



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Pedro Marques Gouveia

**ANÁLISE AO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS
APÓS APLICAÇÃO NOS SUPORTES**

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Construções, orientada pela Professora Doutora Maria
Isabel Morais Torres e pela Professora Doutora Inês Flores-Colen e
apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Novembro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

João Pedro Marques Gouveia

ANÁLISE AO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS APÓS APLICAÇÃO NOS SUPORTES

ANALYSIS OF MORTARS BEHAVIOR AFTER APPLICATION ON SUPPORTS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e pela Professora Doutora Inês Flores-Colen.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Novembro de 2021



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Com a colaboração institucional:



AGRADECIMENTOS

Este espaço é reservado ao enaltecimento de todas as pessoas e entidades que me auxiliaram na realização deste trabalho, tanto em ambiente laboratorial, de análise ou até mesmo na escrita do documento. A todas elas o meu profundo agradecimento.

Agradeço às minhas orientadoras, Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres por toda a disponibilidade, flexibilidade e conhecimentos transmitidos, e à Professora Doutora Inês Flores-Colen pelo apoio e colaboração.

A mais sentida gratidão ao projeto IF MORTAR (POCI-01-0145-FEDER-032223/ PTDC/ECI-EGC/32223/2017), no âmbito do programa Portugal 2020, financiado pela FEDER através de o programa POCI e ao ITeCons pela cedência das suas instalações e material para a realização da campanha experimental assim como todo o pessoal associado, nomeadamente aos Engenheiros Mestres e estudantes de Doutoramento Rafael Travincas e Poliana Bellei.

Lembrar ainda e agradecer do fundo do meu coração a todas as amizades conquistadas ao longo destes cinco anos, pelos momentos de diversão, de estudo e apoio mútuo no derrubar de diversas barreiras e constante aprendizagem numa das melhores fases das nossas vidas.

Por fim, agradecer aos pilares da minha vida, à minha família. Aos meus pais pelo grandíssimo esforço, dedicação e me terem proporcionado tudo e tanto para um dia chegar a esta fase e conseguir atingir o sonho pelo qual nunca desisti nem nunca me deixaram desistir. À minha irmã agradeço pelo verdadeiro amor que nutrimos e que caminhando lado a lado nos ajudaremos em qualquer circunstância. À minha namorada pela paciência, apoio demonstrado e principalmente pela felicidade que sempre me transmitiu e me fez ser todos os dias melhor que ontem.

Um dos sonhos da minha vida.

Obrigado.

RESUMO

Os revestimentos mais usados nas fachadas de edifícios em Portugal continuam a ser ainda, sem dúvida, os rebocos de argamassas à base de cal ou de cimento, quer sejam tradicionais ou pré-doseadas.

As argamassas usadas nesses revestimentos são sujeitas a estudos, em geral com recurso a provetes executados em laboratório, com diversas configurações e de acordo com as exigências das respetivas normas. Apesar deste facto, o comportamento que as argamassas apresentam dentro dos moldes não será exatamente o mesmo que estas apresentam quando aplicadas em suportes reais, já que as características dos suportes em laboratório comparativamente aos reais são um pouco distintas.

Após a aplicação da argamassa no suporte forma-se uma interface entre ambos, e as consequentes interações que aí se desenvolvem modificam-se ao longo do tempo devido à cinética de hidratação e à absorção do suporte. Assim percebe-se a dependência do suporte e da interface que vai ser criada no comportamento final das argamassas.

Nesse sentido, existem diversas propriedades que merecem ser caracterizadas para avaliar o comportamento das argamassas aquando da aplicação nos suportes, assim como os fenómenos que acontecem no contacto da argamassa com o suporte e que vão obviamente influenciar as conclusões finais do estudo. Essas propriedades vão ser avaliadas no estado endurecido das argamassas.

Como existem muito poucos estudos que relacionem as características das argamassas e suportes, esta dissertação pretende avaliar o comportamento das argamassas após aplicação nos suportes relacionando as propriedades dos dois materiais de construção comparativamente a outros materiais.

No âmbito do projeto IF MORTAR – Estudo Experimental e Numérico da Interface Argamassa-Suporte, em que está envolvida esta dissertação foram caracterizados vários materiais e que vão ser objeto de comparação.

Palavras-chave: Argamassas, Comportamento, Interface, Características, Propriedades, Suportes

ABSTRACT

The most commonly used coatings on building facades in Portugal are still, without a doubt, lime or cement-based mortars, being mainly traditional, in-situ, or pre-dosed.

The mortars used in these coverings are subjected to studies, generally using specimens made in laboratories, with various configurations and in accordance with the requirements of the respective standards. Despite this fact, the behavior that the mortars present inside the molds will not be exactly the same as when applied on real supports, since the characteristics of the supports in the laboratory are somewhat different from the real ones.

After the application of the mortar on the support, an interface is formed between both, and the consequent interactions that develop there are modified over time due to the hydration kinetics and the absorption of the support. Thus, one can see the dependence of the support and the interface that will be created in the mortars' final behavior.

In this sense, there are several properties that deserve to be characterized in order to evaluate the behavior of mortars when applied to supports, as also the phenomena that occur in the contact between the mortar and the support, which will obviously influence the final conclusions of the study. These properties will be evaluated in the hardened state of the mortars.

As there are very few studies that relate the characteristics of mortars and supports, this dissertation aims to evaluate the behavior of mortars after application to supports by relating the properties of the two construction materials compared to other materials.

In the scope of the IF MORTAR project - Experimental and Numerical Study of the Mortar-Support Interface, in which this dissertation is involved, several materials were characterized and will be compared.

Keywords: Mortars, Behavior, Interface, Characteristics, Properties, Supports

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Argamassas de revestimento em Portugal	4
2.1.1 Considerações iniciais	4
2.1.2 Constituição geral das argamassas	5
2.1.3 Aplicação das argamassas	6
2.1.4 Argamassas de cal hidráulica	7
2.1.4.1 Cal hidráulica natural	7
2.1.4.1.1 Cal hidráulica industrial <i>Versus</i> Cal hidráulica natural	11
2.1.4.1.2 Argamassas industriais	11
2.2 Influência das condições do suporte.....	13
2.3 Comportamento das argamassas.....	14
2.3.1 Trabalhabilidade	14
2.3.2 Resistência à fendilhação.....	14
2.3.3 Resistência mecânica (Compressão e Tração).....	15
2.3.4 Capacidade de impermeabilização	17
2.3.5 Permeabilidade ao vapor de água	17
2.3.6 Porosidade	18
2.3.7 Absorção de água e secagem.....	20
2.3.8 Aderência.....	21
2.3.9 Influência da cura	23
2.4 Fenómenos na interface argamassa-suporte	25
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	26
3.1 Introdução.....	26
3.2 Preparação e caracterização da argamassa	26
3.2.1 Espalhamento da argamassa no estado fresco	27

3.2.2	Massa volúmica da argamassa no estado fresco.....	28
3.3	Preparação e caracterização dos suportes.....	29
3.4	Execução dos provetes de ensaio.....	30
3.4.1	Condições de cura.....	31
3.5	Execução dos provetes prismáticos e circulares.....	32
3.6	Ensaio para caracterização dos provetes endurecidos.....	34
3.6.1	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	35
3.6.2	Absorção de água por capilaridade.....	36
3.6.3	Índice de secagem.....	38
3.6.4	Permeabilidade ao vapor de água	39
3.6.5	Módulo de elasticidade dinâmico	42
3.6.6	Resistências à tração por flexão e à compressão	43
3.6.7	Porosimetria por intrusão de mercúrio	44
3.6.8	Aderência através do ensaio <i>pull-off</i>	46
3.7	Ensaio realizados para a caracterização dos suportes	47
4.	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	48
4.1	Introdução.....	48
4.2	Caracterização dos provetes com as argamassas endurecidas.....	48
4.2.1	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	48
4.2.2	Absorção de água por capilaridade.....	49
4.2.3	Índice de secagem.....	49
4.2.4	Permeabilidade ao vapor de água	50
4.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico	51
4.2.6	Resistências à tração por flexão e à compressão	51
4.2.7	Porosimetria por intrusão de mercúrio	52
4.2.8	Aderência através do ensaio <i>pull-off</i>	53
4.3	Caracterização dos suportes.....	54
4.3.1	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	54
4.3.2	Absorção de água por capilaridade.....	54
4.3.3	Permeabilidade ao vapor de água	55

4.3.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio	55
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	56
5.1	Introdução	56
5.2	Argamassas dos moldes / argamassas aplicadas.....	56
5.2.1	Porosidade aberta e absorção por capilaridade.....	56
5.2.2	Porosidade aberta e índice de secagem.....	58
5.2.3	Porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água	60
5.2.4	Porosidade aberta e resistência à compressão	61
5.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração.....	63
5.3	Argamassas após cura corrente e após envelhecimento acelerado.....	63
5.3.1	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	64
5.3.2	Absorção por capilaridade, índice de secagem e permeabilidade ao vapor	65
5.3.3	Resistência à compressão e aderência	67
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXO A - FICHA TÉCNICA.....	A-1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As argamassas de revestimento em edifícios desempenham um papel importante na medida em que conferem a proteção necessária ao suporte onde são aplicadas, tornando o mesmo esteticamente mais aprazível e fundamentalmente contribuem para a sua impermeabilização.

Na generalidade as argamassas tradicionais são constituídas por ligante, agregado e água. A mistura destes componentes resulta na conhecida pasta que serve de revestimento aos paramentos atuais dos edifícios, em que o principal ligante usado é o cimento. No entanto, como refere Silva (2006) que cita Guimarães (2002), julga-se que as primeiras argamassas produzidas pelo Homem, cujo ligante era a cal, aconteceram nos primórdios da Idade da Pedra, no período do Paleolítico (compreendido de 2.6 milhões de anos atrás até 10.000 a.c). O mesmo autor citado diz que foram entretanto encontradas ruínas cujo solo argiloso foi estabilizado com cal, provenientes da construção da Pirâmide de Shersi, no Tibet, por volta de 3000 a.c.

Apesar do uso continuado e importante da cal como ligante no passado, este foi sendo substituído pelo cimento que apresenta maior resistência mecânica e maior rapidez de endurecimento. Contudo, o uso de cimento em reabilitação de edifícios antigos, ou seja, edifícios contruídos numa fase antecedente aos anos 40/50 do século XX, demonstra-se demasiado rígido.

Em Portugal, o último Censos realizado (INE, 2011), mostra que 42% dos edifícios com data de construção anterior a 1945 (de um total de cerca de 512 039 edifícios), necessitam de reparações médias a muito grandes nas paredes exteriores. Quando as anomalias existentes nos revestimentos são realmente severas e se não existir valor cultural significativo, pode ser necessário substituir parte do reboco ou a sua totalidade. Estas intervenções, muitas vezes relacionadas com materiais e processos construtivos muito diferentes dos originais, como o uso de cimento a substituir a cal, nem sempre contribuem para melhorar o estado de conservação deste tipo de edifícios, podendo ainda causar diversas anomalias.

Assim, torna-se realmente importante melhorar o comportamento das argamassas, para dessa forma se conhecer e compatibilizar as características destas ao suporte mais adequado. A incompatibilidade entre argamassa e suporte pode levar ao seu destacamento da fachada, colocando em causa a segurança que envolve os edifícios e as pessoas que neles habitam. É crucial ainda realçar a crescente necessidade de utilização de recursos naturais, com o objetivo

de aumentar o carácter mais sustentável que envolve os revestimentos, e também perceber se a incorporação deste tipo de material representa um sinal de evolução nesta área.

Nesse contexto, os estudos realizados nesta temática, envolvem as características das argamassas determinadas com ensaios controlados, em laboratório, com recurso a provetes normalizados. Estes provetes não são representativos do comportamento real de quando aplicado em obra, uma vez que existem diferentes variáveis que não são possíveis de simular em laboratório.

A aplicação da argamassa no suporte implica a formação de uma interface entre estes e as interações que ocorrem após o contato da argamassa, no estado plástico, com o suporte. Estas interações vão-se modificando ao longo do tempo devido à cinética de hidratação e a absorção do suporte.

Nesse sentido, torna-se importante considerar todos estes fenómenos, para as diferentes argamassas e suportes, relacionando as características das argamassas para um melhoramento da qualidade e conseqüente durabilidade dos revestimentos de fachada, tanto de edifícios novos como de reabilitação. Assim, o desenvolvimento deste estudo, integrado num projeto de investigação mais amplo, contribui para a otimização dos processos de seleção das argamassas para os suportes mais adequados.

A argamassa usada neste estudo é uma argamassa pré-doseada de cal hidráulica, que representa um produto cuja utilização cresceu muito ao longo dos últimos anos, devido à forte concorrência no mercado e às enormes vantagens que acarretam relativamente às argamassas tradicionais. As atuais exigências de construção proporcionaram o desenvolvimento de novas tecnologias na produção de novos produtos prevendo-se para os próximos anos uma tendência de crescimento da produção de argamassas de carácter industrial.

1.2 Objetivos

Dentro da temática deste estudo existem muitos trabalhos de investigação desenvolvidos envolvendo a análise às argamassas de forma individual, sendo muito difícil encontrar atualmente trabalhos que relacionem a argamassa e o suporte onde esta é aplicada.

Esta dissertação tem como objetivo identificar os parâmetros dos suportes que vão influenciar o comportamento das argamassas ao longo do tempo, após aplicação nos suportes. Dessa forma, haverá uma seleção mais eficiente das argamassas na sua utilização, otimizando as suas características.

Deste modo, será possível responder de forma concreta a várias questões, tais como:

Que características vão apresentar as argamassas como consequência dessas alterações de suportes?

Quais os elementos que mais influenciam as características das argamassas?

Qual ou quais os suportes mais adequados para a argamassa em estudo?

A análise final deste estudo, vai permitir estabelecer relações entre diferentes argamassas, suportes e condições de aplicação e obter conclusões que melhorem a qualidade final dos revestimentos a aplicar na fachada de edifícios.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos principais. No capítulo 1 é apresentado o enquadramento do tema, com a importância do estudo para a sociedade e identificando os principais objetivos do mesmo. É também descrito a estruturação do documento.

No capítulo 2, sintetiza-se de forma estruturada o trabalho de recolha bibliográfica incidente no tema, relacionando alguns estudos de interesse. Apresentam-se alguns conceitos básicos importantes para a compreensão do estudo, resultados obtidos em determinados estudos e as respetivas conclusões.

O capítulo 3 é dedicado à descrição da campanha experimental desenvolvida, dos materiais usados e normas seguidas na preparação e realização dos ensaios laboratoriais. É descrito todo o processo experimental recorrendo a imagens obtidas em laboratório.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos durante a campanha experimental, assim como certas considerações importantes.

O capítulo 5 contém a análise dos dados apresentados. Para a apresentação e comparação dos dados recorre-se a conteúdos gráficos e na respetiva análise relacionam-se com resultados obtidos em campanhas experimentais de outros estudos.

Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões da campanha experimental e perspetivam-se algumas recomendações a considerar em estudos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Argamassas de revestimento em Portugal

Os revestimentos aplicados em edifícios correntes são decisivos naquilo que é a qualidade de habitabilidade, já que têm relevantes exigências funcionais a cumprir, tais como, a estanquidade à água líquida, segurança, compatibilidade com o suporte, conforto acústico, conforto visual, conforto térmico, higiene, durabilidade e resistência mecânica. Nesse sentido, deve-se ponderar a solução a adotar, tanto na forma de aplicação como os seus constituintes.

Em Portugal, os paramentos dos edifícios são geralmente constituídos por tijolo de alvenaria, bloco de betão ou bloco de argila expandida. Os revestimentos são sobretudo de cimento ou/ e cal, quer seja aérea ou hidráulica, sendo o cimento, segundo Almeida et al (2017), usado em estruturas mais recentes (a partir do início do século XX) e a cal, muito importante desde tempos imemoriais até aos anos 50 do século XX. Daí advém o conceito de argamassas tradicionais, que cada vez mais incide não só nas argamassas constituídas por cal, mas também em argamassas constituídas por cimento.

Apesar de muito utilizadas as argamassas tradicionais apresentam muitas desvantagens, como a medição pouco rigorosa dos constituintes e o controlo muito baixo da operação, que originam desperdícios de material, de mão de obra, acarretando custos elevados. Para alterar este panorama, o setor da construção civil tem investido em técnicas que procuram melhorar o controlo da operação e da qualidade. É aqui que aparecem as argamassas pré-doseadas, abordadas neste capítulo e usadas neste estudo, diferenciando-se das tradicionais no modo de produção.

Assim, torna-se realmente importante estudar os comportamentos das diferentes argamassas, após a aplicação nos vários tipos de suportes e dessa maneira pode-se melhorar e rentabilizar os materiais usados com uma qualidade final melhorada. Neste capítulo pretende-se efetuar uma compilação dos vários estudos já realizados nesta área e todas as conclusões obtidas que sejam relevantes.

2.1.1 Considerações iniciais

As argamassas que compõem o revestimento dos paramentos são fundamentalmente constituídas por um ou mais ligantes, agregados e água reservando ainda a possibilidade de conter aditivos. Esta mistura homogénea pode ser doseada e misturada em obra (argamassa tradicional) ou previamente doseada (argamassa industrial).

2.1.2 Constituição geral das argamassas

- Ligante

O ligante segundo a terminologia utilizada, traduz-se por um pó muito fino com capacidade de aglutinante com outros materiais, quando misturado com água, ganha coesão, tornando-se num sólido.

Relativamente à sua constituição, o ligante é segundo Coutinho (1988), o elemento da mistura responsável por uma maior durabilidade podendo ser subdividido em aéreo, hidráulico ou orgânico. O ligante hidráulico é constituído por pó muito fino que amassado com água forma uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reação química entre o pó e a água. Além de endurecer ao ar pode também emerso, atingir as suas características finais. O ligante aéreo, pelo contrário não consegue endurecer dentro de água, pois depende do dióxido de carbono da atmosfera para se transformar em carbonatos. Por último, o ligante de natureza orgânica pode referir-se aos casos dos hidrocarbonetos e das resinas sintéticas.

O tipo de ligante usado é um fator muito importante e porventura até o mais decisivo, já que diferentes ligantes dão origem a diferentes processos de endurecimento, ligações entre as várias partículas do ligante e conseqüentemente dos agregados. Para o caso de argamassas pré-doseadas, o tipo de ligante é de natureza idêntico ao utilizado para as argamassas tradicionais.

- Agregados

Uma mistura de ligante e água é suficiente para formular uma argamassa com adequada resistência mecânica. No entanto, a instabilidade geral apresentada pelo ligante, com elevada retração e fluência, leva à utilização de agregados nos revestimentos.

Os agregados usados nas argamassas podem ser materiais granulados grossos e finos (com máxima dimensão de 4,75mm) aglomerados por um ou mais ligantes constituindo o esqueleto das argamassas (Rodrigues, 2004).

De acordo com Margalha et al (2007) os finos podem transmitir uma coesão e trabalhabilidade melhoradas, mas uma mistura de areias finas e grossas torna a percentagem de volume de vazios mais adequada, melhorando no estado endurecido, a resistência à flexão e compressão, e em algumas misturas pode diminuir a capilaridade.

Assim, o tipo e dimensão de areias utilizadas nas argamassas, assim como a sua composição granulométrica tem grande influência no comportamento dos revestimentos, pelo que a

proporção e escolha na mistura assume um papel preponderante na qualidade final das argamassas (Rodrigues, 2004).

Em Portugal, geralmente as areias são naturais, extraídas do leito dos rios ou de areiros, com granulometria variável e fundamentalmente do tipo siliciosa, calcária, sílico-calcária ou argilosa. Estas diferentes granulometrias, podem originar muitas vezes anomalias nos rebocos dos edifícios, como eflorescências, destacamentos ou fissuração. Este problema não é tão evidente em argamassas pré-doseadas uma vez que os agregados presentes na sua constituição são devidamente calibrados.

- Água

A água a utilizar na argamassa permite a hidratação do ligante promovendo a aglomeração dos constituintes, e obtendo por fim uma pasta. De referir que a água não deve conter sais potencialmente nocivos à presa dos ligantes, para que, a longo prazo não apareçam patologias no paramento.

A quantidade de água a adicionar à mistura que constitui a argamassa deve permitir que esta tenha fluidez suficiente para ser convenientemente aplicada, conseguir uma boa penetração e distribuição no suporte, mas que de forma simultânea possua uma quantidade de água mínima para que se reduzam os possíveis efeitos introduzidos no paramento e ainda limitar a retração (Rodrigues, 2004). No caso das argamassas pré-doseadas a quantidade de água é obviamente fundamental, devendo ser sempre adotada a relação água-produto sugerida pelo fabricante.

2.1.3 Aplicação das argamassas

Para uma adequada aplicação da argamassa de revestimento tradicional de ligante hidráulico, esta deve apresentar três camadas, vulgarmente designados revestimentos multicamada, com teor de ligante crescente do interior para o exterior:

- Chapisco ou camada de aderência: ligação ao suporte e regularização da absorção de água por parte do suporte. Deve ser fortemente doseada em ligante e apresentar acabamento irregular (rugosidade) para garantir boa aderência. Pelo facto de apresentar muita quantidade de ligante não tem contribuição para a impermeabilização do paramento;
- Camada de base: impermeabilização, regularização e verticalidade do paramento;
- Camada de acabamento: proteção e efeito estético. Primeira barreira à penetração da água. Não pode apresentar fissuras, o que significa teor de ligante mais reduzido (Veiga, 2005).

No entanto, atualmente, devido aos curtos prazos de execução impostos à indústria da construção e a uma mão de obra cada vez mais dispendiosa e pouco especializada, os produtos pré-doseados aparecem em força no mercado, com uma aplicação através de uma única camada (revestimentos monocamada) ou em duas camadas, seguidas de pintura. Assim, estes tipos de argamassas destinam-se a substituir os rebocos tradicionais, desempenhando as mesmas funções destes, mas em geral com um menor número de camadas e respetiva espessura.

Fundamentalmente, os revestimentos pré-doseados são argamassas em forma de pó que são amassadas mecanicamente com água e são geralmente aplicáveis de forma manual ou por projeção mecânica, com recurso a máquinas apropriadas.

2.1.4 Argamassas de cal hidráulica

De modo a analisar o comportamento dos revestimentos após aplicação nos suportes, nomeadamente da cal hidráulica, e relacionar as conclusões obtidas nos diversos estudos já efetuados, será importante de uma forma sintética mencionar as características associadas à argamassa usada neste estudo.

2.1.4.1 Cal hidráulica natural

De acordo com Sabbioni et al (2002), o termo hidráulico deve-se a duas propriedades específicas, a propriedade de endurecimento quando a água é adicionada ao ligante seco, e também a capacidade de endurecimento debaixo de água. Estas características foram alcançadas no século X a.c. onde construía-se portos, aquedutos e outras construções recorrendo à adição de cinzas vulcânicas, tijolos cerâmicos ou ladrilhos esmagados ao ligante de cal. Os Romanos em particular, compreenderam desde logo a necessidade de adicionar pozolanas e cal para as construções resistirem às intempéries. A utilização de argamassas à base de cal disseminou-se a partir do fim do Império Romano devido ao custo de produção da cal.

