



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Pedro Martins Braz

INTERFACE DE ARGAMASSAS DE CAL COM SUPORTES
DE PEDRA E DE TIJOLO MACIÇO

Dissertação de Mestrado de Reabilitação de Edifícios (Ramo Não Estrutural),
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel 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.

Coimbra, Novembro 2021



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João Pedro Martins Braz

INTERFACE DE ARGAMASSAS DE CAL COM SUPORTES DE PEDRA E DE TIJOLO MACIÇO

Lime mortar interface with stone supports, solid bricks

Dissertação de Mestrado de Reabilitação de Edifícios (Ramo Não Estrutural),
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Torres. e pela Professora Doutora Inês Flores Colen

Colaboração institucional:



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.

Coimbra, novembro 2021

*“O esforço pelo conhecimento é um daqueles objetivos independentes,
sem os quais uma afirmação consciente da vida me
parece impossível ao homem de pensamento.”*

Albert Einstein

Para o meu Pai,

Resumo

A investigação desenvolvida foca-se no estudo das características dos revestimentos de cal aérea e cal hidráulica em edifícios antigos, e em especial, analisa o seu comportamento quando em contacto com diferentes suportes. Pretende dar-se especial enfoque ao estudo do mecanismo responsável pela aderência entre a argamassa e o suporte, e quais os fatores que a poderão influenciar e que irão também influenciar as características das argamassas após aplicação nos suportes, com intuito de contribuir para a melhoria da adequabilidade e competências no sector das argamassas.

Numa primeira fase da investigação procedeu-se à investigação e recolha de dados acerca das características das argamassas pré-doseadas de cal aérea e cal hidráulica, e análise e tratamento dos mesmos. Foram referidas e caracterizadas as anomalias mais correntes associadas ao reboco em edifícios antigos, sendo o seu aprofundamento do conhecimento um fator determinante na realização da presente dissertação.

Posteriormente, foi levada a cabo uma campanha experimental constituída por diferentes ensaios em que se pretendeu aprofundar o conhecimento das características da cal aérea e da cal hidráulica após aplicação em suportes e compará-las com as características determinadas em laboratório sobre proveites normalizados. Esta comparação tem como objetivo conhecer a influência que os suportes têm nas argamassas após a sua aplicação e assim poder contribuir para uma escolha mais adequada das argamassas a aplicar em suportes de edifícios antigos que necessitam de reabilitação.

Palavras-chave: Cal aérea hidratada; Cal hidráulica; Argamassas pré-doseadas; Interface.

Abstract

The research developed focuses on the study of the characteristics of air lime and hydraulic lime coatings in old buildings, and in particular, analyzes their behavior when in contact with different supports. It intends to give special focus to the study of the mechanism responsible for the adhesion between the mortar and the substrate, what factors may influence it and which will also influence characteristics of the mortars after application to the substrates, in order to contribute to the improvement of suitability and skills in the mortar sector.

In the first phase of the investigation, research and data collection were carried out on the characteristics of the pre-dosed mortars of air lime and hydraulic lime, and their analysis and treatment. The most common defects associated with rendering in old buildings were mentioned and characterized, being their deepening of knowledge a determining factor in the realization of this dissertation.

Subsequently, an experimental campaign was carried out consisting of different tests in which the aim was to deepen the knowledge of the characteristics of air lime and hydraulic lime after application on supports and compare them with their characteristics determined on laboratory standardized samples. This comparison aims to know the influence that substrates have on mortars after their application and thus contribute to a more adequate choice of mortars to be applied to substrates of old buildings needing rehabilitation.

Keywords: Hydrated air lime; Hydraulic lime; pre-dosed mortars; Interface.

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e disponibilidade das minhas Orientadoras, Doutora Maria Isabel Torres e a Doutora Inês Flores-Colen, pelas suas observações, críticas e sugestões. Os meus sinceros agradecimentos pelos seus contributos que foram fulcrais para a minha aprendizagem e para o meu desenvolvimento pessoal.

Explicito também os meus agradecimentos, ao Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva, pelo seu conhecimento, pelo seu gosto de ensinar e pela sua disponibilidade durante o curso.

Os meus agradecimentos ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (Itecons) pela cedência das instalações, informação, materiais e equipamentos, e pela ajuda intensa dos seus colaboradores e por me ter proporcionado uma tese no âmbito de um projeto IF MORTAR (POCI-01-0145-FEDER-032223/PTDC/ECI-EGC/32223/2017), inserido no programa Portugal 2020, financiado pelo FEDER, através do programa POCI.

Um muito obrigado de coração à Doutora Dora Silveira e ao Engenheiro Rafael Travincas Pinto, pela disponibilidade, pelo profissionalismo, e pela capacidade de trabalho que tiveram, dando o auxílio necessário na campanha experimental.

À minha família e aos meus amigos que me ajudaram e apoiaram sempre incondicionalmente.

Ao meu irmão David Brás, que não me deixou cair, não me deixou desistir no meu percurso académico, que me ajudou muito, que fez com acreditasse que era possível, um eterno agradecimento.

Pelo o incentivo, pelo o apoio e pela força que me transmitiu, um agradecimento especial à minha mãe.

Pelo apoio incondicional, pelo o Amor e pela paciência demonstrada nos meus momentos menos bons, um agradecimento único e especial à minha namorada, Filipa Barata.

O meu muito obrigado

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento da temática.....	1
1.2 Objeto de estudo e objetivos do trabalho.....	2
1.3 Organização da Dissertação.....	3
2 Estado do Conhecimento.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 A reabilitação em Portugal.....	4
2.3 Cal	5
2.4 Argamassas	6
2.5 Interface suporte e argamassa	6
2.6 Mecanismos de aderência	7
2.7 Influência das propriedades das argamassas na aderência.....	8
2.8 Influência da preparação da argamassa.....	10
2.9 Influência do suporte	10
2.10 Influência das condições de cura	11
3 Procedimento Experimental	12
3.1 Introdução	12
3.2 Ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas.....	12
3.2.1 Análise granulométrica da área utilizada.....	13
3.2.2 Baridade dos materiais	14
3.3 Composição das argamassas em estudo.....	14

3.4	Produção das argamassas	15
3.4.1	Amassadura	15
3.4.2	Preparação dos provetes prismáticos	16
3.4.3	Aplicação das argamassas nos suportes	17
3.5	Condições de cura	18
3.6	Caraterização das argamassas no estado fresco	18
3.6.1	Ensaio de espalhamento	18
3.7	Caracterização das argamassas no estado endurecido	19
3.7.1	Massa volúmica e porosidade aberta	19
3.7.2	Ensaio de determinação da resistência à flexão.....	21
3.7.3	Ensaio de determinação da resistência à compressão.....	22
3.7.4	Modulo de elasticidade dinâmico	23
3.7.5	Ensaio de absorção de água por capilaridade	25
3.7.6	Índice de secagem.....	26
3.7.7	Permeabilidade ao vapor de água	28
3.7.8	Ensaio de aderência de tração “ <i>Pull Off</i> ”	31
3.8	Ensaio dos suportes de tijolo maciço e de pedra	32
3.9	Ensaio de envelhecimento acelerado	33
3.9.1	Primeira parte: quatro ciclos de aquecimento e congelamento	33
3.9.2	Segunda Parte, quatro ciclos de humidificação e congelamento.....	34
4	Análise de resultados	35
4.1	Introdução	35
4.2	Caracterização dos constituintes da argamassa.....	36
4.2.1	Introdução.....	36
4.2.2	Análise granulométrica.....	36
4.2.3	Baridade da cal hidráulica e da areia	37
4.2.4	Caraterização das argamassas no estado fresco.....	38
4.3	Caracterização das argamassas destacadas dos suportes	38

4.3.1	Introdução.....	38
4.3.2	Massa volúmica e porosidade aberta.....	39
4.3.3	Coefficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água 42	
4.3.4	Resistências mecânicas.....	46
4.3.5	Modulo de elasticidade dinâmico.....	49
4.3.6	Aderência ao suporte.....	50
4.4	Argamassa de cal hidráulica após envelhecimento acelerado.....	53
4.4.1	Massa volúmica e porosidade aberta.....	54
4.4.2	Coefficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água 55	
4.4.3	Resistência mecânica.....	58
4.4.4	Aderência aos suportes.....	59
4.5	Comparação das características dos suportes.....	60
4.5.1	Massa volúmica e porosidade aberta.....	60
4.5.2	Coefficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água 61	
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	64
5.1	Considerações Finais.....	64
5.2	Propostas para desenvolvimentos futuros.....	67
6	Referências.....	68
	ANEXO A Ficha Técnica da Cal Aérea Pré-Doseada.....	1
	ANEXO B Ficha Técnica da Cal Hidráulica.....	2
	ANEXO C Ficha Técnica do Agregado.....	3

Índice de Figuras

Figura 2.1 Evolução da Reabilitação e da Construção nova (2013-2018) (SIOU, 2018).....	5
Figura 3.1 Lavagem da areia.....	13
Figura 3.2 Procedimento de enchimento dos provetes prismáticos de argamassa	16
Figura 3.3 a) Cofragem do suporte de tijolo com rede b) Cofragem de suporte de Tijolo c) Cofragem em suporte de pedra	17
Figura 3.4 Cura das argamassas nos provetes e nos suportes	18
Figura 3.5 medição do espalhamento.....	19
Figura 3.6 a) Provetes no Exsicador para o seu arrefecimento b) Pesagem Hidrostática.....	20
Figura 3.7 procedimento do ensaio da Resistência à Flexão	21
Figura 3.8 Ensaio da Resistência à Compressão.....	22
Figura 3.9 Ensaio de Resistência à Compressão.....	23
Figura 3.10 Execução do Ensaio do Modulo de Elasticidade Dinâmico	25
Figura 3.11 Impermeabilização dos provetes com papel filme	27
Figura 3.12 Proвете preparado para o ensaio de permeabilidade ao vapor de Água	28
Figura 3.13 Ensaio de arrancamento das pastilhas aderentes ao suporte.....	32
Figura 3.14 a) Camara de aquecimento b) Camara de congelamento	33
Figura 3.15 Tanque para manter uma humidade	34
Figura 4.1 Curva granulométrica do agregado	37
Figura 4.2 Massa volúmica e porosidade das argamassas de cal hidráulica e cal aérea endurecidos em moldes prismáticos aos 28/90 dias, e endurecidos em suportes de pedra e de tijolo aos 28/90 dias;	41
Figura 4.3 Coeficiente de absorção de água das argamassas nos moldes e aplicadas nos suportes após 28/90 dias	44
Figura 4.4 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem das argamassas de cal hidráulica e cal aérea endurecidos em moldes prismáticos aos 28/90 dias, e endurecidos em suportes de pedra e de tijolo aos 28/90 dias;.....	46
Figura 4.5 Resistência à flexão por tração das argamassas dos moldes prismáticos após 28/90 dias	47

Figura 4.6 Resistência à compressão das argamassas nos moldes e aplicadas nos suportes após de 28/90 dias	49
Figura 4.7 Módulo de elasticidade das argamassas nos moldes prismáticos após 28/90 dias	50
Figura 4.8 Massa volúmica e porosidade aberta da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.....	54
Figura 4.9 Coeficiente de absorção de água por capilaridade da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado	56
Figura 4.10 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.	58
Figura 4.11 Resistência à compressão da cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.....	59
Figura 4.12 Massa volúmica e a porosidade aberta dos suportes; IF_P – Suporte de pedra; IF_T – Suporte de tijolo.....	61
Figura 4.13 Coeficiente de absorção de água dos suportes; IF_P – Suporte de Pedra; IF_T – Suporte de Tijolo	62
Figura 4.14 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e Índice de secagem dos suportes; IF_P – Suporte de Pedra; IF_T – Suporte de Tijolo	63

