, foram retirados do recipiente e foi eliminada a água em excesso com

papel absorvente húmido. Procedeu-se à pesagem de cada provete e registaram-se as respetivas massas, B (Figura 33).

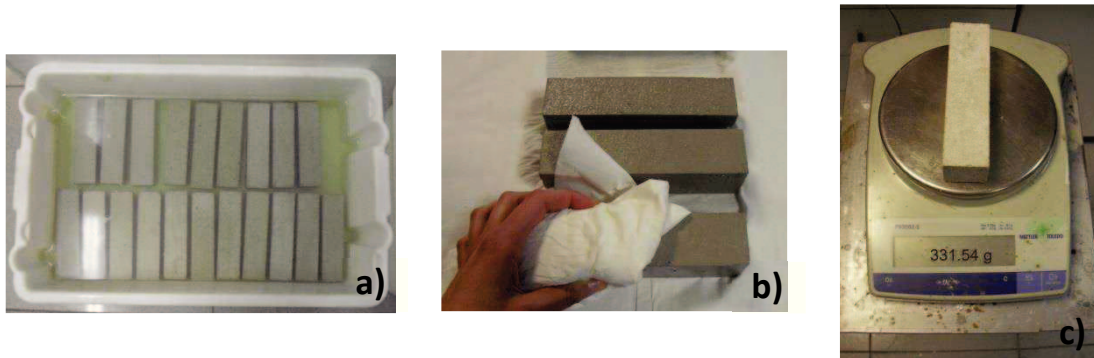


Figura 33 – Provetes para análise de porosidade aparente. a) Provetes imersos em água; b) Remoção de excesso de água; c) Pesagem dos provetes.

A terceira e última etapa refere-se à determinação da massa hidrostática, que corresponde à massa dos provetes pesados em imersão. É realizada uma montagem experimental (Figura 34) constituída por um suporte pendurado na base inferior de uma balança e por um recipiente aberto que se encontra cheio de água. Após taragem da balança, com a respetiva montagem preparada, introduziu-se o provete sobre o suporte mergulhado e registou-se a massa hidrostática, C.

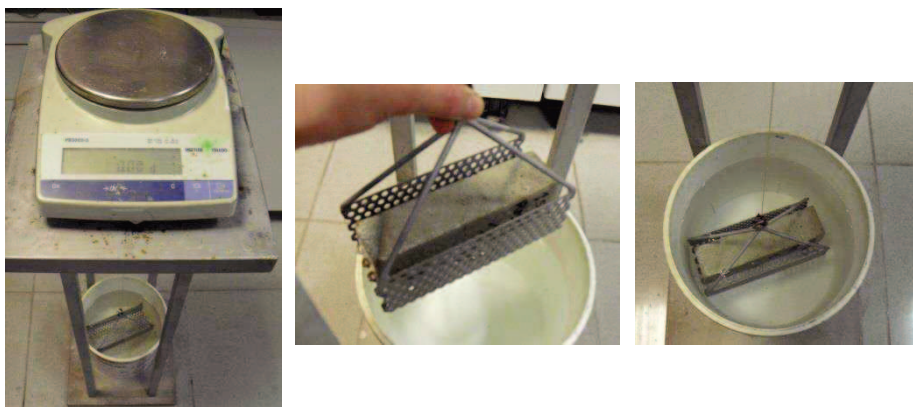


Figura 34 – Esquema de montagem do equipamento para determinação da massa hidrostática dos provetes.

O cálculo da porosidade aparente (η_a) será realizado com recurso à seguinte equação (Santiago, 2009):

$$\eta_a(\%) = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

A – massa do provete seco (g);

B – massa do provete saturado (g);

C – massa do provete saturado, submerso em água (g).

6.3.7 Retração

Uma vez que não existe norma de ensaio para determinação da retração de argamassas de reboco, recorre-se vulgarmente à norma para as argamassas de junta. Deste modo, o ensaio de retração foi realizado por adaptação da EN 12808-4:2009.

A fase inicial consistiu na preparação dos provetes prismáticos de dimensões 160mm×40mm×40mm. Esta etapa foi realizada do mesmo modo, aquando da preparação dos provetes para o ensaio de resistência à flexão e compressão. Os moldes para a realização destes provetes têm uma particularidade diferente, apresentando nos seus topos um furo que permite a colocação de pinos adequados que perfuram as extremidades dos moldes e que têm correspondência com as extremidades da amostra (Figura 35).

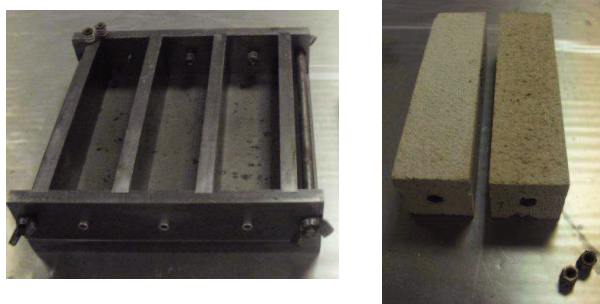


Figura 35 – Molde para ensaio de retração.

O desmolde dos provetes foi realizado 2 dias após a sua conceção, tendo-se efetuado uma primeira medição do comprimento do provete, recorrendo ao respetivo equipamento de medição (Mitutoyo Corp., Model ID-C112B) (Figura 36).

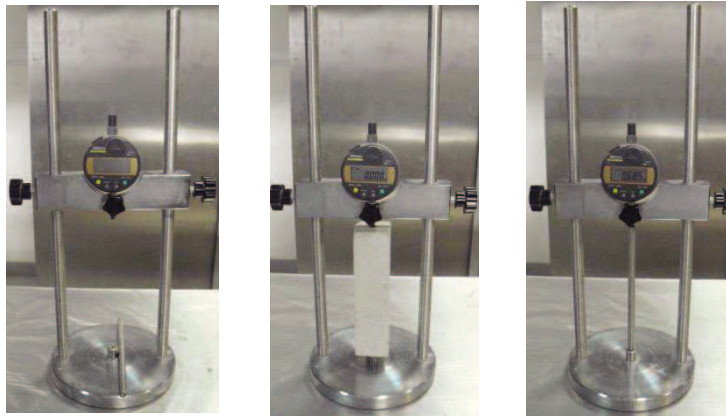


Figura 36 – Medição da retração dos provetes.

Os provetes foram acondicionados, durante os 28 dias, nas condições padrão, à temperatura de 23 (± 2) °C e 50 (± 5) % de humidade relativa. Após os 28 dias procedeu-se à medição do comprimento final de cada provete, calculando-se a retração em mm/m, a partir da Equação 19.

$$\text{Retração} = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \quad (\text{Equação 19})$$

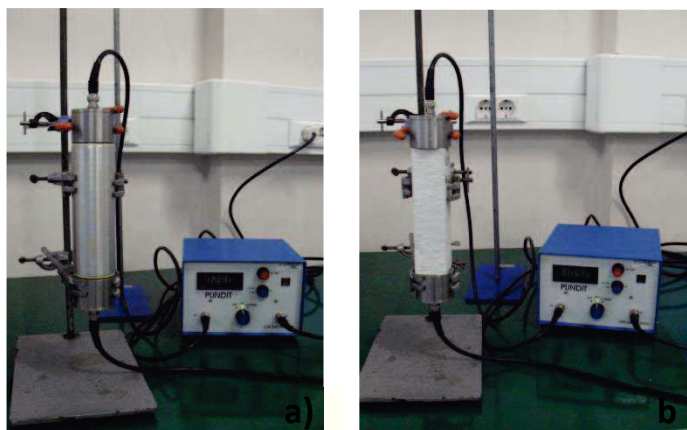
onde C_{inicial} e C_{final} é o comprimento do provete, inicial e final, respetivamente, em milímetros.

6.3.8 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado com base na determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassónicas através da amostra, recorrendo para isso ao equipamento Pundit (Portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester) (NP EN 12504-4, 2007).

Este equipamento é constituído por um gerador de impulsos elétricos e por um par de transdutores. O procedimento consistiu basicamente em colocar nos topos dos provetes os transdutores, tendo-se utilizado vaselina, para promover o respetivo contato e evitar a presença de ar na interface provete-transdutor. A avaliação da velocidade da onda foi apenas

realizada na direção longitudinal pois é a direção mais satisfatória, uma vez que os pulsos provenientes do transmissor são propagados principalmente na direção normal à face do transdutor. De forma a minimizar a interferência do operador, optou-se por colocar os transdutores e os provetes a medir, fixos num suporte, tal como apresentado na Figura 37 (CNS Farnell).



**Figura 37 - a) Medição do tempo de propagação na barra de referência
b) medição do tempo de propagação num provete de teste.**

O transdutor em contato com a superfície do provete produz um feixe de ondas longitudinais. Após percorrer o comprimento conhecido do provete, o feixe de ondas é convertido em sinal elétrico por um segundo transdutor, sendo então medido o tempo de percurso do impulso vibratório. O tempo é obtido por leitura direta do visor digital do Pundit (NP EN 12504-4, 2007).

Procede-se então ao cálculo da velocidade da onda ultrassónica (V), segundo a seguinte equação: (NP EN 12504-4, 2007)

$$V = \frac{d}{t} \quad \text{(Equação 20)}$$

Onde:

d – comprimento do provete (km);

t – tempo que a onda ultrassónica leva a percorrer a distância d (s).

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (Ed) foi efetuado recorrendo aos valores fornecidos pelo manual do respetivo equipamento (Tabela 9), assim como, à seguinte relação

entre o módulo de elasticidade e a velocidade da onda ultrassônica: $E_d = 6 \times e^{0,076 \times V^2}$ (Yıldırım & Sengul, 2010).

Tabela 9- Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de propagação da onda ultrassônica (CNS Farnell).

Velocidade da onda (km/s)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MN/m²)
3,6	24000
3,8	26000
4,0	29000
4,2	32000
4,4	36000
4,6	42000
4,8	49000
5,0	58000

6.3.9 Higroscopicidade

O ensaio de higroscopicidade teve apenas em consideração a determinação da curva de adsorção. A metodologia utilizada seguiu os pressupostos da norma ISO 12571:2000 e consistiu basicamente em submeter os provetes a ambiências com humidade relativa crescente, mantendo a temperatura constante de 23 (± 2) °C.

Foram utilizadas três humidades relativas diferentes, tendo sido alcançadas com recurso a soluções salinas sobressaturadas e a uma câmara de climatização (Aralab, Fitoclima D1200 PH-CI). Os valores reais da humidade relativa obtida através das soluções salinas foram regularmente controlados com recurso a um termohigrómetro (KIMO Instruments, KH100 Kistock) (Figura 38). A Tabela 10 representa as ambiências adotadas.

Tabela 10 – Ambiências utilizadas no ensaio de adsorção.

HR (%)	
65%	Câmara climatizada
74%	Cloreto de Sódio (NaCl)
82%	Cloreto de Potássio (KCl)



Figura 38 – Termohigrómetro.

As soluções sobressaturadas foram preparadas em banho-maria a 23 °C (Grant Instruments, GD 100) (Figura 39), de acordo com as curvas de solubilidade de cada sal, apresentadas na Figura 40.



Figura 39 – Preparação da solução salina.

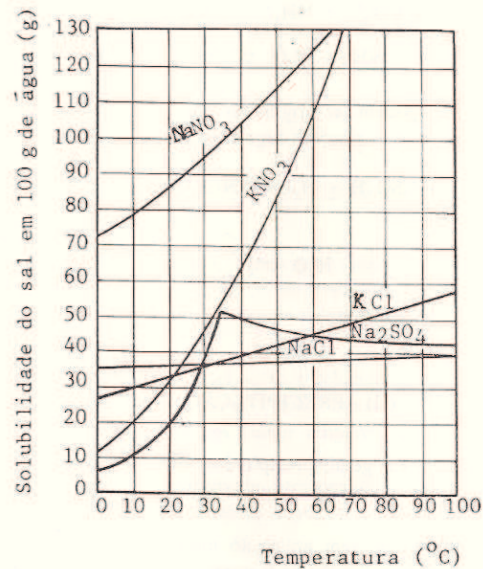


Figura 40 – Solubilidade dos sais em água, em função da temperatura (Pombeiro, 1998).

No caso das soluções sobressaturadas o ensaio decorre dentro de um exsiccador, onde é introduzida uma grelha onde são colocados os provetes, de modo a que estes não entrem em contacto com a solução salina que se encontra na base do exsiccador, conforme mostra a Figura 41.



Figura 41 – Ensaio de higroscopicidade: a) provetes para ensaio de higroscopicidade; b) provetes dentro de exsiccador.

Estes provetes foram submetidos ao tempo de cura normal de 28 dias, em condições padrão de $23 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ e $65 (\pm 5) \% \text{HR}$. A dimensão utilizada para os provetes foi de $(46,0 \times 39,0 \times 9,5) \pm 2 \text{ mm}$. Optou-se por uma dimensão reduzida de forma a se alcançar a estabilização da respetiva massa no mais curto prazo de tempo possível.

Na fase inicial do ensaio os provetes devem estar secos, sendo colocados na estufa a $105 ^\circ\text{C}$ durante 24 h e, deve-se garantir o isolamento das condições exteriores, utilizando para isso, vaselina na união da tampa com a base do exsiccador. Os provetes colocados no interior do exsiccador são periodicamente pesados, até alcançar massa constante (Lima, 2004).

Posto isto, é determinado o teor de humidade do provete através do quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do provete por secagem, pela massa do provete seco, segundo a seguinte expressão (Machado, 2006):

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

m_h – massa do provete húmido (g);

m_s – massa do provete seco (g).

6.3.10 Condutibilidade Térmica

O ensaio de condutibilidade térmica, realizado no ITeCons, seguiu os pressupostos da norma EN 12664:2001 e consistiu, numa fase inicial, na conceção dos provetes de dimensões 150x150x150 mm. O acondicionamento destes provetes foi realizado da mesma forma que os provetes para ensaio à flexão e compressão (segundo a EN 1015-11). Passados os 28 dias de cura os provetes foram cortados em dimensões 150x150x40 mm, à exceção da amostra A em que os provetes foram cortados em 150x150x30 mm, devido à quantidade insuficiente de amostra fornecida. Este corte é realizado com meios adequados de forma a assegurar que a superfície das amostras é tornada plana. Alguns dos provetes obtidos utilizados para ensaio, são apresentados na Figura 42.

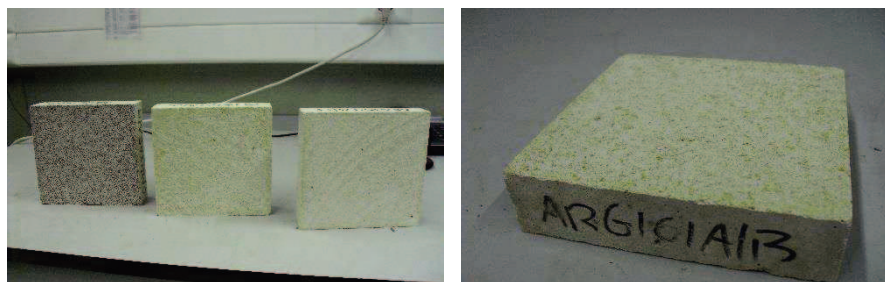


Figura 42 – Alguns dos provetes utilizados para ensaio.