Em 1756 o engenheiro inglês John Smeaton, estudava o fenómeno de hidraulicidade das argamassas, e após uma longa série de experiências sobre as causas do endurecimento das argamassas hidráulicas em obras daquela época, ainda que exclusivamente constituídas por cal e pozolana, reparou que a presença de argila no calcário, que servia de matéria-prima, proporcionava uma notável melhoria após a sua calcinação (Alvarez et al., 2005). Daí se explica, o facto da matéria-prima da cal hidráulica natural, atualmente, ser à base de calcários margosos.

Em Portugal, a cal hidráulica apareceu em meados de 1891, e atualmente, ainda que menos usadas, as cais são materiais marcantes na indústria da construção (Figura 2.1), assumindo-se em vários campos de aplicação no setor.

Legenda:

dp: pó seco

lu: cal viva em
pedaços

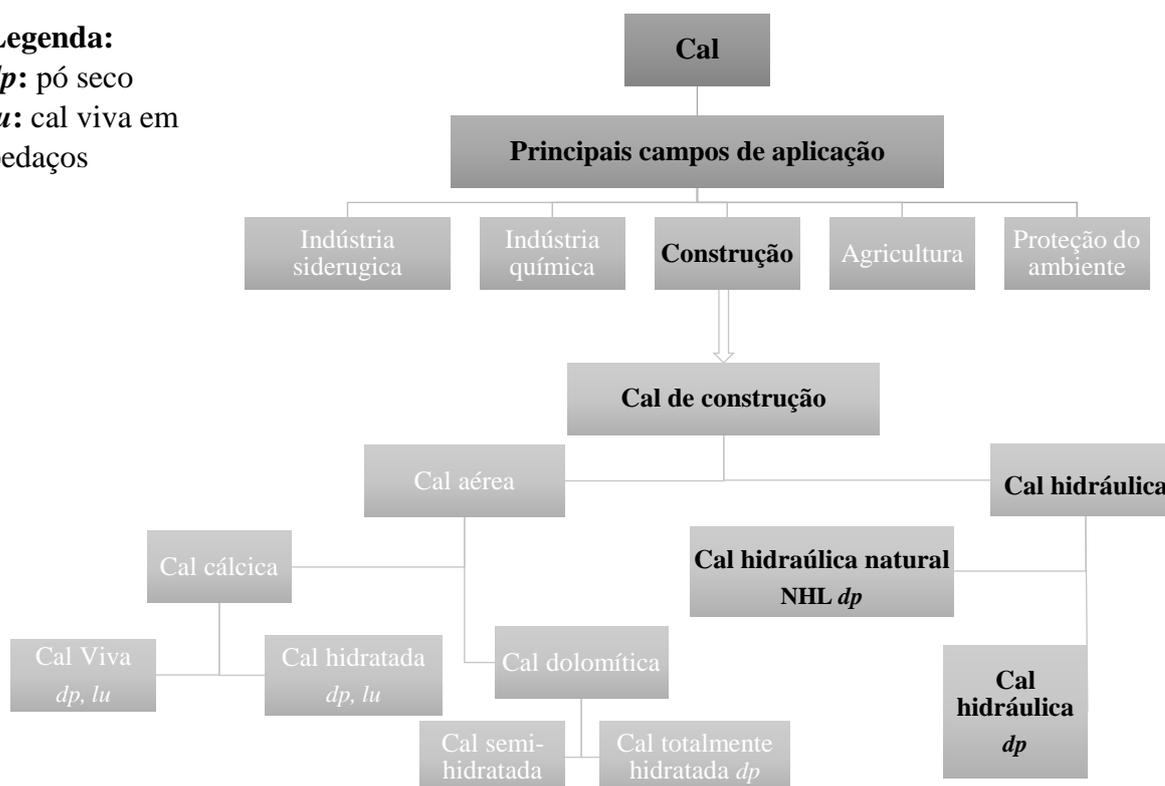


Figura 2.1 - Diagrama esquemático de tipos de cais e campos de aplicação (Sequeira et al., 2007).

A cal hidráulica natural é a matéria-prima responsável pela produção de argamassas secas pré-doseadas industriais, possuindo ainda uma vasta gama de aplicações, nomeadamente nas argamassas para rebocos com ligante hidráulico e argamassas para elevação de alvenarias, enchimento e acabamentos.

A cal hidráulica segundo menciona Coutinho (1988) e Coelho et al (2009), obtém-se recorrendo a calcário margoso com uma quantidade de argila considerável (>5% e ≤20%), sujeito a temperaturas na ordem dos 1000-1500°C.

Posteriormente e seguindo as indicações de Sequeira et al (2007) a cal hidráulica natural é obtida de rochas constituídas por calcário (CaCO_3) e argila ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). A 850°C através da calcinação do carbonato de cálcio ou calcário (CaCO_3), obtém-se óxido de cálcio/cal (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). A argila entre os 400°C-600°C decompõe-se em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Entre 850°C-1100°C temos o culminar das reações de sílica e alumina, com

óxido de cálcio, devido a forças intermoleculares, originando-se silicatos bicálcicos (1) e aluminatos tricálcicos (2).



A cozedura (energia adicionada, de preferência forno contínuo vertical de alvenaria e revestimento refratário) de substâncias calcárias (CaCO_3) e argilosas ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), em determinadas proporções até à calcinação, não permite a existência de uma fase líquida, originando à saída dos fornos uma substância condensada, designada de pedra cozida, representada na equação (3).



O CaO , isoladamente, não serve como material de construção, uma vez que é um composto instável em água, com a qual reage dando-se uma grande libertação de energia acompanhada de um grande aumento de volume. O óxido de cálcio, CaO , converte-se em hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , por reação com água.

À medida que é retirada a pedra cozida da parte inferior do forno é colocada por cima uma nova mistura, gesso cru ($\text{CaSO}_4\text{2H}_2\text{O}$). Durante o processo de cozedura há a admissão de ar nos fornos, sendo esta admissão nunca efetuada aquando da retirada do material cozido, de modo a não existir uma desestabilização da temperatura (Francisco, 2015).

A presa da cal hidráulica natural acontece em duas fases. Inicialmente, uma fase fundamentalmente hidráulica, e a longo prazo produz efeitos de presa aérea, ocorrendo da superfície para o interior:

- A fase hidráulica é obtida pela hidratação dos aluminatos tricálcicos e silicatos bicálcicos após amassadura;
- A fase aérea ocorre por reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono atmosférico (Sequeira et al., 2007).

As argamassas de cal hidráulica, são as que mais vantagens apresentam comparativamente às existentes. Tal como refere Francisco (2015), Mascarenhas (2006) enuncia essas características da seguinte maneira:

- Calor de hidratação é reduzido e liberta-se lentamente, o que faz com que a evaporação da água seja lenta e evita o aparecimento de fissuras;
- As eventuais retrações, a acontecer são moderadas;

- São permeáveis ao vapor de água restituindo a água proveniente das paredes sob a forma de vapor nos dias mais quentes;
- A perda de água durante a presa é lenta mesmo em suportes muito absorventes.

Como menciona Ranesi & Faria (2020), Veiga et al (2010) estudaram os materiais mais usados pelas empresas construtoras e de reabilitação em Portugal. Alguns desses materiais são como referem os autores, a cal hidráulica natural (NHL classe 5) e areia corrente, que devido à cultura e volume de trabalho, é uma argamassa com maior utilização por parte das empresas construtoras em Portugal. No que diz respeito a empresas de reabilitação, geralmente com trabalhos mais especializados, usou-se uma cal hidráulica pré-doseada (HL classe 3.5), com areia calibrada. Os resultados obtidos para determinados parâmetros estão resumidos no Quadro 2.1 para as referidas argamassas, com os respetivos traços.

Quadro 2.1 - Propriedades das argamassas para cal hidráulica (HL3.5) e cal hidráulica natural (NHL5), (Ranesi & Faria, 2020).

	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Coefficiente de capilaridade [kg/(m ² ·min ^{1/2})]
HL3.5 (1:3)	2.80-3.20	1.00-1.20	7.80	1.40-2.00
NHL5 (1:4)	0.80-1.20	0.20-0.50	1.00-3.00	1.20-2.50

Segundo Veiga & Faria (1990), as argamassas à base de cal hidráulica apresentam como característica principal a sua menor deformação na rotura (que chega a ser inferior às argamassas de cimento). Considerando esta conjectura, constata-se que a cal hidráulica é o principal componente de grande parte das argamassas pré-doseadas para reparação de alvenarias antigas que atualmente estão no mercado.

Não obstante, o desuso gradual das argamassas de cal, originou a uma perda enorme de conhecimento sobre as suas propriedades devido às múltiplas e valorizadas vantagens apresentadas pelo cimento Portland, como maior resistência mecânica e endurecimento mais rápido. Assim, a aplicação de argamassas à base de cimento para substituição de rebocos antigos compadece de desvantagens por serem demasiado compactas, rígidas, impermeáveis ao vapor de água, e grande facilidade a fendilhar, o que obviamente entrando água nestas zonas causa uma acelerada deterioração (Hughes & Válek, 2003; Mosquera et al., 2006).

Na Figura 2.2 é ilustrado um exemplo de aplicação de cal hidráulica natural nos revestimentos de um edifício sujeito a reabilitação:



Figura 2.2 - Convento de São Francisco, Coimbra.

2.1.4.1.1 Cal hidráulica industrial *Versus* Cal hidráulica natural

Segundo a NP EN 459-1 (IPQ, 2015) a cal hidráulica (industrial, HL) é um ligante constituído por cal e outros materiais tais como, o cimento, cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, filler calcário, entre outros possíveis materiais. Tem a capacidade de ganhar presa e endurecer quando é misturada com água, contribuindo o dióxido de carbono para o seu processo de endurecimento.

A cal hidráulica natural (NHL), segundo a mesma norma apresenta-se como uma cal com propriedades hidráulicas produzida pela queima de calcários, tal como já foi explicitado no capítulo 2.1.4.1, com a mesma capacidade de ganhar presa e endurecer da cal hidráulica, mas apresentando como grande diferença o facto de não conter aditivos na sua constituição. Pode-se assim concluir que as propriedades hidráulicas deste tipo de ligante advêm única e exclusivamente da composição química da sua matéria-prima natural.

2.1.4.1.2 Argamassas industriais

As primeiras argamassas industriais em Portugal foram produzidas na década de 80 do século passado, sendo predominantemente colas de construção, vulgarmente conhecidas como cimento-cola. A partir dos anos 90, houve uma intensificação do fabrico de argamassas pré-doseadas, devido ao elevado número de trabalhos, num curto espaço de tempo e com qualidade de execução.

Em função do local de produção, pode-se diferenciar argamassas tradicionais de industriais, na medida em que as argamassas industriais, contrariamente às tradicionais, podem ser doseadas e/ou misturados em fábrica, apresentando-se em pó ou em pasta. No primeiro caso requer a adição de água de acordo com o fabricante, no segundo caso, está pronta a aplicar.

Estas argamassas têm múltiplas vantagens, tais como, a homogeneidade do produto final, garantia de qualidade, reprodutibilidade, diminuição do erro humano e utilização de matérias-primas adequadas.

- Processo de produção

A produção de argamassas industriais em pó, é efetuada a partir da junção de agregados, ligantes e aditivos. Antes de serem misturados, os agregados e os ligantes são submetidos a um processo de secagem, com recurso a fluxos de ar quente, de forma a não existir o risco da própria argamassa hidratar desde a sua fase de produção até à fase de transporte.

Em fábrica, existe um vagão, sujeito ao fornecimento de areias e ligantes, em que posteriormente a pedra é transportada para um britador, sobe à torre da unidade de produção e aí sofre um processo de crivagem, para que os agregados atinjam as granulometrias pretendidas. De referir que o agregado de sílica fina é colocado num silo diferente.

O material após chegar aos silos, é doseado através de pesagem de cada componente, considerando a possível incorporação de aditivos. Seguidamente, o material é misturado seco para que exista uma melhor homogeneização dos componentes. Por fim, é encaminhado para silos onde se procede ao embalamento. O referido processo está descrito na Figura 2.3.

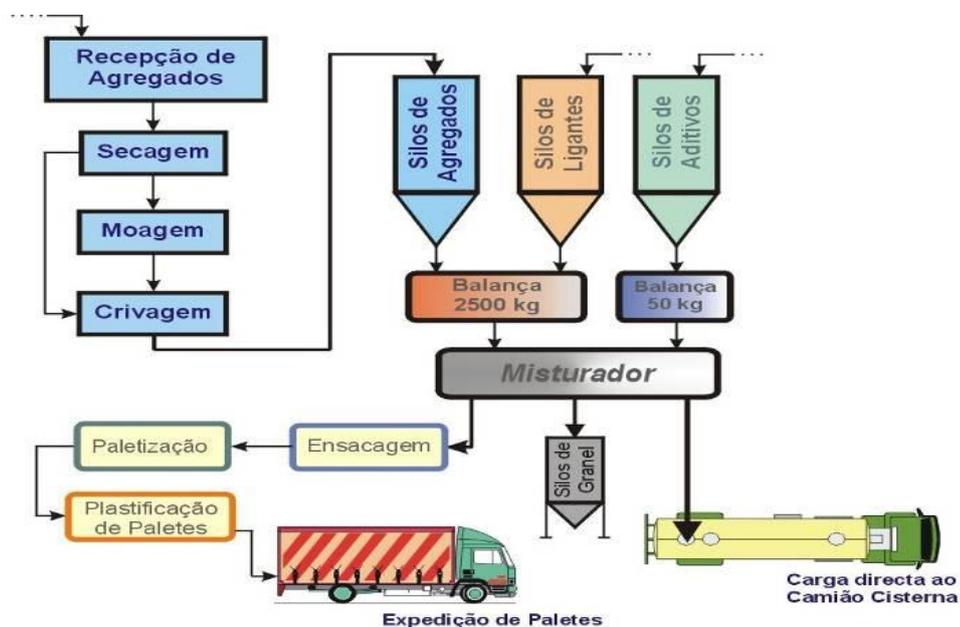


Figura 2.3 – Diagrama do processo industrial de argamassas em pó (APFAC, 2007).

2.2 Influência das condições do suporte

As características do suporte influenciam as características das argamassas aplicadas, tal como concluíram os estudos de Paulo (2019). Assim, Torres et al (2020) provaram que em função do tipo de suporte, composição das argamassas e número de camadas, o comportamento final pode ser influenciado.

Suportes muito porosos, são suscetíveis de atrasar a hidratação do ligante, devido à grande capacidade de absorção que estes exibem. Ou seja, a absorção por parte do suporte, de água proveniente da argamassa, pode causar zonas que por não estarem hidratadas, são frágeis, e degradam-se facilmente ao longo do tempo.

Nesse sentido, como concluíram Torres et al (2020), no âmbito do projeto em que se engloba esta dissertação, a preparação do suporte com molhagem ou humedecimento prévio conduz a melhores resultados em termos de comportamento das argamassas no estado endurecido, face à água líquida.

Assim, o revestimento deve ser compatível com o suporte do ponto de vista geométrico, mecânico e químico. Relativamente à compatibilidade geométrica, há a necessidade do suporte apresentar planeza ou regularidade superficial adequada à espessura e à técnica de aplicação do revestimento. Deve existir compatibilidade mecânica (tensões internas devido à retração do revestimento) para não ocorrer degradação do suporte (Veiga & Faria, 1990). Deve aderir bem ao suporte, ter coeficiente de condutibilidade térmica idêntico ao do material do suporte e permitir que as trocas de vapor de água entre o suporte e o ar exterior se efetuem sem constrangimentos, o que significa que este tem de apresentar uma boa permeabilidade ao vapor de água. É igualmente importante que exista uma boa compatibilidade química, o que significa que a argamassa de revestimento tem de apresentar capacidade para resistir ao ataque de sais que eventualmente existam no suporte, como por exemplo sulfatos. Por outro lado os sais que porventura possam existir podem causar reações nocivas com os materiais constituintes do suporte, através da dissolução com a água da chuva ou de condensações interiores que posteriormente migram para o interior do suporte por capilaridade, o que provoca a sua degradação química (Veiga, 1998).

De maneira geral, as características do suporte que mais podem influenciar o revestimento são a resistência mecânica, a porosidade, a sucção capilar, a rugosidade do paramento, a permeabilidade à água, o grau de proteção mecânica requerida e a estabilidade dimensional (Veiga & Faria, 1990).

2.3 Comportamento das argamassas

As argamassas de revestimento assumem um determinado comportamento em função das características que a compõem, e obviamente algumas dessas características assumem uma particular importância após aplicação no suporte.

Uma argamassa com uma maior quantidade de ligante tem maiores possibilidades de aparecimento de fendilhação, provocado pela retração hidráulica (com maiores tensões no seio da argamassa). Uma permeabilidade à entrada de água muito reduzida e suficiente permeabilidade ao vapor de água, evita a condensação da água no interior do suporte e permite que este seque, eliminando por evaporação a água que se tenha introduzido por capilaridade em períodos de chuva ou que até porventura já existisse no interior do mesmo aquando da construção.

Estas são algumas das principais características a considerar, e nesse sentido, deve-se perceber e interligar algumas destas capacidades que as argamassas de revestimento devem apresentar, seguidamente explicitadas.

2.3.1 Trabalhabilidade

Segundo Carasek (1996) a trabalhabilidade é definida como a capacidade de uma argamassa se espalhar de uma forma fluida por toda a área do suporte, para que o seu aspeto final seja satisfatório, e em que fissuras e reentrâncias sejam revestidas. Para que isso aconteça é necessária uma boa aplicação, de modo a permitir uma boa aderência no contacto entre a argamassa e suporte. Uma alternativa para melhorar a trabalhabilidade (com traço da argamassa e dos materiais definido), é alterar a quantidade de água presente na mistura (não em excesso). Este ajuste de mais ou menos água está diretamente relacionado com a consistência ou fluidez. A plasticidade associada à argamassa é influenciada não só pela quantidade de água, mas também pelo teor de ar incorporado, pela presença de adjuvantes apropriados e pelos diferentes tipos e quantidades de agregados. De acordo com Veiga & Faria (1990), para igual teor de ligante, as argamassas de cal hidráulica natural apresentam maior trabalhabilidade que as argamassas de cimento.

2.3.2 Resistência à fendilhação

A suscetibilidade à fendilhação é difícil de quantificar, mas a existência de fendilhação põe em causa o contributo do revestimento para a estanquidade do suporte e afeta desfavoravelmente o aspeto do paramento.

A fendilhação acontece pelo facto da argamassa não conseguir resistir às tensões de tração instaladas, que entre as várias possibilidades podem acontecer devido aos movimentos do suporte, pelas variações de temperatura e de teor de água no revestimento, reações químicas expansivas associadas à carbonatação pela existência de sulfatos no revestimento ou alterações físicas devido ao congelamento da água existente na argamassa de revestimento. De uma maneira geral, a fendilhação pode ser relacionada com a retração, módulo de elasticidade e resistência à tração (Rodrigues, 2004; Veiga & Faria, 1990).

A fendilhação, de acordo com Veiga (2005), tende a evoluir até atravessar toda a camada, o que significa que quanto mais larga for essa camada, maior é a fenda formada (Figura 2.4). Além disso segundo a mesma autora, as fendas num revestimento multicamada como se formam aleatoriamente na superfície, são naturalmente desfasadas entre camadas. Deste modo, as fendas a existir num reboco monocamada são muito mais perigosas comparativamente a um revestimento constituído por várias camadas e de espessura final idêntica, porque tanto a água como todos os fluidos agressivos penetram muito mais facilmente pelo paramento atingindo o suporte.

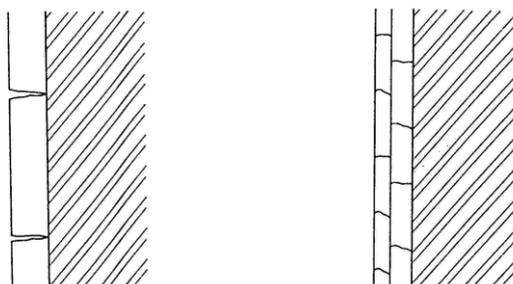


Figura 2.4 – Reboco monocamada versus reboco de duas camadas (Veiga, 2005).

Para melhorar o comportamento do revestimento à fendilhação, é necessária uma boa aderência ao suporte, o que vai possibilitar uma distribuição de tensões mais eficiente e um poder de retenção de água elevado, já que ao reduzir os efeitos de dessecação prematura da argamassa vai contribuir para a diminuição das fendas no paramento (Veiga, 1998).

Por fim, Campitelli & Nasciso (2008) concluíram que a fissuração dos revestimentos de argamassas é diretamente proporcional ao teor de ligante na mistura, já que aumenta a resistência mecânica do revestimento.

2.3.3 Resistência mecânica (Compressão e Tração)

A resistência à compressão é uma importante propriedade a considerar no comportamento das argamassas e traduz-se pela capacidade destas em resistir a esforços estáticos e dinâmicos.

Carasek (1996) tentou relacionar as conclusões obtidas por diversos autores, em que variaram a quantidade de ligante, agregados e dos materiais constituintes, e concluiu que de modo geral as argamassas de maior resistência à compressão são as que possuem maior teor de ligante. Para além disso apresentam maior aderência. Todavia a quantidade de ligante têm de ser bem doseado, pois em dosagens elevadas conduzem a retração mais elevada e consequente fendilhação.

O mesmo entendimento tiveram Rodrigues et al (2007), que avaliaram o comportamento mecânico em termos de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e à compressão, para argamassas de cimento e bastardas (com cimento e cal hidráulica) tendo-se verificado que para um teor muito elevado de ligante cimento, podem indiciar resistências mecânicas demasiado elevadas no paramento, colocando em risco a função de proteção destes. Deve por isso o teor de ligante cimento ser elevado, mas com um certo limite. Campiteli & Nasciso (2008) concluíram também que a quantidade de água usada na mistura é um fator preponderante na resistência mecânica do revestimento.

Estudos efetuados por Veiga & Santos (2015) mostram que para uma argamassa de cal hidráulica natural NHL 3.5, a utilização de areia calcária em detrimento de areia do Rio Tejo, leva a um aumento da resistência mecânica, principalmente para o traço volumétrico 1:2,5. Esta conclusão pode ser explicada pelo facto de a areia calcária conduzir a estruturas mais compactas, com menor índice de vazios.

Veiga (2003) em função de vários estudos efetuados, compilou os resultados obtidos, obtendo os requisitos exigidos às argamassas em termos de resistência mecânica sintetizados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Requisitos exigidos às argamassas (Veiga, 2003).

Uso	Características Mecânicas (MPa)		
	R _t	R _c	E
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000
Reboco interior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000

R_t – Resistência à tração; R_c – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade dinâmico.

2.3.4 Capacidade de impermeabilização

A capacidade de impermeabilização é determinada pela capacidade por parte do suporte de resistir à penetração de água proveniente do exterior e conseqüentemente a capacidade de eliminar a água em excesso por secagem, sob a forma de vapor (evaporação), assim que existam condições climáticas favoráveis. Estas capacidades são avaliadas através da permeabilidade à água e ao vapor de água, respetivamente (Veiga, 1998).

2.3.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água dos revestimentos é de extrema importância. A caracterização e quantidade de humidade que é transportada na estrutura porosa da argamassa traduz-se num fluxo que acontece com mais ou menos dificuldade, dependendo do tipo de argamassa, e diretamente relacionado com a durabilidade dos paramentos. Revestimentos menos porosos ao vapor de água apresentam uma maior probabilidade de ataque por sulfatos já que os iões permanecem mais tempo no seu interior.