Índice de Quadros

Quadro 3.1 Legenda e Composição das argamassas em estudo	15
Quadro 4.1 Definição da nomenclatura dos suportes	35
Quadro 4.2 Definição da nomenclatura das argamassass dos suportes	36
Quadro 4.3 Dimensão do Agregado.....	37
Quadro 4.4 Baridade da Cal Hidráulica e da Areia	38
Quadro 4.5 Consistência das argamassas por espalhamento	38
Quadro 4.6 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta das argamassas e dos suportes	40
Quadro 4.7 Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas.....	43
Quadro 4.8 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem das argamassas	45
Quadro 4.9 Resultados das Resistências à flexão por tração	47
Quadro 4.10 Resultados das Resistências à compressão	48
Quadro 4.11 Modulo de elasticidade dinâmico da cal aérea e cal hidráulica	50
Quadro 4.12 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa de cal aérea	51
Quadro 4.13 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica	51
Quadro 4.14 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica com Rede	52
Quadro 4.15 Tensão de aderência no suporte de pedra em provetes de argamassa hidráulica.....	52
Quadro 4.16 Tensão de aderência no suporte de pedra em provetes de argamassa hidráulica com Rede	53
Quadro 4.17 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta das argamassas e dos suportes com envelhecimento acelerado.....	54
Quadro 4.18 Resultados do coeficiente de absorção das argamassas em envelhecimento acelerado	55
Quadro 4.19 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem das argamassas com envelhecimento acelerado	57
Quadro 4.20 Resultados das Resistências à flexão por tração e da resistência de compressão	58
Quadro 4.21 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica com Rede em processo de envelhecimento acelerado	60

Quadro 4.22 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta dos suportes.....	60
Quadro 4.23 Resultados do coeficiente de absorção de água dos suportes	61
Quadro 4.24 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem nos suportes.....	62

1 Introdução

1.1 Enquadramento da temática

Desde a crise de 2008, que afetou de forma muito particular o sector imobiliário, que o paradigma de construção se tem vindo a alterar, havendo uma maior aposta na reabilitação de edifícios. Também inerente à reabilitação, tem havido um aumento significativo na reabilitação de edifícios “Antigos”.(INE, 2013)

Os edifícios antigos, na grande maioria de alvenaria de pedra, de tijolo maciço ou de blocos de terra, materiais mais comuns na construção antiga, estão expostos a agentes agressivos que, de uma forma particular, degradam os revestimentos exteriores.

Os revestimentos exteriores dos edifícios antigos são maioritariamente revestimentos de argamassa (rebocos) e são dos principais elementos a serem intervencionados e eventualmente substituídos, não só devido às condicionantes da arquitetura do edifício como pela sua função na proteção da estrutura.

A falta de conhecimento das características das argamassas em serviço, tem contribuído para a aplicação de argamassas incompatíveis, que podem ser prejudiciais para o revestimento e para o suporte existentes. Garantir a compatibilidade das argamassas com o suporte, tanto em termos mecânicos, como do ponto de vista físico da sua microestrutura (relativamente à água no estado líquido ou na forma de vapor), ou ainda relativamente à composição química - no que se refere aos constituintes ou a produtos de reação desenvolvidos (caso do teor em sais solúveis), deste modo é fundamental garantir que não são introduzidas tensões ou componentes que provocam ou conduzem a uma maior deterioração da estrutura de suporte e dos revestimentos existentes. Neste contexto, torna-se importante o conhecimento das características das argamassas existentes e das novas formulações em reabilitação.

O comportamento de uma argamassa após aplicação no suporte está muito dependente da interface que se vai criar entre estes dois elementos da construção (Scartezini *et al*, 2002), e é bastante diferente daquele que as argamassas apresentam quando são caracterizadas em laboratório. Desta forma, torna-se imprescindível estudar as características das argamassas de cal aplicadas em determinados suportes e compará-las, com as suas características obtidas em laboratório, para que as mesmas possam garantir uma maior eficiência e uma maior compatibilidade entre si e com os suportes correntemente utilizados em edifícios antigos.

Na perspectiva do aumento do conhecimento do comportamento de argamassas de cal, aplicadas sobre suportes de tijolo maciço e suportes de pedra, no estudo laboratorial desenvolvido procedeu-se à caracterização mecânica e física de dois tipos de argamassas de cal aplicadas sobre os dois tipos de suporte referidos. As argamassas escolhidas foram uma argamassa de cal aérea hidratada pré-doseada e uma argamassa de cal hidráulica formulada em laboratório.

Com a campanha experimental foi possível proceder-se a uma análise mais pormenorizada do desempenho de argamassas de cal, aplicadas nos dois tipos de suportes e compará-lo com o desempenho das mesmas argamassas moldadas em moldes laboratoriais.

Para um conhecimento profundo da reabilitação, no emprego das argamassas tradicionais será necessário o estudo e análise das características das argamassas e do seu comportamento com o objetivo de produzir a argamassa adequada com melhor desempenho e compatibilidade com o suporte.

As argamassas de cal são as que apresentam maior adequabilidade e compatibilidade com os suportes de edifícios antigos. O objetivo deste estudo é aprofundar o conhecimento do comportamento das argamassas de cal aérea e hidráulica quando aplicadas em suportes de tijolo maciço e pedra natural, procedendo à caracterização do seu comportamento mecânico e físico.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação IF_MORTAR ((POCI-01-0145-FEDER-032223 / PTDC / ECI-EGC / 32223/2017), a decorrer atualmente no Itecons e cujo objetivo global é analisar a influência dos suportes nas argamassas após aplicação. No âmbito deste projeto estão a ser analisadas diversos tipos de argamassas e diversos tipos de suportes. Está também a ser analisada a influência de diversos fatores como condições de cura, tipo de agregado, traço das argamassas, entre outros.

1.2 Objeto de estudo e objetivos do trabalho

Este estudo tem como objetivo aprofundar o conhecimento da interface de argamassas de cal com suportes de pedra, e tijolos maciços e a análise do seu comportamento ao longo do tempo, tendo em conta as características das formulações de argamassas de cal aérea e hidráulica, de modo a avaliar a influência do tipo de suporte nas características destas argamassas. Deste modo, será estudada a evolução das características mecânicas e físicas das argamassas de cal aérea e hidráulica após aplicação nos suportes com as características das mesmas argamassas determinadas em provetes laboratoriais executados e analisados de acordo com as normas aplicáveis.

Quais serão os parâmetros que irão influenciar o desempenho desta interface? De que forma essas características irão influenciar o comportamento das argamassas? Terão as condições de aplicação e

de cura alguma influência? Irão as características das argamassas aplicadas alterando ao longo do tempo de forma diferente conforme o tipo de suporte?

Estas são algumas das perguntas às quais esta investigação pretende responder ou, pelo menos, dar alguma contribuição para as respostas.

1.3 Organização da Dissertação

A estrutura desta tese é composta por oito capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma parte introdutória, dividida por dois subcapítulos, o enquadramento da temática e o objeto de estudo e o seu objetivo.

O Capítulo 2 diz respeito à revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais para o presente estudo.

O Capítulo 3 é relativo ao procedimento experimental, onde é feita a caracterização dos materiais (cal aérea pré-doseada, cal hidráulica, suportes de tijolo maciço e do suporte de pedra como também do agregado a areia), como também são apresentados os ensaios a realizar, bem como as técnicas empregadas durante a execução dos mesmos.

No Capítulo 4 estão demonstrados os resultados da campanha experimental e feita a análise dos resultados dos ensaios realizados,

No Capítulo 5 são descritas as conclusões do trabalho desenvolvido assim como são apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 6 encontram-se as referências bibliográficas.

Anexos – são descritas as fichas técnicas dos materiais utilizados para o estudo realizado.

2 Estado do Conhecimento

2.1 Introdução

Numa intervenção de reabilitação desde do estrutural ao revestimento em edifícios antigos, deverá ser feita uma análise da extensão da degradação e também do seu valor histórico do edifício. Nos casos de edifícios de valor histórico relevante, a primeira opção deve passar sempre pela conservação do revestimento antigo através de operações de manutenção e reabilitação. Por uma análise *in situ* deve-se ter em conta a substituição parcial ou total do revestimento dependendo do nível de degradação do revestimento do edifício.

Na escolha da argamassa para a reabilitação/conservação de edifícios antigos tem que se ter em conta as características da alvenaria existente. Relativamente às argamassas, estas devem apresentar permeabilidade ao vapor de água e deformabilidade semelhantes às do suporte, e não devem ter resistência superior ao suporte para evitar o desenvolvimento de tensões, que são transmitidas à alvenaria.

2.2 A reabilitação em Portugal

Parte dos problemas dos edifícios em Portugal advém da falta de obras de manutenção e de intervenções de reabilitação. Como consequência preponderante, ocorre a degradação e o abandono do património edificado, quer habitacional quer do património histórico e cultural.

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE, 2018) o número de edifícios licenciados para construção nova foi de 73.6 %, tendo-se registado um ligeiro aumento face a 2017, que representava 71.6% do total de obras de construção. Relativamente a obras de reabilitação, em 2018, em 26,4% de edifícios foram concluídas as obras de reabilitação, apesar de se verificar uma diminuição deste tipo de obras, comparativamente a anos anteriores (Figura 2.1).

A evolução das obras de reabilitação entre 2013 e 2018 registou sucessivos decréscimos, com exceção de 2014, em que se verificou um acréscimo aproximadamente de 3.4%. Em 2018 assistiu-se a uma diminuição de 3,7%, correspondendo a um total de 4088 de edifícios reabilitados. Pelo contrário, uma tendência crescente a partir 2015 pelas construções novas, registou um crescimento percentual de 2015-2018 de 4,3% (INE, 2018)

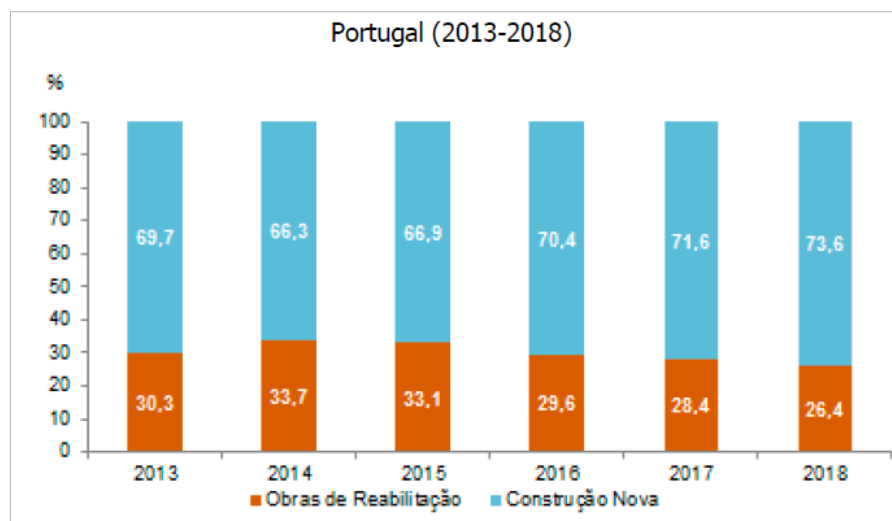


Figura 2.1 Evolução da Reabilitação e da Construção nova (2013-2018) (SIOU, 2018)

2.3 Cal

Pela Norma NP EN 459-1:2015, pode definir-se cal como um material com quaisquer formas físicas e químicas, constituídas por óxido de cálcio (CaO), por óxido de magnésio (MgO) ou por hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)₂ e Mg(Rosly *et al*)₂ (Rosly *et al*, 2019). De acordo com a referida norma, existem diferentes tipos de cal de construção, destacando-se nestes a cal aérea e a cal hidráulica (Paulo, 2006):

- **Cal aérea:** cal obtida a partir de calcários puros, carbonato de cálcio (CaCO₃), com teor de impurezas inferior a 5%, ou carbonato de cálcio e magnésio. A cal aérea é constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio a qual endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa dentro da água, visto não ter propriedades hidráulicas. Apresenta-se na forma de cal viva ou de cal hidratada;
- **Cal Hidráulica Natural (NHL):** cal constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reação com o hidróxido de cálcio.