Posto isto, procedeu-se à secagem dos provetes, tendo sido colocados em estufa a 105°C (Figura 43 -a)), até obterem massa constante. Após determinação da massa da amostra (Figura 43 - b)) e, para impedir a transferência de humidade de ou para a amostra durante o ensaio, esta é fechada num envelope de segurança resistente ao vapor (Figura 43 - c)).

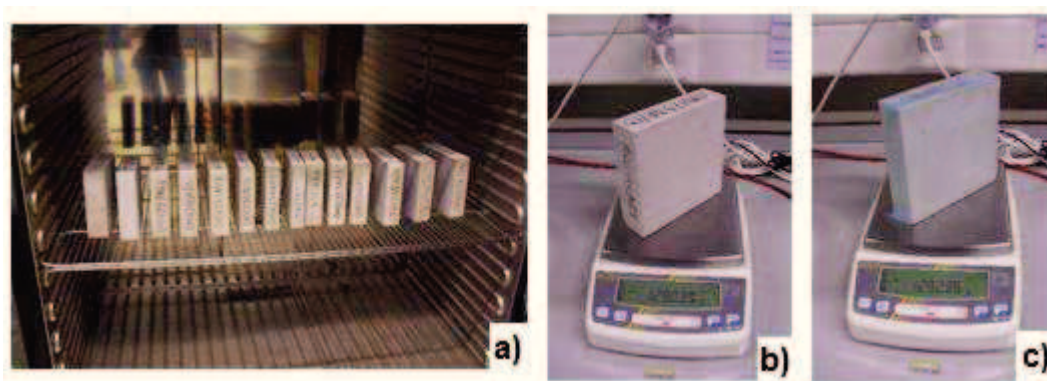


Figura 43 – a) Secagem dos provetes em estufa a 105°C; b) Pesagem dos provetes; c) Pesagem dos provetes com envelope plástico.

Posto isto, inicia-se o ensaio de condutibilidade térmica, com recurso ao equipamento de placa quente protegida, λ -Meter EP500e. Este aparelho mede a espessura d da amostra, a diferença de temperatura ΔT na amostra e o fluxo de calor Q , que é equivalente à potência elétrica fornecida à zona de medição P ($=U.I$). A condutibilidade térmica é determinada com base na área de medição A e na condução térmica unidimensional, segundo a seguinte equação (Lambda, 2013):

$$\lambda = \frac{\dot{Q}.d}{A.\Delta T} = \frac{U.I.d}{A.\Delta T} \quad (\text{Equação 22})$$

Os componentes que constituem o referido equipamento são apresentados na Figura 44.

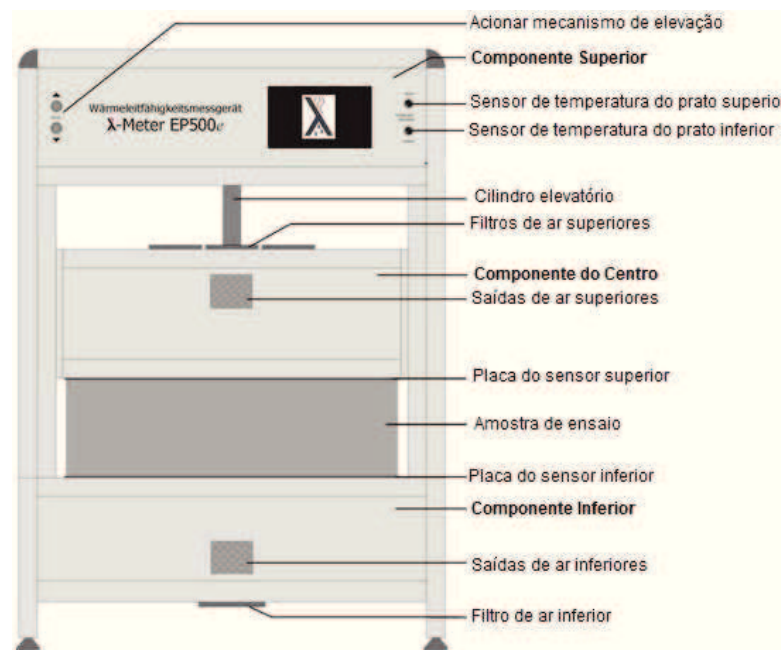


Figura 44 – Esquema do aparelho de placa quente protegida λ -Meter EP500e (Lambda, 2013).

A dimensão máxima da amostra de ensaio é de 500x500mm. No entanto, este equipamento permite a utilização de amostras de mais reduzida dimensão, uma vez que a área de teste real está localizada bem no centro da amostra. Nas amostras 500x500 mm o material exterior, adjacente à área central, não é considerado para o resultado do teste, sendo contudo necessário dispor de uma camada exterior de forma a criar condições térmicas que garantam um campo de temperatura estacionária unidimensional.

De seguida, introduziu-se a amostra para ensaio (150x150 mm) no equipamento, tendo o cuidado de a isolar lateralmente com um material têxtil, conforme representado na Figura 45.



Figura 45 – Realização de ensaio de condutibilidade térmica no equipamento λ -Meter EP500e.

Segue-se o processo de abaixamento da placa superior, que ocorre lentamente de modo a permitir uma maior precisão e evitar possíveis danos na amostra. Encontrando-se as placas (superior de aquecimento e inferior de arrefecimento) totalmente em contato com a amostra, é então iniciado o ensaio, sendo estabelecido um diferencial de temperatura entre as placas de 15°C. Este diferencial entre as faces do provete origina um fluxo de calor através deste, que é medido pelo equipamento.

As amostras submetidas a este ensaio foram as amostras Padrão e apenas as amostras que incorporam o resíduo 1 (amostra A, B e C), uma vez que, pela análise dos restantes resultados foi o que se apresentou maior viabilidade. Para além destas amostras ensaiou-se também uma amostra com incorporação de granulado de cortiça (8% em peso) de forma a estabelecer uma comparação. Para cada amostra foram ensaiados três provetes, sendo o resultado do ensaio obtido através da média destes três valores.

6.3.10 Resistência aos ciclos gelo-degelo

Os ensaios de resistência ao gelo-degelo foram também realizados no ITeCons. Uma vez que não existe nenhuma norma aplicável para realização da resistência ao gelo-degelo em argamassas, seguiram-se os princípios da EN 12371:2006, aplicável para pedra natural.

Este ensaio foi executado com o objetivo de determinar o efeito dos ciclos de gelo-degelo nas características de desempenho, ao nível da resistência à flexão e resistência à compressão, das argamassas.

A fase inicial de preparação e condicionamento dos provetes, de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm, foi realizada da mesma forma aquando da preparação dos provetes para ensaio à flexão e compressão (segundo a EN 1015-11). Foram preparados dois conjuntos de provetes, um para ser ensaiado após ser submetido aos ciclos de gelo-degelo e o outro para ser ensaiado sem ser submetido ao gelo-degelo. As amostras submetidas a este ensaio foram: amostra Padrão, amostra A, B, C e amostra com incorporação de granulado de cortiça. Foi preparado, para cada conjunto, três provetes de cada amostra.

Por questões de disponibilidade da câmara de gelo-degelo, os provetes foram submetidos aos ciclos já com cerca de 50 dias de cura. Os provetes foram colocados na câmara, na horizontal e de modo a não entrarem em contato uns com os outros, ou com as paredes da câmara. Foram submetidos a 15 ciclos, realizando-se uma inspeção visual a cada 5 ciclos. Cada ciclo é constituído por um período de 6 h de gelo ao ar, seguido por um período de 6 h de degelo, durante o qual os provetes são imersos em água (NP EN 12371, 2006). Cada ciclo é constituído pelos seguintes estágios:

Tabela 11 – Fases de cada ciclo de gelo-degelo (NP EN 12371, 2006).

	Temperatura	Tempo
Início do ciclo	$\geq +5\text{ °C} \leq +20\text{ °C}$	T_0
Estágio 1	$\leq 0\text{ °C} \geq -8\text{ °C}$	$T_0 + 2,0\text{ h}$
Estágio 2	$\leq -8\text{ °C} \geq -12\text{ °C}$	$T_0 + 6,0\text{ h}$
Estágio 3	Imersão total	$T_0 + 6,5\text{ h}$
Estágio 4	$\geq +5\text{ °C} \leq +20\text{ °C}$	$T_0 + 9,0\text{ h}$
Estágio 5	$\geq +5\text{ °C} \leq +20\text{ °C}$	$T_0 + 12,0\text{ h}$

Completados os 15 ciclos, avaliaram-se as resistências à flexão e compressão destes provetes.

7. Resultados e Discussão

Neste capítulo é realizada a apresentação dos resultados obtidos assim como a análise e interpretação dos mesmos.

Primeiramente caracterizam-se as três amostras de resíduo de madeira recolhido. A partir desta análise, são identificadas as amostras com maior viabilidade para incorporação nas argamassas de reboco (resíduo 1 e resíduo 3), descritos no capítulo 6.1. Segue-se a caracterização das várias amostras de argamassa com incorporação destes resíduos (amostra Padrão, amostra A, B, C, D, E e F), descritos na Tabela 8. São apresentadas inicialmente as propriedades das argamassas no estado fresco e posteriormente no estado endurecido.

7.1 Propriedades do Resíduo

7.1.1 Humidade

7.1.1.1 Determinação do título

A Tabela 12 apresenta os resultados para o título (mg de água / mL de reagente Karl Fischer), obtidos a partir da titulação inicial com água.

Tabela 12 – Resultados do volume de Karl Fischer gasto na titulação com água.

m H ₂ O (mg)	Volume KF (mL)	Título (mg H ₂ O / mL KF)
30,0	15,450	1,942
	16,210	1,851
	15,920	1,884
Média		1,89 mg H₂O / mL KF

7.1.1.2 Determinação da humidade das amostras de resíduo

O teor de água existente em cada amostra de resíduo de madeira foi calculado a partir da equação 5. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 13 – Resultados do volume de Karl Fischer gasto na titulação das amostras de resíduo e respectivos valores de humidade.

Amostra	Massa amostra (g)	Volume KF (mL)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio Padrão relativo (%)
Resíduo 1	0,2412	12,350	9,73	9,9	1,51
	0,2291	12,091	10,03		
	0,2314	12,250	10,06		
Resíduo 2	0,2283	51,426	42,80	42,6	1,12
	0,1975	43,598	41,94		
	0,2019	45,749	43,05		
Resíduo 3	0,2323	1,846	1,51	1,4	6,81
	0,2161	1,460	1,28		
	0,2214	1,671	1,43		

Tal como seria de esperar, constata-se através dos resultados obtidos que o resíduo 2 é aquele que apresenta teor de humidade mais elevado (cerca de 43%) e o resíduo 3 é aquele que menor percentagem de água incorporada, 1,4%. Pode-se identificar este resíduo 3 como totalmente seco, uma vez que a sua percentagem de humidade se aproxima de 0%. O resíduo 1 apresenta um teor de humidade de cerca de 10%.

A madeira e consequentemente o seu resíduo, é um material que tem sempre associado um teor de humidade. A água apresenta uma forte relação com a substância lenhosa, verificando-se a sua existência, não só na forma de água de constituição, mas também nas formas de água de saturação e água livre, sendo estas duas últimas que interessam referir. A água de saturação corresponde à água retida pelas membranas higroscópicas das células, mas que é suscetível de ser evaporada por secagem em estufa a 103 (\pm 2) °C. A água livre diz respeito à água contida nos espaços celulares e intercelulares, apresentando ligações fracas à substância lenhosa, sendo por isso, facilmente libertada (Machado, 2006).

Pelos teores de humidade que cada amostra de resíduo apresenta, pode-se afirmar que a humidade do resíduo 1 se refere à água de saturação porque, apesar de ser obtido a partir de madeira seca, este resíduo não se encontrava isolado, encontrava-se sujeito a determinadas condições ambientais, com uma dada humidade relativa. Consequentemente, este resíduo terá adsorvido alguma humidade até entrar em equilíbrio com o meio ambiente.

O resíduo 2, tendo sido obtido a partir da serragem de madeira “verde”, apresenta uma quantidade de água extremamente elevada. Este tem presente não só a água de saturação mas também água no estado livre.

Já o resíduo 3 é, garantidamente, um resíduo do qual foi extraído quase toda a água, quer de saturação quer de água livre. O 1,4% de humidade corresponderá à água de constituição.

Tendo em conta estes resultados, eliminou-se a hipótese utilizar o resíduo 2 nos ensaios a realizar. Considerando que se pretende incorporar este resíduo numa argamassa de base cimentícia, cuja cura ocorre por hidratação do cimento, a presença desta água livre não é adequada, pois induziria à hidratação parcial do cimento, formando “grânulos”.

Os ensaios posteriormente realizados apenas incluem as amostras de resíduo 1 e resíduo 3.

7.1.2 Granulometria

A avaliação da granulometria do agregado a incorporar na argamassa é bastante relevante na medida em que tem uma influência direta na trabalhabilidade e compacidade do produto final.

Conforme referido anteriormente, foi eliminada a fração de resíduo superior a 2 mm por, se considerar, que não seria adequada para a aplicação em causa – incorporação em argamassas de reboco. Os resultados granulométricos, a seguir apresentados, são válidos tanto para o resíduo 1 como para o resíduo 3 (Tabela 14).

Tabela 14 – Resultados da distribuição granulométrica do resíduo de madeira.

Peneiros (mm)	M peneiro vazio (g)	M peneiro com amostra (g)	M amostra (g)	Retido (%)	Retido Acumulado	Passado (%)
2,0	495,1	495,1	0,0	0,0	0,0	100,0
1,0	466,1	467,5	1,4	4,8	4,8	95,2
0,5	452,2	466,4	14,2	48,6	53,4	46,6
0,25	449,4	460,5	11,1	38,0	91,4	8,6
0,125	452,3	453,9	1,6	5,5	96,9	3,1
0,063	437,7	438,2	0,5	1,7	98,6	1,4
Fundo	404,6	405,0	0,4	1,4	100,0	0,0

Pela análise de resultados, constata-se que a granulometria do resíduo de madeira distribui-se, maioritariamente, entre o peneiro de 0,5 e 0,25mm, sendo a percentagem de retido de 48,6% e 38,0%, respetivamente.

A incorporação do resíduo na formulação da argamassa irá ser efetuada pela substituição do inerte silicioso, a areia. Como tal, procedeu-se à comparação granulométrica entre ambos (Figura 46).