Brito (2009) refere que o transporte de vapor de água pode ser descrito como um processo de difusão regido pela lei de Fick (4), ou seja, sempre que um material esteja sujeito a ambientes com diferentes humidades relativas, ocorrerá transporte de vapor de água dentro do material, processo designado por difusão, em que se gera um fluxo que tende a equilibrar a concentração de vapor nos dois ambientes. Assim, haverá transferência de humidade, no sentido da maior para a menor humidade relativa. A lei de Fick pode segundo Botas (2009) ser representada da seguinte maneira:

$$Q = D \times \frac{A \times \Delta C}{l} \times t \quad (4)$$

Em que,

Q, massa de vapor de água (g);

D, coeficiente de difusão de vapor de água (m²/s);

A, área do provete ou superfície a considerar (m²);

ΔC, gradiente de concentração (g/m³);

l, espessura do provete ou superfície a considerar (m);

t, tempo (s).

O fluxo de vapor faz-se, em geral, do interior para o exterior, o que acarreta para o revestimento exterior uma maior importância na permeabilidade ao vapor (incluindo acabamento final). Este deverá ser mais permeável do que o suporte sobre o qual esteja aplicado (aumentando de dentro

para fora nas várias camadas que possam constituir a argamassa de revestimento) (Rodrigues, 2004).

Segundo Pereira (2008), a permeabilidade ao vapor de água das argamassas é normalmente relacionada com a porosidade, sendo que em geral variam de forma direta, isto é, um aumento da porosidade traduz-se num aumento da permeabilidade.

2.3.6 Porosidade

A porosidade de uma argamassa é uma das propriedades mais importantes na análise ao seu comportamento, permitindo compreender o fenómeno de transporte de fluidos no interior desta.

A porosidade pode ser definida pela quantidade de vazios no seu interior devido à evaporação da água usada na sua mistura dos vários componentes e ao ar contido na mesma. Podem distinguir-se dois tipos de porosidades (Figura 2.5):

- Porosidade aberta, constituída por poros que comunicam entre si de forma a criar uma rede contínua de vazios. Consiste no quociente entre o volume de poros abertos e o volume aparente do provete (de forma percentual). Sequeira et al (2012) refere ainda que a porosidade aberta é inversamente proporcional à massa volúmica;
- Porosidade fechada, estabelecida por poros ou agrupamentos destes, isolados no interior do material, estando por isso excluídos da rede contínua referida. Naturalmente apenas a porosidade aberta contribui para o transporte de fluidos através do material (Rato, 2006).



Figura 2.5 –Porosidade aberta (A), porosidade fechada (B) (Freitas et al., 2008).

Os poros existentes no interior da argamassa são de dimensões variáveis, variando também na forma e na interligação entre eles. Segundo Carasek (1996), os poros do suporte de grandes dimensões (superiores a 5 μm) não têm força capilar para vencer os poros da argamassa (de 1 μm a 5 μm), considerados por isso inoperantes. Assim, o efeito de capilaridade é tanto mais forte quanto menores forem as dimensões dos poros.

A porosidade influencia por isso a sucção capilar do suporte e a quantidade de água que este pode absorver. De acordo com Pereira (2008), no que diz respeito à porosidade dos vários tipos de argamassas, a sucção capilar é maior na argamassa de cimento em relação às restantes, já que geralmente estas têm poros com dimensões mais reduzidas.

Associado à dimensão dos poros, Coutinho (2005) é mais específico e indica que existem três tipos de poros, em função do tamanho e influência no transporte: os microporos com dimensão inferior a 0,1µm, os poros capilares com dimensão entre 0,1 e 1000 µm e os macroporos com dimensão superior a 1000 µm.

De acordo com Arandigoyen et al (2005), o comportamento capilar é uma consequência da natureza porosa dos materiais de construção e da sua exposição às condições ambientais. Quando um capilar está em contato com um líquido, cria uma diferença de pressão ΔP , inversamente proporcional ao seu raio, forçando o líquido a ir para o interior do capilar. Essa relação é demonstrada pela Equação (5):

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (5)$$

Sendo:

- γ , a tensão superficial do líquido;
- θ , o ângulo de contacto;
- r , o raio do capilar;

No entanto, naquilo que concerne a argamassas Brito (2009) refere que não é possível analisar a capilaridade ao nível de cada poro, já que a sua estrutura interna apresenta elevada complexidade. Nesse sentido, o comportamento das argamassas é avaliado em termos macroscópicos, com coeficientes globais, determinados com base no ensaio de capilaridade que consiste na colocação de provetes com dimensões regulares e secção constante, em absorção livre através da sua face inferior. A quantidade total de água absorvida W (kg/m²) (6) e a altura da ascensão capilar H_c (m) (7) são diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo decorrido, t (s):

$$W(t) = A \times \sqrt{t} \quad (6)$$

$$H_c(t) = B \times \sqrt{t} \quad (7)$$

Sendo, A (kg/m²s^{1/2}) e B (m/s^{1/2}), respetivamente, o coeficiente de capilaridade e o coeficiente de penetração capilar.

2.3.7 Absorção de água e secagem

Relativamente às argamassas de revestimento, estas têm de apresentar bom comportamento em contacto com a água líquida, pois a absorção excessiva do revestimento e uma constante exposição ao contacto com a água, provoca uma certa suscetibilidade ao aparecimento de patologias, tais como fungos, bactérias e conseqüentemente a perda de aderência, tanto em relação ao suporte, como entre camadas da própria argamassa.

A condução de água líquida no revestimento é em parte devida a um fenómeno designado por transporte capilar que é o principal mecanismo de condução dos iões cloreto e sulfato nas argamassas, e a água absorvida por capilaridade pode ser um problema como consequência dos ciclos de gelo-degelo (Arandigoyen et al., 2005).

De acordo com Botas (2009), quando o revestimento está sujeito a temperaturas negativas, a água existente no interior congela (gelo) e conseqüentemente aumenta de volume. Se os poros se encontrarem saturados, ou quase saturados, este aumento de volume pode originar fissuração devido às pressões exercidas nas paredes dos poros. No processo de descongelação (degelo), a quantidade de água que anteriormente cristalizou, retoma o seu volume inicial. No decorrer destes ciclos gelo-degelo pode ocorrer secagem parcial ou total.

O mesmo autor refere que durante estes ciclos, os poros vão perdendo a capacidade de resistir às pressões exercidas pelo gelo, e com o aumento do número de ciclos, ficam mais suscetíveis a fendilhar. Estas fissuras podem originar um revestimento com um maior poder de absorção de água, caso a argamassa se encontre saturada.

A secagem define-se como sendo o processo pelo qual a água evapora do material poroso. No caso particular da secagem das argamassas, revela-se de extrema importância, pois vai influenciar o seu comportamento em termos de durabilidade.

O processo de secagem denota-se por três fases distintas segundo Brito (2009):

- 1ª fase: A secagem inicia-se quando os poros constituintes do material estão maioritariamente preenchidos com água, e por capilaridade vão migrando na direção da superfície exterior. A evaporação ocorre à superfície e o correspondente teor de humidade vai diminuindo linearmente com o tempo. A taxa de secagem vai ser então influenciada por fatores como a humidade relativa, a temperatura e a velocidade do ar;
- 2ª fase: O fluxo capilar torna-se insuficiente e a água líquida não atinge a superfície. Há uma diminuição do preenchimento dos poros à superfície com água. Assim, a partir deste momento o transporte de água desde a zona húmida até à superfície passa a dar-se por difusão do vapor no espaço poroso. Com a diminuição do preenchimento dos

poros, o percurso da difusão de vapor aumenta, resultando numa diminuição da taxa de secagem;

- 3ª fase: A última etapa é apenas controlada pela difusão do vapor, até atingir o equilíbrio. A taxa de secagem continua a diminuir lentamente, sendo que a secagem total apenas se atinge usando métodos de secagem artificial.

Veiga & Santos (2015) mostraram experimentalmente que para uma argamassa de cal hidráulica natural NHL 3.5, a utilização de areia calcária conduz a uma ligeira redução da velocidade de absorção de água, devido à redução da dimensão dos poros que com o aumento do teor de ligante demonstra uma tendência de redução do coeficiente de capilaridade.

Quando o suporte é tijolo cerâmico, a água é absorvida pelo tijolo em menos de 10 minutos e é mais rápida para tijolos de argila (apenas 3 minutos), o que facilmente comprova a influência do tipo de suporte no comportamento das argamassas de revestimento (Brocken et al., 1998). Pode-se relacionar as conclusões conseguidas neste estudo com o facto de a cal hidráulica usada na presente dissertação ter na sua constituição uma certa quantidade de argila, o que poderá conferir um carácter mais absorvente. No entanto o carácter hidrófugo, natural das argamassas pré-doseadas vai contrariar essa tendência.

De referir ainda, que de acordo com os estudos efetuados por Carasek (1996) e Scartezini e Carasek (2003), o bloco de betão apresenta uma menor velocidade de sucção de água, relativamente ao tijolo cerâmico, já que este último é bastante mais poroso. Torres et al (2020), também concluíram que para um revestimento multicamada de uma argamassa de cimento, este tem um efeito significativo na absorção de água para um suporte de tijolo cerâmico e um efeito quase irrelevante para blocos de betão.

2.3.8 Aderência

A aderência ao suporte é um dos fatores preponderantes à longevidade dos revestimentos. Os revestimentos devem possuir uma boa aderência ao suporte e boa coesão interna. Esta aderência pode ser diminuída se o material de revestimento se encontrar humedecido.

A aderência resulta de uma combinação de ações mecânicas e da adesão específica dos materiais (Addleson, 1992). Durante o processo de aplicação, ocorre perda de água da argamassa por evaporação e por absorção do suporte e, com ela, a perda de plasticidade da pasta que assim obtém uma ligação mecânica ao suporte. Do ponto de vista da durabilidade, uma boa aderência entre o reboco e a base de assentamento permite controlar a ocorrência de fendilhação (Gaspar et al., 2007).

Após a aplicação da argamassa sobre o suporte, a aderência processa-se por penetração capilar da água de amassadura nos poros do suporte, arrastando os elementos mais finos da argamassa que ao cristalizar no interior dos seus poros assegura a colagem. Esta característica será importante de modo a que o revestimento não se descole do suporte sob efeitos de trações e compressões desenvolvidas por variações dimensionais diferenciais entre o suporte e o revestimento, de choques ou de pressões de vapor, e não conduzir a concentrações de tensões em pontos localizados (Rodrigues, 2004; Veiga, 1998).

A aplicação dos revestimentos de forma manual, segundo Fernandes & John (2007), apresenta menor resistência de aderência comparativamente ao revestimentos executados por projeção mecânica, para argamassas semelhantes. Isto, pelos estudos efetuados por Gonçalves & Bauer (2005) deve-se ao operador que executa os revestimentos com grande irregularidade na espessura do revestimento.

Scartezini & Carasek (2003) provaram utilizando blocos de betão e tijolos cerâmicos que o tipo de suporte é o principal responsável pela resistência de aderência. Concluíram que os blocos de betão têm uma aderência muito superior aos tijolos cerâmicos devido à rugosidade. Nesse sentido, a aplicação do chapisco é fundamental quando se têm suportes muito lisos e com uma capacidade de sucção muito baixa. Exemplo disso, é a aplicação de chapisco em tijolos cerâmicos em que foi obtida uma aderência superior na ordem dos 20%.

Scartezini (2002) refere ainda que para o caso de argamassas bastardas, os blocos de betão têm resistência de aderência constante nos primeiros 20 dias sofrendo pequenos aumentos ao longo do tempo, enquanto o tijolo cerâmico sofre uma queda e estabilizada a sua resistência a partir dos 28 dias, que pode ser atenuada pela cura húmida dos rebocos. No que concerne ao tipo de rotura verificaram-se duas possíveis para ambos os suportes. No caso dos blocos de betão, ocorreram sempre roturas coesivas do suporte, e no tijolo cerâmico as roturas adesivas foram uma constante.

Assim, Carneiro (1993) refere que uma boa aderência ao suporte depende da sua rugosidade e dos cuidados na preparação do paramento, tanto em termos de limpeza, humedecimento e do chapisco a utilizar, como da retenção de água da argamassa durante o efeito de sucção capilar, que pode provocar a saída de água prematura necessária à hidratação do cimento.

Na Figura 2.6 resume-se essa dependência da rugosidade no suporte para obter boas condições de aderência.

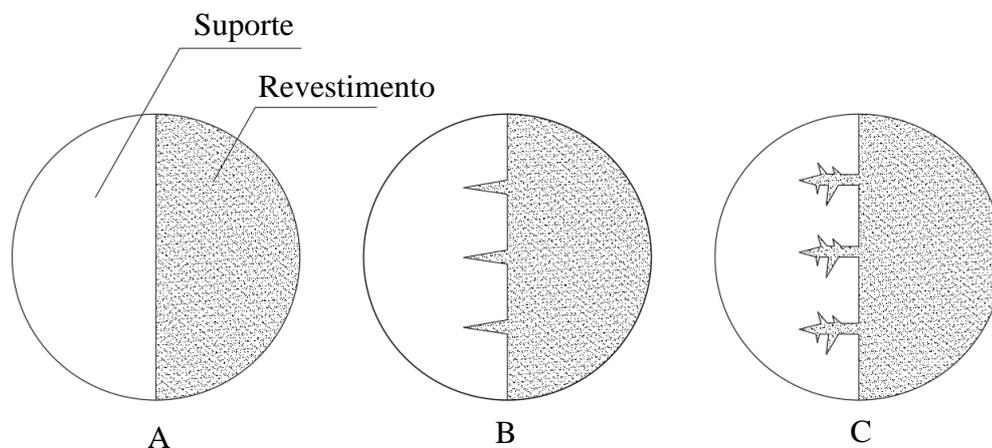


Figura 2.6 –Aderência da argamassa de revestimento.

- A) Suporte demasiado liso e compacto traduz-se em más condições de aderência;
- B) Suporte rugoso, que não absorve água em excesso, ideal para boas condições de aderência;
- C) Suporte que absorve água em excesso, o que implica risco de dessecação prematura.

Em suportes com alta absorção de água a aderência poderá ser melhorada caso o suporte seja previamente humedecido, para evitar que o suporte absorva a água da argamassa. Isto deve-se à redução da sucção por capilaridade, já que, caso contrário, a excessiva absorção de água da argamassa nas primeiras horas pela sucção do suporte, pode conduzir à formação de microfissuras na interface devido à retração plástica, que por sua vez diminui a aderência (Carasek, 1996).

Veiga (2003) define em função de estudos já realizados, requisitos exigidos às argamassas em termos de aderência, sintetizados no Quadro 2.3:

Quadro 2.3 - Requisitos de aderência para rebocos de edifícios antigos (Veiga, 2003).

Uso	Aderência (MPa)
Reboco exterior	0,1-0,3 ou rotura coesiva pelo reboco
Reboco interior	0,1-0,5 ou rotura coesiva pela junta

2.3.9 Influência da cura

A cura das argamassas de revestimento pode ser realizada de forma natural ou com envelhecimento acelerado. Comumente, as avaliações do comportamento das argamassas aplicadas nos suportes fazem-se aos 28, 60 e 90 dias. São processos importantes para o seu desempenho, já que vários estudos mostram que diferentes tipos de cura dão lugar a diferentes

comportamentos por parte das argamassas e vice-versa, o que torna imprescindível a sua consideração no comportamento dos revestimentos.

O endurecimento das argamassas associado ao desenvolvimento de resistências mecânicas está diretamente relacionado a processos de carbonatação e hidratação e que, conseqüentemente pode ser alterado pela temperatura e humidade relativa.

O aumento de temperatura está diretamente relacionado com o aumento do limite de saturação do ar e obviamente promove a diminuição da humidade relativa do ar. Assim, a velocidade de evaporação da água de determinadas argamassas pode ser controlada pela conjugação entre estes fatores, sendo importante considerar em argamassas que dependam da água para reagir e atingir o endurecimento (como cimento e cal hidráulica), o que pode levar a que argamassas deste tipo tenham alguns problemas em atingir o endurecimento ou nem o atinjam. Dessa forma a resistência mecânica dos paramentos pode ficar comprometida.

Lanas et al (2006) provaram que o endurecimento das argamassas é influenciado de forma mais evidente pela humidade relativa, para argamassas de cal aérea, em ambientes com humidades relativas perto dos 60%, principalmente a longo prazo. Isto traduz-se, por resistências mecânicas maiores, já que, apresentam taxas de carbonatação bastante superiores.

Scartezini e Carasek (2003) concluíram para argamassas bastardas de cimento Portland e cal hidráulica com traço em volume, 1:1:6, aplicadas sobre suportes de tijolo cerâmico e bloco de betão, que a cura húmida das argamassas influencia a aderência ao suporte devido aos efeitos de retração por parte das argamassas, do mesmo modo que diminui a velocidade de carbonatação da argamassa ao longo do tempo.

De acordo com Torres et al (2020), o processo de envelhecimento acelerado reduz a permeabilidade ao vapor de água das argamassas na ordem de 33%. Os mesmos autores verificaram, que para as argamassas em geral, com o avançar do tempo, há um aumento da permeabilidade à água líquida, que pode estar relacionado com o aparecimento de microfissuração por retração.

Obrzut et al (2020) refere que a técnica de envelhecimento acelerado ou artificial, comparativamente ao envelhecimento natural é uma técnica em que se obtêm resultados mais agressivos, apresentando-se, no entanto como uma técnica muito eficiente para simular as degradações reais que as argamassas de reboco sofrem. Além disso, faculta em tempos muitos mais curtos resultados que permitem a investigação por materiais com melhor qualidade e mais duráveis.

2.4 Fenómenos na interface argamassa-suporte

Após aplicação da argamassa no suporte forma-se uma interface, e as interações que ocorrem após o contacto com o substrato vão se modificando ao longo do tempo devido à cinética de hidratação e à absorção do suporte (Costa & John, 2011).

As argamassas sendo materiais porosos, têm capacidade para absorver água. A absorção de água pode acontecer de duas formas distintas: devido à pressão hidráulica associada normalmente à imersão e por capilaridade. A absorção devida à pressão hidráulica dá-se quando as argamassas estão imersas, ou seja, quando estão totalmente em contacto com a água e a absorção é feita através das diversas faces da argamassa, por ação da gravidade e da pressão que a água exerce no sentido de ocupar o espaço preenchido por ar. A absorção de água por capilaridade é caracterizada pela absorção apenas quando uma ou várias das suas faces está em contacto com a água, e a absorção ocorre por sucção capilar, em particular no sentido contrário ao da força exercida pela gravidade (Pereira, 2008).

Se controlada, a absorção pode melhorar a aderência entre a argamassa e o suporte. Esta não deve ser demasiado forte para evitar uma fraca hidratação da argamassa nem demasiado fraca para evitar uma interface demasiado porosa (Pierre, 2008).

A sucção é um fenómeno de curta duração. Numa fase inicial os grandes capilares são embebidos, o que leva a uma redução gradual do diâmetro dos capilares. A redução da quantidade de água da mistura devido à absorção do suporte provoca primeiro um aperto mecânico das partículas sólidas. A concentração de iões dissolvidos aumenta, o que acelera a cristalização dos hidratos, enquanto que a cinética de hidratação é amplificada pelos movimentos da água (Pierre, 2008). Assim percebe-se que a sucção está diretamente relacionada com a dimensão e interligação dos poros das argamassas.

Nesse sentido, pode-se, de acordo com Moropoulou et al (2000) afirmar que o comportamento da argamassa é influenciado pelas características do suporte e da interface que se vai criar entre estes dois elementos.

Vários autores se têm debruçado sobre o estudo da interface argamassa suporte e os possíveis fatores que mais podem influenciar esta adesão. No entanto, quanto à forma como as características das argamassas variam após aplicação nos suportes ainda são escassos os trabalhos nesta área de investigação.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

O trabalho experimental decorreu nas instalações do ITeCons, usando-se como matéria-prima uma argamassa de cal hidráulica pré-doseada, produzida pela Secil, da gama Reabilita Cal RB, formulada exclusivamente a partir de cal hidráulica natural (NHL classe 3.5), já com as quantidades de agregado ($< 3,75$ mm) e ligante pré-definidas, sendo necessário apenas adicionar a quantidade de água indicada pelo fabricante.

Este tipo de argamassa segundo indicações da própria Secil (2019) não pode ser aplicada a temperaturas ambientes e de suporte inferiores a 5 °C nem superiores a 30 °C. Durante a aplicação a argamassa foi mantida à temperatura ambiente na ordem dos 20 ± 2 °C.

A argamassa usada foi aplicada em laboratório sobre vários tipos de suportes com diferentes dimensões associadas, tais como:

- Bloco de betão ($500\times 200\times 100$) mm
- Bloco de betão leve ($500\times 200\times 100$) mm
- Placa de betão ($300\times 200\times 40$) mm
- Tijolo cerâmico furado ($300\times 200\times 70$) mm
- Tijolo cerâmico maciço ($215\times 110\times 55$) mm

Nota ainda para a sigla HR que é mencionada várias vezes ao longo deste capítulo e designa humidade relativa.

3.2 Preparação e caracterização da argamassa

A argamassa foi preparada já com traço (ligante:agregado), apenas foi necessário adicionar água à mistura. A quantidade de água a adicionar na argamassa é facultada pela Secil (2019) no formato de intervalo de valores (entre 4 e 4,5l por 25 kg), o que representa a necessidade de determinação da quantidade mais apropriada de água a adicionar à mistura.

Esta quantificação é feita previamente através do ensaio de espalhamento (capítulo 3.2.1) em que foi obtida a quantidade de 4,5l, que representa o valor máximo recomendado pelo fabricante, sendo a água pesada com recurso a uma balança com incerteza associada de $\pm 0,5$ g. A amassadura foi obtida com recurso a uma misturadora elétrica (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Obtenção da amassadura com recurso a misturadora elétrica.

Relativamente ao processo de cura, a argamassa foi sujeita a cura corrente de 28 dias e envelhecimento acelerado, sendo importante referir que este último processo foi selecionado pelo facto de se obterem resultados num espaço de tempo bastante mais reduzido, o que é relevante para o tempo de estudo disponível.

3.2.1 Espalhamento da argamassa no estado fresco

Com o ensaio de espalhamento pretendeu-se avaliar a consistência da argamassa, e deste modo determinou-se a influência da quantidade de água na mesma, seguindo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999b). Numa primeira etapa foi obtida a argamassa a usar, adicionando uma determinada quantidade de água (dentro da faixa de valores indicada pelo fabricante, ou seja, 4 a 4,5l por saco) à argamassa pré-doseada. A amassadura da argamassa foi realizada numa fase inicial de forma manual (cerca de 30 segundos), e numa fase posterior de forma mecânica (cerca de 70 segundos), recorrendo a uma misturadora mecânica (Figura 3.2).

Imediatamente após este processo a mesa de espalhamento, o molde tronco-cónico e o pilão de compactação foram levemente humedecidos, colocando-se de seguida a argamassa na mesa de espalhamento, dentro do molde tronco-cónico. A argamassa a instalar no referido molde foi colocada em duas camadas devidamente compactadas com um varão de compactação (cerca de 10 pancadas por camada). Com o molde totalmente preenchido retirou-se o possível excesso de argamassa existente à superfície do molde assim como restos que possam ter ficado na mesa de espalhamento e que conseqüentemente pudessem influenciar o resultado do ensaio. Para além disso verificou-se o nivelamento da mesa.