2.4 Argamassas

Na investigação a realizar serão comparadas as características de argamassas de cal aérea e hidráulica após aplicação nos suportes com as características das mesmas argamassas determinadas em provetes laboratoriais executados e analisados de acordo com as normas aplicáveis. Perante as características definidas no produto pré-doseado ou as determinadas em laboratório, será feita uma análise sobre as características esperadas da cal aérea pré-doseada e da argamassa de cal hidráulica.

Com os provetes de cal hidráulica com dados obtidos numa campanha experimental no âmbito do projeto IF MORTAR, comparou-se através dos resultados calculados dos provetes, com a cal hidráulica nos suportes. O mesmo procedimento foi realizado para a cal aérea pré-doseada, onde foi feito o endurecimento da cal em provetes, e em suportes e comparados analiticamente.

Pela rapidez de execução imposta muitas vezes os tempos de secagem dos rebocos tradicionais não são respeitados, a falta de humidificação dos suportes prévia, fazendo com que seja cada vez mais optado por argamassas pré-doseadas. As argamassas pré-doseadas em fábrica, tem a vantagem da não necessidade do armazenamento do ligante, areia, da peneiração da areia do controlo da qualidade, sendo muito mais a eficiente a produção da mistura pré-doseada (Torres, 2014).

2.5 Interface suporte e argamassa

Neste trabalho, o estudo da influência das características do suporte com a argamassa aplicada, será o principal foco, onde os processos químicos e mecânicos que irão ocorrer na interface da argamassa vão ter um papel fundamental neste estudo. Em análise de laboratório através de ensaios de arrancamento, consegue-se avaliar a capacidade de aderência da argamassa com o suporte uma característica na qual vai depender a capacidade de impermeabilização, durabilidade e resistência à fendilhação.

Ao ser aplicada uma argamassa sobre um suporte dá-se a formação de uma interface e as interações entre ambas as superfícies (argamassa e suporte) que vão ocorrer, iniciam-se de imediato, ou seja ainda com as argamassas no seu estado plástico e vão decorrer ao longo do tempo devido à cinética de hidratação e à absorção do substrato. (Torres, 2014)

Sendo essencial o estudo da interface entre a argamassa e o suporte, revelando quais as condicionantes dos mecanismos e dos fatores que influenciam a aderência da argamassa com o suporte.

2.6 Mecanismos de aderência

A aderência da argamassa ao suporte é essencialmente um fenômeno mecânico, resultante da osmose entre o leito da argamassa com o suporte (água e partículas finas dos ligantes) que, ao endurecer no interior dos seus poros, efeito de ancoragem da argamassa ao suporte. Este fenômeno é essencial para a proteção das paredes, para que seja garantida de uma boa durabilidade, resistência física, química e térmica (Pinto, 2014).

A aderência das argamassas ao suporte resulta de uma combinação entre ações mecânicas – que são predominantes no caso dos rebocos – e a aderência específica dos materiais – que funciona por colagem das superfícies e que pode ser potenciada, por exemplo, através de adições à argamassa. (Flores e Freitas, 2009)

A aderência é a propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato. Não se trata, portanto, de uma propriedade da argamassa, mas é a interação entre as camadas do sistema de revestimento (H. Carasek *et al*, 2001).

Neste item, irá ser sobre o mecanismo de aderência entre a argamassa e o suporte, onde os fatores que irão ser predominantes para influência do comportamento entre a argamassa e o suporte através de ensaios em laboratório para a análise do comportamento entre estes. A boa aderência depende da rugosidade da superfície e dos cuidados com a sua preparação (limpeza, humedecimento e chapisco) e ainda da retenção de água da argamassa durante o efeito de sucção, que evita a saída prematura da água necessária à hidratação do ligante. Outro fator que afeta a aderência é a resistência mecânica da base às sucessivas camadas do revestimento (Carneiro, 1993).

Assim, a resistência mecânica do revestimento deve decrescer da camada interior até à mais externa, a fim de evitar uma movimentação diferencial entre o revestimento e o suporte (Moura, 2007). Desta forma, é imprescindível que sejam conhecidos os mecanismos e fatores que influenciam a aderência entre reboco e suporte.

O fenômeno mecânico da aderência entre um substrato poroso e a argamassa dá-se pela transferência de água que ocorre entre a argamassa e o substrato, possibilitando a entrada da pasta de cimento nos poros do substrato, que, pelo processo de hidratação, precipita hidróxidos e silicatos permitindo a ancoragem do revestimento (H. Carasek, 1997)

Pela análise microscópica, a morfologia e a natureza dos produtos formados nessa região o intertravamento de cristais de etringite nos poros do substrato é o principal responsável pela resistência de aderência. Nesse sentido, entende-se que a porosidade terá grande influência na aderência de revestimentos ao substrato (H. Carasek, 1997).

Durante o processo de aplicação, ocorre a 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 - uma vez que as tensões internas que se geram durante a retração são distribuídas de forma equilibrada por toda a argamassa. Assegura ainda uma maior resistência a movimentos diferenciais entre os dois materiais e, a prazo, permite evitar o descolamento do reboco em relação à alvenaria ou à camada subjacente (Gaspar *et al*, 2007)

A aderência é fortemente influenciada pela distribuição de poros da base sobre a qual a argamassa é aplicada, em função de sua grande influência na capacidade de absorção de água do substrato. A quantidade de poros com diâmetro superior a 50 μm (denominados macroporos) exerce grande influência na capacidade de absorção de água, uma vez que esses são os principais responsáveis pela permeabilidade da base. Os mesoporos e os microporos, por sua vez, estão relacionados com outras propriedades, como a retração e a fluência (Kazmierczak *et al*, 2007).

Além da aderência pelo fenômeno de ancoragem dos produtos de hidratação nos poros do substrato, a influência de fenômenos químicos será preponderante. Estes ocorrem em função da proximidade das moléculas do substrato e da argamassa colante, que se atraem pelas forças elétricas de Van Der Waals (H. B. d. Santos, 2008). Estas ligações são conduzidas por forças intermoleculares, entre moléculas eletricamente neutras, sendo estas responsáveis por muitos fenômenos físicos e químicos, como a aderência, o atrito e a viscosidade (Grillo, 2010).

A granulometria da areia constituinte na cal hidráulica condiciona a qualidade da argamassa, uma vez que a sua uniformidade se traduz num maior volume de vazios, e uma menor compactidade e menor resistência; por outro lado, uma granulometria não uniforme resulta num menor volume de vazios, maior compactidade e uma maior resistência mecânica.

A dosagem do ligante, relação entre os ligantes e o agregado, também influenciam na resistência mecânica, tempo de presa e na estabilidade volumétrica de uma argamassa. A quantidade de água influencia a trabalhabilidade e a resistência mecânica.

2.7 Influência das propriedades das argamassas na aderência

Segundo (E. Carasek *et al*, 2007), a trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas em uma condição homogênea. A trabalhabilidade é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial.

A plasticidade da argamassa é a sua característica de se espalhar com facilidade sem que haja segregação dos materiais ou separação da água (Guimarães, 2002). A plasticidade da argamassa depende da finalidade e da aplicação da mesma, e requer uma quantidade ideal de água para que atinja uma ótima consistência. Logo, consistência e plasticidade são fatores importantes para se obter trabalhabilidade (Cascardo e Carasek, 2007). A plasticidade tem influência de acordo com a quantidade de agregados e aglomerados, a adição ou não de aditivos e pela intensidade da mistura (Cincotto *et al*, 1995).

A retenção de água está associada à capacidade de a argamassa manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassadura, que pode ser por evaporação e por absorção de água da base, interferindo no processo de acabamento e na retração plástica (H. Carasek, 2010). A retenção de água também afeta as propriedades da argamassa no estado endurecido, como a aderência, a resistência mecânica e a durabilidade do material (Isaia, 2010).

A resistência mecânica diz respeito à propriedade dos revestimentos possuírem um estado de consolidação interna, capaz de suportar as movimentações do suporte e resistir às ações mecânicas das mais diversas naturezas, que se traduzem, geralmente, por tensões simultâneas de tração, compressão e corte (Sabbatini, 1990).

A estrutura de poros, por sua vez, refere-se à porosidade inicial da mistura e à consolidada durante o processo de hidratação do ligante. Quanto menor a porosidade, maior a resistência mecânica, ou seja, quanto maior o número de vazios capilares e o teor de ar incorporado, menor a resistência (Carneiro, 1993). Em análise, quanto menor a relação água/ligante, menor será a porosidade, e maior será a resistência, visto que serão os produtos de hidratação a ocupar os vazios e não a água em excesso, que evaporará, abrindo novos poros (Neville, 2015).

Segundo (Torres, 2014) a boa trabalhabilidade, boa aderência ao suporte e boa compacidade de uma argamassa está diretamente correlacionada com um forte de proporção de ligante, porém conduz a uma argamassa com elevada tendência para a fissuração de retração. Por outro lado, ao reduzir o teor do ligante, para a diminuição da retração obtém-se uma argamassa muito porosa e com uma baixa impermeabilidade significativa, pouco aderente ao suporte e com uma trabalhabilidade reduzida.

A elasticidade de uma argamassa é a capacidade que esta tem de absorver deformações sem que ocorra rotura, retomando as suas dimensões iniciais no final da solicitação que lhe é imposta (Cincotto *et al*, 1995). A fissuração das argamassas é o resultado da elasticidade e resistência pela tração inadequada perante as tensões resultantes da retração de secagem, retração térmica ou por ações externas.

O módulo de elasticidade está diretamente ligado ao comportamento da argamassa em relação à sua deformabilidade e a sua rigidez, sendo a principal causa mecânica dos fenómenos patológicos nomeadamente as fissuras de uma argamassa.

Quando os módulos de elasticidade do suporte e do revestimento são muito distintos, podem ocorrer descolamentos do revestimento, condicionando a durabilidade da solução de revestimento. Esta situação é agravada no caso de o módulo de elasticidade do revestimento ser muito superior ao do suporte, uma vez que o revestimento suportará as tensões de compressão mais fortes e, devido à sua baixa espessura, estará sujeito a fenômenos de encurvadura que irão provocar descolamentos localizados ou generalizados (Veiga, 1998).

2.8 Influência da preparação da argamassa

A quantidade de água a ser utilizada é preponderante para o fenômeno de hidratação da cal, e para a trabalhabilidade da argamassa, na sua aderência com o suporte, e para o endurecimento da argamassa. Segundo (Veiga *et al*, 2016), a quantidade de água a utilizar, depende do tipo ligante, do traço da argamassa e da granulometria do agregado, sendo relevante a quantidade de água para determinadas características da argamassa. Estes fatores são preponderantes para argamassas demasiado porosas, o que vai pôr em causa a sua resistência mecânica, sendo a quantidade de água importante para a obtenção de uma argamassa mais consistente, com menor tendência para fissurar, menor permeabilidade e maior a capacidade de resistência.

2.9 Influência do suporte

A aderência ao suporte não depende só das características da argamassa, depende também das do suporte. De facto, os suportes rugosos são melhores que os lisos pois permitem uma melhor aderência mecânica. Suportes muito absorventes prejudicam a aderência pois tendem a dessecar rapidamente a argamassa impedindo a hidratação dos constituintes e tornando a interface pulverulenta (Torres, 2014).