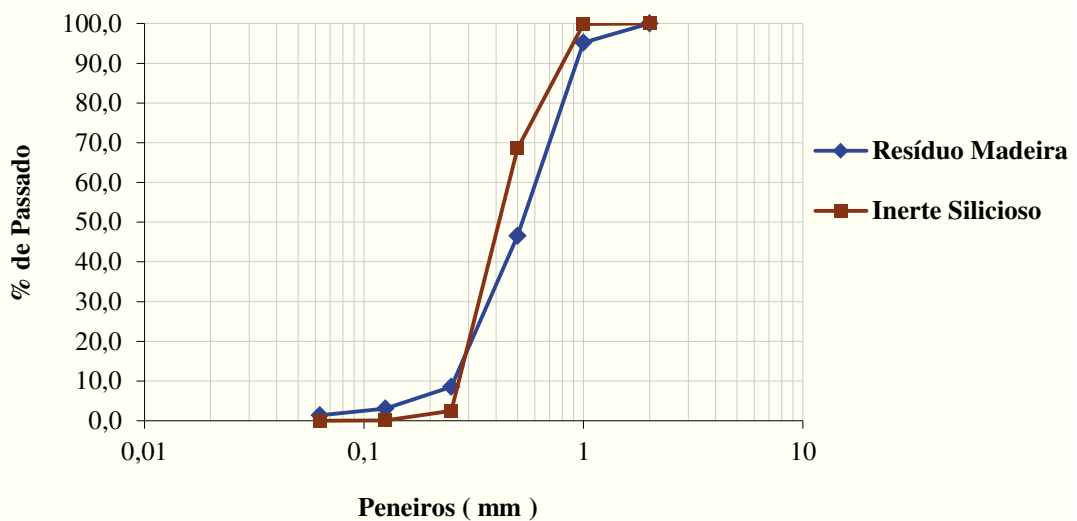


Figura 46 – Representação gráfica da % de passado em função da malha do peneiro.

Comparando a curva granulométrica do resíduo com a da areia constata-se que são muito idênticas, também na areia a distribuição ocorre maioritariamente entre as malhas de 0,5 e 0,25 mm, apesar das percentagens serem diferentes. A granulometria do resíduo é ligeiramente superior, apresentando uma percentagem de passado de cerca de 47% no peneiro de 0,5 mm, ao passo que na areia essa percentagem é de 69%. Também na malha de 1 mm é visível essa diferença, apresentando o resíduo cerca de 95% de passado e a areia 100%.

Para além da semelhança granulométrica com o inerte silicioso, a distribuição granulométrica do resíduo também cumpre com o requisito da NP EN 13139, que estabelece um máximo de 5% de passados no peneiro de 0,063mm. Em termos granulométricos, o resíduo poderá substituir o inerte silicioso na formulação da argamassa.

7.1.3. Baridade

Na Tabela 15 são apresentados os valores obtidos para a baridade (arredondados às dezenas, segundo NP 955, 1973) do resíduo 1 e resíduo 3.

Tabela 15 – Resultados da baridade para o *resíduo 1 e 3*.

Amostra	Baridade (kg/m ³)	Média
Resíduo 1	180	18×10 ¹
	180	
	190	
Resíduo 3	170	17×10 ¹
	170	
	170	

Os valores obtidos para a baridade são idênticos, sendo ligeiramente superior no caso do resíduo 1 do que no caso do resíduo 3. Esta variação deve-se ao diferente teor de humidade que cada um deles apresenta. O resíduo 1 apresenta uma humidade superior e, como tal, apresentará consequentemente, uma baridade superior.

7.2. Propriedades da Argamassa no estado fresco

Seguidamente serão apresentados os resultados das argamassas, que incorporam os resíduos 1 e 3, no estado fresco.

7.2.1 Consistência

A determinação da consistência da argamassa é particularmente importante para daí, se avaliar também, a correta dosificação de água de amassadura para a realização da mistura.

Para a amostra Padrão identificou-se um espalhamento de cerca de 145 mm, como sendo aquele que lhe confere melhor trabalhabilidade. Para as restantes formulações, com incorporação de resíduo, ajustaram-se as percentagens de água de forma a obter o

espalhamento nesta ordem de grandeza. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados de espalhamento obtidos para as amostras de ensaio.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Água de Amassadura (%)	30,1%	48,8%	57,4%	65%	48,8%	57,4%	65%
Espalhamento (mm)	145,0	145,5	144,0	145,3	142,9	142,5	144,2

Dos resultados apresentados conclui-se que, para espalhamentos idênticos, a percentagem de água de amassadura das argamassas com resíduo é significativamente superior à percentagem de água da amostra Padrão. Isto é facilmente explicado, pelo poder superior de retenção de água do resíduo, quando comparado com o do inerte silicioso. Para além disso, essa retenção de água é tanto maior quanto maior a percentagem de incorporação de resíduo, conduzindo a percentagens de água de amassadura superiores, conforme se constata pelos resultados.

Foram utilizadas estas percentagens de água de amassadura em todos os ensaios posteriormente realizados.

7.2.2 Teor de Ar

Torna-se importante avaliar a incorporação de ar nas argamassas, não só porque interfere na sua densidade, mas também porque influencia diretamente as suas prestações mecânicas, como se poderá constatar no capítulo 7.3.1.

Os resultados obtidos para o teor de ar das argamassas são apresentados na Figura 47.

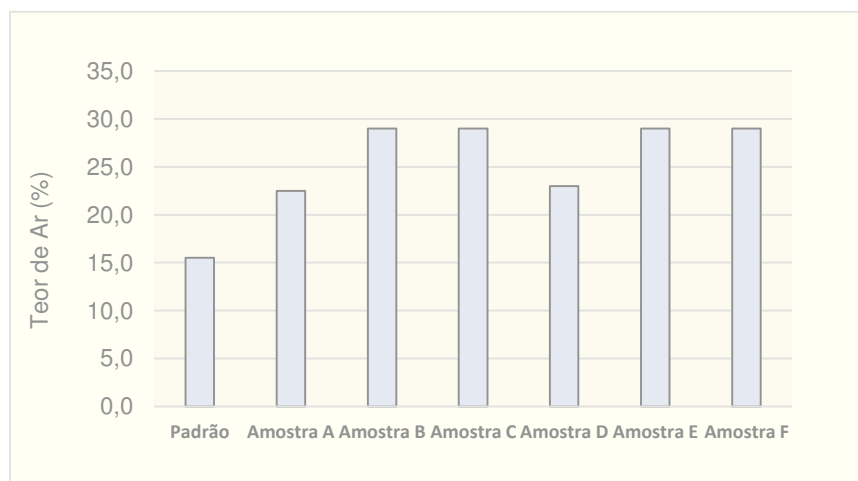


Figura 47 – Resultados do teor de ar para as amostras de ensaio.

A incorporação de resíduo nas argamassas aumenta a sua percentagem de ar. O resíduo promove a adsorção de ar na superfície das partículas, tornando as argamassas mais leves, o que se torna particularmente vantajoso tendo em vista a aplicação que se pretende dar ao produto. Contudo, esse aumento não é proporcional à percentagem de resíduo incorporada. Nas argamassas que incorporam 10% de resíduo o teor de ar foi cerca de 23% e nas argamassas que incorporam 15% e 20% de resíduo apresentam o mesmo teor de ar, de 29%. Daqui, pode-se entender, que a argamassa com 15% de incorporação de resíduo terá atingido o seu limite máximo de adsorção de ar.

7.2.3 Massa Volúmica e Consumo

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da massa volúmica da pasta para as diferentes amostras.

Tabela 17 – Resultados de massa volúmica da pasta obtidos para as amostras de ensaio.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Massa Volúmica (kg/m ³)	1620	1280	1080	1020	1250	1060	1000

Constata-se que a amostra Padrão apresenta, tal como seria de esperar, uma massa volúmica superior às amostras que incorporam resíduo. Isto explica-se através da baridade dos

agregados, isto é, na amostra Padrão é incorporado inerte silicioso de baridade 1500 kg/m^3 , ao passo que nas amostras com resíduo, parte deste agregado silicioso é substituído pelo resíduo, com baridade significativamente inferior ($170/180 \text{ kg/m}^3$). Isto traduz-se, conseqüentemente numa redução da massa volúmica da pasta, sendo mais significativa para percentagens de incorporação de resíduo superiores. Contudo, esta redução torna-se pouco significativa quando se compara a argamassa que incorpora 20% com a que incorpora 15% de resíduo, o que se justifica pelos valores apresentados anteriormente para o teor de ar. Apresentando iguais teores de ar, seria de esperar que as massas volúmicas também fossem idênticas. Daqui, pode-se concluir, que a incorporação de 20% não traz qualquer melhoria em termos de redução da densidade da pasta.

De notar ainda que, para as mesmas percentagens de incorporação de resíduo, as amostras com incorporação de resíduo 3 apresentam massa volúmica ligeiramente inferior às amostras com incorporação de resíduo 1. Isto deve-se ao fato da baridade do resíduo 3 ser ligeiramente inferior à do resíduo 1.

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos para o consumo de cada uma das amostras.

Tabela 18 – Resultados de consumo obtidos para as amostras de ensaio.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
m pasta (kg)	1,0361	0,8861	0,8870	0,8182	0,7895	0,7642	0,7532
m pó (kg)	0,7242	0,4537	0,3779	0,3027	0,4042	0,3256	0,3013
Consumo [kg/(m ² .cm)]	11,8	7,38	6,14	5,62	6,57	5,29	4,90

O consumo da argamassa está intimamente relacionado com o valor da massa volúmica da pasta pois, quanto menos densa é a argamassa maior é o seu rendimento e, conseqüentemente menor o consumo. Portanto, as argamassas que apresentam menor consumo são as que incorporam 15% e 20% de resíduo. Como seria de esperar, a redução no consumo da argamassa de 15% para 20% não é tão significativa como no caso de 10% para 15%.

Comparando as amostras que incorporam resíduo 1 com as que incorporam resíduo 3, constata-se uma maior rentabilidade para as argamassas que incorporam resíduo 3, conseqüência de possuírem também massas volúmicas ligeiramente inferiores.

7.3. Propriedades da Argamassa no estado endurecido

7.3.1 Resistência à flexão e compressão

Na Figura 48 e Figura 49 são apresentados os resultados da resistência à flexão e à compressão para as diferentes amostras, após 28 dias e 90 dias de cura.



Figura 48 - Resultados da resistência à flexão, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.

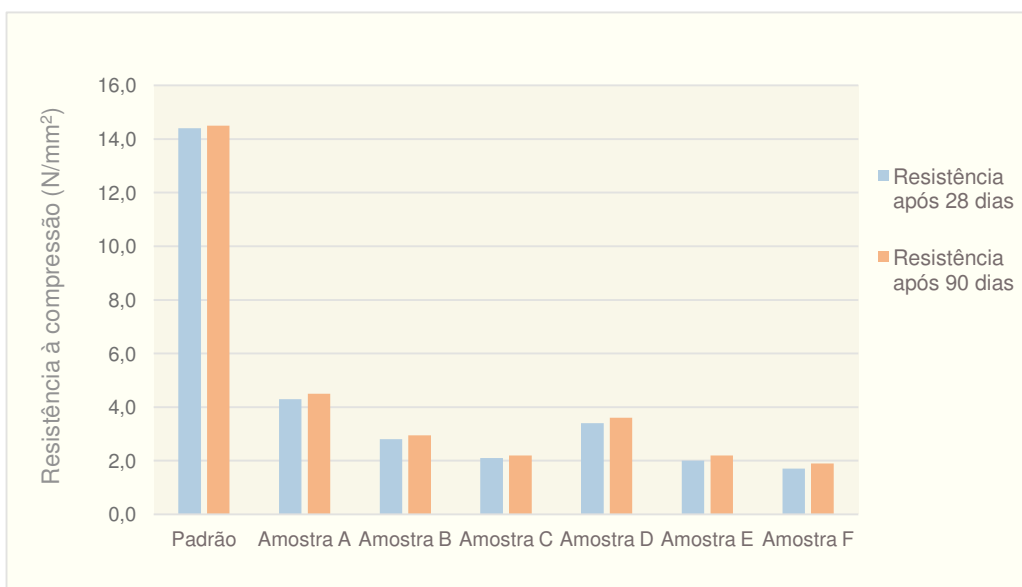


Figura 49 - Resultados da resistência à compressão, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.

A incorporação de resíduo de madeira, quer seja de resíduo 1 quer seja de resíduo 3, conduz a uma redução significativa nas resistências mecânicas das argamassas, tanto a nível da flexão como da compressão. Segundo a NP EN 998-1, a resistência da argamassa Padrão enquadra-se na classe CS-IV ($\geq 6 \text{ N/mm}^2$), enquanto que as argamassas com incorporação de resíduo estão incluídas na classe CS-II (1,5 a $5,0 \text{ N/mm}^2$) / CS-III (3,5 a $7,5 \text{ N/mm}^2$). Avaliando as diferentes amostras, quanto maior a percentagem de incorporação de resíduo, quer seja de resíduo 1 quer seja de resíduo 3, maior é a redução nas resistências mecânicas. Comparando as amostras que incorporam a mesma quantidade de resíduo 1 e de resíduo 3 constata-se que as resistências são inferiores no caso da incorporação do resíduo 3. Tal fato, explica-se com base na diferente capacidade de retenção de água de cada resíduo. Nas amostras D, E e F, terá sido retida, pelo resíduo, maior quantidade da água de amassadura do que nas amostras A, B e C, ficando disponível uma quantidade de água inferior para a hidratação do ligante cimento, o que, conseqüentemente, origina resistências mecânicas também inferiores. Conclui-se, portanto, que proceder à secagem do resíduo torna-se prejudicial em termos mecânicos, apresentando um melhor comportamento as amostras que incorporam o resíduo 1.

Comparando os resultados obtidos após 28 dias e após 90 dias, constata-se que as resistências mecânicas das argamassas se desenrolam nos primeiros 28 dias, ocorrendo um ligeiro incremento da resistência à compressão aos 90 dias. Tratam-se, contudo, de incrementos pouco significativos, na ordem dos 0,1 a $0,2 \text{ N/mm}^2$. Já no que se refere, às resistências à flexão, esses valores não sofreram qualquer variação. Na Figura 50 são apresentados os resultados obtidos para a ductilidade das argamassas, obtida a partir do quociente entre a resistência à flexão e a resistência à compressão.