Após remoção do molde tronco-cónico que suportava a argamassa, rodando a manivela existente na mesa de espalhamento cerca 15 vezes, num período total de 15s ficando a mesa sujeita a um determinado valor de tensão, e deste modo, tal como refere o próprio nome do

ensaio, a argamassa “foi-se espalhando” pela mesa (Figura 3.3). Por fim, mediu-se o diâmetro da argamassa em três direções distintas, com um paquímetro digital.

Neste estudo, para uma argamassa com a quantidade máxima de água recomendada pelo fabricante (4,5l) foram obtidos para três provetes os valores representados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Resultados de consistência na mesa de espalhamento da argamassa em estudo.

Argamassas	Resultados espalhamento (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coef. Variação (%)
Arg_1	159.89	160.40	0.47	0.29%
Arg_2	160.81			
Arg_3	160.50			

A norma EN 1015-2 (CEN, 1998a) recomenda um diâmetro máximo de argamassa, para este ensaio e em função da massa volúmica, na ordem dos 175 mm. Assim, deu-se o ensaio por concluído, com a argamassa a exibir uma adequada trabalhabilidade e apresentando um valor de 160,4 mm de espalhamento da argamassa e uma quantidade de água a usar na campanha experimental de 4,5l.



Figura 3.2 - Misturadora usada no ensaio de consistência por espalhamento.



Figura 3.3 - Resultado final do ensaio de espalhamento da argamassa.

3.2.2 Massa volúmica da argamassa no estado fresco

No âmbito da preparação da argamassa utilizada na campanha experimental foi realizado este ensaio com o objetivo de proceder à caracterização da mesma. Foram seguidas as recomendações da norma EN 1015-6 (CEN, 1998b), sendo a massa volúmica expressa pelo quociente entre massa e volume da argamassa fresca, quando introduzida num dado recipiente. O valor obtido para a argamassa em questão foi de 1661 kg/m^3 . O resultado confirma o

parâmetro referido pelo fabricante para a argamassa, de boa trabalhabilidade e possibilidade de projeção mecânica.

3.3 Preparação e caracterização dos suportes

A argamassa Reabilita Cal RB aplicada sobre os suportes, de acordo com Secil (2019) não necessita que estes tenham um tratamento prévio, carecendo apenas de condições importantes que foram cuidadosamente cumpridas, como limpeza, coesão e a inexistência de qualquer tipo de material que afetasse as condições normais de aderência. O fabricante recomenda ainda a aplicação de camadas com espessura entre 10 e 20 mm.

Para facilitar o posterior processo de destacamento dos provetes com argamassa, foi colocada sobre alguns dos suportes uma rede de fibra de vidro, ainda antes da aplicação da argamassa. No âmbito do projeto em que está inserida esta dissertação, já foram ensaiados suportes com e sem rede de fibra de vidro para desse modo se perceber a influência da rede no comportamento da argamassa. Os resultados obtidos para ambos os suportes testados são muito semelhantes, pelo que o uso da rede na presente campanha experimental é completamente viável e bastante útil após o período de cura correspondente (Torres et al., 2020). A rede de fibra de vidro usada apresenta $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ de abertura e densidade de 158 g/m^3 .

Para uniformizar a camada de argamassa a colocar sobre os suportes, foram colocados moldes de madeira com comprimento e largura contíguos aos suportes, mas com 15 mm de espessura adicional para contabilizar a camada de argamassa a aplicar. Colocaram-se ainda serra juntas para imobilizar os moldes de madeira. Na Figura 3.4 é possível visualizar a preparação para dois dos suportes em estudo, no caso, tijolo cerâmico furado e placa de betão.



Figura 3.4 - Colocação dos moldes de madeira e respetivas redes de fibra de vidro em suporte de tijolo cerâmico furado (A) e placa de betão (B).

3.4 Execução dos provetes de ensaio

A argamassa foi aplicada no suporte de forma manual, através de uma colher de pedreiro, de forma a promover o aperto da argamassa, fomentando a aderência argamassa-suporte (Figura 3.5).

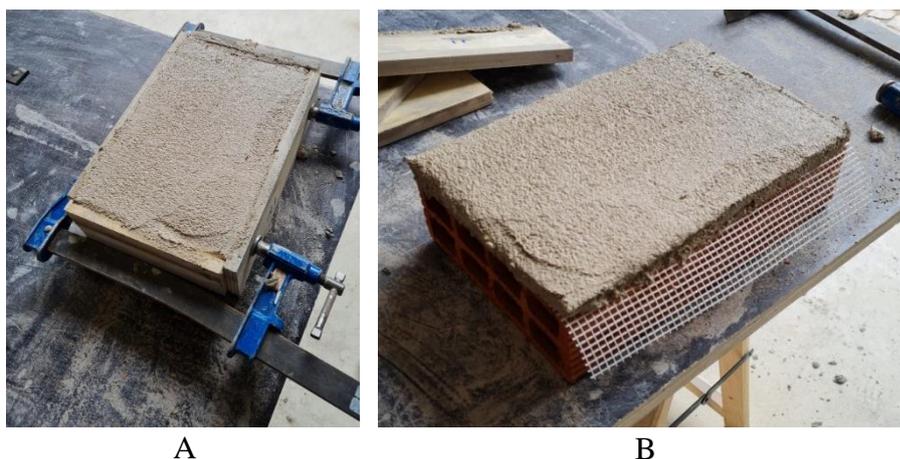


Figura 3.5 - Colocação da argamassa sobre o suporte, (A) com moldes de madeira, (B) sem moldes de madeira.

Seguidamente através de formas quadradas, 40×40 mm (Figura 3.6-A), e circulares, 100 mm diâmetro (Figura 3.6-B), marcou-se a argamassa colocada nos suportes para após o período de cura se proceder mais facilmente ao destacamento dos provetes. Para um melhor aproveitamento da argamassa produzida, foram instalados alguns provetes quadrados no suporte original de provetes circulares.

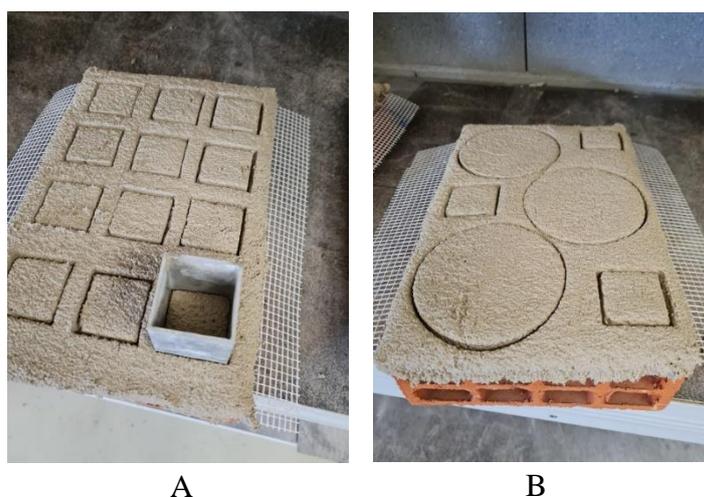


Figura 3.6 - Exemplo de execução dos provetes na argamassa após a aplicação no suporte de tijolo cerâmico furado, (A) com formas quadradas, (B) com formas circulares.

Em alguns suportes não foi colocada qualquer rede de fibra de vidro, nem foi implementado nenhum provete circular e/ou quadrado, para que após o seu período de cura, se execute o ensaio *pull-off*, que avalia a aderência por parte da argamassa ao suporte (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Preparação do suporte de tijolo cerâmico furado, posteriormente sujeito ao ensaio *pull-off*.

3.4.1 Condições de cura

- Cura corrente (28 dias)

Os provetes foram sujeitos inicialmente a cura corrente a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$ HR. Durante o processo de cura foram abrigados convenientemente no interior do laboratório.

De forma a ser mais preciso recorreu-se a um termo higrómetro colocado no local de cura da argamassa tendo-se obtido uma temperatura média de 16°C e 66% de HR média.

- Envelhecimento acelerado

De acordo com a norma EN 1015-21 (CEN, 2002b), os provetes são sujeitos ao processo de envelhecimento acelerado após a cura inicial de 28 dias já referenciada, sendo submetida numa câmara climática a duas séries de quatro ciclos cada.

1ª série:

- a) Colocação dos provetes a $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante $8\text{h}\pm 15\text{min}$;
- b) Colocação dos provetes a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ / $65\pm 5\%$ HR durante $30\text{min}\pm 2\text{min}$;
- c) Colocação dos provetes a $-15\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante $15\text{h}\pm 15\text{min}$;
- d) Colocação dos provetes a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ / $65\pm 5\%$ HR durante $30\text{min}\pm 2\text{min}$.

2ª série:

- a) A norma refere que os provetes devem ser emersos parcialmente em água (5mm), mas como existiram problemas associados, este processo foi solucionado através da pulverização dos provetes com água e posteriormente colocados a $20\pm 1^\circ\text{C}$ / $95\pm 5\%$ durante $8\text{ h}\pm 15\text{min}$ (Figura 3.8);
- b) Colocação dos provetes a $20\pm 2^\circ\text{C}$ / $65\pm 5\%$ HR durante $30\text{min}\pm 2\text{min}$;
- c) Colocação dos provetes a $-15\pm 1^\circ\text{C}$ durante $15\text{h}\pm 15\text{min}$;
- d) Colocação dos provetes a $20\pm 2^\circ\text{C}$ / $65\pm 5\%$ HR durante $30\text{min}\pm 2\text{min}$.

De referir ainda que entre as duas séries, armazenam-se os provetes durante pelo menos 48 h em condições de cura corrente ($20\pm 2^\circ\text{C}$ e $65\pm 5\%$ HR).



Figura 3.8 - Câmara climática aberta para pulverização dos provetes.

3.5 Execução dos provetes prismáticos e circulares

Os provetes prismáticos e circulares foram executados em laboratório seguindo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999a). Foram efetuados com o intuito de serem objeto de comparação com os provetes realizados sobre os suportes já mencionados, pelo facto de estes endurecerem sobre um suporte metálico não possibilitando a absorção de água constituinte da argamassa. Para além disso, no que concerne à aderência argamassa-suporte, neste caso será nula, já que é aplicado o óleo descofrante e o suporte não apresenta qualquer rugosidade. Assim, estes provetes são considerados como padrão ao longo da campanha experimental.

- **Provetes prismáticos**

A execução dos provetes prismáticos ($40\times 40\times 160$ mm) iniciou-se pelo revestimento do molde metálico usado com óleo descofrante, de modo a facilitar a desmoldagem. Depois usando a

argamassa obtida e mencionada no capítulo 3.2.1 colocou-se uma camada no molde metálico até meia altura (Figura 3.9) e compactou-se com recurso a um pilão (Figura 3.10), submetendo a argamassa a cerca de 10 pancadas aplicadas de forma manual. De seguida, procedeu-se da mesma maneira, com uma nova camada, ficando cada compartimento do molde metálico totalmente preenchido, compactado e nivelado, retirando para isso a argamassa em excesso existente à superfície (Figura 3.11).



Figura 3.9 - Colocação da primeira camada de argamassa (não compactada).



Figura 3.10 - Pilão compactador.

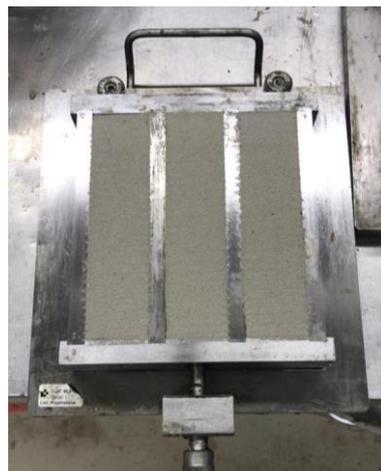


Figura 3.11 - Colocação da última camada de argamassa, compactada e excessos retirados.

Relativamente ao processo de cura e secagem, os provetes foram posteriormente colocados dentro de sacos de polietileno (Figura 3.12) devidamente fechados durante 5 dias, ainda dentro dos moldes metálicos, de modo a manter a %HR da argamassa. Depois dos provetes já desmoldados foram novamente colocados nas mesmas condições durante 2 dias. Até atingir os restantes 28 dias os provetes ficaram sujeitos à temperatura ambiente.



Figura 3.12 - Colocação dos provetes prismáticos (nos moldes metálicos) dentro de sacos de polietileno.

- **Provetes circulares**

Para a execução deste tipo de provetes recorreu-se a moldes circulares em PVC (diâmetro de 100 mm e altura de 15 mm) fixados com silicone a um suporte revestido em plástico. Depois os moldes foram também lubrificados com óleo descofrante e totalmente preenchidos com argamassa. A compactação, tal como sucedeu com os provetes prismáticos, foi executada através de 10 pancadas manuais com o pilão compactador. Por fim a superfície foi nivelada retirando o excesso existente (Figura 3.13).

Os provetes, ainda em molde, foram todos colocados dentro de sacos de polietileno devidamente fechados durante 5 dias. Terminando este prazo ficaram sujeitos à temperatura ambiente até atingir os 28 dias do período de endurecimento.



Figura 3.13 - Execução dos provetes circulares.

3.6 Ensaios para caracterização dos provetes endurecidos

Decorrido o tempo de cura de 28 dias e tendo-se procedido ao processo de envelhecimento acelerado os provetes foram cuidadosamente destacados dos suportes (com recurso a um martelo e um formão) e sujeitos aos ensaios de seguida explicitados.

Relativamente aos provetes prismáticos foram destacados dos moldes após o período de cura de 28 dias para o ensaio à compressão e tração por flexão, sendo ainda cortados em “pastilhas” de 15 mm de espessura para os ensaios seguidamente explicitados, o que dessa forma torna possível a comparação entre ambos os tipos de provetes. Os provetes circulares foram facilmente removidos e preparados para a execução do ensaio de permeabilidade ao vapor de água.

3.6.1 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

A massa volúmica aparente e a porosidade aberta foram determinadas segundo a norma NP EN 1936 (IPQ, 2008b) que segue métodos de ensaio para um caso específico de pedra natural tendo por isso sido sujeita a um processo de adaptação.

Para a realização do ensaio, foram ensaiados cerca de 10 provetes de cada suporte ($\approx 40 \times 40 \times 15 \text{ mm}$), sendo estes colocados numa estufa ventilada (Figura 3.14) a uma temperatura na ordem de 70°C até apresentarem massa constante e consequentemente pesados numa balança com uma precisão de $0,01 \text{ g}$, constituindo esta a massa seca, M_s . Depois foram imersos em água até atingirem a saturação e em imersão foram sujeitos a pesagem hidrostática, M_h , através do mecanismo representado na (Figura 3.15) em que um cesto preso à balança usada anteriormente imerge dentro de um recipiente cheio de água, e colocando-se cuidadosamente os provetes dentro deste recipiente se regista as pesagens respetivas, sendo a temperatura da água registada por meio de um termómetro. Por fim, os mesmos provetes são retirados da água, é eliminada a água em excesso e pesada a massa saturada, M_{sat} (Figura 3.16).



Figura 3.14 - Estufa ventilada.



Figura 3.15 - Pesagem dos provetes em imersão.



Figura 3.16 - Pesagem da massa saturada.

A massa volúmica aparente de cada provete, pode ser calculada por imersão, segundo a norma através da equação (8):

$$MV = \frac{M_s}{M_{sat} - M_h} \times \rho_{rh} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (8)$$

A porosidade aberta foi calculada a partir da expressão (9):

$$P_{ab} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_h} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

Em que,

M_S é a massa do provete seco, g;

M_{sat} é a massa do provete saturado, g;

M_h é a massa do provete imerso em água, g;

ρ_{rh} é a massa volúmica da água, kg/m³.

3.6.2 Absorção de água por capilaridade

Para a execução do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu-se a norma ISO 15148 (CEN, 2002a), apesar de não terem sido cumpridos certos valores limite explicitados na mesma, como a área mínima de amostras em contacto com a água (100 cm²). Ainda assim todos os procedimentos necessários à sua execução foram escrupulosamente seguidos.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade de um determinado material é traduzido pela quantidade de água que é absorvida por unidade de área, devido a forças de sucção capilar, quando o provete se encontra com a sua base em contacto com água. Assim, antes do ensaio se iniciar os provetes (40×40×15mm) foram colocados numa estufa ventilada (Figura 3.14) com uma temperatura na ordem dos 70°C até que as amostras apresentem massas constantes. Enquanto decorria este processo foi colocado numa tina metálica água a uma altura de 5mm ± 2mm a partir de uma malha plástica colocada na base (Figura 3.17), sendo verificado constantemente a sua veracidade. A colocação da malha referida é importante na medida em que minimiza a área de contacto dos provetes com o fundo do recipiente metálico, permitindo assim a absorção de água mais favorável por parte da base do provete.

Posteriormente, todos os provetes escolhidos (aproximadamente 10 de cada suporte) foram retirados momentaneamente da estufa e sujeitos a medição da área do provete em contacto com a água através de um paquímetro digital. Imediatamente a seguir os provetes foram isolados lateralmente com rolo de filme estirável de modo a possibilitar um fluxo unidirecional (Figura 3.18). Por fim, os provetes voltaram à estufa.



Figura 3.17 - Verificação da altura da água na tina metálica.



Figura 3.18 – Colocação de filme estirável no provete.

Apresentando os provetes massa constante procedeu-se à pesagem inicial dos provetes secos numa balança com precisão de 0,001g devidamente calibrada (Figura 3.19). O ensaio iniciou-se com a colocação dos provetes na tina metálica (Figura 3.20), encontrando-se esta no interior de uma câmara climática (Figura 3.21) com condições padrão de temperatura na ordem dos $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $50\%\pm 5\%$, sendo por fim a tina tapada para evitar evaporação de água para o exterior. A balança também se encontra no interior da câmara climática já mencionada.

Após 5 minutos do início do ensaio, os provetes foram retirados individualmente da água, o possível excesso existente foi extraído de forma rápida, são pesados e posteriormente colocados novamente na água. Este procedimento repetiu-se aos 10 min, 20 min, 30 min, 1h, 1h30, 2h, 4h, 8h, 24h, 48h e 72h relativamente ao início do ensaio. Verificou-se que, como esperado, as duas últimas pesagens (num intervalo de aproximadamente 24h) apresentaram massa constante, com uma variação inferior a 1% para todos os provetes testados.



Figura 3.19 - Balança calibrada.



Figura 3.20 - Provetes na tina metálica.



Figura 3.21 - Câmara climática.

Por fim, e de acordo com a norma foi obtido o coeficiente de absorção por capilaridade para cada amostra, representando este a velocidade de absorção de água por parte do material. Nesse sentido, a quantidade de água que é absorvida por unidade de área (Δm_t) pode ser obtida pela equação (10):

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (10)$$

Sendo:

m_i a massa inicial, g;

m_t a massa do provete num determinado instante t, g;

A, a área do provete em contacto com a água, m².

Com os valores obtidos associados ao tempo decorrido traça-se um gráfico para cada amostra, que representa a variação de massa por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo. Se o gráfico obtido originar uma reta ou no limite duas retas com declive bem distinto e definido, então tem-se de acordo com a norma um gráfico do “Tipo A” e o cálculo do coeficiente de capilaridade é efetuado tendo por base a expressão (11), sendo viável obter o valor representado pela expressão, através do valor do declive da reta correspondente:

$$A_w = \frac{\Delta m_{tf} - \Delta m_0}{\sqrt{t_f}} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}] \quad (11)$$

Sendo:

Δm_{tf} a variação de massa, por área, no final da reta (no gráfico), kg/m²;

Δm_0 a variação de massa, por área, no início da reta (no gráfico), kg/m²;

t_f o tempo decorrido entre o início e o final da reta, s.

Contrariamente a este, se o gráfico obtido ao invés de ser reto for curvo, a norma designa esta tipologia por gráfico do “Tipo B” sendo o coeficiente de absorção calculado através da expressão (12):

$$A_w = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{86400}} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}] \quad (12)$$

Em que:

Δm_{tf} é a variação de massa, por área após 24h, kg/m².

3.6.3 Índice de secagem

Este ensaio foi realizado com o objetivo de analisar a capacidade de secagem por parte da argamassa em função do suporte sobre a qual é aplicada, tendo sido executado depois do término do ensaio de absorção de água por capilaridade, aproveitando assim o facto de os provetes já se encontrarem quase saturados. Ainda assim os provetes foram imersos novamente por um curto período até atingirem a saturação total. O ensaio de secagem foi executado conforme o definido no início do projeto em que está envolvido este estudo, que por sua vez segue a recomendação da EN 16322 (CEN, 2014).

Antes de colocados novamente em processo de saturação os provetes (aproximadamente 10) foram embalados com filme estirável, lateralmente e na sua base, para que o fluxo de evaporação se dê apenas através da parte superior do provete.

Seguidamente as amostras foram pesadas na balança já demonstrada na Figura 3.19, localizada no interior da câmara climática, com uma temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\%\pm 5\%$ de humidade relativa, em intervalos de tempo de 10 minutos até perfazer 1h e de hora em hora até às 8h a partir do início do ensaio. Depois desta última pesagem foram efetuadas duas pesagens por dia, com um intervalo de cerca de 8h. Numa fase mais avançada do ensaio estas duas pesagens não apresentavam diferenças significativas, logo foi feita apenas uma pesagem ao dia, até que a variação de massa entre duas pesagens consecutivas (no período de aproximadamente 24h) fosse inferior a 0,1%.

Após a estabilização da massa, foram traçadas as curvas de secagem, que exprimem a variação no tempo do teor em água, através da equação (13):

$$W_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad [\%] \quad (13)$$

Em que:

W_i é o teor de humidade no instante i , %;

m_i é a massa do provete no instante i , g;

m_0 é a massa do provete seco, g.

Assim, o índice de secagem é obtido através da expressão (14):

$$I_s = \sum_{i=1}^n \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_i}{W_{máx} + t_f} \right] \quad (14)$$

Em que:

t_i é o tempo de ensaio i , h;

W_i é o teor de humidade no instante i , %;

t_f é o tempo final de ensaio, h.

3.6.4 Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água é executado seguindo os procedimentos sugeridos pela NP EN 1015-19 (IPQ, 2008a), relacionada com argamassas de reboco endurecidas e ISO 12572 (CEN, 2016a), para materiais de construção com diversas origens. Permitem a obtenção de um coeficiente que traduz a quantidade de vapor de água que atravessa um determinado material homogéneo quando sujeito a uma diferença de pressão entre as superfícies constituintes do material, por unidade de tempo e espessura.

O provete de secção circular (≈ 100 mm de diâmetro e 15 mm de espessura) foi então colocado entre dois ambientes de igual temperatura, mas com diferentes pressões parciais de vapor

originando assim um gradiente de pressões entre as superfícies inferior e superior do provete, o que possibilita a existência de um fluxo de vapor através do mesmo. Assim, com o conhecimento do fluxo de difusão, da diferença de pressões parciais e das dimensões do provete considerado foi possível a obtenção do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água.

Nesse sentido, o referido ensaio seguiu o método da tina húmida que pode ser descrito e iniciado pela colocação de impermeabilizante elástico nas laterais do provete circular (Figura 3.22), para garantir que não existe difusão de vapor por essas zonas. Depois de duas demãos e seco o provete foi colocado sobre o topo de uma tina de vidro (estanque à difusão do vapor), da mesma largura, com água até 15 mm da parte superior da tina permitindo assim que apenas exista ar nesta zona (Figura 3.23). Por fim, o provete foi em conjunto com a tina cuidadosamente selados na lateral com fita adesiva *masking* e duas demãos de parafina (Figura 3.24), sendo estes desde logo colocados numa câmara climática (Figura 3.21) a 23°C de temperatura e 50% de HR. Os provetes foram sujeitos a sucessivas e periódicas pesagens (24 em 24h) até que a variação de massa se apresente constante. Foram ensaiados cerca de 5 provetes para cada suporte.