Os suportes com alta porosidade, por absorverem grande quantidade de água, podem provocar atrasos na hidratação do ligante, a quantidade de água restante na argamassa poderá não ser a suficiente para hidratar todo o ligante, originando zonas frágeis na argamassa, havendo uma forte probabilidade de apresentarem anomalias (H. Carasek et al, 2001).

2.10 Influência das condições de cura

Para a cura das argamassas, elas funcionam como fronteira entre dois ambientes condicionados, essencialmente, pela temperatura e humidade relativa.

A humidade relativa nos materiais deve ser limitada devido aos altos teores de humidade que provocam uma degradação mais célere (Flores e Freitas, 2009). As argamassas são materiais higroscópicos e absorvem água do ar no interior dos seus poros com aumento da humidade relativa do ambiente. Este fenómeno deve-se às forças intermoleculares ou de Van der Waals que atuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros (Mauro, 2017).

Fatores como a temperatura, humidade relativa e velocidade do ar são condicionantes para a velocidade de secagem da argamassa. Pressupõe-se também que o teor de humidade diminui linearmente ao longo do tempo durante o processo de evaporação (Mauro, 2017).

A influência da temperatura no processo de cura não está relacionada com o facto de favorecer ou não o processo de hidratação, mas em ditar a velocidade do mesmo (Pinto, 2014), a elevação da temperatura acelera a presa e o endurecimento, mas baixa a velocidade de crescimento da tensão de rotura, diminuindo, portanto, a resistência final. Pelo contrário com a diminuição da temperatura, a cura será mais lenta, ou poderá não se realizar se água congelar comprometendo o endurecimento.

3 Procedimento Experimental

3.1 Introdução

Foram realizados ensaios experimentais das duas argamassas de cal aplicadas em suportes distintos, submetidas a cura normal e “envelhecimento acelerado”, de acordo com a norma EN 1015-21: 2002. Para o estudo da influência dos suportes no comportamento das argamassas de cal, foram preparados provetes de argamassas de cal em moldes prismáticos (de acordo com as normas) e provetes de tijolo e de pedra com aplicação de uma camada de cada um dos tipos de argamassas, que foram sujeitos a cura normalizada com durações de acordo com o tipo de argamassa (argamassa de cal aérea pré-doseada durante 90 dias e argamassa de cal hidráulica durante 28 dias).

Dois tipos de provetes foram produzidos, um com rede de fibra e outro sem rede nos dois tipos de argamassa com dois objetivos, se a rede tem alguma influência nos resultados nos testes submetidos, e também para facilitar o destacamento da argamassa com o suporte.

Na investigação realizada foram comparadas as características de argamassas de cal aérea e hidráulica após aplicação nos suportes com as características das mesmas argamassas determinadas em provetes laboratoriais executados e analisados de acordo com as normas aplicáveis. Perante as características das determinadas em laboratório, foi feita uma análise sobre as características esperadas da cal aérea pré-doseada e da argamassa de cal hidráulica.

Todos estes ensaios foram realizados no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (Itecons).

3.2 Ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas

As argamassas estudadas na campanha experimental foram de dois tipos de argamassa de cal, uma argamassa de cal aérea pré-doseada e argamassa de cal hidráulica formulada em laboratório com um traço em volume de 1:4. Os dois tipos de argamassas foram endurecidos em moldes prismáticos como argamassas de referência, com o intuito de fazer uma análise comparativa com estas mesmas argamassas nos dois tipos de suporte, para o estudo da influência dos suportes.

Os provetes de argamassa de cal hidráulica moldados nos moldes metálicos já foram analisados noutra campanha anterior, no âmbito do projeto IF_MORTAR.

3.2.1 Análise granulométrica da área utilizada

A análise granulométrica foi realizada pelo método de peneiração manual, de acordo com a norma NP EN 933-1, em conformidade com os seguintes procedimentos. Colocou-se a amostra laboratorial numa estufa ventilada, a uma temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até ficar seca, ou seja, até à obtenção de massa constante entre duas pesagens.

Procedeu-se à lavagem do material, num peneiro de 0,063 mm (peneiro de lavagem), para que fosse possível determinar a percentagem de finos (Fig. 3.1), após a lavagem das três amostras, colocaram-se os tabuleiros na estufa ventilada a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ para a areia secar até terem massa constante.



Figura 3.1 Lavagem da areia

Após a secagem da amostra, deixou-se a arrefecer, até à temperatura ambiente e registaram-se as massas como **M₂**. Considerou-se uma amostra de 200g, de acordo com a norma, e após a repartição da amostra até à quantidade necessária, a mesma foi colocada em uma série de peneiros, com granulometria decrescente nesta ordem, 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, 0,063mm.

Após agitação da coluna de peneiros, retiraram-se os peneiros um a um, começando pelo peneiro com maior abertura (4mm). Quando, após um minuto de peneiração manual e individual, a massa do material retido em cada peneiro, não se alterar mais do que 1%, o ensaio terminou, sendo registada a massa de cada peneiro (Fig. 3.1), bem como o material do fundo, **P**.

Com a dimensão da abertura da malha dos peneiros (eixo das ordenadas), e com a percentagem cumulativa do material que passa em cada peneiro (eixo das abcissas) foi possível traçar a curva granulométrica de cada amostra.

Procedeu-se à realização das respetivas curvas granulométricas. A curva granulométrica é uma representação gráfica que possibilita uma interpretação da distribuição das partículas dos agregados mais eficiente.

3.2.2 Baridade dos materiais

A baridade dos materiais foi determinada com base na norma NP EN 1097-3:2002. Segundo esta norma, a baridade pode ser determinada através da seguinte equação 1:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} [g/cm^3] \quad (1)$$

Onde,

m_1 é a massa do recipiente vazio, em gramas;

m_2 é a massa do recipiente e do provete elementar, em gramas;

V é a capacidade do recipiente, em cm^3 .

3.3 Composição das argamassas em estudo

Nesta campanha laboratorial estudaram-se as características de 2 tipos de argamassas aplicadas em dois tipos de suportes em comparação com as mesmas argamassas em moldes prismáticos. O Quadro 3.1 apresenta as argamassas e suportes estudados. As argamassas foram feitas em ambiente específico a uma temperatura 25° e a uma humidade relativa específica de 65° .

Os dois tipos de argamassas estão identificados como argamassas de cal aérea pré-doseada (**CA**) e argamassa de cal hidráulica (**CH**). Dependendo do tipo de suporte as argamassas estão identificadas especificamente. O traço volumétrico adotado para a formulação da argamassa de cal hidráulica foi de 1:4. Na determinação da quantidade de água atendeu-se a que todas as argamassas produzidas tivessem trabalhabilidade similar. No Quadro 3.1 diz respeito à legenda das argamassas e sua composição.

Quadro 3.1 Legenda e Composição das argamassas em estudo

Argamassa	Suporte	Tipos	Cal (kg)	Areia (kg)	Água (L)	Traço	
Cal Aérea Pré-doseada	Provetes Prismáticos	IF_CA	21	-	5,59	-	
	Tijolo Maciço c/Rede	IF_CA_TR					
	Pedra c/Rede	IF_CA_PR	18	-	4,8	-	
	Tijolo Maciço	IF_CA_T					
	Pedra	IF_CA_P					
Cal Hidráulica	Provetes Prismáticos	IF_CH				1:4	
	Tijolo Maciço	IF_CH_T	3,25	19,08	3,9	1:4	
	Pedra	IF_CH_P					
	Tijolo Maciço c/Rede	IF_CH_TR					
		Pedra c/Rede	IF_CH_PR				
		Tijolo Maciço c/Rede em processo de envelhecimento acelerado	IF_CH_TR e.a	-	-	-	-
	Pedra c/Rede em processo de envelhecimento acelerado	IF_CH_PR e.a	-	-	-	-	

3.4 Produção das argamassas

3.4.1 Amassadura

As amassaduras das argamassas foram realizadas de acordo com a norma EN 1015-2 (1998), com o auxílio de uma misturadora, quer para a argamassa de cal aérea pré-doseada (**IF_CA**), quer para a argamassa de cal natural (**IF_CH**).

Antes de se pesar o material necessário, os agregados foram secos numa estufa ventilada à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, até massa constante. Posteriormente, foram arrefecidos até à temperatura ambiente. Os materiais foram pesados numa balança de precisão de 0,1g.

Foram então colocados num balde e pré misturados manualmente com ajuda de uma colher de pedreiro. A mistura foi realizada a uma velocidade mais baixa, nos primeiros 30 segundos, seguidamente introduziu-se a quantidade de água pré-determinada, e a mistura foi realizada aproximadamente durante 3 minutos, até obter uma consistência e coesão da argamassa. Após a mistura com a misturadora, mexeu-se argamassa com ajuda de uma colher de pedreiro, para se conseguir misturar possíveis materiais acumulados no fundo do balde.

3.4.2 Preparação dos provetes prismáticos

A preparação dos provetes foi realizada de acordo com a norma EN 1015-11 (1999). Utilizaram-se moldes prismáticos metálicos triplos de dimensões normalizadas 40×40×160 mm, para o fabrico de três provetes em simultâneo. Todos os moldes foram previamente montados, limpos e pincelados com óleo descofrante em todas as suas faces, para facilitar a descofragem.

O molde metálico foi montado e encheu-se a argamassa fresca até atingir aproximadamente metade da altura, com o auxílio de um pilão compactou-se a argamassa no molde com 25 pancadas. Depois colocou-se a segunda camada de argamassa até o molde ficar cheio e com o auxílio de uma régua metálica nivelou-se a argamassa com o molde, colocou-se cada um dos moldes num saco de polietileno convenientemente fechado (Fig. 3.2) a uma temperatura de 25°C durante 2 dias. Findos os dois dias descofraram-se os provetes e em seguida colocaram-se nas mesmas condições anteriores durante mais 5 dias. Após 7 dias retiraram-se os provetes dos respetivos sacos e durante mais 21 dias ficaram a uma temperatura de 25°C e a uma humidade relativa de 65%. Salientar que para a argamassa de cal hidráulica o processo de cura foi de 21 dias, enquanto que para a argamassa de cal aérea foi de 90 dias, mas em condições idênticas.

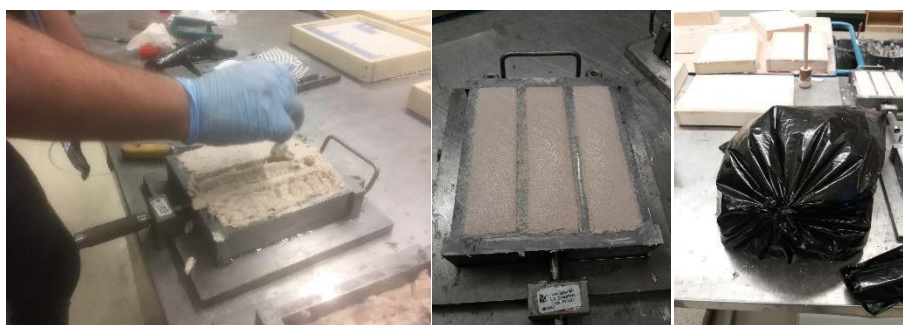


Figura 3.2 Procedimento de enchimento dos provetes prismáticos de argamassa

Os provetes prismáticos destinam-se aos ensaios de resistência mecânica, massa volúmica aparente, determinação da absorção por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, porosidade, módulo da elasticidade.

3.4.3 Aplicação das argamassas nos suportes

Para a aplicação das argamassas nos suportes com rede e sem rede (Fig.3.3) utilizaram-se moldes de madeira para garantir uma espessura uniforme 1,5 cm.