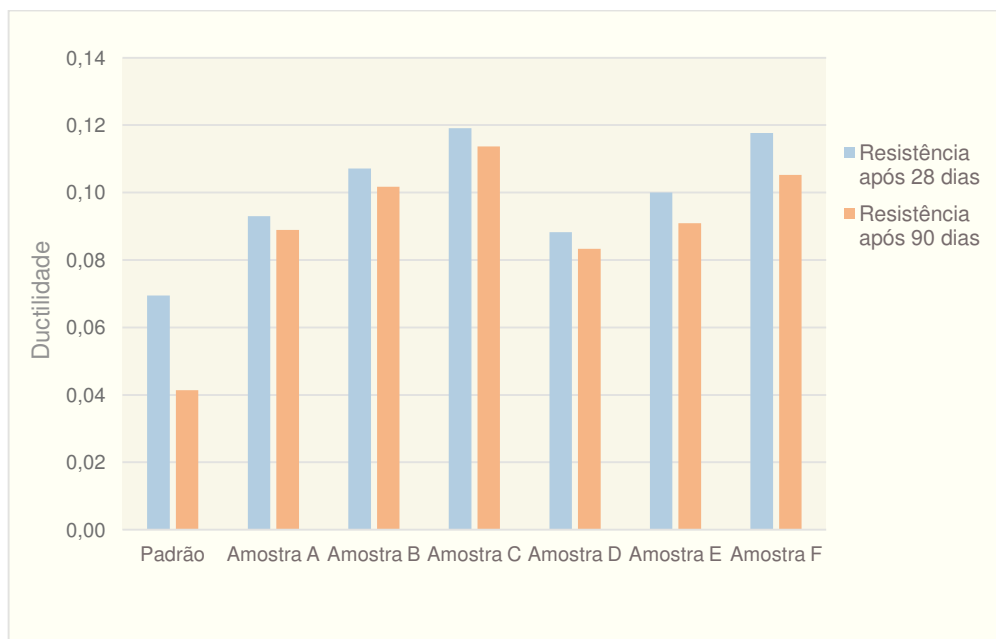


Figura 50 - Resultados da ductilidade, após 28 e 90 dias, para as amostras de ensaio.

Conforme seria de esperar, os valores obtidos indicam que a amostra Padrão é a menos dúctil, obtendo-se uma melhor ductilidade para as amostras que incorporam resíduo, sendo tanto melhor quanto maior o incremento de resíduo. As amostras que incorporam resíduo 1 apresentam ductilidade superior às amostras que incorporam resíduo 3. No entanto, seria de esperar um comportamento contrário, isto é, que as amostras D, E e F apresentassem melhor ductilidade, uma vez que apresentam resistência à compressão inferior. Contudo, isso não se verificou porque para além da redução na resistência à compressão, sofreram também redução na resistência à flexão.

Ainda que, sendo uma relação estabelecida apenas empiricamente, este parâmetro de ductilidade permite inferir acerca da deformabilidade do material. Isto é, quanto maior a ductilidade da argamassa (menor resistência à compressão) melhor será a sua capacidade de deformação. Posto isto, espera-se que essa capacidade seja tanto maior quanto maior a percentagem de incorporação de resíduo, o que irá ser posteriormente confirmado aquando da apresentação dos resultados do módulo de elasticidade.

Comparando os valores obtidos aos 28 dias com os dos 90 dias, constata-se uma diminuição da ductilidade das argamassas, fato este, que se deve ao ligeiro incremento que se verifica na resistência à compressão.

7.3.2 Massa Volúmica

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para a massa volúmica do produto endurecido para as várias amostras de ensaio.

Tabela 19 - Resultados de massa volúmica do provete obtidos para as amostras de ensaio.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Massa Volúmica (kg/m ³)	1270	830	730	710	820	670	650

Os resultados da massa volúmica do provete seguem o mesmo raciocínio dos resultados obtidos para a massa volúmica da pasta, sendo as justificações também as mesmas. Evidencia-se, uma vez mais que, a incorporação de resíduo reduz a densidade da argamassa endurecida.

As amostras E e F apresentam valores para a massa volúmica compreendidos entre 650 a 670 kg/m³, valores estes bastante próximos do que é prescrito para se obterem argamassas térmicas, como o desejado. O LNEC considera que devem ter massas volúmicas inferiores a 600 kg/m³ (Veiga & Malanho, 2012).

7.3.3 Aderência ao Suporte

A Figura 51 apresenta a média dos resultados obtidos de aderência ao suporte e a Tabela 20 apresenta o desvio padrão e respetivo coeficiente de variação dos 5 valores obtidos, para cada amostra.

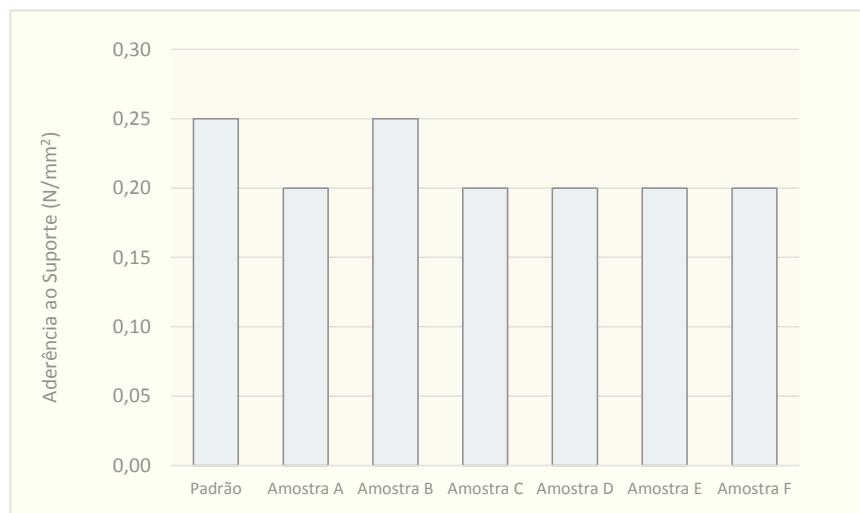


Figura 51 – Resultados da aderência ao suporte para as amostras de ensaio.

Tabela 20 – Desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para os 5 valores de aderência obtidos para cada amostra.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Desvio Padrão	0,08	0,07	0,03	0,06	0,07	0,02	0,07
CV (%)	32,0%	33,9%	12,6%	40,0%	42,3%	10,0%	35,4%

Independentemente da percentagem de incorporação de resíduo, os resultados de aderência ao suporte são iguais (0,20 N/mm²), à exceção da amostra B em que o valor da aderência é ligeiramente superior e igual à amostra Padrão (0,25 N/mm²). Não se esperava obter esta diferença na amostra B, contudo, tendo em conta o desvio padrão e respetivo CV, verifica-se que não existe uma diferença significativa entre os valores de aderência. Estes valores de aderência obtêm-se a partir de dois arredondamentos, um primeiro arredondamento da força de adesão individual às centésimas, e um segundo arredondamento da média final às décimas, o que poderá ter conduzido a esta diferença. Apesar do resultado da amostra B ter sido validado, não foi interpretado como sendo a amostra com melhor adesividade ao suporte.

Para além destes resultados quantitativos foi também avaliado o tipo de rutura de cada amostra (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultados do tipo de rutura para as amostras de ensaio.

Amostra	Padrão	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D	amostra E	amostra F
Tipo de Rutura	FP-A / FP-B	FP-A	FP-B	FP-B	FP-A / FP-B	FP-B	FP-B

Os tipos de rutura que ocorreram foram FP-A (rutura na interface argamassa / substrato) e FP-B (rutura coesiva na argamassa). O tipo de rutura FP-B indica que a aderência da argamassa ao suporte é superior ao valor obtido. O valor de aderência obtido corresponde à rutura na argamassa que constitui, neste caso, um ponto mais fraco comparativamente com a adesão que esta apresenta ao suporte. O tipo de rutura FP-A traduz o valor real da aderência argamassa / suporte.

Portanto, para iguais valores de aderência, a melhor solução será aquela que apresentar rutura FP-B. Dos resultados obtidos, as amostras B, C, E e F constituem as melhores opções em termos de aderência ao suporte.

7.3.4 Absorção de Água por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade, para cada uma das argamassas, é apresentada na Figura 52.

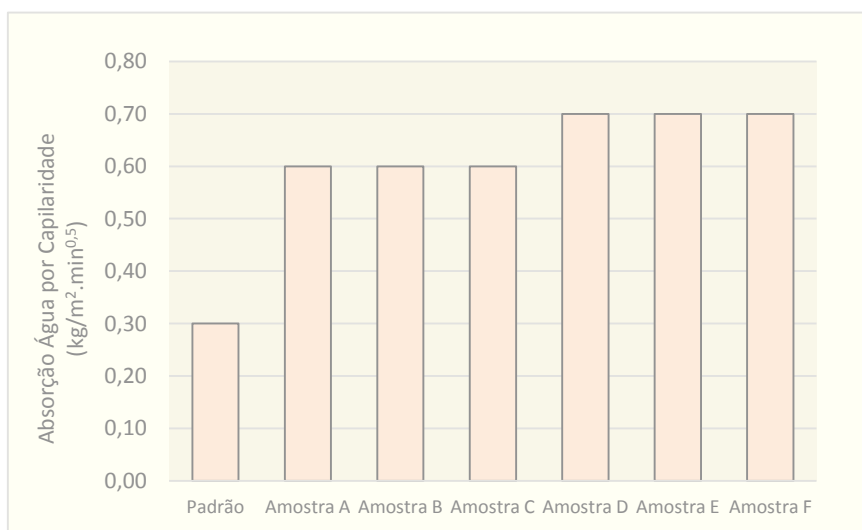


Figura 52 – Resultados de absorção de água para as amostras de ensaio.

Através dos resultados obtidos constata-se que a incorporação do resíduo de madeira nas argamassas provoca um incremento na absorção de água por capilaridade, quando comparado com a argamassa Padrão. Este comportamento explica-se com base na porosidade das argamassas. Conforme se irá constatar no capítulo 7.3.6, as amostras que incorporam resíduo apresentam estrutura porosa e, como tal, a absorção de água por capilaridade é facilitada neste tipo de argamassas.

Verifica-se um aumento para o dobro no caso da incorporação do resíduo 1 e ainda superior no caso do resíduo 3. O facto de no resíduo 3 o aumento ser ligeiramente superior ao do resíduo 1 explica-se pelo diferente teor de humidade de cada resíduo. Possuindo o resíduo 3 um teor de humidade inferior, apresenta maior capacidade de retenção de água, e consequentemente, isso reflete-se no teor de água absorvido da argamassa.

Pretendendo-se obter uma argamassa de reboco isolante, é requisito segundo a NP EN 998-1 que se enquadre na categoria W1, isto é, que apresente absorção de água por capilaridade $C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$. Ora, tendo-se obtido como valores $0,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e $0,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, as argamassas são enquadradas na classe W0 não sendo, portanto cumprido este requisito. Esta é uma propriedade que deverá ser melhorada, bastando para isso incrementar a percentagem de hidrofugante em cada formulação.

7.3.5 Permeabilidade ao Vapor de Água

Na Tabela 22 são apresentados os resultados obtidos para a Permeância (Λ), para a permeabilidade ao vapor de água (W_{vp}) e para o coeficiente de permeabilidade (μ) das várias amostras ensaiadas. Os valores de $\Delta G/\Delta t$ correspondem ao declive da reta obtida a partir da relação entre a massa do copo e o tempo (ver Anexo A).

Tabela 22 – Resultados obtidos de permeabilidade ao vapor de água para as amostras de ensaio.

Amostra	$\Delta G/\Delta t$ (kg/s)	Λ (kg/m².s.Pa)	W_{vp} (kg/m.s.Pa)	μ
Padrão	-6×10^{-9}	$2,596 \times 10^{-10}$	$5,192 \times 10^{-12}$	37,4
amostra A	-1×10^{-8}	$4,363 \times 10^{-10}$	$8,726 \times 10^{-12}$	22,2
amostra B	-1×10^{-8}	$4,363 \times 10^{-10}$	$8,726 \times 10^{-12}$	22,2
amostra C	-1×10^{-8}	$4,363 \times 10^{-10}$	$8,726 \times 10^{-12}$	22,2
amostra D	-1×10^{-8}	$4,363 \times 10^{-10}$	$8,726 \times 10^{-12}$	22,2
amostra E	-1×10^{-8}	$4,363 \times 10^{-10}$	$8,726 \times 10^{-12}$	22,2
amostra F	-2×10^{-8}	$8,913 \times 10^{-10}$	$1,783 \times 10^{-11}$	10,9

Qualquer uma das amostras que incorpora resíduo, apresenta um coeficiente de permeabilidade ao vapor inferior à amostra Padrão, o que significa que a resistência à transmissão do vapor de água é também inferior. Isto traduz-se numa vantagem, uma vez que se obtêm argamassas mais permeáveis.

A permeabilidade ao vapor de água é um parâmetro que é favorecido pela porosidade das argamassas. Sendo as argamassas com resíduo, materiais mais porosos (conforme se irá confirmar no capítulo 7.3.6.) apresentam, naturalmente uma maior permeabilidade. Seria de esperar também que o coeficiente de permeabilidade ao vapor fosse tanto menor quanto maior a incorporação de resíduo, contudo tal não se verificou. Apenas se confirmou essa redução para o caso da amostra F, que incorpora 20% do resíduo 3. De forma a esclarecer este comportamento deveria repetir-se o ensaio e realizar três provetes para cada amostra. A etapa da execução do provete, nomeadamente a fase de preparação da superfície do mesmo poderá condicionar o comportamento de permeabilidade.

A partir destes resultados, pode-se afirmar que a incorporação de resíduo melhora as propriedades de permeabilidade ao vapor da argamassa, contudo, a única que cumpriria o requisito da norma NP EN 998-1 ($\mu \leq 15$), seria a amostra F.

7.3.6 Porosidade Aparente

A Tabela 23 compila os resultados obtidos para determinação da porosidade aparente das várias amostras. As siglas mA, mB e mC identificam as massas dos provetes secos, saturados e saturados submersos em água, respetivamente.

Tabela 23 – Apresentação dos resultados obtidos de Porosidade para as amostras de ensaio.

	mA (g)	mB (g)	mC (g)	Porosidade (%)	Média (%)
Padrão	331,54	405,27	148,38	28,70	28,70
	332,81	407,76	151,02	29,19	
	321,54	395,00	138,98	28,69	
amostra A	215,99	305,49	64,58	37,15	37,01
	202,81	291,39	50,33	36,75	
	207,18	296,52	55,14	37,01	
amostra B	185,72	278,28	38,55	38,61	39,22
	194,25	288,61	48,04	39,22	
	199,06	297,88	53,32	40,41	
amostra C	193,14	294,46	49,79	41,41	41,41
	189,78	292,38	47,40	41,88	
	191,88	292,25	47,62	41,03	
amostra D	222,35	313,02	65,28	36,60	36,89
	216,26	306,28	62,26	36,89	
	213,63	305,38	60,94	37,53	
amostra E	175,46	263,60	26,47	37,17	37,31
	175,42	263,86	26,79	37,31	
	194,67	293,16	49,40	40,40	
amostra F	181,08	278,76	36,83	40,38	38,11
	155,43	244,88	10,18	38,11	
	156,93	244,57	12,20	37,72	

A partir dos resultados obtidos constata-se que, qualquer uma das argamassas que incorpora resíduo apresenta porosidade significativamente superior à amostra Padrão. A porosidade aumenta também, com o aumento das quantidades de resíduo incorporadas não sendo, contudo, esse incremento tão significativo.