Figura 3.22 - Colocação de impermeabilizante na lateral do provete.



Figura 3.23 - Água a 15mm do topo da tina.



Figura 3.24 - Colocação de fita adesiva e parafina na lateral do conjunto.

Obtendo os registos das pesagens efetuadas diariamente, foi representado graficamente a variação do peso com o tempo. O fluxo de difusão de vapor de água foi então determinado pela expressão (15), já que retrata a inclinação da reta que une os pontos em que a massa pesada ficou praticamente constante.

$$G = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad [kg/s] \quad (15)$$

Em que:

G é o fluxo de difusão de vapor de água, kg/s;

$m_2 - m_1$ é a variação de massa, após esta se apresentar constante, kg;

$t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo correspondente à variação de massa, s.

Para o valor de G, este foi obtido quando a subtração em valor absoluto do valor médio dos últimos 5 registos de G com o de cada registo, dividido pelo valor médio é inferior a 0,05. Conseguindo o valor de G, pode ser calculada a densidade do fluxo de difusão de vapor pela equação (16):

$$g = \frac{G}{A} \quad [kg/m^2s] \quad (16)$$

Em que:

g é a densidade de fluxo de difusão de vapor de água, kg/m²s;

G é o fluxo de difusão de vapor de água, kg/s;

A é a área de exposição do provete, m².

A permanência à difusão de vapor de água pode em função do que já foi calculado, ser obtida através da expressão (17):

$$W = \frac{g}{P_{sat} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{100}} \quad [kg/m^2sPa] \quad (17)$$

Em que:

W é a permanência à difusão de vapor de água, kg/(m²sPa);

P_{sat} é a pressão de saturação à temperatura que ocorreu o ensaio, Pa;

$\varphi_1 - \varphi_2$ é a diferença entre as humidades relativas existentes no interior e no exterior da tina de ensaio, %;

g é a densidade de fluxo de difusão de vapor de água, kg/m²s.

Por fim, associando a espessura do provete à permanência à difusão de vapor de água anteriormente referida, pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade pela equação (18):

$$\delta = \frac{W}{e} \quad [kg/msPa] \quad (18)$$

Sendo:

δ , o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, kg/(msPa);

e, a espessura do material de ensaio, m;

W, a permanência à difusão de vapor de água, kg/(m²sPa).

3.6.5 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade é uma característica mecânica que traduz a maior ou menor rigidez de uma determinada argamassa, na medida em que confere a capacidade necessária de se ajustar a possíveis deformações do suporte em que a argamassa seja aplicada. No caso da argamassa usada, de cal hidráulica, esta deve apresentar um módulo de elasticidade adequado para que assim consiga acompanhar as pequenas deformações das alvenarias, fenómeno que é corrente em edifícios antigos. No entanto este não deve ser exageradamente reduzido para evitar a própria desagregação da argamassa. Assim, uma possibilidade para conhecer as propriedades elásticas mais apropriadas da argamassa é determinar o seu módulo de elasticidade dinâmico.

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi executado seguindo a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006), em que o principal objetivo é colocar um provete prismático (40×40×160 mm) em vibração longitudinal conseguindo com isso medir a frequência fundamental de ressonância através da velocidade do som que atravessa o provete, a frequência de ressonância e o módulo de elasticidade da argamassa.

A frequência fundamental de ressonância foi medida através de um sistema de aquisição multi-analisador PulseTM, modelo 3560-C, da marca “Brüel & Kjaer”. Foi utilizado um martelo de impacto modelo 8206 e um acelerómetro modelo 8339, ambos da marca já referida. O ensaio foi realizado para três provetes das argamassas dos moldes, após os 28 dias e pode ser descrito pela Figura 3.25.



Figura 3.25 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

A frequência fundamental de ressonância que se pretende registar corresponde à frequência mais alta em que é obtida também a amplitude máxima. Para cada provete foram efetuadas três medições tendo o cuidado de não variarem mais de 60 Hz entre si. O valor da frequência fundamental de ressonância resulta da média desses três valores. Depois de registado este valor,

com o comprimento e largura do provete ensaiado, da sua massa volúmica e da massa seca obtém-se o módulo de elasticidade traduzido pela expressão (19):

$$E_d = 4 \times L^2 \times f_0^2 \times \rho \times T \times 10^{-6} \text{ [MPa]} \quad (19)$$

Sendo:

L , o comprimento do provete, mm;

f_0 , a frequência de ressonância longitudinal, Hz;

ρ , a massa volúmica do provete, g/mm³;

T , um fator de correção.

Importa ainda referir que o valor da massa volúmica para cada provete foi obtido por cubicagem, baseado nas dimensões do provete tal como demonstra a expressão (20):

$$\rho = \frac{m_d}{L \times A} \text{ [g/mm}^3\text{]} \quad (20)$$

Em que:

m_d é a massa do provete seco, g;

L é o comprimento do provete, mm;

A é a área da secção transversal do provete, mm².

3.6.6 Resistências à tração por flexão e à compressão

A resistência mecânica apresentada pela argamassa é uma característica que importa analisar, já que dessa forma é possível adequar a resistência às tensões introduzidas no seio da argamassa (ou resistência à fendilhação) aos paramentos sobre os quais são aplicadas. Assim, a tendência para a fendilhação é diretamente proporcional à relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração. Para além disso, as resistências mecânicas analisadas (tração e compressão) são também diretamente proporcionais à ductilidade apresentada pela argamassa.

O ensaio para a determinação das resistências referidas segue a norma EN 1015-11 (CEN, 1999a), sendo que os provetes usados são provenientes do módulo de elasticidade dinâmico (40×40×160 mm), já que este é um ensaio não destrutivo. Nesse sentido, para avaliação da resistência à tração por flexão, o provete foi colocado no equipamento retratado na Figura 3.26, sobre dois apoios e colocando-se o provete de tal forma que a face ao nível dos apoios e a face que vai receber a carga, fossem faces que estiveram em cura em contacto com o molde metálico.

Uma das metades resultante deste ensaio, serve para o ensaio à compressão (Figura 3.27). Este último ensaio à compressão foi efetuado tanto na argamassa do molde como da argamassa com o efeito do suporte (10 cada) para provetes 40×40×15 mm.



Figura 3.26 - Ensaio à tração por flexão na argamassa do molde prismático.



Figura 3.27 - Ensaio à compressão na argamassa do molde prismático (40x40x80) mm.

Assim, para o ensaio à tração por flexão aplicou-se uma carga constante no provete, sujeitando este à flexão até atingir a rotura. Relativamente à compressão foi aplicada uma força constante perpendicularmente à superfície do provete também até à rotura.

A resistência à tração por flexão foi calculada tendo por base a expressão (21):

$$R_t = 1,5 \frac{F_f \times l}{d \times b^2} \quad [MPa] \quad (21)$$

Em que:

F_f é a carga de rotura à tração por flexão, N;

l é a distância entre apoios inferiores, mm;

b é a largura de base do provete, mm;

d é a espessura do provete, mm.

Por fim, a resistência à compressão foi obtida através da expressão (22):

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad [MPa] \quad (22)$$

Em que:

F_c é a carga de rotura à compressão, N;

S é a área de aplicação da carga, mm².

3.6.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio permite quantificar a distribuição de poros (abertos e fechados) existentes numa dada argamassa, analisando o diâmetro médio, a massa

volúmica e a área total. Fundamentalmente a amostra alvo de análise é sujeita a uma variação de pressão quando mergulhada em mercúrio, já que este é um líquido não molhante em contacto com partículas sólidas, ou seja, não penetra de uma forma natural nos poros da amostra, sendo necessária uma força para permitir essa penetração.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio designa-se de Porosímetro Autopore 9500 (Figura 3.28), em que a parte superior e inferior do equipamento correspondem às câmaras de baixa e alta pressão, respetivamente. O procedimento do ensaio iniciou-se pela colocação de um fragmento da argamassa (com cerca de 1 cm^3) no dessecador para remover o ar e humidade relativa (através da pressão de vácuo). Depois o penetrómetro (Figura 3.29) encheu-se com mercúrio na câmara de baixa pressão (com uma pressão inferior a 5 kPa) e foi sujeita a pesagem.

Por fim, o penetrómetro foi colocado na câmara de alta pressão (para que o mercúrio atinja os poros de menores dimensões), reduzida a pressão e sujeita a pesagem (Figura 3.30).

Assim, em cada uma das câmaras ocorrem duas fases distintas. Numa fase inicial a amostra seca foi recolhida e colocada num penetrómetro, onde foi imersa em mercúrio e aumentando incrementalmente a pressão, foi medido o volume de mercúrio que é injetado no meio poroso em função da pressão (intrusão). O penetrómetro permite quantificar essas variações de volume através das variações de condutância.

Posteriormente a segunda fase deu-se com a redução de pressão até à pressão atmosférica em que houve a saída de grande parte do mercúrio entranhado na amostra (extrusão). De referir ainda que as várias fases do ensaio foram controladas e os dados registados por meios computadorizados.



Figura 3.28 – Porosímetro
Autopore 9500.

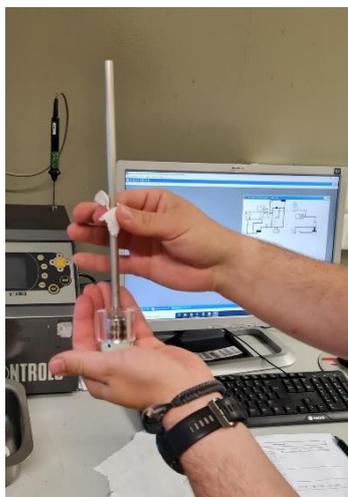


Figura 3.29 - Penetrómetro.



Figura 3.30 - Câmara de alta
pressão.

3.6.8 Aderência através do ensaio *pull-off*

No âmbito da presente campanha experimental foi avaliada a adesão entre a argamassa e o suporte sobre a qual esta é aplicada, apesar de que esta propriedade não é fulcral no principal objetivo deste estudo. No entanto, a aderência fornece informações acerca das características que as argamassas devem apresentar para um bom desempenho.

De acordo com a norma EN 1015-12 (CEN, 2016b), o ensaio permite obter o valor da resistência adesiva, que foi determinada através da tensão de tração máxima aplicada perpendicularmente à superfície da argamassa no suporte. A força de tração foi aplicada através de uma chapa metálica colada à área de ensaio da superfície da argamassa (Figura 3.31).

As chapas metálicas têm um formato em anel cônico truncado com arestas cortantes, com um diâmetro na face de maior dimensão de $50\pm 0,1$ mm e espessura na ordem dos $25\pm 0,5$ mm, com um encaixe na zona central da chapa para permitir a ligação ao sistema de tração (Figura 3.32).

As áreas de teste circulares foram cortadas ao longo da argamassa até cerca de 2 mm do suporte, através de uma caroteadora. Relativamente à colagem das chapas metálicas, houve um certo cuidado para que a zona superficial da argamassa não contivesse resíduos (limpeza efetuada usando um pincel) e a cola não contactasse com zonas exteriores ao provete circular sujeito a ensaio, tendo sido usada uma cola resistente *Ceys Araldite* (Figura 3.33). Segundo a norma devem ser ensaiados para cada suporte cinco provetes.



Figura 3.31 - Equipamento para aplicação da força de tração.



Figura 3.32 - Chapas metálicas.



Figura 3.33 - Processo de colagem das chapas metálicas.

Assim, procedendo ao cálculo da resistência adesiva, esta foi obtida a partir da expressão (23):

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (23)$$

Sendo:

- f_u , a resistência adesiva, MPa;
- F_u , a carga de rotura à tração, N;
- A, a área do provete ensaiado, mm².

Podem, segundo a norma ocorrer 3 tipos de rotura (A, B e C). O modo de rotura A acontece quando a fratura é de adesão, na interface entre a argamassa e o suporte sendo o valor de ensaio igual à resistência adesiva. Os modos de rotura B e C ocorrem para fraturas de coesão, no caso B na argamassa (Figura 3.34) e C no suporte. Para ambas as situações o valor da resistência adesiva é superior ao de ensaio. Para além dos modos mencionados na norma, foi verificado durante o ensaio a possibilidade de rotura na superfície argamassa-cola (Figura 3.35). Para esta situação o respetivo provete é desconsiderado.



Figura 3.34 - Rotura coesiva na argamassa para tijolo maciço.



Figura 3.35- Rotura coesiva na argamassa e argamassa-cola para placa de betão.

3.7 Ensaios realizados para a caracterização dos suportes

Para a caracterização dos suportes utilizados na campanha experimental, e para ajudar na análise de resultados, efetivaram-se os ensaios de massa volúmica aparente e porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Os ensaios desenvolvidos seguiram os procedimentos já descritos no capítulo 3.6, para os provetes de argamassas endurecidas.

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Após a realização de todos os ensaios em laboratório, em particular os ensaios para os provetes com a argamassa endurecida e respectivos suportes, estes fornecem as informações necessárias para auxiliar nas inferências do presente estudo, explicitando-se neste capítulo os resultados desses mesmos ensaios, sujeitos aos dois períodos de cura. Os resultados são referenciados por ordem de realização dos ensaios, tal como já tinha sido mencionado no capítulo anterior. De referir ainda que as siglas mencionadas no capítulo têm os seguintes significados:

TM: Tijolo Maciço / TF: Tijolo Furado / BB: Bloco de Betão / BBL: Bloco de Betão Leve
PB: Placa de Betão / MOLDE: “Pastilhas” do provete prismático / CV: Coeficiente de Variação.

4.2 Caracterização dos provetes com as argamassas endurecidas

4.2.1 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os resultados obtidos para o referido ensaio estão representados no Quadro 4.1 e Quadro 4.2.

Quadro 4.1 - Resultados da massa volúmica aparente e porosidade aberta para os provetes de argamassa aplicados nos suportes e endurecidos nos moldes (MOLDE), após período de cura de 28 dias.

Suporte	Nº de provetes	Massa volúmica aparente (kg/m ³)			Porosidade aberta (%)		
		$\rho_{b,médio}$ (kg/m ³)	Desvio Padrão	CV (%)	$P_{0,médio}$ (%)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	10	1724	11.24	0.7%	13.73	0.40	2.9%
TF	10	1660	15.55	0.9%	11.61	0.56	4.8%
BB	10	1676	9.70	0.6%	13.58	0.26	1.9%
BBL	10	1684	24.37	1.5%	12.72	0.96	7.5%
PB	8	1659	6.49	0.4%	13.57	0.34	2.5%
MOLDE	8	1541	17.57	1.1%	13.11	0.46	3.5%

Quadro 4.2 - Resultados da massa volúmica aparente e porosidade aberta para os provetes de argamassa aplicados nos suportes, após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de provetes	Massa volúmica aparente (kg/m ³)			Porosidade aberta (%)		
		$\rho_{b,médio}$ (kg/m ³)	Desvio Padrão	CV (%)	$P_{0,médio}$ (%)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	7	1716	20.08	1.2%	15.21	0.41	2.7%
TF	10	1649	18.04	1.1%	12.46	0.43	3.5%
BB	10	1649	18.05	1.1%	15.02	0.86	5.7%
BBL	10	1663	19.38	1.2%	13.67	0.68	4.9%
PB	10	1657	28.88	1.7%	14.96	0.31	2.0%

4.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio foi executado de forma a obter a quantidade de água absorvida por unidade de área para cada provete ensaiado. Esta quantidade é obtida através da variação de massa por unidade de tempo, o que para este caso se traduz numa variabilidade gradual e sem um declive relativamente constante, representando assim aquilo que a norma especificada para este ensaio refere como gráfico do “Tipo B”.

Para esta situação o valor do coeficiente de absorção de água é obtido através do quociente entre a variação da massa e a raiz quadrada do tempo, no caso 24h.

Os valores alcançados estão retratados no Quadro 4.3 e no Quadro 4.4.

Quadro 4.3 - Resultados do coeficiente de absorção por capilaridade para os provetes de argamassa aplicados nos suportes e endurecidos nos moldes (MOLDE), após período de cura de 28 dias.

Suporte	Nº de provetes	Coeficiente de absorção (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	6	0.0107	0.00123	11.5%
TF	10	0.0048	0.00055	11.5%
BB	10	0.0081	0.00033	4.1%
BBL	10	0.0057	0.00053	9.4%
PB	10	0.0069	0.00056	8.1%
MOLDE	9	0.0056	0.00066	11.8%

Quadro 4.4 - Resultados do coeficiente de absorção por capilaridade para os provetes de argamassa aplicados nos suportes, após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de provetes	Coeficiente de absorção (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	10	0.0134	0.00164	12.3%
TF	10	0.0081	0.00078	9.6%
BB	10	0.0147	0.00085	5.8%
BBL	10	0.0111	0.00074	6.7%
PB	10	0.0113	0.00088	7.8%

4.2.3 Índice de secagem

Os resultados obtidos para os respetivos índices de secagem estão apresentados no Quadro 4.5 e no Quadro 4.6.

Quadro 4.5 - Índice de secagem para os provetes destacados após 28 dias.

Suporte	Nº de amostras	Índice de secagem	Desvio Padrão	CV (%)
TM	10	0.161	0.0198	12.3%
TF	10	0.170	0.0133	7.8%
BB	10	0.152	0.0119	7.8%
BBL	10	0.171	0.0088	5.1%
PB	10	0.159	0.0139	8.7%
MOLDE	10	0.149	0.0071	4.7%

Quadro 4.6 - Índice de secagem para os provetes destacados após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de amostras	Índice de secagem	Desvio Padrão	CV (%)
TM	10	0.119	0.0115	9.7%
TF	10	0.132	0.0122	9.2%
BB	10	0.126	0.0081	6.5%
BBL	10	0.139	0.0076	5.5%
PB	10	0.129	0.0088	6.8%

4.2.4 Permeabilidade ao vapor de água

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água alcançaram-se os resultados explicitados no Quadro 4.7 e no Quadro 4.8, após cura corrente e envelhecimento acelerado, respetivamente.

Quadro 4.7 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água para a argamassa após 28 dias.

Suporte	Nº de provetes	$\delta_{\text{médio}}$ (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	6	2.051E-11	1.477E-12	7.2%
TF	5	2.244E-11	1.003E-12	4.5%
BB	5	1.823E-11	1.028E-12	5.6%
BBL	4	2.171E-11	1.352E-13	0.6%
PB	5	1.675E-11	5.313E-13	3.2%
MOLDE	5	2.082E-11	5.256E-13	2.5%

Quadro 4.8 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água para a argamassa após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de provetes	$\delta_{\text{médio}}$ (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	4	1.702E-11	5.959E-13	3.5%
TF	5	1.744E-11	4.682E-13	2.7%
BB	4	1.756E-11	1.480E-12	8.4%
BBL	5	1.777E-11	7.615E-13	4.3%
PB	5	1.461E-11	6.225E-13	4.3%

4.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

No Quadro 4.9 está representado o resultado para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico de acordo com a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006).

Quadro 4.9 - Resultado obtido para o módulo de elasticidade da argamassa no molde.

Provete	Massa dos provetes (g)	Massa volúmica média (g/mm ³)	Valor médio (g/mm ³)	Módulo de elasticidade (MPa)	Valor médio (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
IF_CH_1	384.46	1.502E-3	1.499E-3	2872.4	2853.9	46.2	1.6%
IF_CH_2	389.83	1.523E-3		2888.0			
IF_CH_3	376.83	1.472E-3		2801.3			

4.2.6 Resistências à tração por flexão e à compressão

No Quadro 4.10 é apresentado o valor da resistência à tração por flexão para a argamassa no molde. Nota: 1 N/mm² = 1 MPa.

Quadro 4.10 - Resistência à tração por flexão para os provetes prismáticos (40×40×160) mm.

Suporte	Provete	Resistência à tração por flexão, R _t (N/mm ²)	Valor médio R _t (N/mm ²)	Desvio Padrão	CV (%)
MOLDE PRISMÁTICO (40×40×160)	M_1	2.306	2.252	0.0494	2.2%
	M_2	2.238			
	M_3	2.210			

Relativamente à resistência à compressão para os provetes destacados dos suportes e do molde, os resultados estão apresentados no Quadro 4.11 e no Quadro 4.12.

Quadro 4.11 - Resultados da resistência à compressão para os provetes de argamassa aplicados nos suportes e endurecidos nos moldes (MOLDE e MOLDE.P), após 28 dias.

Suporte	Nº de provetes	Resistência à compressão, R _c (N/mm ²)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	9	2.554	0.2038	8.0%
TF	9	3.192	0.3096	9.7%
BB	9	2.678	0.1874	7.0%
BBL	9	3.170	0.2723	8.6%
PB	9	3.144	0.2441	7.8%
MOLDE	8	2.287	0.3182	13.9%
MOLDE.P (40×40×80)	6	2.447	0.0979	4.0%

Quadro 4.12 - Resultados da resistência à compressão para os provetes de argamassa aplicados nos suportes, após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de provetes	Resistência à compressão, R_c (N/mm ²)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	7	2.535	0.2130	8.4%
TF	7	3.079	0.2463	8.0%
BB	8	2.638	0.3226	12.2%
BBL	7	3.039	0.1904	6.3%
PB	8	3.084	0.1769	5.7%

4.2.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os resultados obtidos para o ensaio da porosimetria nas argamassas após cura corrente e envelhecimento acelerado estão respetivamente resumidos no Quadro 4.13 e no Quadro 4.14.

Quadro 4.13 - Resultados do ensaio da porosimetria para a argamassa, após 28 dias.

Suporte	Volume específico intrudido (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (μ m)	Porosidade (%)
TM	0.185	0.2118	31.7
TF	0.196	0.2913	32.5
BB	0.191	0.2855	31.9
BBL	0.185	0.2849	31.1
PB	0.191	0.2735	31.9
MOLDE	0.219	0.2242	34.2

Quadro 4.14 - Resultados do ensaio da porosimetria para a argamassa, após envelhecimento acelerado.

Suporte	Volume específico intrudido (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (μ m)	Porosidade (%)
TM	0.173	0.2554	30.3
TF	0.189	0.2622	31.7
BB	0.200	0.2366	32.9
BBL	0.188	0.2266	31.7
PB	0.188	0.2619	31.5

Informação adicional: Superfície específica = 230 m²/g, Ângulo de contacto = 130°, Tensão superficial do mercúrio = 0.049 N/m.

Será interessante ainda apresentar a variação do diâmetro dos poros da argamassa em função do volume de intrusão de mercúrio, para cada suporte onde esta é aplicada. Essa variabilidade está retratada desde a Figura 4.1 à Figura 4.4.

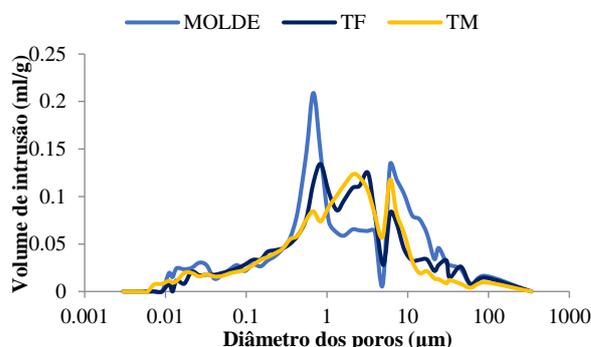


Figura 4.1 - Variação do diâmetro dos poros após 28 dias para argamassa do molde, TF e TM.