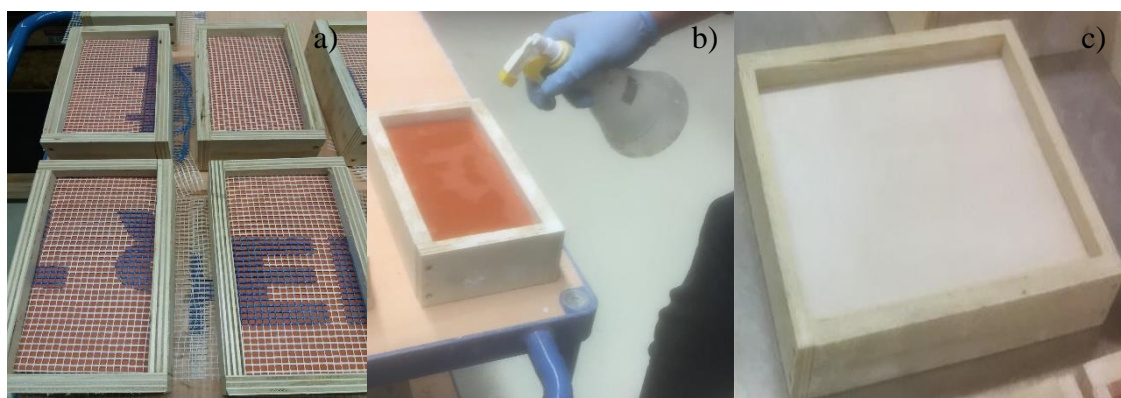


Figura 3.3 a) Cofragem do suporte de tijolo com rede b) Cofragem de suporte de Tijolo c) Cofragem em suporte de pedra

Todos os suportes utilizados foram humedecidos, antes de ser aplicada a argamassa, com o auxílio de um pulverizador, sendo-lhes colocado cofragem molde de madeira em volta do suporte, também previamente humedecido, para delimitar a argamassa e permitir a aplicação de uma camada de espessura constante. Posteriormente foi aplicada a argamassa e compactada com o auxílio de um pilão, de seguida foi argamassa nivelada com uma régua de metal sobre a face do tijolo.

Foram executados 15 provetes para cada tipo de argamassa em suporte de tijolo maciço com rede e sem rede no suporte, perfazendo um total de 60 provetes. Foram também executados 5 provetes para cada tipo de argamassa em suporte de pedra com rede e sem rede no suporte, perfazendo um total de 20 provetes.

3.5 Condições de cura

A cura foi feita de acordo com norma EN 1015-11:1999 em ambiente de laboratório, nos moldes metálicos assim como nos suportes. As argamassas de cal aérea ficaram, no total 90 dias em cura e os provetes de argamassa de cal hidráulica ficaram 28 dias para ambos os suportes (Fig3.4).



Figura 3.4 Cura das argamassas nos provetes e nos suportes

3.6 Caracterização das argamassas no estado fresco

3.6.1 Ensaio de espalhamento

A realização do ensaio de espalhamento foi feita após as amassaduras das argamassas, antes da colocação nos moldes e nos provetes para avaliar a quantidade de água e a trabalhabilidade das argamassas. A determinação do valor de espalhamento das argamassas frescas tem como objetivo aferir a trabalhabilidade da mesma, isto é, determinar a melhor consistência possível para cada aplicação.

Para a realização deste ensaio recorreu-se a uma mesa de espalhamento onde é colocada uma peça metálica troncocónica, com as superfícies foram limpas, e que foi cheia com duas camadas de argamassa.

Após cada camada foram aplicadas 10 pancadas com um pilão, para o acondicionamento uniforme da argamassa (EN 1015-3 (1999)). Quando o molde está cheio foi retirado o material em excesso, com ajuda de uma régua metálica, mantendo o molde com firmeza na mesa de espalhamento.

Retirou-se a peça troncocónica num só movimento ascendente e firme e, com o volante da mesa de espalhamento, rodou-se 15 vezes em 15 segundos (uma volta por segundo) levantando e deixando cair o prato da mesa para que a argamassa se espalhe (Fig. 3.5). Com o auxílio de um paquímetro mediu-se o diâmetro em duas direções perpendiculares.

O valor de espalhamento (Esp) é obtido pela Equação 2:

$$Esp = \frac{D_{médio} - 100}{100} \times 100[\%] \quad (2)$$

Esp – Valor de espalhamento

D_{médio} – Diâmetro médio do espalhamento



Figura 3.5 medição do espalhamento

3.7 Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.7.1 Massa volúmica e porosidade aberta

A Porosidade é obtida, em percentagem, pelo quociente entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete. (NP EN 1936, 2008). A porosidade pode definir-se como a quantidade de ar existente no interior de uma argamassa endurecida. Este volume de ar pode resultar da natureza dos constituintes da argamassa, dos processos usados na sua execução ou da forma de aplicação (D. A. F. d. Santos, 2014).

Os provetes foram colocados no exsiccador (Fig.3.6a) durante duas horas após da retirada da estufa que estiveram durante 24 h. Cada provete foi então retirado do exsiccador e imediatamente pesado em

imersão (pesagem hidrostática, m_s), utilizando um suporte acoplado debaixo de uma balança, colocado dentro de água (Fig.3.6b). Foram efetuadas pesagens hidrostáticas apenas a 6 amostras de cada vez. Assim, após esta pesagem, os provetes foram colocados sobre papel seco, de forma a retirar a água em excesso. Seguidamente foram pesados, obtendo-se a massa saturada dos provetes (m^3). Estes ciclos de pesagens foram feitos para os provetes de argamassa de cal aérea, cal hidráulica, ambos endurecidos nos moldes, nos suportes de tijolo com rede e sem rede, nos suportes de pedra com rede e sem rede.



Figura 3.6 a) Provetes no Exsicador para o seu arrefecimento b) Pesagem Hidrostática

Utilizando as massas m_d , m_s , m_h calculou-se a massa volúmica aparente e a porosidade aberta dos provetes. A massa volúmica aparente (ρ_b) foi obtida através da Equação (3).

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3)$$

A porosidade aberta (P_{ab}) foi calculada pela Equação (4).

$$P_{ab} = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (4)$$

m_s - massa do provete saturado

m_d - massa provete seco

m_h - massa provete imerso em água

3.7.2 Ensaio de determinação da resistência à flexão

Neste ensaio colocaram-se os provetes de argamassa de cal aérea e hidráulica endurecidas em molde num equipamento adequado, centrado sobre dois apoios que estão a uma distância de 100 milímetros entre eles (EN 1015-9:1999), aplicou-se uma carga de compressão na zona central com uma máquina universal marca “Instron” 5900R 5884 (com o dispositivo indicado pela norma para o ensaio de tração por flexão) e a uma tensão constante (Fig.3.7), ficando estes sujeitos a um esforço de flexão até se atingir a rotura.



Figura 3.7 procedimento do ensaio da Resistência à Flexão

Este ensaio permite determinar a tensão de rotura à tração por flexão. Os provetes utilizados neste ensaio foram de dimensão 40x40x160 mm (EN 1015-9:1999). O cálculo da resistência à tração por flexão realizou-se através da seguinte Equação (5):

$$R_f = 1.5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} [N/mm^2] \quad (5)$$

Onde:

F – Força máxima aplicada [N];

l – Distância entre os eixos de apoio do provete [=100mm];

b – Largura do provete [=40mm];

d – Espessura do provete [=40mm]

3.7.3 Ensaio de determinação da resistência à compressão

Neste ensaio aplicou-se uma carga de compressão sobre os provetes até ocorrer a rotura. Os ensaios para determinação da resistência à compressão foram realizados recorrendo ao mesmo equipamento dos ensaios de flexão. Foram apenas alteradas as condições e apoio dos provetes (Fig. 3.8), sendo a carga aplicada numa superfície com uma área de 1600 mm² dos provetes com 105 cm de espessura (EN 1015-11:1999).



Figura 3.8 Ensaio da Resistência à Compressão

Colocou-se o provete na máquina apropriada para o ensaio de compressão sobre um apoio metálico, com as dimensões 40x40 milímetros (dispositivo indicado pela norma para o ensaio de compressão). Também se teve que ter em atenção que as faces em contacto com o aparelho (superior e inferior) nas argamassas de cal hidráulica destacadas dos suportes, devido à sua superfície irregular, foram regularizadas com uma película de argamassa de cimento com resistência mecânica mais elevada. Foi aplicada uma carga de compressão a uma taxa constante até à rotura no provete registando-se a carga máxima aplicada (Fig.3.9).



Figura 3.9 Ensaio de Resistência à Compressão

O cálculo da resistência à compressão realizou-se através da seguinte Equação (6):

$$R_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2] \quad (6)$$

Onde:

R_c - Resistência à compressão [N/mm^2]

F - Força máxima aplicada [N];

A_c - área de carga [mm^2] → $A_c=40mm \times 40mm=1600mm^2$

3.7.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Segundo a norma (NP EN 14146:2006) os provetes utilizados para a realização deste ensaio foram os de dimensão 40x40x160 mm. Estes foram colocados no exsiccador para evitar que houvesse absorção de humidade do ar por parte dos provetes.

O procedimento para este ensaio é provocar um impacto numa extremidade do provete, o que faz com que haja uma excitação nas partículas que provoca uma onda de vibração em todo o provete. As amplitudes de vibração (acelerações) em função da frequência foram medidas na extremidade oposta do provete e registadas utilizando um *software* adequado. Para a realização do ensaio, colocaram-se dois apoios prismáticos de secção triangular em metal rígido com um comprimento superior à largura do provete e colocou-se o provete sobre esses apoios.

Colocou-se um acelerómetro numa das extremidades do provete e na extremidade oposta aplicaram-se impactos repetidos com um ritmo constante (Fig.3.10), com um martelo de impacto, da marca "Bruel & Kjaer". O acelerómetro, foi ligado a um multi analisador de sinal, PulseTM, da marca "Bruel & Kjaer" que em conjunto com software adequado nos permitiu visualizar o espectro de vibração do provete. Nesse gráfico é possível identificar a frequência de ressonância do provete que nos permitirá efetuar o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico

Através da Equação (7) explicita em baixo calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal:

$$Edl = 4 \times 10^{-6} \times l^2 \times F_L^2 \times \rho \times T \quad (7)$$

Edl - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal [MPa]

ρ - Massa volúmica do provete [g/mm³];

l - Comprimento do provete [mm];

F_L - Velocidade de propagação [Km/s]

T - Coeficiente de correção pela Equação (8):

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \times v^2 \times i^2}{l^2} \quad (8)$$

v - Coeficiente de Poisson;

l - Comprimento do provete [mm];

i - Raio de giração da secção do provete [mm], para equação (9)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (9)$$

A - área do provete [mm²]

I - Momento de inércia do provete [mm⁴]

Cálculo pela equação (10), dos provetes prismáticos de base quadrada:

$$I = \frac{b^4}{12} \quad (10)$$

b – Lado da base (quadrado) [mm]

Calculou-se a massa volúmica de cada provete, pelo processo de cubicagem, usando as dimensões do provete, através da equação (11):

$$\rho = \frac{m_d}{l \times A} [g/mm^3] \quad (11)$$

ρ – Massa volúmica [g/mm^3];

m_d – massa do provete seco [g];

A – área da secção transversal do provete [mm^2];

l – Comprimento do provete [mm].