A porosidade das argamassas encontra-se intimamente relacionada com o parâmetro apresentado anteriormente, a permeabilidade ao vapor de água. Quanto maior a porosidade de uma argamassa maior será a sua permeabilidade e isso, confirma-se, quando se comparam os resultados da amostra Padrão com os das restantes amostras. O fato do incremento da

porosidade, em função do aumento da percentagem de incorporação de resíduo, não ser muito significativo, poderá justificar a obtenção dos mesmos valores de coeficiente de permeabilidade para qualquer uma das amostras.

7.3.7 Retração

Na Tabela 24 são apresentados os resultados de retração livre das argamassas obtidos por medição da variação das dimensões dos provetes.

Tabela 24 – Apresentação dos resultados obtidos de retração para as amostras de ensaio.

	Comprimento inicial (mm)	Comprimento final (mm)	Retração (mm/m)	Média (mm/m)
Padrão	159,54	159,32	1,38	1,50
	159,48	159,24	1,50	
	159,30	159,05	1,57	
amostra A	159,49	158,94	3,45	3,58
	159,42	158,85	3,58	
	159,40	158,82	3,64	
amostra B	159,59	158,82	4,82	4,39
	159,46	158,76	4,39	
	159,50	158,82	4,26	
amostra C	159,63	158,70	5,83	5,89
	159,55	158,60	5,95	
	159,59	158,65	5,89	
amostra D	159,72	159,24	3,01	3,01
	159,55	159,03	3,26	
	159,66	159,21	2,82	
amostra E	159,79	159,25	3,38	3,32
	159,52	159,00	3,26	
	159,60	159,07	3,32	
amostra F	159,64	159,09	3,45	3,63
	159,60	159,00	3,76	
	159,56	158,98	3,63	

Conforme se pode constatar pelos resultados obtidos, a incorporação do resíduo de madeira contribui para um maior retração das argamassas, sendo tanto maior quanto maior a sua percentagem de incorporação.

A amostra Padrão apresenta o valor mais baixo de 1,5 mm/m e a amostra C apresenta o valor mais elevado, de 5,89 mm/m. De salientar que as amostras que incorporam o resíduo 3 apresentam valores de retração inferiores comparativamente com as amostras que incorporam o resíduo 1. Isto poderá explicar-se com base no diferente teor de humidade de cada resíduo. O resíduo 1 apresenta maior teor de humidade do que o resíduo 3, significa que para a mesma percentagem de água de amassadura, a argamassa que incorpora o resíduo 1, terá uma maior massa de água para evaporar, sofrendo conseqüentemente uma maior redução no seu volume, apresentando uma maior retração.

O aumento da retração nas argamassas que incorporam resíduo é, sem dúvida penalizador pois, quanto mais elevado for o valor da retração maior é a sua tendência em fissurar, condicionando a sua durabilidade, característica esta não desejada para uma argamassa de reboco.

7.3.8 Módulo de Elasticidade Dinâmico

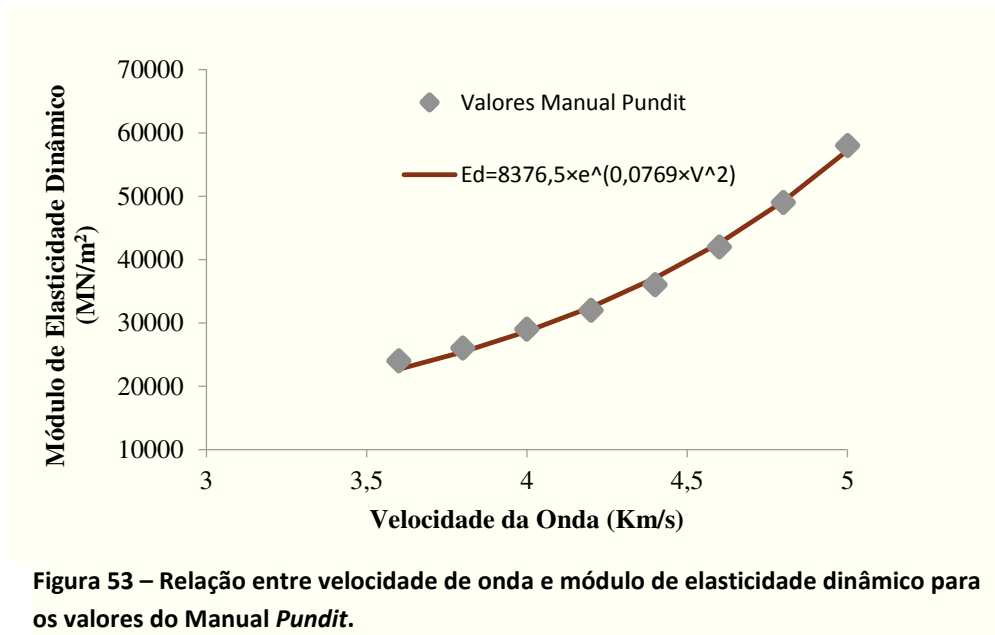
Na Tabela 25 são apresentados os resultados obtidos para o tempo que a onda ultrassônica leva a percorrer o comprimento de cada provete ($d=1,6 \times 10^{-4}$ km) e as respectivas velocidades de onda.

Tabela 25 – Resultados obtidos para a velocidade de onda ultrassônica para as amostras de ensaio.

	$10^{-6} \times \text{Tempo (s)}$			$10^{-6} \times$ Média (s)	Velocidade (km/s)
Padrão	63,7	63,6	63,5	63,6	2,52
amostra A	103,5	103,4	102,8	103,2	1,55
amostra B	107,6	107,5	107,3	107,5	1,49
amostra C	114,8	114,7	114,2	114,6	1,40
amostra D	104,4	104,2	103,8	104,1	1,54
amostra E	117,3	117,2	117,0	117,2	1,37
amostra F	128,1	128,0	127,8	128,0	1,25

O manual do equipamento Pundit, apresenta o valor para o módulo de elasticidade dinâmico em função da velocidade de onda ultrassônica, contudo esses valores tabelados, apresentados na Tabela 9, são para velocidades de onda superiores às obtidas.

Como tal, foi necessário adoptar uma metodologia de cálculo de forma a determinar os respetivos valores para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Yıldırım & Sengul (2010) estabelecem a seguinte equação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de onda: $E_d = 6 \times e^{0,076 \times V^2}$. Através da função solver do excel, tentou-se ajustar esta equação aos valores tabelados do manual do Pundit, tendo-se obtido uma nova equação: $E_d = 8376,5 \times e^{0,0769 \times V^2}$. Esta equação ajusta-se adequadamente aos dados tabelados, conforme se verifica pela Figura 53.



Posto isto, utilizou-se esta equação encontrada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico por extrapolação para os valores de velocidade de onda obtidos (Figura 54).

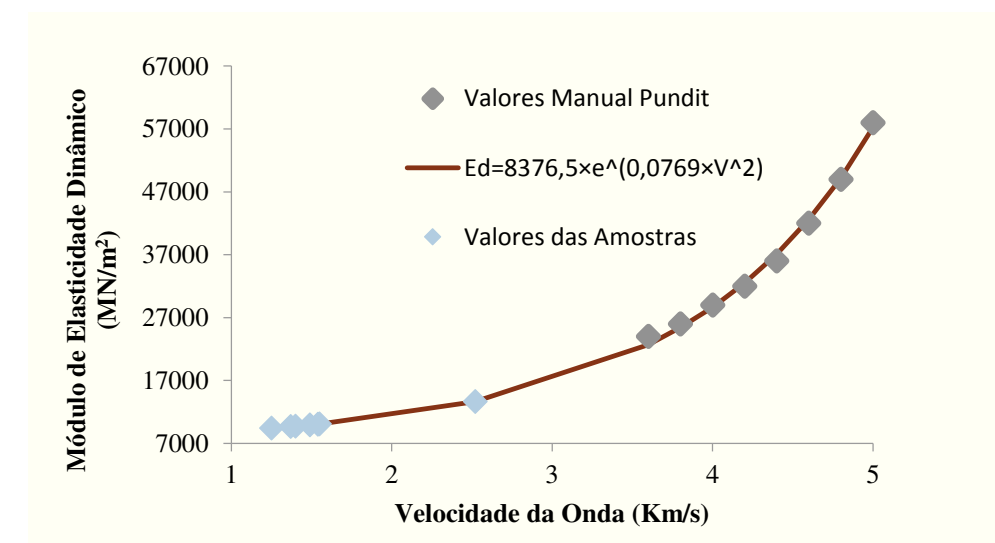


Figura 54 - Relação entre velocidade de onda e módulo de elasticidade dinâmico para as amostras de ensaio.

Na Figura 55 são apresentados os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, para cada uma das amostras de ensaio.

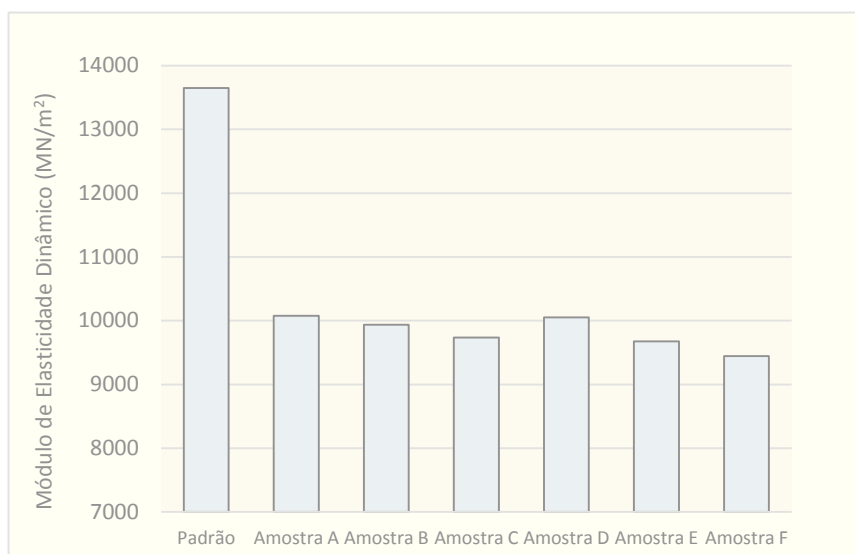


Figura 55 – Valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, para as amostras de ensaio.

Conforme seria de esperar, e no seguimento dos resultados obtidos da ductilidade, obteve-se para a amostra Padrão, módulo de elasticidade dinâmico significativamente superior comparativamente às amostras que incorporam resíduo. Ora, quanto maior o módulo de elasticidade dinâmico, menor é a capacidade da argamassa em se deformar, menor é sua elasticidade. Concluiu-se, portanto, que a incorporação de resíduo nas argamassas melhora a capacidade de deformação, sendo tanto melhor quanto maior for a sua percentagem de incorporação.

Comparando as argamassas que incorporam resíduo 1 com as que incorporam resíduo 3, constata-se que o resíduo 3 produz argamassas ligeiramente mais deformáveis, quando comparando com as mesmas percentagens de incorporação do resíduo 1. Mesmo sendo uma diferença pouco significativa, era este o comportamento que se previa pois, sendo as amostras D, E e F, argamassas mecanicamente mais fracas, seria de esperar uma melhor capacidade de deformação.

7.3.9 Higroscopicidade

Na Tabela 26 são apresentadas as massas dos provetes húmidos (m_h) e secos (m_s) e respetivo teor de humidade (u) para as amostras ensaiadas.

Tabela 26 – Resultados obtidos dos teores de humidade para as amostras de ensaio.

		65% HR	74% HR	82% HR
Padrão	m_h (g)	23,00	23,19	23,37
	m_s (g)	22,55	22,55	22,55
	u (%)	2,00	2,84	3,64
amostra A	m_h (g)	17,39	17,57	17,74
	m_s (g)	16,96	16,96	16,96
	u (%)	2,54	3,60	4,60
amostra B	m_h (g)	15,82	16,00	16,19
	m_s (g)	15,39	15,39	15,39
	u (%)	2,79	3,96	5,20
amostra C	m_h (g)	15,54	15,73	15,92
	m_s (g)	15,06	15,06	15,06
	u (%)	3,19	4,45	5,71
amostra D	m_h (g)	17,17	17,33	17,48
	m_s (g)	16,68	16,68	16,68
	u (%)	2,94	3,90	4,80
amostra E	m_h (g)	13,88	14,00	14,16
	m_s (g)	13,45	13,45	13,45
	u (%)	3,20	4,09	5,28
amostra F	m_h (g)	15,67	15,88	16,08
	m_s (g)	15,17	15,17	15,17
	u (%)	3,30	4,68	6,00

Obtidos estes resultados, procedeu-se posteriormente ao ajuste de uma função matemática aos valores obtidos. Foi utilizada a equação empírica de Freiesleben Hansen, que foi desenvolvida para o betão endurecido, aplicável tanto para a adsorção como desadsorção (Hansen, 1986):

$$u = u_h \left(1 - \frac{\ln \phi}{A}\right)^{1/n} = u_h \times \exp \left[-\frac{1}{n} \times \ln \left(1 - \frac{\ln \phi}{A}\right) \right] \quad (\text{Equação 23})$$

Onde u_h é o teor de umidade higroscópica máximo, A é uma relação entre esse valor e o teor de umidade não evaporável, ϕ é a umidade relativa e n é um expoente fixado empiricamente (Hansen, 1986). Utilizando a função solver do excel, ajustou-se a equação anterior aos valores obtidos, tendo-se obtido as equações apresentadas nas Figura 56 e Figura 57.