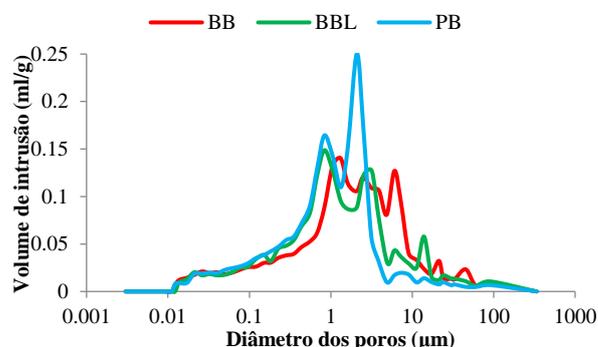


Figura 4.2 - Variação do diâmetro dos poros após 28 dias para argamassa do BB, BBL e PB.

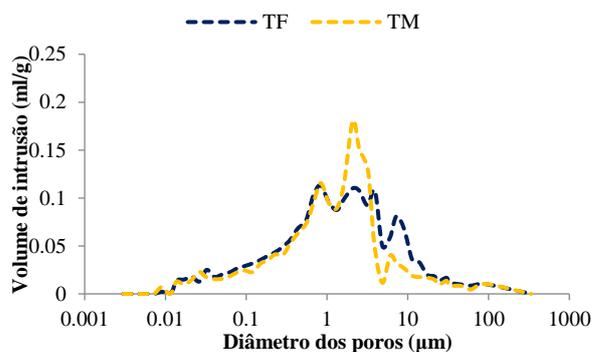


Figura 4.3 - Variação do diâmetro dos poros após envelhecimento acelerado para argamassa do TF e TM.

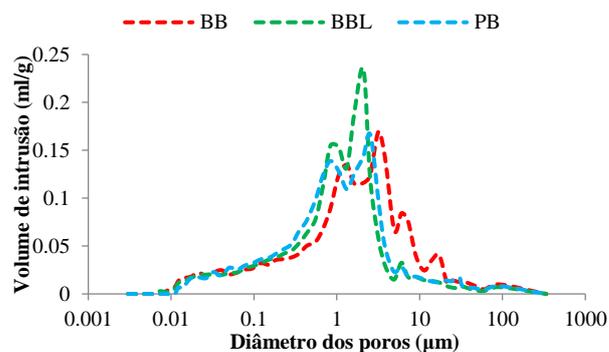


Figura 4.4 - Variação do diâmetro dos poros após envelhecimento acelerado para argamassa do BB, BBL e PB.

4.2.8 Aderência através do ensaio *pull-off*

Para a avaliação da aderência foram efetuados ensaios após os 28 dias e envelhecimento acelerado. Os resultados estão explicitados seguidamente no Quadro 4.15 e no Quadro 4.16.

Quadro 4.15 - Resultados da tensão de rotura para os provetes de argamassa aplicados nos suportes, após 28 dias.

Suporte	Nº de provetes	Tipo de rotura	Tensão de rotura, f_a (N/mm ²)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	6	Coesiva na argamassa	0.322	0.0366	11.4%
TF	5		0.307	0.0347	11.3%
BB	5		0.239	0.0247	10.3%
BBL	5		0.310	0.0513	16.5%
PB	4		0.336	0.0513	15.3%

Quadro 4.16 - Resultados da tensão de rotura para os provetes de argamassa aplicados nos suportes, após envelhecimento acelerado.

Suporte	Nº de provetes	Tipo de rotura	Tensão de rotura, f_a (N/mm ²)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	6	Coesiva na argamassa	0.309	0.0562	18.2%
TF	6		0.275	0.0418	15.2%
BB	4		0.244	0.0626	25.6%
BBL	5		0.282	0.0993	35.2%
PB	5		0.314	0.0857	27.3%

4.3 Caracterização dos suportes

4.3.1 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os resultados para o referido ensaio nos suportes estão sintetizados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica e porosidade aberta para os suportes.

Suporte	Nº de amostras	Massa volúmica aparente (kg/m ³)			Porosidade aberta (%)		
		P_b , médio (kg/m ³)	Desvio Padrão	CV (%)	P_0 , médio (%)	Desvio Padrão	CV (%)
TM	6	2071	1.62	0.1%	18.33	0.32	1.7%
TF	6	2071	12.66	0.6%	16.54	1.47	8.9%
BB	5	2113	20.91	1.0%	14.51	1.05	7.2%
BBL	6	1343	42.32	3.2%	16.52	1.32	8.0%
PB	6	2224	9.34	0.4%	11.46	0.35	3.1%

4.3.2 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio seguiu as recomendações da ISO 15148 (CEN, 2002a). Observaram-se variações de massa por unidade de tempo que vão de encontro ao gráfico denominado pela norma já especificada do “Tipo A”. Assim, no Quadro 4.18 encontram-se os resultados obtidos.

Quadro 4.18 - Resultados do coeficiente de absorção por capilaridade para os suportes.

Suporte	Nº de amostras	Coefficiente de absorção (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	5	0.1113	0.01535	13.8%
TF	6	0.0384	0.00469	12.2%
BB	6	0.3320	0.00309	0.9%
BBL	6	0.3080	0.02102	6.8%
PB	5	0.0214	0.00222	10.4%

4.3.3 Permeabilidade ao vapor de água

No Quadro 4.19 são apresentados os resultados do ensaio da permeabilidade ao vapor de água para os suportes.

Quadro 4.19 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água dos suportes.

Suporte	Nº de provetes	$\delta_{\text{médio}}$ (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão	CV (%)
TM	5	4.540E-12	3.106E-13	6.8%
TF	5	3.965E-12	1.250E-13	3.2%
BB	6	1.465E-11	1.054E-12	7.2%
BBL	5	1.563E-11	2.150E-12	13.8%
PB	5	3.294E-12	5.301E-13	16.1%

4.3.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os resultados do ensaio da porosimetria nos suportes estão sintetizados no Quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Resultados da porosimetria efetuada para os suportes.

Suporte	Volume específico intrudido (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (μm)	Porosidade (%)
TM	0.121	1.0956	23.4
TF	0.096	0.1660	19.7
BB	0.033	0.0757	7.9
BBL	0.243	0.0736	35.3
PB	0.045	0.0582	10.1

Superfície específica = 230 m²/g, Ângulo de contacto = 130°, Tensão superficial do mercúrio = 0.049 N/m.

A variação do diâmetro dos poros em função do volume de intrusão de mercúrio, para cada suporte está retratada nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

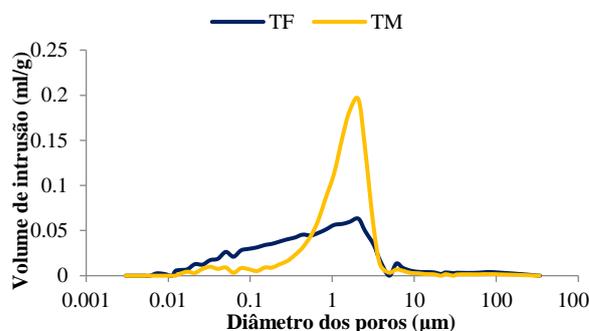


Figura 4.5 - Variação do diâmetro dos poros para TF e TM.

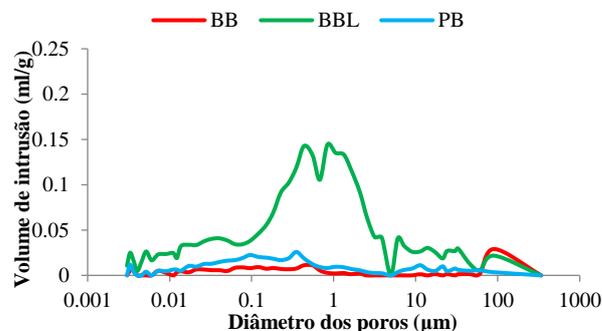


Figura 4.6 - Variação do diâmetro dos poros para BB, BBL e PB.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Este capítulo é reservado à análise de todos os resultados, obtidos ao longo da campanha experimental. A referida análise é alvo, numa fase inicial, de uma comparação entre os valores das argamassas endurecidas nos moldes metálicos e as aplicadas nos vários suportes, para os ensaios com maior significado e após o correspondente processo de cura normal ou corrente de 28 dias. O objetivo desta análise é avaliar a influência das características do suporte comparativamente às características das argamassas preparadas em laboratório, que em geral representam as que são apresentadas nas fichas técnicas, neste caso, das argamassas pré-doseadas. Para além desta comparação é analisada, nesta primeira fase, a forma como evoluem todas as variáveis ensaiadas, estando dependente também de uma apreciação crítica.

A segunda parte da análise dos resultados obtidos constitui a comparação entre processos de cura a que a argamassa esteve sujeita (28 dias e envelhecimento acelerado). Dessa maneira percebe-se a influência deste parâmetro no comportamento do revestimento, em função dos ensaios realizados. Com isto consegue-se entender o comportamento real do revestimento com o avançar do tempo.

De referir ainda que as siglas mencionadas no capítulo têm os seguintes significados:

TM: Tijolo Maciço / TF: Tijolo Furado / BB: Bloco de Betão / BBL: Bloco de Betão Leve

PB: Placa de Betão / MOLDE: “Pastilhas” do provete prismático / EA: Envelhecimento Acelerado.

5.2 Argamassas dos moldes / argamassas aplicadas

5.2.1 Porosidade aberta e absorção por capilaridade

Antes da análise associada aos ensaios supracitados, aborda-se a evolução apresentada no ensaio da massa volúmica aparente e da porosidade aberta onde esta exibiu resultados diferentes daqueles que eram esperados. Tal como referido por diversos autores, entre os quais Sequeira et al (2012), a massa volúmica varia de forma inversamente proporcional à porosidade aberta. Na presente campanha a variação entre os dois parâmetros não foi muito clara variando quase de forma direta, pelo facto de tal como enuncia o fabricante da argamassa pré-doseada, esta conter fibras naturais e aditivos. Apesar de não ser mencionado o tipo de aditivos, há grande probabilidade desta argamassa conter adjuvantes hidrófugos. A presença destes elementos oferece segundo Roos et al (2008) uma maior resistência à absorção de água fazendo com que a saturação dos provetes ensaiados seja mais demorada. Exemplo disso é o ensaio de absorção

por capilaridade, que decorreu durante 72h, traduzindo-se numa curva não estabilizada, indicando que esse tempo não chega para a saturação dos provetes. Para o ensaio da massa volúmica e porosidade aberta o período de saturação dos provetes foi de também aproximadamente 72h, apesar de que, neste caso, a absorção de água se deu por pressão hidráulica associada à imersão, o que ainda assim poderá não ter sido o tempo suficiente. Além disto verificou-se que contrariamente ao que aconteceu neste ensaio, a porosidade diminuiu com a aplicação nos suportes no ensaio da porosimetria, tal como era expectável. Todavia, como existiu homogeneidade de processos ao longo da campanha experimental, e pela fórmula que traduz a porosidade aberta, os valores deste parâmetro estarão em coerência relativamente aos que seriam obtidos.

Importa ainda ressaltar que a argamassa endurecida no molde tem uma massa volúmica aparente, quando comparada com as aplicadas nos suportes reais bastante inferior (capítulo 4.2.1). Pese embora o facto deste valor não ser o mais preciso, já que foi obtido por imersão numa argamassa pré-doseada, a ordem de grandeza encontrada deve ser alvo de análise. A razão encontrada pode residir no reduzido diâmetro médio dos poros constituintes dos provetes e também pelo facto da porosidade total (resultados de ambos os parâmetros no capítulo 4.2.7) ser a mais elevada em relação aos restantes, para a argamassa do molde.

Na Figura 5.1 está retratada a relação entre a porosidade aberta e a absorção de água por capilaridade para os provetes (40×40×15mm) destacados dos respetivos suportes e dos moldes metálicos. É possível numa primeira análise perceber que a argamassa quando aplicada sobre um suporte real tem ligeiras diferenças quando comparada com a argamassa do molde.

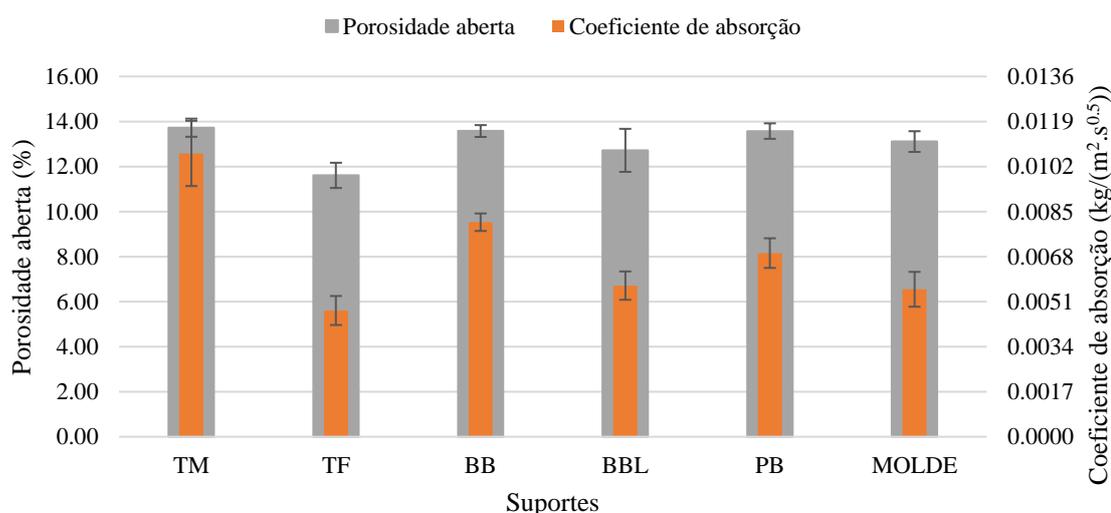


Figura 5.1 - Porosidade aberta e coeficiente de absorção por capilaridade para a argamassa endurecida após 28 dias.

Através da Figura 5.1 percebe-se que a porosidade aberta da argamassa dos vários suportes reais não difere muito da argamassa do molde, excetuando a aplicada sobre os suportes de tijolo furado (13% inferior) e tijolo maciço (5% superior). A justificação poderá residir nos tipos de suportes usados, que tal como está mencionado no capítulo 4.3 estes apresentam diâmetros médio dos poros distintos, já que no caso do tijolo maciço este apresenta um diâmetro muito superior aos demais. Já relativamente à dimensão média dos poros das argamassas no capítulo 4.2.7, verifica-se praticamente o oposto, o que significa que o tamanho dos poros entre suporte e argamassa variam de forma inversamente proporcional.

Assim, percebe-se que quando o suporte é constituído por poros de grandes dimensões, como o tijolo maciço (1.0956 μm), este demonstra não ter força capilar suficiente para vencer os poros da argamassa (de menores dimensões), sendo por isso considerados inoperantes, passando-se a absorção de água a efetuar quase somente pela argamassa. Tal conclusão já tinha sido obtida por Carasek (1996). Nesse sentido, o efeito de capilaridade é tanto mais forte quanto menores forem as dimensões dos poros da argamassa.

Arandigoyen et al (2005) já tinha estabelecido uma relação, oportunamente referida, do raio do poro capilar em função da diferença de pressão, demonstrando que estes dois parâmetros são inversamente proporcionais, ou seja quando os poros da argamassa são de menores dimensões, o fenómeno de sucção capilar é maior, traduzindo-se num maior coeficiente de absorção de água por capilaridade.

No caso, a argamassa com influência do tijolo maciço apresenta uma capacidade de absorção 91% superior à do molde, ao contrário do tijolo furado que apresenta uma redução de 14%. Importa ainda mencionar que a aplicação de cal hidráulica pré-doseada, devido à presença de adjuvantes (em particular, retentores de água) na sua constituição, é mais resistente criando uma espécie de barreira de proteção do suporte face à incidência direta de água no reboco, o que pode ter influenciado os resultados alcançados.

Numa última análise é ainda possível reparar na Figura 5.1, na razão de proporcionalidade que existe entre a porosidade aberta e o coeficiente de absorção por capilaridade, o que era esperado e vai de encontro ao estudo já efetuado por diversos autores, tal como Torres (2014).

5.2.2 Porosidade aberta e índice de secagem

Na Figura 5.2 são relacionados os resultados e a conseqüente variação, em função do suporte, da porosidade aberta e o índice de secagem para a argamassa destacada após os 28 dias, já que se continua a verificar uma certa dependência da rede contínua de vazios constituinte da argamassa de cada suporte.

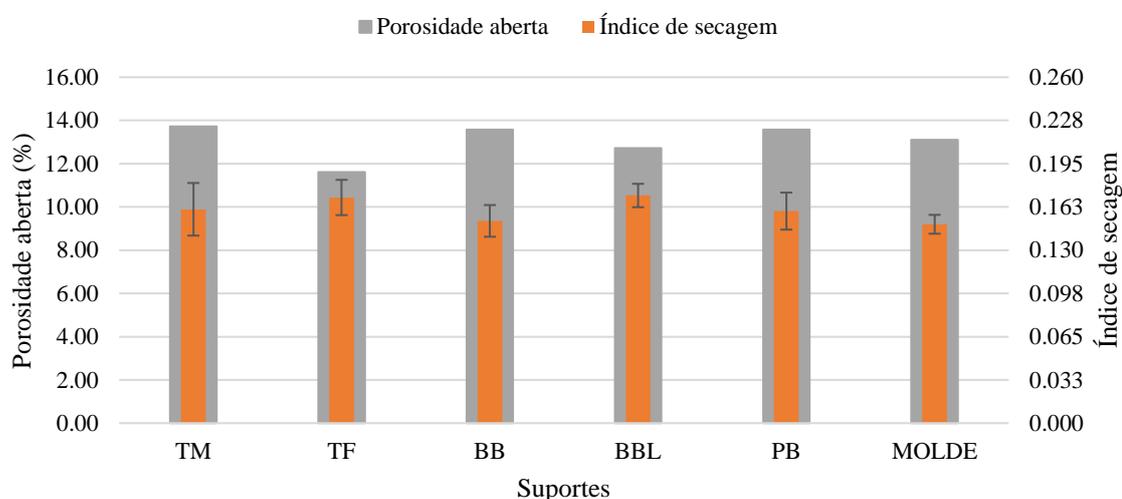


Figura 5.2 - Porosidade aberta e índice de secagem para a argamassa endurecida nos suportes e no molde após 28 dias.

O índice de secagem reflete o processo pelo qual a água evapora do material poroso, variando este valor em função da resistência da própria argamassa para permitir essa libertação. Assim, é perceptível que quando a porosidade (aberta) da argamassa é mais baixa, haverá uma maior resistência à libertação de água. Quer isto dizer que estes dois parâmetros variam de forma inversamente proporcional.

A variação obtida para estes dois parâmetros é em certa medida a esperada para os provetes influenciados pelos suportes, já que no caso do tijolo furado este, de acordo com a porosidade aberta apresentada, devia ter maior resistência à secagem e isso é verificado. O contrário se devia verificar e verifica para os restantes suportes. Isto acontece porque se a argamassa aplicada sobre este suporte é resistente à absorção de água, também o vai ser à sua libertação. A argamassa aplicada nos restantes suportes apresenta um índice de secagem muito semelhante ao do molde, logo não serão alvo de qualquer comentário.

Todavia ainda se verificam umas ligeiras diferenças entre os suportes reais, e ainda mais evidentes do que era expectável para a argamassa do molde. Este comportamento “atípico” pode estar relacionado com as propriedades já referidas da argamassa usada, pré-doseada, com grande probabilidade de conter adjuvantes hidrófugos e introdutores de ar. Nesse sentido e segundo Pinto (1997) dá lugar a uma alteração em relação à evaporação de água demorando até mais tempo para se efetivar a secagem quase total (diferença de 0.1%) relativamente às argamassas convencionais. Neste caso, foram necessários 22 dias para se encontrar a diferença mínima em relação à massa inicial.

Ainda assim, pensa-se que os valores alcançados são totalmente viáveis, e constatando os resultados percebe-se que a argamassa aplicada sobre o tijolo furado tem uma menor capacidade de secagem possivelmente justificada pela menor porosidade aberta constituinte. Em condições reais a capacidade de secagem do revestimento pode ser influenciada pela elevada porosidade dos suportes onde é aplicada a argamassa, como pode ser o caso do tijolo furado. Deste modo, a água da amassadura vai penetrar mais facilmente no suporte, traduzindo-se em menor quantidade de água absorvida pela argamassa e consecutivamente numa maior dificuldade em libertar a água por parte da argamassa já que grande parte desta encontrar-se-á nos suportes. Resumindo, a capacidade de secagem da argamassa é razoável, o que é benéfico dado que os suportes antigos são muitas vezes alvo de infiltrações provenientes do terreno, em que a água ascende por capilaridade até determinada altura da parede, fruto da elevada porosidade dos materiais da alvenaria, e uma boa capacidade de secagem é essencial para a durabilidade do revestimento.

Nesse sentido, apenas a título estatístico o índice de secagem da argamassa aplicada sobre tijolo furado é superior em relação à do molde em cerca de 14%.

5.2.3 Porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água

Na Figura 5.3, continua-se a relacionar o comportamento da argamassa com rede de poros que a constitui, representando-se uma vez mais a porosidade aberta a variar em função da permeabilidade ao vapor das argamassas ensaiadas.

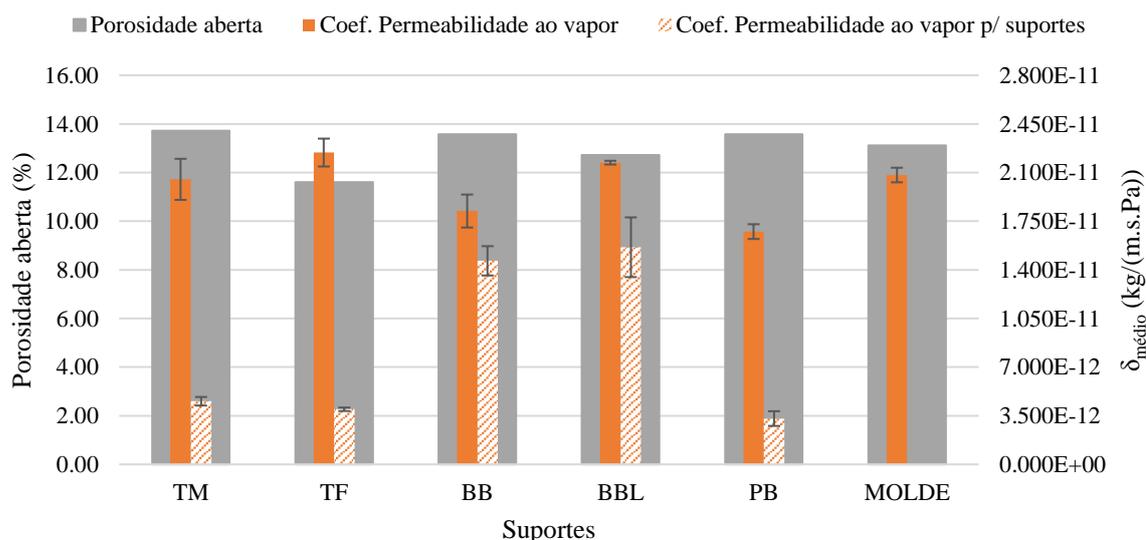


Figura 5.3 - Porosidade aberta e coeficiente de permeabilidade ao vapor para a argamassa endurecida nos suportes e no molde após 28 dias.