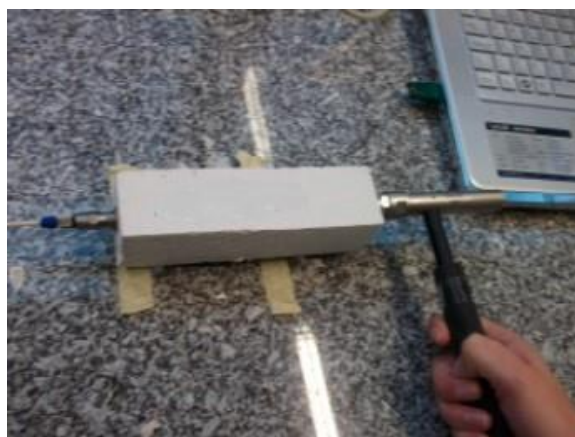


Figura 3.10 Execução do Ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico

3.7.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Procedeu-se à secagem dos provetes em estufa, de acordo com a norma (NP ISO 15148:2002), com as condições de temperatura de $60^\circ C \pm 5^\circ C$, até se atingir uma massa constante. Isto verifica-se quando em duas pesagens consecutivas com um intervalo de 24h a perda de massa não seja superior a 0,2%

relativamente à massa total. Seguidamente os provetes foram envoltos com papel filme, deixando as bases livres, para garantir o sentido unidirecional de absorção de água.

Antes do ensaio, os provetes foram pesados e depois colocados numa tina com as faces de corte viradas para baixo; colocou-se água da torneira na tina de modo a que as extremidades de cada prisma ficassem submersas 10 mm. Ao longo do ensaio, teve-se o cuidado de manter o nível de água sempre constante e como tal cobriu-se a tina para evitar a evaporação. Ao fim de 5 minutos os prismas foram retirados um de cada vez e as suas extremidades imersas foram limpas com papel absorvente. De seguida, pesaram-se os provetes e voltaram-se a colocá-los na tina. Este procedimento é repetido aos 25, 35 minutos, 1, 2, 4h11min, 8, 24 e 48 h após a imersão inicial. Depois de cada medição verificou-se e ajustou-se o nível da água na tina.

Para o cálculo do coeficiente de capilaridade, usou-se a seguinte expressão (12):

$$A = 0.1 \times (M^2 - M^1)[kg/m^2 \cdot min^{0.5}] \quad (12)$$

A – Coeficiente de capilaridade

M_1 – massa do provete do tempo inicial (g);

M_2 – massa do provete do tempo final (g)

3.7.6 Índice de secagem

O objetivo deste ensaio foi avaliar o comportamento das argamassas no processo de evaporação da água para o estudo da capacidade de secagem de cada uma delas. Seguindo a norma (EN 16322:2013), este ensaio foi realizado com os provetes utilizados para o ensaio de absorção de água e na sequência do mesmo, aproveitando o facto de os provetes estarem muito humedecidos. Após o término do ensaio de absorção de água os provetes foram totalmente imersos em água, durante 48 horas, sendo depois retirados e limpos com um pano húmido para retirar o excesso de água.

Procedeu-se, então, à impermeabilização dos provetes com papel filme (Fig.3.11), para garantir o fluxo de secagem ser unidirecional.



Figura 3.11 Impermeabilização dos provetes com papel filme

De seguida foram todos os provetes foram pesados e registaram-se as suas massas m_0 . Os provetes saturados foram colocados numa camara climática a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ e pesados na mesma balança, de hora a hora, até perfazer um total de 6h a contar da primeira pesagem. Após esta pesagem, de 24 em 24h foram novamente pesados até se obter massa constante.

O teor em água (W_i) é expresso em percentagem e dado pela Equação (13):

$$W_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 [\%] \quad (13)$$

WI - teor de humidade no instante i, em %

m_i - Massa do provete no instante i, em gramas

m_0 - Massa do provete seco, em gramas

O Índice de Secagem ($I.S$) é determinado com base nas curvas de secagem pela Equação (14)

$$I.S = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(W_i) \times dt}{W_0 \times t_f} \quad (14)$$

WI - teor de humidade no instante i, em %

t_f - Tempo final do ensaio [horas]

3.7.7 Permeabilidade ao vapor de água

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material homogêneo é a quantidade de vapor de água que é passa no material referido, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor entre as suas faces.

Este método consiste na análise do comportamento dos provetes quando colocados entre dois ambientes com a mesma temperatura, mas com pressões parciais de vapor diferentes, originando um gradiente de pressões entre as duas faces do provete e originando um fluxo de vapor de água. Nos cálculos deste fluxo de difusão e conhecendo a diferença de pressões parciais e as dimensões do provete podemos determinar a permeabilidade ao vapor de água.

Colocou-se água dentro de uma tina com o objetivo de conseguir-se manter uma humidade relativa de 93,2%, mediram-se os provetes de ensaio, a sua espessura e o seu diâmetro em 3 pontos diferentes. Colocaram-se em cima das tinas água com uma folga de 15 mm entre a superfície do provete e a superfície do líquido.

Os provetes circulares foram trinchados com uma borracha acrílica, sem isolar as superfícies dos provetes, colocaram-se os provetes nas tinas e selaram-se os bordos com fita de pintor colmatando o provete e a tina, de seguida com parafina aquecida colocou-se nos bordos do provete e na junta entre o provete e a tina, de modo a não existir nenhuma passagem de vapor pelas laterais (Fig.3.12).

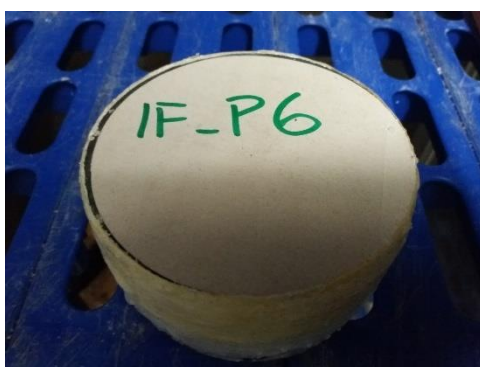


Figura 3.12 Provetes preparado para o ensaio de permeabilidade ao vapor de Água

Realizou-se uma primeira pesagem logo após a selagem e antes da colocação na câmara climática a temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de $50\% \pm 5\%$. Teve-se especial atenção no manuseamento das tinas porque a solução não pode em nenhuma circunstância molhar o provete.

Após 24 horas voltaram a fazer-se novas pesagens e registaram-se os resultados. As pesagens foram feitas com intervalos de aproximadamente 24 horas e foi feito um gráfico com a relação entre a massa dos provetes e o tempo. O ensaio terminou quando conseguimos colocar três pontos do gráfico alinhados numa linha reta, significando um fluxo de vapor de água constante.

Para calcular a permeabilidade foi necessário realizar alguns cálculos. A relação entre a variação de massa e o tempo, Δm_{12} , é dada pela seguinte equação (15):

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} [Kg/s] \quad (15)$$

Δm_{12} – variação de massa e o tempo [kg/s]

m_1 – massa do conjunto provete, tina e solução, no instante t_1 [kg]

m_2 – massa do conjunto provete, tina e solução, no instante t_2 [kg]

t_1 e t_2 – tempos relativo a duas pesagens consecutivas [s]

Quando o valor da variação de massa por intervalo de tempo (Δm_{12}) se torna constante, assume-se esse valor de fluxo de difusão de vapor de água, G [kg/s], pela equação (16)

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

A – área do provete exposta [m²]

g - Densidade de fluxo de difusão de vapor, em kg.m²/s

G – Fluxo de difusão de vapor de água, em kg/s

A permeância à difusão de vapor de água, W , foi calculada equação (17):

$$W = \frac{g}{Z} [kg/(m^2.s.Pa)] \quad (17)$$

W - Permeância à difusão de vapor de água $Kg/(m^2.s.Pa)$

g - Densidade de fluxo de difusão de vapor, em kg.m²/s

Z - Resistência à difusão de vapor de água, em (m². s. Pa) /kg

Onde, a resistência de vapor de água (Z) é calculada pela equação 18:

$$Z = \frac{p_{sat} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100}}{g} [(m^2 \cdot s \cdot Pa) / kg] \quad (18)$$

Z - Resistência à difusão de vapor de água, em $(m^2 \cdot s \cdot Pa) / kg$

p_{sat} - Pressão de saturação à temperatura que decorreu o ensaio em Pa

$\phi_1 - \phi_2$ - Diferença entre as humidades relativas existentes no interior e no exterior da tina de ensaio, em %

Cálculo da pressão de saturação à temperatura de ensaio (p_{sat}), pela equação (19):

$$P_{sat} = 610.5 \times e^{\frac{17.26 \times \theta}{237.3 + \theta}} [Pa] \quad (19)$$

p_{sat} - pressão de saturação à temperatura de ensaio

$\phi_1 - \phi_2$ - Diferença entre humidades relativas no interior e exterior da tina [%]

θ - Temperatura de ensaio [°C], neste caso foi 20°C

nas condições anteriores:

$$p_{sat} = 2337 [Pa]$$

Considerando que a humidade relativa fora da tina é 50% e a humidade relativa no interior é 93,2%, então pode-se adotar o valor de variação de pressão à temperatura de ensaio,

$$\Delta p_v = 1009,5 [Pa]$$

Para o cálculo da permeabilidade ao vapor de água (δ), usou-se a seguinte expressão (20):

$$\delta = W \times d [Kg / (m \cdot s \cdot Pa)] \quad (20)$$

δ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, em $kg / (m \cdot s \cdot Pa)$

d - Espessura do provete [m]

W - É a permeância à difusão de vapor de água, em $kg / (m^2 \cdot s \cdot Pa)$

O cálculo seguinte é o fator de resistência à difusão do vapor de água, μ , pela expressão (21):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (21)$$

μ - Fator de resistência à difusão do vapor de água

δ_a – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/ (m.s. Pa)]

Pela norma, δ_a toma o valor de $1,95 \times 10^{-10}$ [kg/(m. s. Pa)]

δ - coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, em kg/ (m.s. Pa)]

O cálculo seguinte, designa-se por espessura da camada de ar equivalente (S_d), que significa a espessura da camada de ar em repouso com a mesma resistência à difusão do vapor de água que o elemento em estudo (argamassa no estado sólido), pela expressão (22)

$$S_d = \mu \times d \text{ [m]} \quad (22)$$

S_d – espessura da camada de ar equivalente

μ - Fator de resistência à difusão do vapor de água

d – Espessura do provete [m]

3.7.8 Ensaio de aderência de tração “Pull Off”

Neste ensaio testou-se a aderência do suporte com o revestimento, segundo uma perspectiva de durabilidade e resistência (EN 1015-12 (2016)) que permitiu determinar a força de aderência relativa à máxima tensão, aplicada por tração direta, perpendicular à superfície de argamassa.

A resistência adesiva é determinada com a aplicação de tensão de tração aplicada por uma carga perpendicular à superfície do revestimento num suporte. A força de tração é aplicada através de uma chapa metálica, colada à área de ensaio da superfície do revestimento (Fig.3.13).

O ensaio iniciou-se com a colagem de pastilhas metálicas nos provetes de tijolo maciço e pedra natural com as argamassas aplicadas.