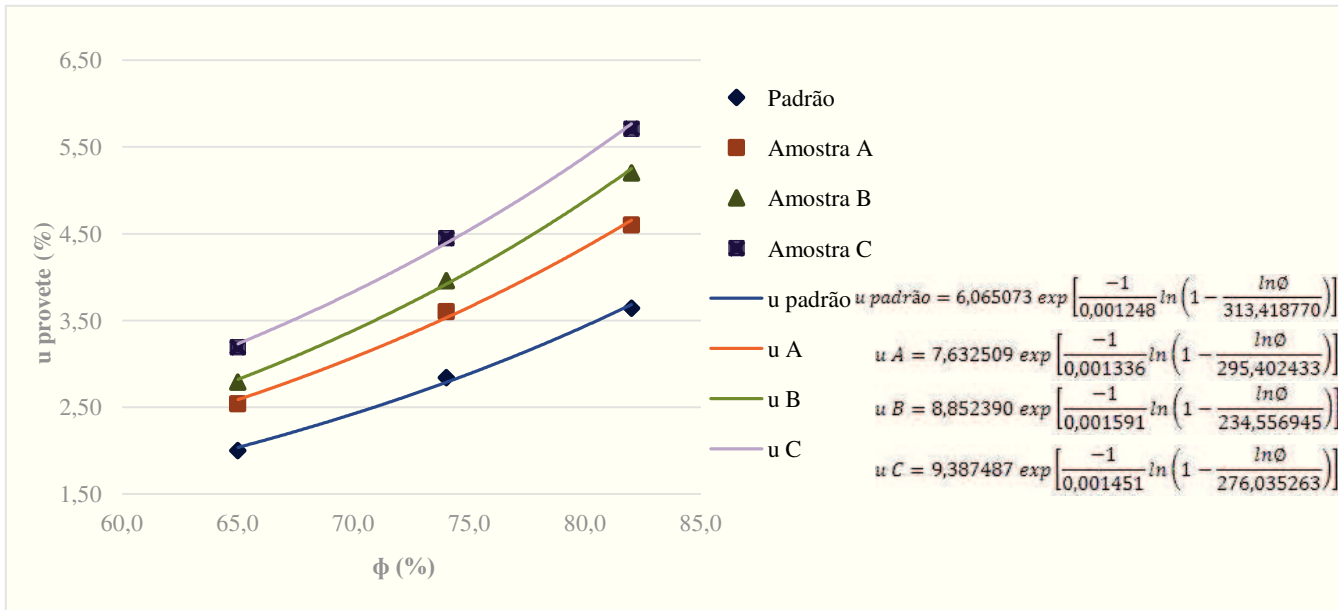


Figura 56 - Curvas higroscópicas para as amostras Padrão, A, B e C.

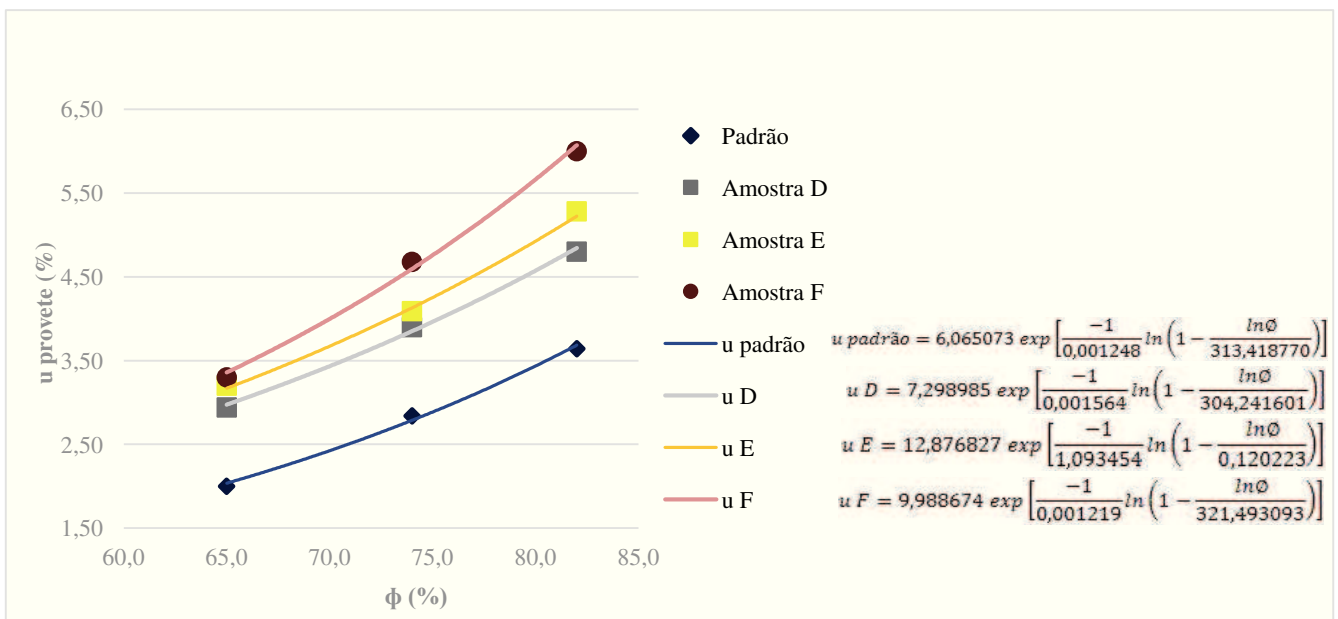


Figura 57 - Curvas higroscópicas para as amostras Padrão, D, E e F.

Pelos resultados obtidos constata-se que independentemente da amostra, à medida que estas vão sendo submetidas a ambiências com humidades relativas (HR) superiores, maior é o número de moléculas de água que são adsorvidas, apresentando teores de humidade também superiores. As equações de ajuste obtidas descrevem esse comportamento crescente.

Para o mesmo valor de HR, as amostras que incorporam resíduo apresentam teores de humidade superior à amostra Padrão, sendo tanto maior quanto maior a percentagem de resíduo incorporado. Este era o comportamento esperado, uma vez que o material lenhoso é tipicamente higroscópico, tende permanentemente a equilibrar o seu teor de humidade com o estado higrométrico e a temperatura do ambiente em que se encontra.

Para além disso, constata-se ainda diferença de adsorção entre as amostras que incorporam o resíduo 1 e o resíduo 3, tendo-se obtido valores superiores para o resíduo 3, que corresponde às amostras D, E e F. Sendo o resíduo 3 totalmente seco, a sua capacidade de adsorção será superior à do resíduo 1 e, como tal, as amostras A, B e C alcançam o equilíbrio com o meio mais rapidamente.

As amostras com incorporação de resíduo, apesar de apresentarem teor de humidade superior à amostra Padrão, continua a ser significativamente inferior à adsorção da madeira no seu estado puro, o resíduo quando envolvido na matriz cimentícia adquire resistência à humidade (Figura 58).

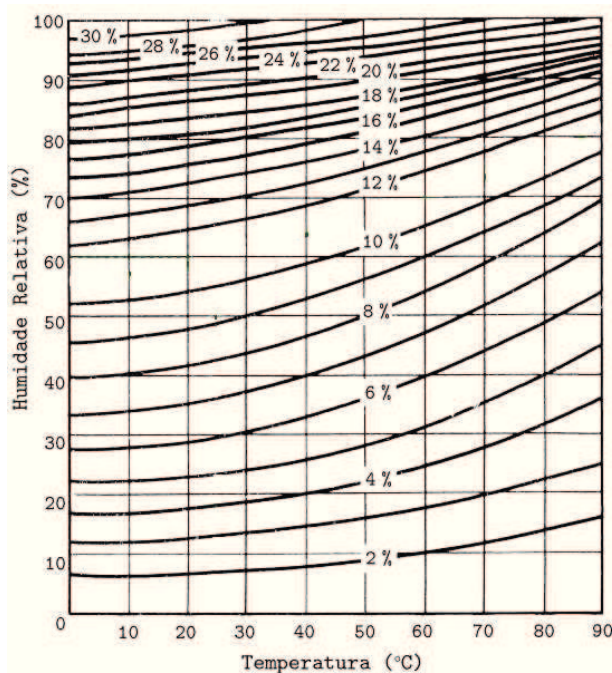


Figura 58 – Curvas higroscópicas de adsorção da madeira (Machado, 2006).

7.3.10 Condutibilidade Térmica

A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos diretamente a partir do equipamento λ -Meter EP500e, de condutibilidade térmica e resistência térmica para as várias amostras de ensaio (amostras com resíduo 1 e granulado de cortiça). Os valores de condutibilidade são obtidos a partir da fórmula de cálculo apresentada na equação 22 e a resistência térmica a partir da equação 2.

Tabela 27 – Resultados obtidos de condutibilidade e resistência térmica, para as amostras de ensaio.

	Espessura (m)	Área (m ²)	Fluxo de calor (W/m ²)	Condutibilidade Térmica [W/(m.°C)]	Condutibilidade Térmica Média [W/(m.°C)]	Resistência Térmica Média (m ² .°C/W)
Padrão	0,0423	0,0224	4,2	0,5348	0,5386	0,08
	0,0436	0,0225	3,8	0,4968		
	0,0393	0,0225	5,0	0,5841		
amostra A	0,0306	0,0226	3,1	0,2762	0,2564	0,12
	0,0313	0,0226	2,7	0,2488		
	0,0288	0,0226	2,9	0,2442		
amostra B	0,0397	0,0225	1,8	0,2152	0,2125	0,18
	0,0383	0,0225	1,9	0,2096		
	0,0393	0,0226	1,8	0,2127		
amostra C	0,0398	0,0226	1,4	0,1619	0,1571	0,25
	0,0395	0,0225	1,3	0,1531		
	0,0385	0,0225	1,4	0,1564		
amostra com granulado de cortiça	0,0398	0,0225	1,3	0,1534	0,1507	0,27
	0,0396	0,0225	1,3	0,1466		
	0,0413	0,0226	1,2	0,1521		

Dos resultados obtidos constata-se que as amostras com incorporação de resíduo (amostras A, B e C) apresentam valores de condutibilidade térmica inferior, comparativamente à amostra Padrão. Isto significa que o resíduo de madeira melhora as propriedades de isolamento das argamassas, aumentando a sua resistência térmica. Esta capacidade de isolamento é tanto melhor quanto maior a percentagem de incorporação de resíduo.

A amostra com granulado de cortiça é aquela que apresenta o valor de condutibilidade térmica mais baixo. O objetivo em ensaiar uma argamassa desta natureza foi para comparar a capacidade de isolamento do resíduo com a cortiça. Atualmente já existem no mercado argamassas que incorporam granulados de cortiça, sendo identificadas como uma solução

que melhora o desempenho térmico dos edifícios. Se compararmos os resultados da amostra que incorpora cortiça (8%) com a amostra que possui percentagem de resíduo mais aproximada a esta, a amostra A (10%), constata-se que a amostra com cortiça apresenta melhores resultados. Apenas a amostra C (20%) aproxima-se destes valores de condutibilidade térmica. Será então necessário uma maior percentagem de incorporação de resíduo comparativamente à cortiça, para se obterem os mesmos valores de condutibilidade térmica.

Segundo a NP EN 998-1, uma argamassa de reboco para ser considerada uma argamassa de isolamento térmico, deve apresentar condutibilidade térmica $\lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$ ou $\lambda \leq 0,1 \text{ W/(m.K)}$, sendo classificada de T2 ou T1, respetivamente, conforme referido na Tabela 2. Considerando este referencial, apenas a amostra C e a amostra com granulado de cortiça podem ser consideradas argamassas com características isolantes, enquadrando-se na classe T2.

Evidentemente que, mesmo para estas amostras com valores de condutibilidade mais baixos, as suas capacidades de isolamento não são comparáveis a um material isolante (Tabela 7). Estes materiais apresentam condutibilidade térmica na ordem de $0,037 - 0,045 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$, ao passo que as argamassas apresentam entre $0,10 - 0,20 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$. No entanto, tratando-se de argamassas leves, é possível manipular a sua espessura de aplicação de forma a se alcançar uma resistência térmica superior. Utilizando, para a amostra C, uma espessura de aplicação de cerca de 5 cm, consegue-se incrementar a resistência térmica para $0,32 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$ o que, segundo o Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril (2006), é suficiente para se ter um isolante térmico ($R > 0,3 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$).

Analisando do ponto de vista económico, a utilização do resíduo de madeira é mais vantajosa comparativamente com o granulado de cortiça. Este granulado, mesmo sendo um desperdício da indústria cortiça, tem associado um custo de cerca de $50\text{€}/\text{m}^3$ (fonte: Amorim Isolamentos, S.A.), já o resíduo de madeira tem um custo significativamente inferior, cerca de $10,5\text{€}/\text{m}^3$ (fonte: Sopromad). Sabendo que o granulado de cortiça tem massa volúmica, $\rho = 75 \text{ kg}/\text{m}^3$, é possível obter uma comparação dos preços de custo de cada formulação (Tabela 28).

Tabela 28 – Preço de custo/kg da argamassa da amostra C e amostra com granulado de cortiça.

Amostra	amostra C (20% resíduo)	amostra com granulado de cortiça (8%)
Custo	0,082€/kg	0,125€/kg

O preço de custo da amostra C continua a ser inferior à amostra com granulado de cortiça, mesmo com uma percentagem de incorporação de resíduo significativamente superior à percentagem de granulado de cortiça.

7.3.11 Resistência aos Ciclos Gelo-degelo

Foi possível a realização dos 15 ciclos de gelo-degelo, conforme programado inicialmente. Os provetes foram avaliados visualmente a cada 5 ciclos e, uma vez que não foram detetados sinais de degradação, prosseguiram-se com os ciclos até completar os 15 previstos. As Figura 59 e Figura 60 apresentam os provetes após sujeitos aos rigorosos 15 ciclos gelo-degelo.



Figura 59 – Provetes das amostras A, B e C após 15 ciclos gelo-degelo.



Figura 60 – Provetes das amostras C e amostra com granulado de cortiça (identificada como amostra D).

De um modo geral, após os 15 ciclos de gelo-degelo, todas as amostras se apresentavam visivelmente bem coesas, e em bom estado de conservação. Foram avaliadas as resistências mecânicas à flexão e compressão destes provetes, e comparadas com as resistências dos provetes, com o mesmo tempo de cura, mas sem serem sujeitos aos ciclos de gelo-degelo (Figura 61 e Figura 62).

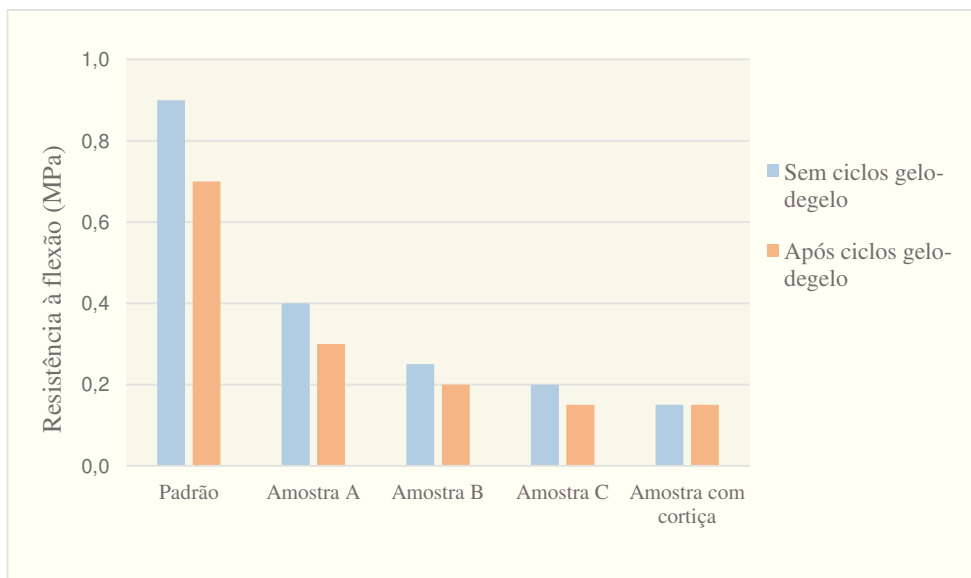


Figura 61 – Resultados da resistência à flexão das amostras após e sem ciclos gelo-degelo.