Antes de qualquer apreciação, há que referir que os provetes circulares usados neste ensaio, pela grande capacidade de aderência ao suporte, foram todos muito difíceis de destacar dos suportes durante a campanha experimental, o que implicou o uso de provetes que não estando perfeitos podem influenciar os resultados finais apresentados.

A permeabilidade ao vapor de água da argamassa está de acordo com Pereira (2008) diretamente relacionada com a capacidade de absorção de água por capilaridade e conseqüentemente com a porosidade aberta. Neste caso, e contrariando o que já foi referido no Capítulo 2.3.5 pelo mesmo autor esta evolução aparenta ser exatamente oposta, e muito se deve às propriedades já referenciadas da argamassa usada, que provocam uma variação pouco clara por parte deste coeficiente. O facto da dimensão média dos poros constituintes da argamassa se apresentarem grandes, como é o caso do tijolo furado ($0.2913 \mu\text{m}$), é também natural que a permeabilidade ao vapor aumente segundo este parâmetro.

Segundo Pinto (1997) este tipo de argamassas tem redução significativa da permeabilidade ao vapor relativamente às argamassas convencionais, o que pode dificultar a adequada respiração dos suportes.

Além disso é verificado neste ensaio aquilo que já era prospetado por Rodrigues (2004), em que o reboco deve ser mais permeável comparativamente ao suporte sobre o qual este é aplicado. Tal pode ser visualizado na Figura 5.3.

Para concluir, constata-se que os suportes de tijolo furado e bloco de betão leve continuam a ser aqueles com maior evidência, apresentando uma permeabilidade ao vapor mais elevada em cerca de 7% e 4%, respetivamente, em relação à argamassa do molde.

5.2.4 Porosidade aberta e resistência à compressão

Para uma última comparação, agora entre a resistência à compressão dos provetes ensaiados e da respetiva porosidade aberta, ambos após 28 dias de cura, é exibida na Figura 5.4 a relação entre os dois parâmetros. Verifica-se desde logo a influência dos suportes na resistência à compressão apresentada pelo revestimento.

Tal como Torres (2014) diversos autores concluíram que a resistência à compressão deverá ser inversamente proporcional à porosidade aberta apresentada pela argamassa. Este facto é facilmente explicável, já que, por hipótese, se a argamassa é mais porosa, o maior número de poros para amostras de igual volume vai se traduzir numa resistência menor quando uma determinada amostra é comprimida.

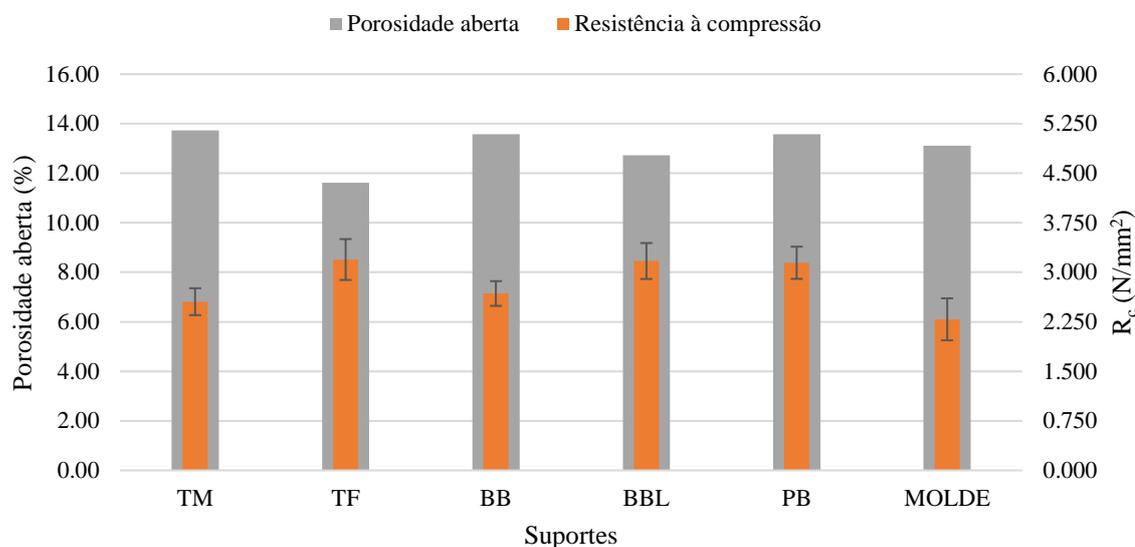


Figura 5.4 - Porosidade aberta e resistência à compressão para a argamassa endurecida nos suportes e no molde após 28 dias.

A Figura 5.4 demonstra uma certa relação entre os dois parâmetros, evidenciando-se a argamassa aplicada nos suportes comparativamente à do molde. Percebe-se que a resistência à compressão aumenta após aplicação em suportes reais, com particular destaque para o tijolo furado, com um aumento de aproximadamente 39%.

De acordo com o fabricante da argamassa, Secil (2019), a resistência à compressão apresentada pelo revestimento deverá pertencer à gama de valores da classe CS II, que segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999a), encontrar-se-á entre 1,5 a 5 MPa. Como é perceptível os valores obtidos nesta campanha coincidem com os obtidos pelo fabricante.

Como já foi mencionado, Veiga (2003) concluiu em função de vários estudos, as exigências necessárias para um revestimento de substituição durável. Esse intervalo está compreendido entre 0,4 a 2,5 MPa e os valores obtidos na presente campanha para a argamassa aplicada nos diferentes suportes após 28 dias, encontram-se muito perto do limite superior, à exceção da argamassa aplicada sobre os suportes de tijolo furado, bloco de betão leve e placa de betão que se podem traduzir em rebocos demasiado fortes, o que pode não ser muito adequado para edifícios antigos, segundo a autora.

Nota ainda para a resistência à compressão efetuada para a metade do provete prismático (40×40×80) mm que teria de ser necessariamente superior ao provete (40×40×15) mm, já que apresenta maior espessura e isso é verificado no Capítulo 4.2.6.

5.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração

O módulo de elasticidade obtido para os provetes da argamassa do molde é cerca de 2854 MPa e pode ser encontrado no Capítulo 4.2.5, sendo este um valor coerente e bastante próximo dos dados fornecidos pela Secil (2019), que refere que este estaria compreendido entre 1750-2250 MPa. Importa ainda referir que este valor está de acordo com o esperado, já que para uma argamassa de reabilitação teria de ser um valor necessariamente baixo, de forma a que não fossem introduzidas tensões elevadas no suporte. Evidência disso são os valores sugeridos por Veiga (2003), para rebocos exteriores, na ordem dos 2000-5000 MPa, o que demonstra a razoabilidade do valor alcançado.

De acordo com Veiga (1998) a resistência de um reboco à fendilhação vai depender da capacidade da argamassa em resistir a tensões de tração que eventualmente sejam introduzidas no paramento, devido ao efeito da restrição da retração e da intensidade das tensões. Assim, e segundo a mesma autora a suscetibilidade à fendilhação do reboco é tanto maior quanto maior for a relação módulo de elasticidade e resistência à tração.

Aplicando esta relação e comparando com os requisitos que devem ser exigidos às argamassas de acordo com Veiga (2003), esta relação era no mínimo cerca de 2850 MPa. Prosseguindo esta relação para efeitos comparativos da argamassa em estudo, para a resistência à tração alcançada e apresentada no Capítulo 4.2.6, seria neste caso aproximadamente 1270 MPa. Assim, verifica-se que a argamassa em estudo poderá ter pequenos problemas no que concerne à fendilhação por retração em edifícios antigos. Veiga (2005) acrescenta ainda que o valor por detrás da resistência à tração para a argamassa em estudo é demasiado forte, transmitindo forças ao suporte que se podem considerar excessivas. A justificação poderá advir do excesso de água que eventualmente foi usada, já que Campiteli & Nasciso (2008), mencionam isso mesmo. Todavia, para edifícios novos, defende Veiga (2005) a resistência à tração deve ser preferencialmente elevada.

5.3 Argamassas após cura corrente e após envelhecimento acelerado

Após a análise da evolução tomada pelos vários parâmetros, a sua consequente coerência em função do que era expectável, e também da comparação dentro de cada ensaio dos provetes influenciados pelo suporte em relação aos provetes do molde, serão neste capítulo comparados os parâmetros já mencionados dos respetivos ensaios de acordo com os processos de cura adotados e anteriormente referidos, nomeadamente após a designada cura corrente de 28 dias e após envelhecimento acelerado.

5.3.1 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Relativamente ao ensaio da massa volúmica aparente e porosidade aberta, é nesta fase alvo de comparação os resultados obtidos para ambos os parâmetros. Na Figura 5.5 estão retratados esses dados de forma gráfica.

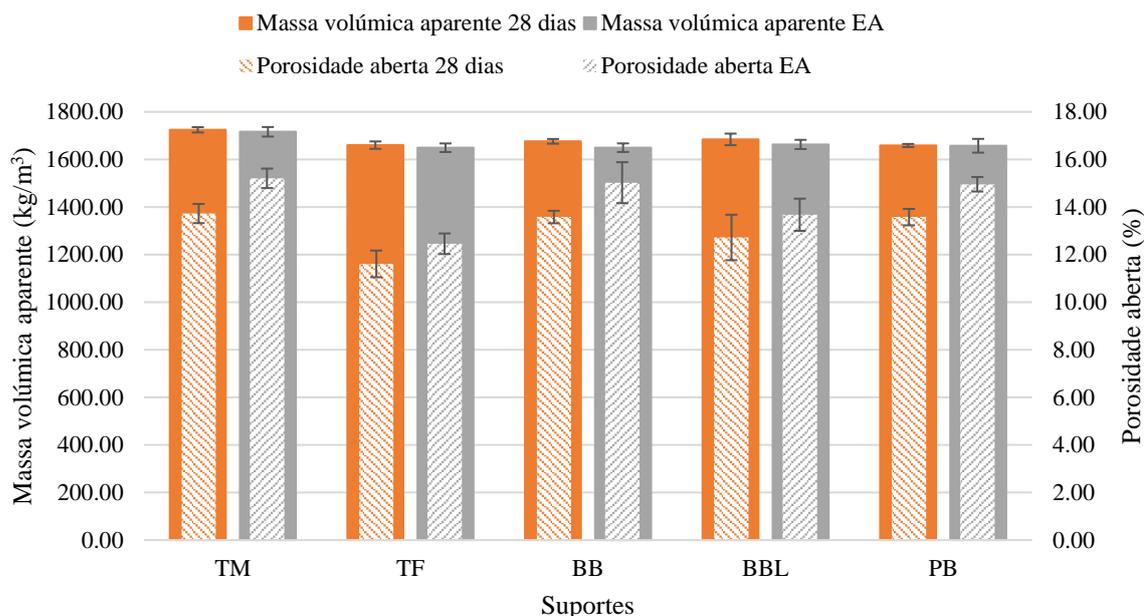


Figura 5.5 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta para a argamassa após 28 dias e após envelhecimento acelerado (e 28 dias).

Contrariamente à evolução pouco clara dos provetes após cura corrente e em função do suporte, neste caso a variação é já de acordo com o que era expectável. Verifica-se que para os provetes ensaiados após os 28 dias e envelhecimento acelerado, como esperado, a porosidade aberta deste processo de cura aumenta em relação à cura corrente. Em sentido inverso a massa volúmica aparente diminui para os provetes após envelhecimento acelerado, quando comparados aos provetes ensaiados após 28 dias.

Este comportamento é justificado pelo facto de que quando os provetes são sujeitos ao processo de envelhecimento acelerado, estes são colocados numa câmara climática com a influência do suporte, e os vários ciclos já explicitados, vão sujeitar as amostras a variações de temperatura e humidade que vão provocar o tal envelhecimento dos provetes, de modo a simular o comportamento dos revestimentos ao longo do tempo. Estas constantes variações de temperatura e humidade vão danificar um pouco o material, aumentando a rede de poros constituinte da argamassa, independentemente do suporte sobre a qual esta esteja aplicada.

Assim, constata-se que o envelhecimento acelerado tem influência na porosidade aberta e massa volúmica aparente. A maior percentagem de variação da porosidade aberta, em função do suporte, acontece no tijolo maciço com um aumento de cerca de 11%. Já para a massa volúmica aparente a maior variação é exibida no bloco de betão havendo uma diminuição de aproximadamente 2%.

5.3.2 Absorção por capilaridade, índice de secagem e permeabilidade ao vapor

Na Figura 5.6 está retratada a variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade e da respetiva capacidade de secagem em função do processo de cura.

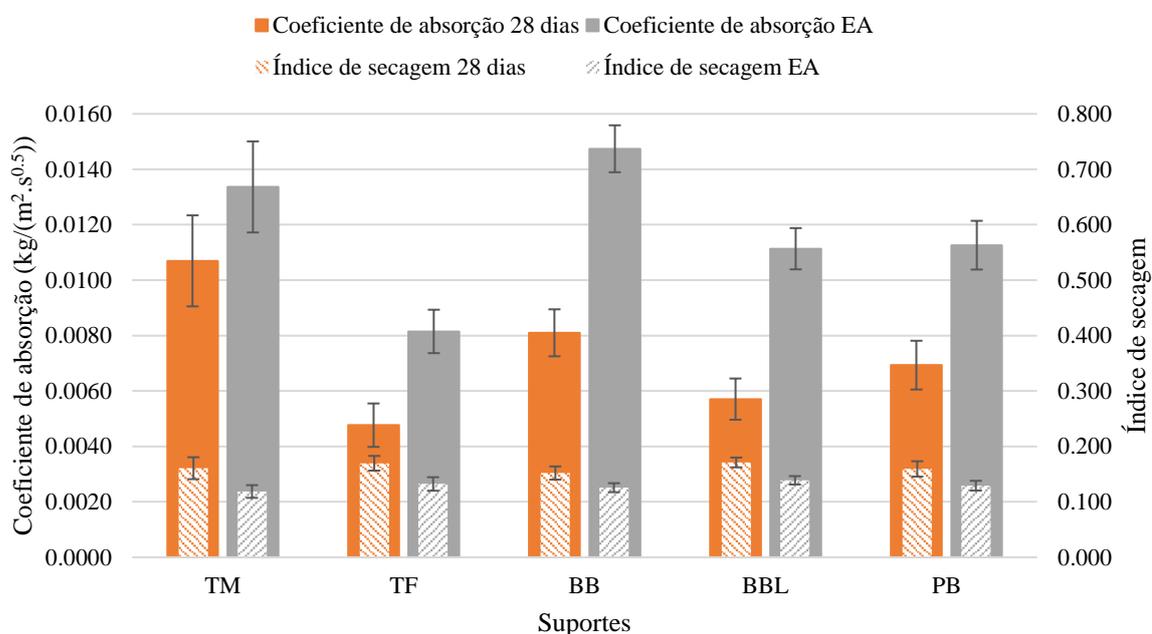


Figura 5.6 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade e índices de secagem para a argamassa após 28 dias e após envelhecimento acelerado (e 28 dias).

Observa-se que de acordo com a evolução da porosidade aberta, que tal como foi anteriormente percecionado, aumentou após o processo de envelhecimento acelerado, a capacidade de absorção por parte da argamassa também aumenta de uma forma relativamente proporcional.

Importa referir que no caso do bloco de betão a argamassa absorveu uma quantidade maior de água após envelhecimento acelerado (cerca de 81%) comparativamente aos restantes. A justificação pode estar relacionada com o ponto anterior, em que a massa volúmica é a que mais diminui e a porosidade a segunda que mais aumenta, para este suporte em específico. Durante o processo de envelhecimento acelerado os provetes são embebidos em água, e como a

argamassa aplicada neste suporte, apresenta uma porosidade total muito alta, e simultaneamente é das argamassas com poros de menores dimensões (Capítulo 4.2.7), a elevada força de sucção capilar que vai existir poderá justificar também esta evolução. Todavia, o ensaio de absorção para o suporte pode ser contraditório, mas neste caso este é colocado em contacto direto com água líquida, provocando uma maior absorção de água (Capítulo 4.3.2) devido ao grande volume de vazios.

Outra justificação encontrada por Torres et al (2020) e já referida neste estudo, está relacionada com o surgimento de microfissuração por retração.

Relativamente ao índice de secagem, após o envelhecimento acelerado, como a porosidade aberta e o coeficiente de absorção sofreram um aumento, então a secagem varia de uma forma inversamente proporcional após esse processo, o que é verificado na Figura 5.6. Importa neste parâmetro o menor valor, já que dessa maneira o revestimento consegue libertar sob efeito de evaporação a quantidade de água adequada.

O suporte que apresenta melhores características nesse sentido é o tijolo maciço reduzindo o seu índice após envelhecimento acelerado em cerca de 25%.

Quanto ao ensaio da permeabilidade da argamassa ao vapor de água, após a respetiva cura corrente e envelhecimento acelerado, os resultados comparativos estão ilustrados graficamente na Figura 5.7.

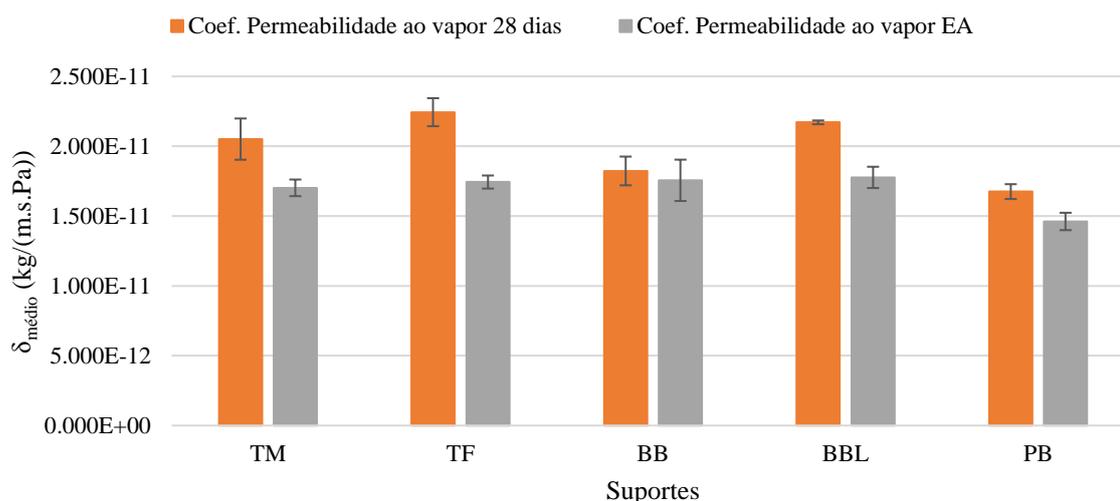


Figura 5.7 - Permeabilidade ao vapor de água para a argamassa ensaiada após 28 dias e após envelhecimento acelerado (e 28 dias).

Demonstrando a coerência dos resultados obtidos neste estudo para este ensaio, a permeabilidade ao vapor de água por parte da argamassa varia de forma inversamente proporcional à porosidade aberta ou à absorção de água. Tal já tinha sido verificado e justificado no Capítulo 5.2.3. Estudos feitos por Torres et al (2020) concluíram também que para argamassas pré-doseadas, no caso, de cimento e cal aérea, o processo de envelhecimento acelerado reduz a permeabilidade ao vapor de água das argamassas na ordem de 33%.

Para este estudo em específico, após envelhecimento acelerado, a argamassa aplicada sobre tijolo furado apresenta um maior decréscimo na sua capacidade de permeabilidade ao vapor relativamente aos demais, em cerca de 22%.

5.3.3 Resistência à compressão e aderência

Para efeitos comparativos do processo de cura corrente e das conseqüentes características apresentadas pela argamassa em função do processo de envelhecimento acelerado, está retratada na Figura 5.8 a sua evolução, no caso para a resistência à compressão e para a aderência exibida pelos provetes da argamassa ensaiada.

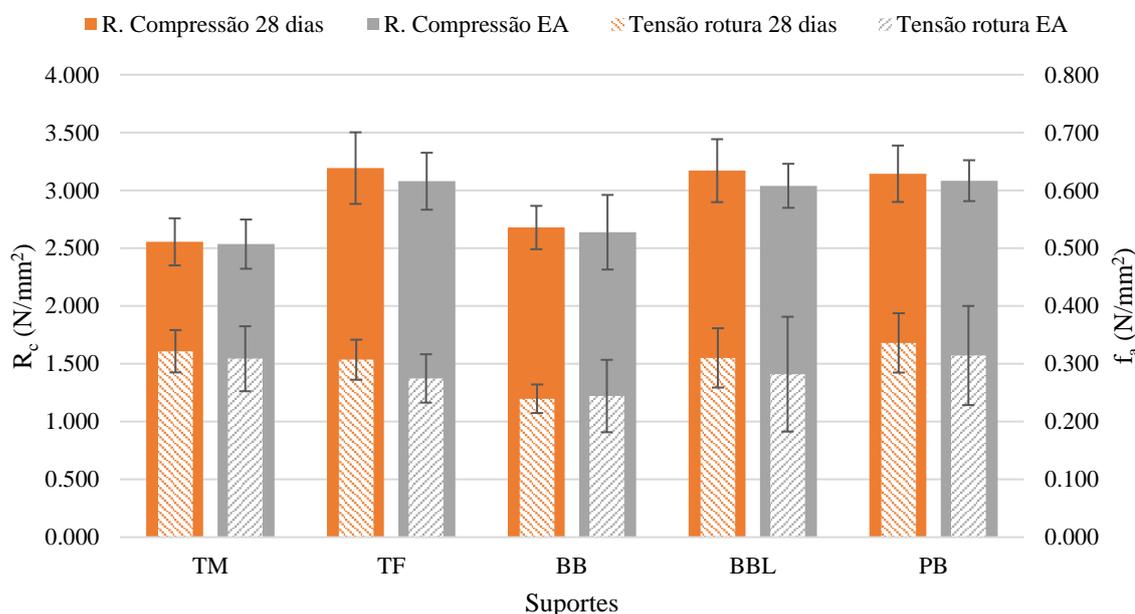


Figura 5.8 – Resistência à compressão e tensão de rotura para a argamassa ensaiada após 28 dias e após envelhecimento acelerado (e 28 dias).

Em relação à resistência à compressão percebe-se pela Figura 5.8 a influência do envelhecimento acelerado no comportamento da argamassa, que em geral provoca uma diminuição da resistência, isto porque após este processo o material fica mais danificado, com

a alteração da sua microestrutura. O tijolo furado e o bloco de betão leve apresentam um maior decréscimo, de cerca de 4%.

Para a aderência da argamassa no suporte sobre a qual é aplicada, importa nesta fase fazer uma ressalva. Esta traduz-se pela capacidade da argamassa penetrar nos poros do suporte em função da porosidade do mesmo. Percebe-se que para suportes pouco porosos, como é o caso do bloco de betão, este absorve uma quantidade menor de água e por sua vez significa uma penetração da argamassa no suporte em menor quantidade. Assim, a aderência da argamassa a este tipo de suporte é mais fraca comprovando-se pelos resultados obtidos.