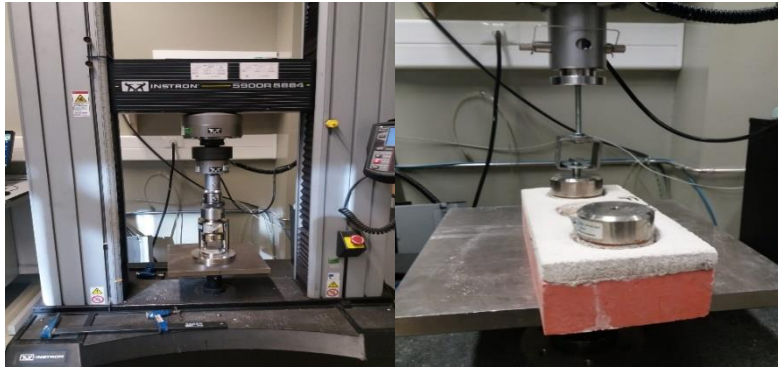


Figura 3.13 Ensaio de arrancamento das pastilhas aderentes ao suporte

O valor da resistência adesiva foi calculado pela equação (23):

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

F_u - carga de rotura à tração, em N

A - área de aplicação da carga, em mm^2

Podem ocorrer diversos tipos de rotura:

- Fratura adesiva na interface entre a argamassa e o suporte, sendo o valor do ensaio igual à resistência adesiva.
- Fratura coesiva na argamassa, sendo a resistência adesiva superior ao valor obtido.
- Fratura coesiva no suporte, sendo a resistência adesiva superior ao valor obtido

3.8 Ensaio dos suportes de tijolo maciço e de pedra

Para o estudo da influência das características dos suportes nas argamassas de cal foi necessário, também determinar algumas características dos suportes. Com procedimentos idênticos aos utilizados para as argamassas, foram determinadas algumas propriedades, nomeadamente, massa volúmica/porosidade aberta, absorção de água, índice de secagem, permeabilidade ao vapor de água.

3.9 Ensaio de envelhecimento acelerado

Após a cura normal de 28 e 90 dias alguns dos provetes de tijolo maciço e pedra natural com argamassa de cal hidráulica aplicada foram sujeitos a um “envelhecimento acelerado”, de acordo com a norma EN 1015-21: 2002, afim de simular um comportamento a longo prazo. Os provetes de tijolo maciço e pedra natural com argamassa de cal aérea foram deixados em laboratório para serem posteriormente ensaiados aos 365 dias.

Após a cura de 28 dias os provetes foram submetidos, sucessivamente, a duas séries de condicionamento de quatro ciclos. Entre as duas séries, foram armazenados 48 horas em condições padrão de $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ Humidade relativa.

3.9.1 Primeira parte: quatro ciclos de aquecimento e congelamento

Os provetes foram aquecidos por radiação infravermelha numa camara (Fig.3.14a) e mantidos a uma temperatura de superfície de $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por $8\text{h} \pm 15\text{min}$. Após o ciclo, as amostras foram colocadas nas condições padronizadas de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ RH por $30\text{min} \pm 2\text{min}$. Armazenados numa Camara de congelamento a $-15 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de temperatura do ar por $15\text{min} \pm 15\text{min}$. Colocaram-se os provetes a uma temperatura padronizada de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ Humidade relativa por $30\text{min} \pm 2\text{min}$ (Fig.3.14b)



Figura 3.14 a) Camara de aquecimento b) Camara de congelamento

3.9.2 Segunda Parte, quatro ciclos de humidificação e congelamento

Mergulhou-se parcialmente os provetes em água a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ a uma profundidade de aproximadamente 5mm, por $8\text{h} \pm 15\text{min}$, num tanque (Fig.3.15) que mantém a água a uma temperatura desejável. Colocaram-se os provetes nas condições padronizadas de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ Humidade Relativa por $30\text{min} \pm 2\text{min}$. Armazenou-se numa camara de congelamento a $-15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de temperatura do ar por cerca de $15\text{min} \pm 15\text{min}$. Após este procedimento, colocou-se a amostra nas condições padronizadas de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ de Humidade relativa por $30\text{min} \pm 2\text{min}$.



Figura 3.15 Tanque para manter uma humidade

Após o envelhecimento acelerado dos provetes, realizaram-se os ensaios já descritos, de acordo com as normas e procedimentos também já descritos.

4 Análise de resultados

4.1 Introdução

É feita a análise comparativa dos resultados obtidos na campanha experimental realizada, com a comparação dos valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica e aérea após aplicação em suportes de tijolo e de pedra com argamassas de cal hidráulica e aérea endurecidas em perfis metálicos, as argamassas de referência. O objetivo deste parâmetro analítico comparativo, é a avaliação da influência das características dos suportes nas características das argamassas que normalmente são determinadas em laboratório e consideradas nas fichas técnicas dos produtos pré-doseados.

Será feita também a análise comparativa dos provetes endurecidos nos suportes de cal hidráulica com o tempo de cura de 28 dias, com os provetes de cal hidráulica em processo de envelhecimento acelerado, para o estudo da evolução das características das argamassas ao longo do tempo, simulando o que poderá acontecer aos revestimentos após aplicação nas alvenarias.

Por fim será realizada a análise comparativa dos suportes isolados, para fazer uma análise precisa do comportamento das argamassas de cal em contacto com cada tipo de suporte, análise da sua interface.

Nos Quadros 4.1 e 4.2, estão representadas as nomenclaturas dos provetes de argamassa, que foram executados na campanha.

Durante a execução dos provetes com aplicação das argamassas nos suportes foi introduzida uma rede de fibra entre argamassa e o suporte, para facilitar o destacamento da argamassa do suporte após a cura, como já referido. Nesta campanha foram analisados os parâmetros com métodos experimentais, nas argamassas em perfis metálicos, nos suportes e analisados os suportes isolados.

Quadro 4.1 Definição da nomenclatura dos suportes

Suporte	Tipos
Análise exclusiva em Tijolo Maciço	IF_T
Análise exclusiva em Pedra	IF_P

Quadro 4.2 Definição da nomenclatura das argamassas dos suportes

Argamassa	Suporte	Tipos
Cal Aérea Pré-doseada	Provetes Prismáticos	IF_CA
	Tijolo Maciço	IF_CA_T
	Tijolo Maciço c/Rede	IF_CA_TR
	Pedra	IF_CA_P
	Pedra c/Rede	IF_CA_PR
Cal Hidráulica	Provetes Prismáticos	IF_CH
	Tijolo Maciço	IF_CH_T
	Tijolo Maciço c/Rede	IF_CH_TR
	Tijolo Maciço c/Rede em processo de envelhecimento acelerado	IF_CH_PR_e.a
	Pedra	IF_CH_P
	Pedra c/Rede	IF_CH_PR
	Pedra c/Rede em processo de envelhecimento acelerado	IF_CH_PR_e.a

4.2 Caracterização dos constituintes da argamassa

4.2.1 Introdução

Para a caracterização dos constituintes da argamassa calculou-se a curva granulométrica da areia (Fig. 4.1) e a baridade da areia e da cal hidráulica, para a cal a aérea pré-doseada não foi feito o cálculo, porque já vem as quantidades de fabrico necessárias.

4.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica do agregado foi feita de acordo com a norma (NP EN 933-1 2012), o agregado da argamassa de cal hidráulica, apresenta uma granulometria centrada no intervalo de 0,25mm a 1mm, curva granulométrica apresentada na Fig. 4.1 e com cerca de 68% do agregado compreendido entre 0,063 e 2 mm Quadro 4.3, sendo um Agregado fino de natureza quartzosa.-

Quadro 4.3 Dimensão do Agregado

Areia	
D_{máx} [mm]	2
D_{min} [mm]	< 0,063

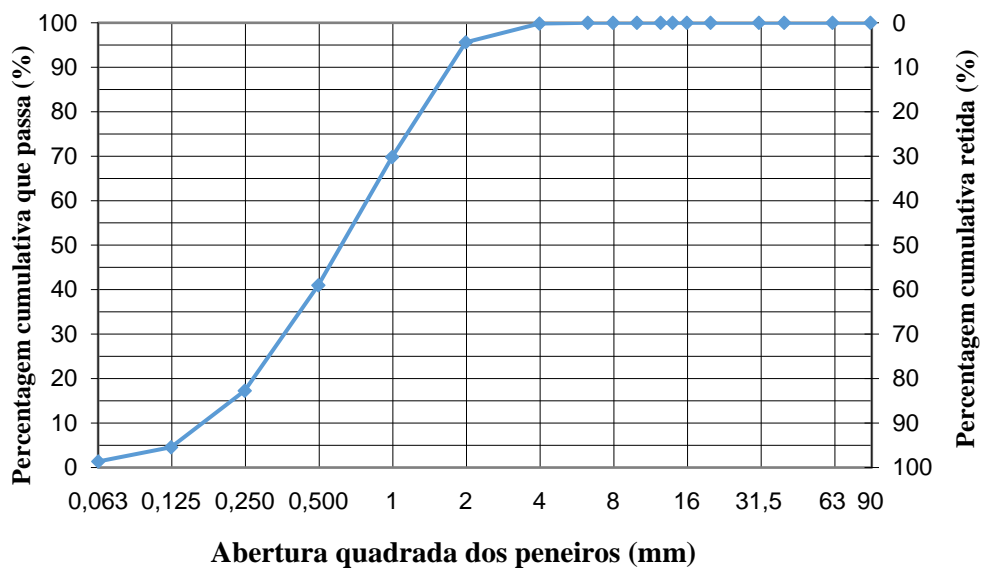


Figura 4.1 Curva granulométrica do agregado

Pela a análise da Curva granulométrica, os dados são unânimes a distribuição do agregado *in situ*, foram idênticos com as características de fábrica do agregado (ANEXO C).

4.2.3 Baridade da cal hidráulica e da areia

A baridade dos materiais foi determinada com base na norma (NP EN 1097-3 2002), verificou-se que a areia teve uma baridade média bem superior que a cal hidráulica (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 Baridade da Cal Hidráulica e da Areia

Material	Baridade (g/cm ³)			Valor médio (g/cm ³)
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	
Areia	1,438	1,446	1,443	1,442
Cal hidráulica	0,727	0,743	0,741	0,737

4.2.4 Caraterização das argamassas no estado fresco

Os valores obtidos, no ensaio de espalhamento, estão apresentados no quadro 4.5, seguindo a norma (EN 1015-11: 1999).

Quadro 4.5 Consistência das argamassas por espalhamento

Materiais	Espalhamento (mm)
Cal aérea	157
Cal hidráulica	160

As argamassas estiveram dentro dos limites de espalhamento e com a consistência que se pretendia.

Para a argamassa de cal aérea a quantidade de água adicionada foi conforme as indicações do fabricante, para uma boa trabalhabilidade da argamassa.

4.3 Caracterização das argamassas destacadas dos suportes

4.3.1 Introdução

Nos ensaios no estado endurecido, foram feitas varias amostras ou vários provetes das argamassas endurecidas em ambos suportes, assim como nas argamassas endurecidas em provetes prismáticos, fez-se vários testes para o mesmo tipo de amostra, para uma forte consolidação de validação dos resultados, fazendo-se uma media dos resultados de varias amostras do mesmo tipo apoiada pelo um desvio de padrão, para um aumento da veracidade dos resultados, ou seja com o apoio do desvio de padrão podemos analisar se os resultados foram mais homogéneos unanimes ou dispersos. Alguns dos provetes não foram possíveis analisar devido a sua impossibilidade de destacamento dos suportes, o que levou a algum desvio de padrão mais disperso ou mais unanime que em alguns casos como

numa amostra de provetes do mesmo tipo estes foram menos a serem testados deram um valor próximo dando um desvio padrão muito pequeno, iludindo a um resultado mais homogêneo, mas não foi possível em certos casos realizar o número de testes ideal nos provetes para consolidar alguma conclusão, será referenciado durante a análise.

4.3.2 Massa volúmica e porosidade aberta

Na Quadro 4.6 estão apresentados os valores obtidos na campanha experimental para a massa volúmica e da porosidade da argamassa de cal hidráulica e da argamassa cal aérea endurecidas nos moldes prismáticos e endurecidas nos suportes de pedra e em tijolo maciço.