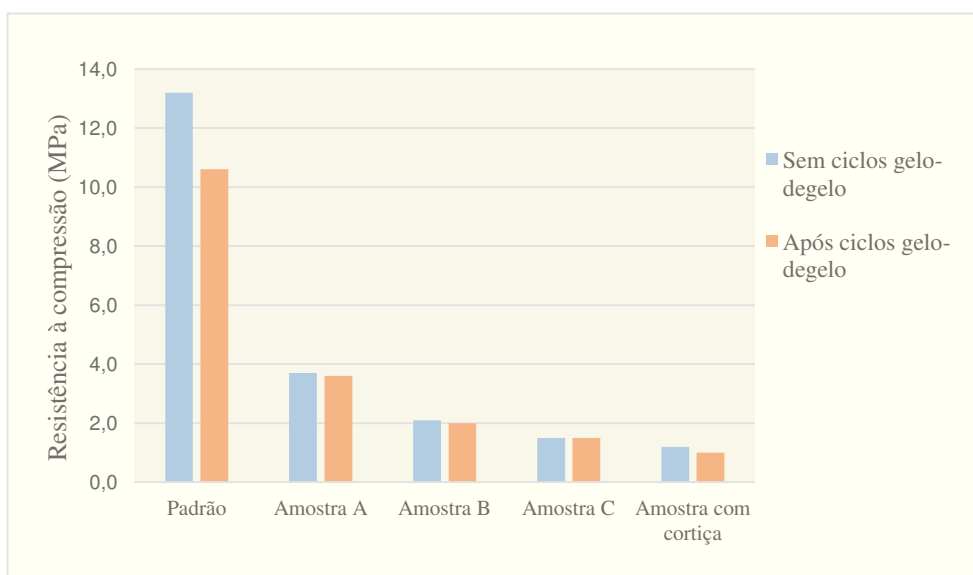


Figura 62 – Resultados da resistência à compressão das amostras após e sem ciclos gelo-degelo.

Comparando os resultados obtidos das amostras após ciclos gelo-gelo, com os resultados das amostras que não foram submetidas aos ciclos, constata-se que as argamassas com incorporação de resíduo e granulado de cortiça, apresentam uma resistência superior à amostra Padrão. Esta superior capacidade de resistência das amostras A, B, C e a amostra com cortiça deve-se ao fato de serem argamassas mais porosas. Os espaços vazios existentes na matriz da argamassa são locais de expansão e que permitem compensar o aumento de volume provocado pela congelação da água atenuando, deste modo, a pressão que se cria no interior da argamassa.

Assim sendo, a porosidade é uma característica que favorece o comportamento das argamassas quando sujeitas a condições climatéricas adversas e, neste sentido, a incorporação de resíduo revelou-se ser vantajosa.

8. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo fornecer um contributo para o desenvolvimento de argamassas sustentáveis tendo-se incorporado nestas, resíduo da serragem da madeira (pinho).

As argamassas de revestimento desenvolvidas utilizaram resíduo, em substituição do inerte silicioso, com dois teores de humidade diferentes: resíduo 1, com cerca de 10% de humidade e resíduo 3, com cerca de 1,4% de humidade. As argamassas foram preparadas com 10%, 15% e 20% de incorporação do resíduo 1 (amostras A, B e C, respetivamente) e do resíduo 3 (amostras D, E e F, respetivamente), utilizando como base de comparação a amostra Padrão, sem qualquer adição de resíduo.

Foi caracterizado o resíduo em termos granulométricos, apresentando uma distribuição muito idêntica ao inerte silicioso e, em termos de baridade, sendo significativamente mais leve que a sílica.

Após caracterização do resíduo procedeu-se à determinação das propriedades das várias amostras de argamassa no estado fresco. Foram identificadas as corretas dosagens de água de amassadura para cada amostra, através da realização do ensaio de consistência, constatando-se uma necessidade de água superior para as amostras com maior incorporação de resíduo.

Em relação ao teor de ar e massa volúmica, as amostras com resíduo apresentam teores de ar superiores, e conseqüentemente massas volúmicas inferiores à amostra Padrão. Contudo, este comportamento não é proporcional à percentagem de incorporação de resíduo. As amostras com 15% e 20% apresentam iguais valores de teor de ar e idênticas massas volúmicas. Conclui-se que a argamassa com 15% de incorporação de resíduo terá atingido o seu limite máximo de adsorção de ar na superfície. A obtenção de argamassas mais leves é vantajoso, tendo em conta que isso irá permitir a realização de espessuras de aplicação de argamassas superiores. Estes resultados conduzem a uma maior rentabilidade também para as argamassas que incorporam 15% e 20% de resíduo.

Posteriormente procedeu-se à caracterização das amostras no estado endurecido. Foram avaliadas as resistências mecânicas à flexão e compressão das várias amostras, constando-se que estas são significativamente reduzidas pela adição de resíduo, sendo essa redução tanto maior quanto maior a percentagem de incorporação. Para além disso, o resíduo 3 produz argamassas ligeiramente mais fracas que o resíduo 1. Apesar das resistências serem inferiores, os valores obtidos são perfeitamente adequados para a aplicação em causa.

Conforme constatado para a massa volúmica da pasta, também a massa volúmica do provete endurecido diminui com a adição de resíduo, tendo-se alcançado os valores mais baixos para as amostras E e F (650 a 670 kg/m^3).

Em termos de aderência ao suporte, o valor quantitativo da adesão diminui ligeiramente para as amostras com resíduo, não havendo significativa diferenciação entre elas. O que as diferencia é o tipo de rutura que ocorre entre a argamassa e o suporte. Posto isto, as amostras que apresentam melhor comportamento são as que incorporam 15% e 20% de resíduo (resíduo 1 ou resíduo 3), uma vez que foram aquelas que apresentaram uma rutura coesiva na argamassa.

No que diz respeito à absorção de água por capilaridade, a incorporação de resíduo, quer seja de resíduo 1 ou resíduo 3, provoca um incremento neste parâmetro. As amostras A, B e C, apesar de apresentarem um valor superior na absorção relativamente à amostra Padrão, é inferior quando comparado com as amostras D, E e F. Neste sentido, a utilização do resíduo 1 é a mais viável, obtendo-se para qualquer uma destas amostras valores de $0,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$.

Relativamente à permeabilidade ao vapor e porosidade, dois parâmetros intimamente relacionados, verifica-se que a adição de resíduo produz argamassas mais porosas e, conseqüentemente mais permeáveis. Não ocorreram significativas variações de porosidade em função das percentagens de incorporação de resíduo daí, também se terem obtido valores de permeabilidade iguais para todas as amostras, à exceção da amostra F.

A retração foi outro parâmetro avaliado e, neste caso, a incorporação de resíduo mostrou ser prejudicial na medida em que, aumenta a retração das argamassas, sendo tanto maior quanto maior a sua incorporação. O resíduo 1 produz argamassas com retração superior ao resíduo 3. As amostras A, B e C sofrem uma maior variação de volume, associada à evaporação da humidade que o próprio resíduo continha.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico, as amostras com resíduo apresentam módulo de elasticidade inferior e como tal, capacidade de deformação superior, comparativamente com a amostra Padrão, sendo tanto melhor quanto maior a percentagem de incorporação. O resíduo 3 produz argamassas ligeiramente mais deformáveis que o resíduo 1.

Ao nível da higroscopicidade, as amostras com adição de resíduo, quer seja resíduo 1 ou resíduo 3, têm tendência a adsorver maior número de moléculas de água, quando comparando com a amostra Padrão, aumentando essa capacidade de adsorção com o aumento da dosificação de resíduo. As curvas higroscópicas, construídas com base no modelo de Hansen, evidenciam também a crescente adsorção para ambientes com humidades relativas superiores. Este comportamento já era previsível uma vez que a madeira é um material tipicamente higroscópico. No entanto, envolvendo o resíduo da madeira numa matriz cimentícia, os teores de humidade são significativamente reduzidos, quando comparando com a madeira pura.

Os ensaios seguintes, de condutibilidade térmica e resistência aos ciclos de gelo-degelo, apenas foram realizados para as amostras com resíduo 1. Na maioria das propriedades avaliadas até este momento, não se identificaram diferenças significativas entre utilizar o resíduo 1 ou o resíduo 3. Como tal, optou-se pela solução que seria mais viável em termos práticos, pois realizar um processo de secagem adicional, acarretaria significativos custos de produção, e não se alcançariam mais-valias acrescidas.

A avaliação da condutibilidade térmica das amostras foi crucial, permitindo aferir acerca da capacidade de isolamento térmico do resíduo de madeira. Este produto melhora o poder isolante das argamassas, tendo-se obtido valores de condutibilidade térmica inferiores para percentagens de incorporação de resíduo superiores. A amostra C é aquela que apresenta condutibilidade térmica mais baixa ($\lambda=0,1571 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$) e, segundo a EN 998-1, apenas esta amostra é identificada como argamassa de isolamento térmico, enquadrando-se na classe T2 ($\lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$). O resíduo de madeira, quando comparado com o granulado de cortiça, apresenta poder de isolamento térmico inferior, contudo o produto final constitui uma solução mais viável economicamente.

Em relação aos ciclos de gelo-degelo as amostras ensaiadas apresentaram bom comportamento, possuindo as amostras com resíduo e cortiça resistência superior à amostra

Padrão. A estrutura porosa que estas argamassas possuem permitiu-lhes absorver as tensões criadas na argamassa devido ao congelamento da água no seu interior.

Pela análise de todos os resultados, foram identificadas mais-valias na utilização do resíduo de madeira em argamassas de revestimento e, neste sentido, procedeu-se à identificação da argamassa que apresenta melhor desempenho global - amostra C (incorporação de 20% de resíduo 1). A Tabela 29 reúne as propriedades finais desta argamassa, comparando com a amostra Padrão e amostra com incorporação de cortiça.

Tabela 29 – Síntese das características de desempenho da amostra C, amostra padrão e amostra com granulado de cortiça.

	amostra C	amostra Padrão	amostra com cortiça	
Argamassa no estado fresco	Água de amassadura (%)	65,0	30,1	59,0
	Consistência (mm)	145,3	145,0	-
	Teor de ar (%)	29,0	15,5	-
	Massa volúmica (kg/m ³)	1020	1620	910
	Consumo [kg/(m ² .cm)]	5,62	11,8	-
	Resistência à flexão (N/mm ²) (após 28dias)	0,25	1,0	0,15
Resistência à flexão (N/mm ²) (após 90dias)	0,25	0,6	-	
Resistência à compressão (N/mm ²) (após 28dias)	2,1 (classe CS-II)	14,4 (classe CS-IV)	1,2 (classe CS-II)	
Resistência à compressão (N/mm ²) (após 90dias)	2,2	14,5	-	
Argamassa no estado endurecido	Massa Volúmica (kg/m ³)	710	1270	-
	Aderência ao suporte (N/mm ²)	0,20	0,25	-
	Absorção de água por capilaridade [kg/(m ² .min ^{0,5})]	0,6 (classe W0)	0,30 (classe W1)	0,50 (classe W0)
	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ)	22,2	37,4	-
	Porosidade aparente (%)	41,41	28,7	-
	Retração (mm/m)	5,89	1,50	-
	Módulo de elasticidade dinâmico (MN/m ²)	9738	13647	10004
	Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]	0,1571	0,5386	0,1507
	Resistência aos ciclos gelo-degelo	Cumpre	Cumpre	Cumpre

Obteve-se uma caracterização da argamassa bastante completa, o que permite afirmar que, de um modo geral, a amostra C apresenta uma boa performance. Contudo, existem algumas propriedades que ainda podem ser melhoradas, sendo apresentadas algumas sugestões, no próximo capítulo.

8.1 Sugestões de trabalho futuro

As propriedades que ainda podem ser melhoradas são a absorção de água por capilaridade e a própria adsorção de moléculas de água à superfície do material. Incrementando a dosagem dos agentes hidrofóbicos poderão alcançar-se melhores resultados ao nível do comportamento da humidade neste tipo de argamassas.

Para além disso, a principal desvantagem associada a estas argamassas é a retração, que se apresenta muito elevada. É possível compensar esta retração com aditivos de forma a evitar eventuais fissurações do material.

Outro desafio que é ainda colocado, é o de se conseguir obter o resíduo sempre com os mesmos padrões de humidade. O resíduo 1 utilizado foi recolhido de um local onde as condições de armazenamento (humidade e temperatura), não são controladas e, como tal, dependendo da humidade ambiente poderá ter-se um resíduo com maior ou menor percentagem de humidade.

Bibliografia

(26 de 04 de 2013). Obtido de Joinville:

http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/Tipos_de_madeiras.pdf

Alibaba.com. (26 de 04 de 2013). Obtido de http://www.alibaba.com/product-tp/112815611/Pine_Wood_Shavings/showimage.html

APFAC . (2008). Monografias APFAC sobre Argamassas de Construção. Lisboa: Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção.

Araújo, J. (15 de 08 de 2012). Agregados para Argamassas e Concreto.

AREAM. (2009). Qualidade térmica dos edifícios...e qualidade de vida. Madeira: Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira.

Bandeira, R. F. (2009). A correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

Bayer, R., & Lutz, H. (2003). Dry Mortars. Wiley-VCH, Weinheim, 75-82

Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M., Bali, A., & Quéneudec, M. (2006). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling. Elsevier Ltd., 21: 662-668

Botas, S., Rato, V. (2010). Influência da introdução de ar no comportamento de argamassas aos ciclos gelo/degelo. Lisboa. 1-11

Brundtland, G. H. (1987). World Comission on Environment and Development. Tokyo, Japan. 1-11

Building and Construction Authority. (2007). Sustainable Construction - Materials for Buildings. Singapore. 1-72

Cao, J., & Chung, D. (2002). Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar. Elsevier Science Ltd., 32:1657-1661

Claro, J. A. (2007). Resíduos em Portugal – Contribuição para a compreensão dos fluxos de resíduos e materiais de fileiras industriais em Portugal. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

CNS Farnell. (1994) Pundit 6 - Portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester. Operating Manual. Borehamwood, Hertfordshire WD6 1WG.

Coatanlem, P., Jauberthie, R., & Rendell, F. (2005). Lightweight wood chipping concrete durability. Elsevier Ltd., 20: 786-781

Coelho, A.Z., Torgal, F.P., & Jalali, S. (2009). A Cal na Construção. Guimarães: Gráfica Vilaverdense - Artes Gráficas, Lda. 73-86

Coelho, M.A. (01 de 07 de 2007). Produtos industriais a partir de resíduos de madeira e fibras. Valorização de Resíduos Agroindustriais.