A capacidade de aderência da argamassa é influenciada pelo envelhecimento acelerado, já que este processo simula o decorrer do tempo, estando o revestimento sujeito a variações de temperatura e humidade, o que danifica e instabiliza um pouco o material. Este facto é ainda mais claro quando se observam as grandes variações de valores (coeficiente de variação) após envelhecimento obtidos para os provetes. Nesse sentido, a aderência vai diminuir após este processo para todos os provetes testados, o que foi perceptível logo durante a campanha experimental, no processo de destacamento, já que este foi bastante mais facilitado após envelhecimento. O maior decréscimo foi de cerca de 11% para o suporte de tijolo furado.

De acordo com o fabricante da argamassa, Secil (2019), a aderência para tijolo e blocos é no mínimo de 0,2 MPa, o que vai de encontro aos resultados obtidos já que nenhum valor é inferior ao estabelecido. Para além disso o fabricante refere que o modo de fratura, segundo a EN 1015-12 (CEN, 2016b) é do tipo B, o que designa uma rotura coesiva na argamassa (no seio do revestimento) e esse facto foi constatado durante a atividade experimental.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As argamassas de revestimento, tal como foi mencionado numa fase inicial deste trabalho, são sujeitas a caracterizações em laboratório, com recurso a moldes normalizados, não porosos e de acordo com as normas em vigor. Em função dessas caracterizações as argamassas são aplicadas sobre suportes, que possivelmente têm propriedades diferentes daquelas que foram consideradas em laboratório, e que obviamente vão desenvolver diferentes interações entre estes elementos.

Esta incerteza associada aos tipos de suportes que as argamassas vão encontrar após aplicação, foi a razão pela qual foi realizado este estudo, para que dessa forma se possa compatibilizar a aplicação de argamassas em determinados suportes, aprofundando o conhecimento das condicionantes de cada aplicação.

Escolheu-se uma argamassa específica (cal hidráulica pré-doseada) a ser aplicada em cinco suportes diferentes (tijolo maciço, tijolo furado, bloco de betão, bloco de betão leve e placa de betão). Foi feita uma breve caracterização individual tanto da argamassa como dos suportes. No caso da argamassa era importante adequar a sua trabalhabilidade antes da aplicação nos suportes. Estes últimos foram caracterizados durante a campanha experimental. Quanto aos processos de cura optou-se por submeter à cura normal de 28 dias, e a envelhecimento acelerado para assim compreender o comportamento da argamassa ao longo do tempo.

Realizada e analisada toda a campanha experimental conclui-se numa primeira fase que todos os objetivos propostos inicialmente para este trabalho foram cumpridos, sendo um contributo para o conhecimento na área das argamassas. Na realidade este estudo é uma pequena parcela de um projeto mais extenso que visa os mesmos objetivos já citados.

Apesar da argamassa usada ser um material que não permite a obtenção de resultados finais claros, visto que contém fibras naturais e adjuvantes hidrófugos, é possível ainda assim concluir que se confirma a influência do suporte nas características da argamassa aplicada.

Numa primeira fase de análise é abordada qual a influência e as conseqüentes características demonstradas nas argamassas depois de aplicadas nos suportes comparativamente à influência do molde.

A argamassa aplicada no tijolo furado serve de premissa ao desenvolvimento deste estudo. O suporte em questão é um material poroso ($p_{0,médio} = 16.54 \%$), com poros de dimensão média reduzida ($0.1660 \mu\text{m}$), o que aumentou o fenómeno de sucção capilar. A argamassa ao ser

aplicada sobre este suporte evoluiu no sentido contrário ao do substrato, ou seja, apresentou poros de maiores dimensões, o que correspondeu a um fenómeno de sucção capilar mais fraco e com isso um menor coeficiente de absorção por capilaridade. Seguindo este raciocínio percebe-se o facto desta argamassa ter menor porosidade aberta (13% < MOLDE), maior resistência à secagem (14% > MOLDE), maior capacidade de permeabilidade ao vapor (7% > MOLDE) e maior resistência à compressão (39% > MOLDE), o que pode conferir ao reboco demasiada resistência, desenvolvendo uma certa suscetibilidade à fendilhação.

Em relação ao tijolo maciço e à argamassa que é aplicada sobre ele, esta exibiu maior porosidade aberta (5% > MOLDE), logo maior coeficiente de absorção de água por capilaridade (poros da argamassa de menores dimensões, 0.2118 μm) e o seu suporte apresentou poros de maior dimensão média (1.0956 μm).

Nota ainda para argamassa do bloco de betão leve que apresenta, a par do tijolo furado, uma maior resistência à secagem e pelo contrário a argamassa do bloco de betão uma menor resistência em relação aos suportes ensaiados e com isso uma menor aderência ao suporte.

O revestimento aplicado sobre a placa de betão apresenta menor permeabilidade ao vapor de água, o que pode estar relacionado com as dimensões mesmo muito reduzidas dos poros do suporte.

Assim, comparativamente à argamassa do molde é de realçar a grande absorção de água do revestimento sobre o tijolo maciço (cerca de 91%), do facto da resistência à secagem ter aumentado em todos os suportes reais e da permeabilidade ao vapor para a argamassa da placa de betão ter diminuído muito face a este. Importa ainda referir que para a aplicação em edifícios antigos esta argamassa pode apresentar uma certa suscetibilidade à fendilhação.

Na segunda e última fase de análise avalia-se a influência do processo de envelhecimento acelerado no comportamento da argamassa. Conclui-se que, como esperado este processo interfere nas características apresentadas pelo revestimento, principalmente na porosidade aberta que aumenta na generalidade dos suportes, até um máximo de 11% para a argamassa aplicada sobre o tijolo maciço.

O revestimento sobre o tijolo furado exhibe o maior decréscimo na permeabilidade ao vapor de água, de cerca de 22%, a menor diferença de porosidade aberta, no caso aproximadamente 7%, e a maior queda em termos de resistência à compressão (cerca de 4%) e aderência ao suporte (cerca de 11%), após o processo de envelhecimento acelerado.

Quanto à argamassa do tijolo maciço, para além de como já foi referido apresentar o maior aumento em termos de porosidade aberta, a sua capacidade de secagem melhorou bastante sendo agora a que apresenta melhores características nesse sentido, tendo o índice diminuído cerca de 74%. A capacidade de absorção de água é também a menos afetada.

Outro elemento importante alvo de análise é a argamassa aplicada sobre o bloco de betão que vai absorver mais água (aproximadamente 81%), já que a porosidade total deste revestimento aumenta apresentando os poros constituintes do material dimensões reduzidas.

Como já mencionado anteriormente, existe influência do suporte no comportamento das argamassas. No entanto, há trabalhos e ensaios que podiam ser efetuados no futuro com o intuito de melhorar este trabalho e aumentar o conhecimento na área, tais como:

- Execução da camada de reboco nos suportes reais, desta vez, projetada mecanicamente para averiguar as possíveis consequências na argamassa, já que como refere o fabricante a argamassa é vocacionada nesse sentido;
- Uso de uma argamassa de acabamento tal como recomenda o fabricante, até porque como refere Veiga (2005) um reboco de uma camada físsura muito mais facilmente que um de duas camadas;
- Alterar a quantidade de água que foi usada (apesar da boa trabalhabilidade demonstrada), para verificar a possível influência no comportamento da argamassa, nomeadamente na suscetibilidade à fendilhação;
- De forma a obter dados mais realísticos dos comportamentos dos provetes ao longo do tempo, efetuar cura natural dos provetes da argamassa, sujeitando estes às várias ações climáticas, durante um período relativamente longo;
- Execução do mesmo estudo em diferentes suportes como tabique e adobe, já que foram materiais muito usados nos edifícios de outrora;
- Repetição de alguns ensaios com o objetivo de analisar a veracidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addleson, L. (1992). *Building Failures, a Guide to Diagnosis, Remedy and Prevention*. 3rd Edition, Oxford, Butterworth & Heinemann.
- Almeida, L., Silva, A. S., Rosário Veiga, M., & Mirão, J. (2017). *Characterization of Renders From Buildings Awarded With Lisbon'S Valmor Prize of Architecture (1902-2002). State of Conservation and Contributions for Preservation*. November, 12–15.
- Alvarez, J., Sequeira, C., & Costa, M. (2005). Ensinamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas Resumo. *Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção*.
- APFAC. (2007). *Argamassas Fabris: Produção, Famílias, Normas*. Associação Industrial Portuguesa, Auditório COPRAI, Lisboa.
- Arandigoyen, M., Bernal, J. L. P., López, M. A. B., & Alvarez, J. I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252(5), 1449–1459. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145>
- Botas, S. M. (2009). Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. *Dissertação Apresentada Para a Obtenção Do Grau Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa*.
- Brito, V. (2009). Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte. *Dissertação Apresentada Na Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa Para Obtenção Do Grau Académico de Mestre Em Engenharia Civil*.
- Brocken, H. J. P., Spiekman, M. E., Pel, L., Kopinga, K., & Larbi, J. A. (1998). Water extraction out of mortar during brick laying : A NMR study. *Materials Ans Structures*, 31(October 2015), 49–57. <https://doi.org/10.1007/BF02486414>
- Campiteli, V. C., & Nasciso, G. da S. (2008). Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, 8, 21–35.
- Carasek, H. (1996). *Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Substratos Porosos – Avaliação dos Fatores Intervenientes e Contribuição ao Estudo do Mecanismo de Ligação*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Carneiro, A. M. P. (1993). Revestimento Externo em Argamassa de Cimento, Cal e Areia – Sistemática das Empresas de Construção Civil de Porto Alegre. *Dissertação de Mestrado Em Engenharia Civil, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre*.
- CEN. (1998a). *Methods of test for mortar for masonry Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. EN 1015-2.

- CEN. (1998b). *Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. EN 1015-6.
- CEN. (1999a). *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. EN 1015-11.
- CEN. (1999b). *Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3.
- CEN. (2002a). *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion*”,. ISO 15148.
- CEN. (2002b). *Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates*. EN 1015-21.
- CEN. (2014). *Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties*. EN 16322.
- CEN. (2016a). *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties*. ISO 12572.
- CEN. (2016b). *Methods of test for mortar for masonry; Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. EN 1015-12.
- Coelho, A., Torgal, F. P., & Jalali, S. (2009). *A Cal na Construção* (TecMinho). Universidade do Minho, Publidisa.
- Costa, E. B. C., & John, V. M. (2011). Aderência Substrato-Matriz Cimentícia – Estado da Arte. In *9º Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*.
- Coutinho, A. de S. (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão - Volume 1* (2ª Edição). Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, M. J. (2005). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem* (1ª). FEUP Edições.
- Fernandes, H., & John, V. (2007). *Estimativa da energia de lançamento das argamassas projetadas por spray a ar comprimido*. Boletim Técnico BT/PCC/474, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Francisco, V. A. (2015). Durabilidade de argamassas de revestimento à base de cal hidráulica natural. *Dissertação Para Obtenção de Grau de Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Do Porto*.
- Freitas, V. P., Torres, M. I., & Guimarães, A. S. (2008). *Humidade Ascensional* (FEUP (ed.)).
- Gaspar, P., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2007). Técnicas de Diagnóstico e Classificação de Anomalias por Perda de Aderência em Rebocos. *Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção*.
- Gonçalves, S. R. de C., & Bauer, E. (2005). Estudo de caso da variação da resistência de aderência à tração em uma parede. *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*,

- March*, 562–567.
- Guimarães, J. E. P. (2002). *A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil* (Pini (ed.); 2nd ed.).
- Hughes, J., & Válek, J. (2003). *Mortars in historical buildings. A review of the conservation, technical and scientific literature*. Technical Conservation, Research and Education Division—Historic Scotland.
- INE. (2011). *Instituto Nacional de Estatística (página internet oficial)*. Acedido em 06/04/2021. https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=ine_censos_publicacao_det&contexto=pu&PUBLICACOESpub_boui=73212469&PUBLICACOESmodo=2&selTab=tab1&pcensos=61969554
- IPQ. (2006). *Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. NP EN 14146.
- IPQ. (2008a). *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria; Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*. NP EN 1015-19.
- IPQ. (2008b). *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. NP EN 1936.
- IPQ. (2015). *Cal de construção - Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade* (p. 55). NP EN 459-1.
- Lanas, J., Sirera, R., & Alvarez, J. I. (2006). *Study of the Mechanical Behavior of Masonry Repair Lime-Based Mortars Cured and Exposed Under Different Conditions*. 36, 961–970. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.003>
- Margalha, M. G., Veiga, M. do R., & Brito, J. de. (2007). Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. *Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção*, 9.
- Mascarenhas, J. (2006). *Sistemas de construção descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal*. Livros Horizonte. ISBN 972-24-1339-2, (vol.1).
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (2000). Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures. *Construction and Building Materials*, 14(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00045-8)
- Mosquera, M. J., Silva, B., Prieto, B., & Ruiz-herrera, E. (2006). *Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport*. 36, 1635–1642. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.041>
- Obrzut, L., Medeiros, A., & Luso, E. (2020). Caracterização Experimental De Argamassas De Substituição À Base De Cal Submetidas Ao Envelhecimento Natural E Artificial.

- Associação Brasileira de Patologias Das Construções*, 2226–2237.
<https://doi.org/10.4322/cbpat.2020.216>
- Paulo, D. (2019). *Estudo de fatores que podem influenciar as características das argamassas após aplicação nos suportes*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Pereira, T. (2008). *Optimização das Características de Humedecimento e Secagem de Argamassas*. *Dissertação Para Obtenção de Grau de Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa*.
- Pierre, N. (2008). *Inter Actions Mortier-Support: Éléments Déterminants des Performances et de l'adhérence d'unmortier*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Université de Toulouse.
- Pinto, A. P. (1997). *Conservação de pedras graníticas. Estudo da acção de hidrófugos (ITG 22)*. LNEC.
- Ranesi, A., & Faria, P. (2020). *Rebocos Interiores para reabilitação - Requisitos e Características Importantes*. *Encore 2020 - 4º Encontro de Conservação e Reabilitação de Edifícios*.
- Rato, V. N. (2006). *Influência da Microestrutura Morfológica no Comportamento das Argamassas*. Tese para Obtenção de Grau Académico de Doutor em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.
- Rodrigues, M. P. (2004). *Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas -Contribuição para o Estudo da Influência dos Ligantes*. *Dissertação Para Obtenção de Grau de Académico de Doutor Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa*.
- Rodrigues, P., Henriques, F., & Rato, V. (2007). *Argamassas Correntes: Influência do Tipo de Ligante e do Agregado*. *2º Congresso Nacional de Argamassas De Construção, Lisboa, Portugal*.
- Roos, M., König, F., Stadtmüller, S., & Weyershausen, B. (2008). *Evolution of Silicone Based Water Repellents for Modern Building Protection*. *5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*, 16, 3–15.
- Sabbioni, C., Bonazza, A., & Zappia, G. (2002). *Damage on Hydraulic Mortars : the Venice Arsenal*. *Journal of Cultural Heritage*, 3, 83–88.
- Scartezini, L. (2002). *Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamasssa fresca*. *Dissertação de Mestrado Em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.*, 286.
- Scartezini, L., & Carasek, H. (2003). *Fatores que exercem influência na resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassas* (Issue 1, pp. 569–581). V SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas.

- Secil. (2019). *Ficha técnica - Reabilita cal RB*.
- Sequeira, A. C., Frade, D., & Gonçalves, P. (2007). Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. *Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção*.
- Sequeira, C., Frade, D., Gonçalves, P., & Santos, A. S. (2012). Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. *Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção*.
- Silva, N. (2006). Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de reocha calcária. *Dissertação Apresentada Como Requisito Parcial à Obtenção de Grau de Mestre, Pelo Programa de Pós-Graduação Em Construção Civil – PPGCC/UFPR, Setor de Tecnologia, Da Universidade Federal Do Paraná, Curitiba.*, 110.
- Torres, I., Colen, I., Silveira, D., & Pinto, R. (2020). *Influence of Grid Presence in the Characteristics of Applied Mortars*. 255–262. <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.082>
- Torres, Isabel, Flores-Colen, I., Silveira, D., Pinto, R., & Matias, G. (2020). *Interface argamassa-suporte: análise das características físicas com base em várias campanhas experimentais*. 331–342.
- Torres, M. I. (2014). Influência da absorção do suporte na argamassa de revestimento. *Relatório de Pós Doutorado*.
- Veiga, M. do R. (2003). Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. *Actas Do 3º ENCORE, Encontro Sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC*, 10.
- Veiga, M. do R. (2005). *Comportamento de Revestimentos de Fachadas com Base em Ligante Mineral. Exigências Funcionais e Avaliação do Desempenho*. LNEC.
- Veiga, R. (1998). *Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes*. Dissertação para a Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Veiga, R. (2005). Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos.” *LNEC*.
- Veiga, R., & Faria, P. (1990). *Revestimentos de Ligantes Minerais e Mistos com Base em Cimento, Cal e Resina Sintética*. Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes – 1ºMódulo. LNEC, p.40-173.
- Veiga, R., Margalha, G., Magalhães, A. C., Fragata, A., & Velosa, A. (2010). *Lime-Based Mortars : Viability for Use as Substitution Renders in Historical Buildings*. April. <https://doi.org/10.1080/15583050902914678>
- Veiga, R., & Santos, A. R. (2015). As argamassas de cal hidráulica natural na reabilitação. *Revista Pedra & Cal*, 58, 38–40.

ANEXO A - FICHA TÉCNICA

FICHA TÉCNICA

REABILITA CAL RB

REBOCO DE ENCHIMENTO EXCLUSIVAMENTE FORMULADO COM CAL HIDRÁULICA NATURAL

SECIL TEK
DÁ FORMA ÀS IDEIAS

1. DESCRIÇÃO

O **REABILITA CAL RB** é uma argamassa seca formulada exclusivamente a partir de cal hidráulica natural. Incorpora agregados siliciosos e calcários criteriosamente selecionados e adições, dispostas de propriedades particulares de tixotropia, aderência, resistência química e durabilidade particularmente adaptadas à função a que se destina. O **REABILITA CAL RB** é vocacionado para a aplicação projetada, podendo, no entanto, ser aplicado manualmente.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

O **REABILITA CAL RB** foi especialmente concebido para conservação e reabilitação do edificado, sendo destinado ao revestimento de alvenarias antigas ou de construção nova. O **REABILITA CAL RB** é aplicado como camada de enchimento e regularização em suportes antigos consolidados com o **REABILITA CAL CS**, ou diretamente sobre os suportes quando estes apresentarem as características físicas e mecânicas apropriadas. Deste modo, **REABILITA CAL RB** também pode ser aplicado sobre betão e alvenarias de tijolo cerâmico ou blocos de betão ou alvenaria de pedra.

A utilização exclusiva do ligante de Cal Hidráulica Natural e a sua composição especial resulta numa excelente compatibilidade com os suportes antigos, onde para além da compatibilidade física e mecânica se destaca a elevada compatibilidade química.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Produto em pó	Valor	Norma
Granulometria	< 3,5 mm	-
Produto em pasta	Valor	Norma
Água de amassadura	17,0 ± 1,0 %	-
Consumo teórico	12,0 kg/m ² /cm	-
Produto endurecido	Valor	Norma
Resistência à compressão	Classe CS II	EN 1015-11
Aderência ao tijolo e bloco / Modo de fratura	≥ 0,2 MPa / B	EN 1015-12

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt

1
seciltek.com

FICHA TÉCNICA

REABILITA CAL RB

REBOCO DE ENCHIMENTO EXCLUSIVAMENTE FORMULADO COM CAL HIDRÁULICA NATURAL



DÁ FORMA ÀS IDEIAS

Módulo de elasticidade	1750-2250 N/mm ²	BS 1881-5
Massa volúmica	1500 ± 150 kg/m ³	EN 1015-10
Capilaridade (24h)	≥ 0,3 kg/m ²	EN 1015-18
Permeabilidade ao vapor de água μ	≤ 15	EN 1015-19
Penetração de água após ensaio de capilaridade	< 5,0 mm	EN 1015-18
Reação ao fogo	Classe A1	EN 988-1
Condutibilidade térmica	0,61 W/(m.K) (P=50%)	NP EN 1745

4. APLICAÇÃO

a) Preparação de suportes

Os suportes preparados com a argamassa **REABILITA CAL CS** estão aptos a receber o **REABILITA CAL RB**.

No caso de aplicação direta sobre suportes em alvenaria estes devem encontrar-se coesos, limpos, sem qualquer tipo de material que afete as normais condições de aderência.

b) Preparação da argamassa

O **REABILITA CAL RB** deve se amassado em equipamento de projeção cm pré amassadura do produto.

Em máquinas sem doseamento automático de água amassar o **REABILITA CAL RB**, na proporção de 4,0 a 4,5 litros de água por saco de 25 kg.

Em máquinas com doseamento automático de água regular o caudal mínimo de água que permita uma boa trabalhabilidade.

c) Aplicação

Para a aplicação do **REABILITA CAL RB** deve fazer-se o uso das boas práticas subjacentes à realização de rebocos de aplicação projetada, prevendo o aperto da argamassa, o talochamento, a utilização de reforços com a rede de fibra de vidro, **REDUR REDE 115** nas áreas de concentração de tensões, tais como, transições de suportes, vértices de vãos, cunhais, etc., entre outros cuidados importantes para o sucesso da aplicação.

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



2

seciltek.com

FICHA TÉCNICA

REABILITA CAL RB

REBOCO DE ENCHIMENTO EXCLUSIVAMENTE FORMULADO COM CAL HIDRÁULICA NATURAL



Não devem ser executadas camadas com espessuras superiores a 2,0 cm nem inferiores a 1,0 cm.

A superfície do *REABILITA CAL RB* deve ser finalizada com a técnica tradicional de talochamento preparando a mesma para o recebimento da camada de acabamento final com o produto *REABILITA CAL AC*.

Por se tratar de situações específicas em cada trabalho de reabilitação, devem ser consultados os nossos Serviços Técnicos no momento de seleção dos produtos.

d) Restrições

O *REABILITA CAL RB* não deve ser aplicado a temperaturas ambientes e de suporte inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C. O seu tempo de cura é de 28 dias.

Em tempo quente e/ou seco ou no caso de suportes expostos à ação direta dos raios solares, deve humedecer-se previamente o suporte iniciando a aplicação quando este se mostrar seco.

Nestas condições deve proceder-se à rega diária das superfícies executadas, durante uma semana, de forma a manter os rebocos permanentemente humedecidos.

A aplicação na presença de ventos fortes pode provocar a fissuração do reboco. Neste caso proceder à proteção dos paramentos de modo a minimizar os efeitos da ação do vento.

5. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas de 60 sacos

Validade

12 meses, desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

6. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- Irritante para os olhos, vias respiratórias e pele;
- Pode causar sensibilização em contacto com a pele;
- Não respirar as poeiras;
- Evitar o contacto com a pele e os olhos;
- Em caso de contacto com os olhos, lavar imediatamente e abundantemente com água e consultar um especialista;

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltex@secil.pt



3
seciltex.com

FICHA TÉCNICA

REABILITA CAL RB

REBOCO DE ENCHIMENTO EXCLUSIVAMENTE FORMULADO COM CAL HIDRÁULICA NATURAL

SECIL TEK
DÁ FORMA ÀS IDEIAS

- Usar vestuário de proteção e luvas adequadas;
- Conservar fora do alcance das crianças.

	<p>REABILITA CAL RB</p> <p>EN 998-1</p> <p>Argamassa de renovação (R) para revestimentos interiores e exteriores</p> <p>Declaração de desempenho DOP 03002</p>
---	--

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorreta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

Revisão de Julho 2019
FT.03002.02

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt

4
seciltek.com