Coutinho, J. (1999). Materiais de Construção 1 – Madeiras. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto

Decreto de Lei nº80/2006 de 4 de abril. (2006). Diário da República - I Série-A.

Dikmen, N. (2011). Performance Analysis of the External wall Thermal Insulation Systems applied in Residences. J. of Thermal Science and Technology, 67-76

Dow. (20 de 10 de 2006). Dow - Soluções para a Construção - Isolamento Térmico de Paredes, Correção de Pontes Térmicas. Construlink. 2-4

Eficiência energética de Edifícios. (26 de 04 de 2012). Obtido de <http://twisters.blogs.sapo.pt/13593.html>

EN 1015-10. (1999/A1). Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-12. (2000). Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-18. (2002). Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-3. (1999). Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table) . Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-3. (1999/A2). Methods of test mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-6. (1998/A1). Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-7. (1998). Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar. Brussels: European Committee for Standardization.

Freitas, V. P., Guimarães, A.S., Torres, M.I. (2008). Humidade Ascensional. Porto: FEUP Edições.

Gaede, L. P. F. (2008). Gestão dos Resíduos da Construção Civil no Município de Vitória- Es e normas existentes. Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção.

GetDomainVids.com. (26 de 04 de 2013). Obtido de <http://www.getdomainvids.com/keyword/pine%20sawdust/>

Gonçalves, B.J.S. (2011). Formulações de argamassas controladoras de humidade ambiente. Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. 19-24

Graf, S.H., Johnson, R.H. (1930). The Properties of Cement-Sawdust Mortars, Plain, and with Various Admixtures. Engineering Experiment Station. Origion State Agricultural College. Bulletin Series, No.3.

- Guimarães, E. F.; Silva, R.A.L.; Cruz, M.H.C.; Caixeiro, J.M.R.; Souza, V. (2006). Ensaios Metrológicos na Determinação do Teor de Umidade no Álcool Combustível. Enqualab – Congresso e FERIA da Qualidade em Metrologia. São Paulo - Brasil.
- Hansen, K.K. (1986). Sorption Isotherms - A catalogue. The Technical University of Denmark - Building materials laboratory. Technical Report 162/86. 13-14
- Hassan, M., Burdet, O., Favre, R. (1995). Ultrasonic measurements and static load tests in bridge evaluation. Elsevier Science Ltd. V.28, No.6, 331-337
- Hillig, É., Schneider, V. E., Weber, C., Tecchio, R. D. (2006). Resíduos de Madeira da indústria madeireira – caracterização e aproveitamento. Fortaleza, Brasil.
- Hoxha, D. U.; Ungureanu, V.N.; Belayachi, N.; Do, D.P.; Thevard J.B. (2012). Hydromechanical properties of some mortars used in some ecologic. Trans Tech Publications. 587:6-10
- Jorge, F., Pereira, C., Ferreira, J.M.F. (2004). Wood-cement composites: a review. Springer-Verlag. 62:370-377
- Karade, S.R. (2010). Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. Elsevier. 24:1323-1330
- Kunzel, H.M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart. 1-60
- Lambda. (2013). Lambda-Meßtechnik GmbH Dresden. Obtido de <http://www.lambda-messtechnik.de/en/thermal-conductivity-test-tool-ep500e.html>
- Lima, O.M.; Alves, C.E.S.; Pereira, N.C.; Mendes, E.S. (2004). Moisture equilibrium isotherms for pinus long-fiber cellulose. Acta Scientiarum. Technology. V.26, No.1, 27-32
- Machado, N.C.C.M. (2006). Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1-126
- Mateus, R. (2004). Novas Tecnologias Construtivas com vista à sustentabilidade da Construção. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho. 1-78

Mateus, S. V.N. (2012). Construção Sustentável - Materiais eco-eficientes para a melhoria do desempenho dos edifícios. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.1-169

McDowall, C., Rockwell, C. (1999). Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials - Laboratory Handbook. International Centre for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property. Italy. 1/99:1-32

Nepomuceno, M. S. (1999). Ensaio não destrutivo em betão. Departamento de Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior. Covilhã. 359-367

NP 955. (1973). Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade. IGPAI - Repartição de Normalização. Lisboa

NP EN 1015-19. (2008). 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. Caparica

NP EN 12371. (2006). Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência ao gelo. Instituto Português da Qualidade. Caparica

NP EN 12504-4. (2007). Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Instituto Português da Qualidade. Caparica

NP EN 933-1. (2000). Ensaio das propriedades dos agregados Parte 1: Análise granulométrica – Método de Peneiração. Instituto Português da Qualidade. Caparica

NP EN 933-2. (1999). Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica – Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Instituto Português da Qualidade. Caparica

NP EN 998-1. (04 de 2010). Especificações de argamassas para alvenarias Parte 1 : Argamassas para rebocos interiores e exteriores. Instituto Português da Qualidade. Caparica

Paiva, J.V.; Aguiar, J.; Pinho, A. (2006). Guia Técnico de Reabilitação Habitacional. Instituto Nacional de Habitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. Vol.2, 1ªed.

Panesar, D.K.; Shindman, B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. Elsevier. 34:982-992

Pombeiro, A. J. (1998). Técnicas e Operações Unitárias em Química Laboratorial. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 3ªed.

Portal da Construção Sustentável. (25 de 04 de 2013). Obtido de http://www.csustentavel.com/index_cat.php?cat=14

Saikia, N.; Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. Elsevier. 34:385-401

Sales, A., Souza, F.R.; Santos, W.N.; Zimer, A.M.; Almeida, F.C.R. (2010). Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. Elsevier. 24:2446-2453

Santiago, L. (2009). Capítulo 4 - Materiais e Métodos - Rochas. 28-43

Santos, C. M. (2006). Coeficientes de transmissão Térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE50. Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC. Lisboa. 1-174

Silva, A.G.P. (03 de 07 de 2012). Porosidade e Densidade de Materiais Cerâmicos. Cap.VII. 173-178

Silva, P. C. P. (2006). Térmica dos Edifícios. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho. Cap.3. 23-70

Sousa, A.V.S.; Silva, J.A.R.M. (2000). Manual de Alvenaria de Tijolo. Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica. Coimbra.

Torgal, F. P.; Jalali, S. (26 de 04 de 2010). A sustentabilidade dos Materiais de Construção. Obtido de <http://www.apeb.pt/news7.htm>

Torgal, F. P.; Jalali, S. (20 de 01 de 2010). Eco-Eficiência dos Materiais de Construção. Materiais de Construção. 48-55

Torgal, F.P.; Jalali, S. (2011). Earth Construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Elsevier. 29:512-519

Veiga, M. R.; Malanho, S. (2012). ETICS e Argamassas Térmicas: novos desafios de desempenho e sustentabilidade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa.

Veiga, M. R.; Souza, R.H.F. (2004). Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem. Universidade do Minho. 20:45-56

Yıldırım, H.; Sengul, O. (2010). Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. Elsevier. 25:1645-1652

Anexos

Anexo A

A.1. Permeabilidade ao vapor de Água

A1.1. Apresentação dos gráficos da relação entre a massa do copo e o tempo.

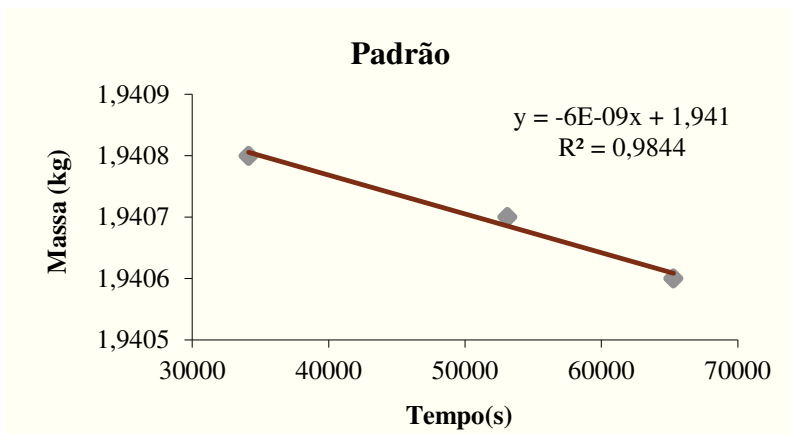


Figura 63 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a *amostra Padrão*.

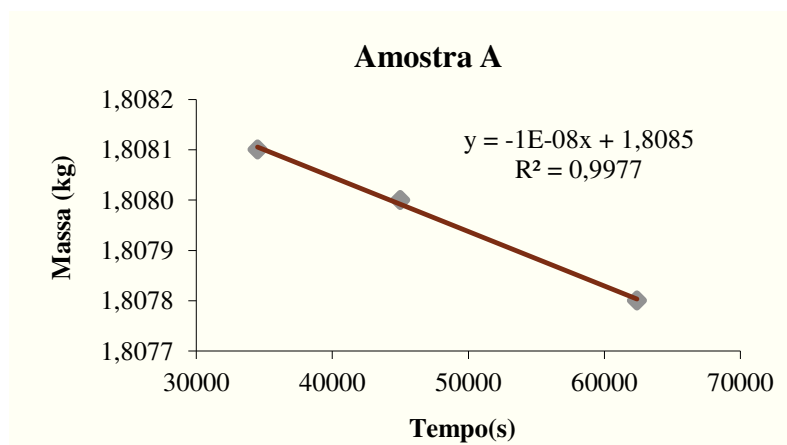


Figura 64 – Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a *amostra A*.

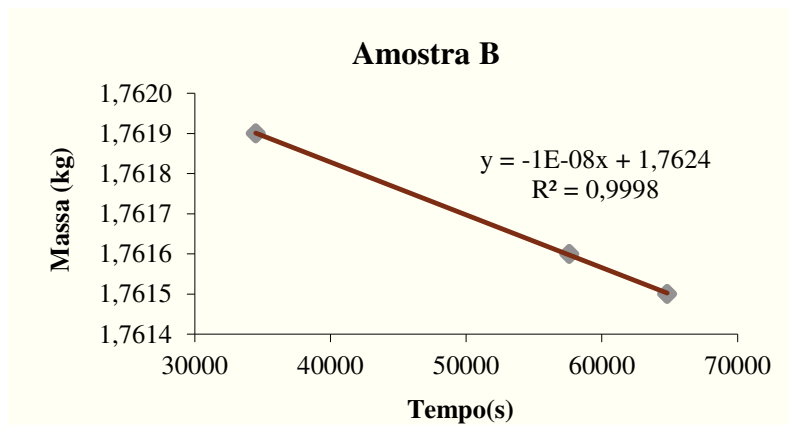


Figura 66 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra B.

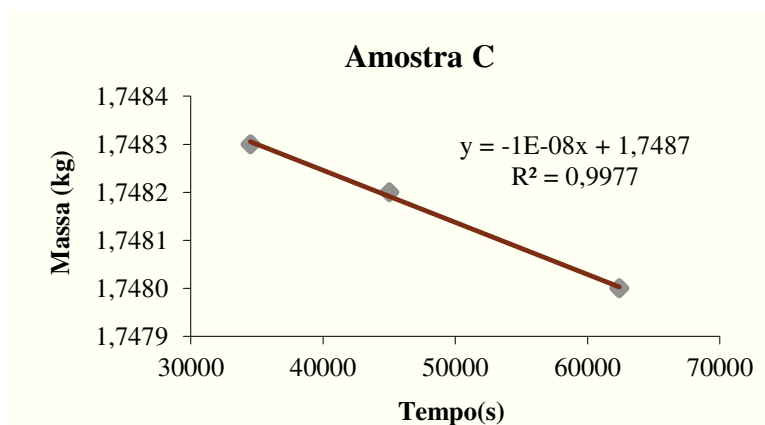


Figura 65 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra C.

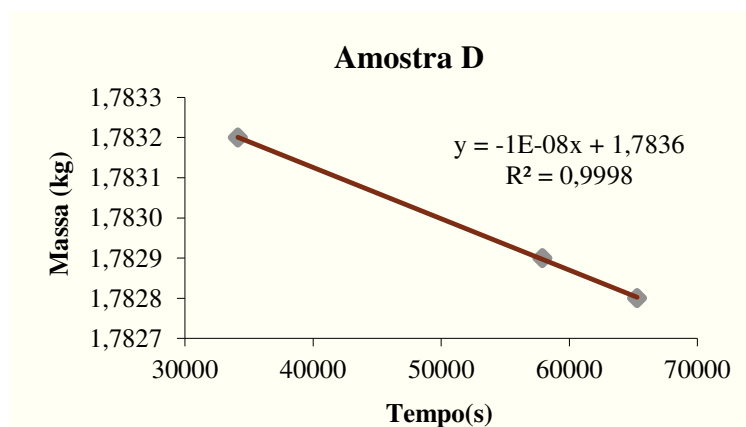


Figura 67 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra D.

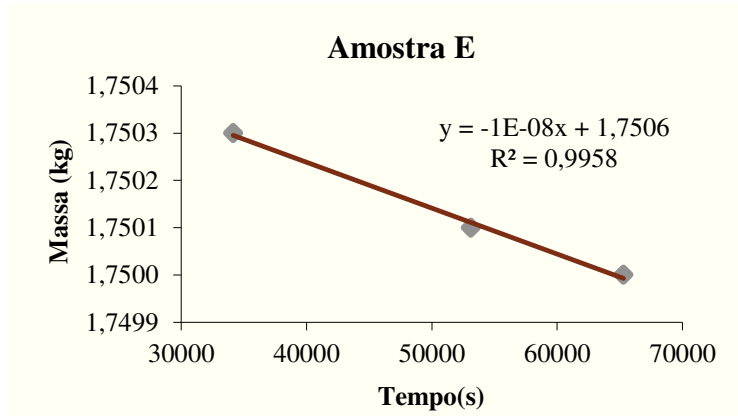


Figura 68 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra E.

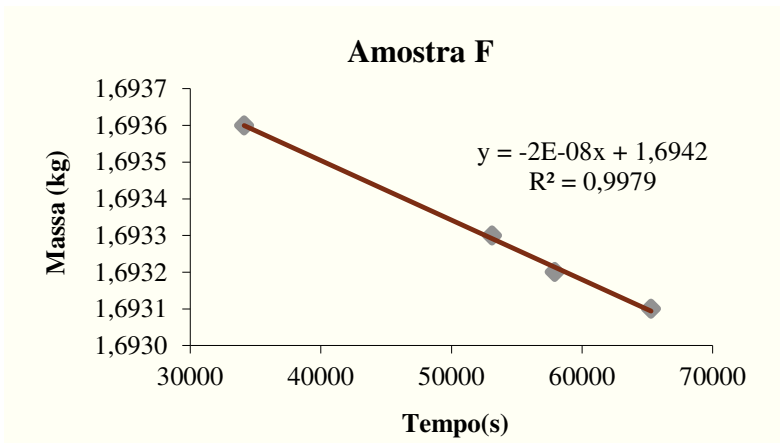


Figura 69 - Representação gráfica da relação entre a massa do copo e o tempo, para a amostra F.