Nos testes feitos aos provetes para a massa volúmica os resultados mais homogêneos foram para a cal hidráulica endurecida em suporte de pedra sem rede obteve um desvio de padrão de 8 valores sendo um número pequeno para os resultados que deram nas amostras sendo muito próximos. Enquanto para a cal aérea endurecida em suporte de pedra com rede a massa volúmica teve um desvio de padrão de 23,3 valores em termos comparativos foi um valor bastante superior ao anterior, tendo os valores das amostras um valor muito mais disperso para a massa volúmica, assim como o mesmo para as argamassas de cal hidráulica endurecida em tijolo em que os valores das amostras foram os mais dispersos obtiveram um valor de desvio de padrão de 35,8, como também para a cal hidráulica endurecida em tijolo sem rede.

No número de amostras testadas para a porosidade aberta, houve valores bastantes dispersos com um desvio de padrão de 1.2 para a cal aérea em suporte de tijolo com rede, em comparação com um desvio de padrão mínimo de 0.2, os resultados não foram tão homogêneos como esperados, assim como para a cal hidráulica endurecida em suporte de tijolo sem rede.

Na Figura 4.2 mostra em gráfico a comparação das características das argamassas de cal endurecidas nos moldes prismáticos. O valor da porosidade da argamassa de cal aérea é mais elevado, enquanto o valor da massa volúmica, pelo contrário, é o menor. Comparando os valores obtidos para as argamassas endurecidas nos moldes com as aplicadas nos suportes verifica-se que na argamassa de cal hidráulica na aplicação nos suportes reduziu a porosidade aberta, mas não teve grande influência na massa volúmica. Os valores obtidos para os dois tipos de suportes são muito idênticos.

Na argamassa de cal aérea os valores dos provetes prismáticos também diferem dos valores obtidos para as argamassas aplicadas nos suportes. A aplicação nos suportes fez com que se verificasse uma diminuição da porosidade aberta e aumento da massa volúmica. Neste caso as diferenças são maiores das verificadas para a argamassa de cal hidráulica.

O suporte tem influência na aderência mecânica da argamassa pela sua porosidade e rugosidade, influenciando então muito o tipo de suporte em interação com argamassa de Cal. Pela capacidade de absorção de cada suporte, influencia a rapidez de absorção da argamassa em contacto com o suporte alterando assim as propriedades da argamassa. Quanto maior a porosidade de um suporte maior a capacidade de aderência com argamassa.

Verificaram-se que nos provetes de cal hidráulica ensaiados nos suporte de tijolo obtiveram valores mais próximos da argamassa de cal hidráulica de referência. Verificou-se também que a rede tem pouca influência no comportamento do provete ensaiado nos suportes, quer no de tijolo como no suporte de pedra.

Nos provetes de argamassa de cal aérea ensaiados nos suportes, a sua influência foi a mais preponderante, a massa volúmica em ambos os suportes, aumentou perante a argamassa endurecida nos provetes metálicos, enquanto a sua porosidade diminuiu significativamente. A rede em ambos os suportes, não influenciou nos valores.

Num modo geral, os suportes influenciaram os valores da porosidade e da massa volúmica

Quadro 4.6 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta das argamassas e dos suportes

	Massa volúmica aparente (kg/m ³)		Porosidade aberta (%)	
	ρ_b , médio	Desv. Padrão.	p_0 , médio (%)	Desv. Padrão.
IF_CA	1485,4	10,8	32,1	0,6
IF_CA_P	1618,8	15,0	19,0	0,2
IF_CA_PR	1631,2	23,3	23,5	0,3
IF_CA_T	1605,2	9,0	23,6	0,2
IF_CA_TR	1647,3	8,3	23,5	1,2
IF_CH	1828,7	21,2	26,5	0,8
IF_CH_P	1778,96	8,0	22,8	0,2
IF_CH_PR	1775,51	15,1	21,5	0,4
IF_CH_T	1782,97	27,4	20,7	1,3
IF_CH_TR	1761,90	35,8	23,0	0,7

A massa volúmica aparente, para a cal aérea pré-doseada está compreendida entre os valores 1300-1500 kg/m³ nas características de fabrico (Anexo A), no laboratório as argamassas em provetes normalizados de cal aérea tiveram um valor médio de 1485,4 kg/m³, valor compreendido aos de fábrica. O valor de referência está próximo aos valores da massa volúmica de 1431 kg/m³, do artigo (Bellei *et*

al, 2021) , mas com um valor bastante inferior com os valores 1567 kg/m^3 do artigo (Silveira *et al*, 2021).

As argamassas de cal aérea endurecidas nos suportes tomaram valores idênticos e bastante superiores com as argamassas de referência, assim como com as características de fabrico (Anexo A). Na cal hidráulica obtiveram-se valores próximos entre as argamassas endurecidas nos suportes, mas com valores inferiores às da argamassa de referência de cal hidráulica.

Os suportes tiveram uma influência preponderante na alteração das suas características em ambas as argamassas, na sua massa volúmica aparente. Salientar para este parâmetro a rede teve pouca ou quase nula influência para a alteração das características das argamassas.

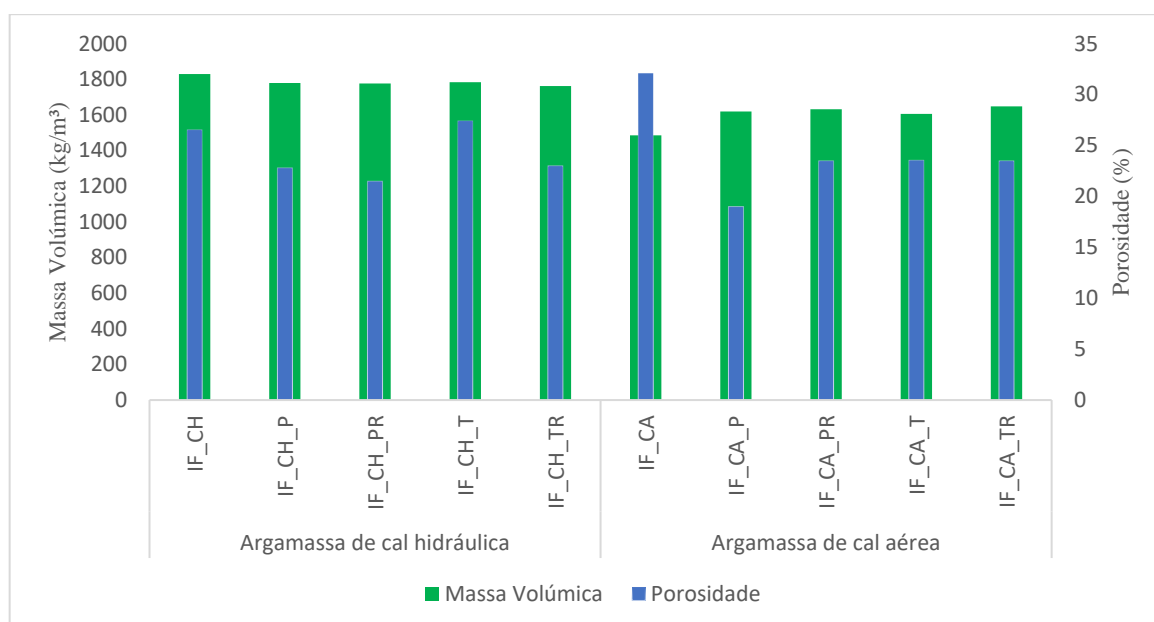


Figura 4.2 Massa volúmica e porosidade das argamassas de cal hidráulica e cal aérea endurecidos em moldes prismáticos aos 28/90 dias, e endurecidos em suportes de pedra e de tijolo aos 28/90 dias;

Quando diminui a porosidade de uma argamassa, a sua massa volúmica tende a aumentar (Bellei *et al*, 2021). Na Cal aérea temos a validação, as argamassas endurecidas nos suportes aumentaram a sua massa volúmica e diminuíram a sua porosidade relativamente com a cal aérea endurecida em provetes normalizados.

Para a cal hidráulica os valores de porosidade nos suportes tiveram uma tendência de descida em comparação com a de referência excetuando a cal hidráulica endurecida no suporte de tijolo que foi superior.

A inter-relação das características da argamassa com as do suporte, são fulcrais para aderência da argamassa/suporte, a capacidade da infiltração da argamassa no suporte está no seu grau de porosidade e na sua rugosidade. A aderência depende do suporte, da osmose entre a argamassa e o suporte, na penetração da água através dos poros do suporte.

Na aparência da superfície das argamassas verificaram-se diferenças quando estas foram endurecidas nos moldes prismáticos, quando foram ensaiadas e endurecidas nos suportes em ambas as argamassas. O aspeto mais rugoso verificou-se mais na argamassa de cal hidráulica do que a argamassa de cal aérea, as causas poderão ser de a cal aérea ser pré-doseada e em fábrica ter constituintes que consigam retardar a absorção da água por capilaridade do suporte. A capacidade de absorção do suporte faz com que a argamassa fique com menos água fazendo com que o provete aplicado no suporte, fique com uma menor porosidade.

Perante o espectro laboratorial, os suportes onde se verificaram maior aderência foram nos suportes de tijolo, devido à sua maior porosidade perante os provetes de argamassa de cal hidráulica e cal aérea com e sem rede, onde houve uma maior penetração da argamassa no suporte.

4.3.3 Coeficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água

Pela ISO 15148:2002 calculou-se a quantidade de água absorvida por unidade de área por um intervalo de tempo esses resultados estão exemplificados pelo Quadro 4.4, e pela Figura 4.2, com a variação da massa por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo.

A Figura 4.3 e o Quadro 4.7 diz respeito aos resultados do coeficiente de absorção de água, e a Figura 4.4 e o Quadro 4.8 dizendo respeito aos resultados de coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem. Numa forma geral verificou-se uma grande influência dos dois tipos de suportes nas duas argamassas.

Nos testes realizados para vários provetes, o desvio de padrão foi bastante disperso para a cal hidráulica endurecida em suporte de tijolo assim como para a cal aérea endurecida em suporte de pedra tendência verificada no capítulo anterior, explica-nos que muitos provetes não foram possíveis serem testados condicionando o tamanho da amostra e dando valores mais pequenos e uma tendência mais homogénea.

Na Cal aérea de referência assim como nas argamassas endurecidas nos suportes tiveram um valor de coeficiente de absorção de água muito baixo.

A argamassa de cal hidráulica é a que tem o maior coeficiente de absorção de água, quer a endurecida nos moldes quer a aplicada nos dois suportes. Esta situação verifica-se devido ao facto de a argamassa

de cal aérea ser uma argamassa pré-doseada e possuir na sua composição aditivos hidrofugantes que lhe reduzem a sua capacidade de absorção de água.

Pela a análise da Figura 4.3 e do quadro 4.7, o tipo de suporte influencia o comportamento em ambas as argamassas devidas à percentagem da porosidade dos suportes. Ambos os suportes fizeram baixar o coeficiente de absorção de água. Na cal aérea o coeficiente de absorção é muito mais baixo devido a sua porosidade ser mais baixa que a argamassa de cal hidráulica, por esta relação a descida do coeficiente foi mais intensa na cal hidráulica em comparação com as argamassas de referência. Perante os resultados da porosidade, este foi o comportamento que se esperava consoante as características dos suportes.

Quadro 4.7 Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas

Provetes	A_w , médio kg/ (m ² .s ^{0.5})	Desvio Padrão
IF_CH	0,4288	0,0944
IF_CH_P	0,3047	0,0313
IF_CH_PR	0,2736	0,0071
IF_CH_T	0,0107	0,0291
IF_CH_TR	0,2942	0,0997
IF_CA	0,0253	0,0022
IF_CA_P	0,0059	0,0313
IF_CA_PR	0,0053	0,0002
IF_CA_T	0,0107	0,0016
IF_CA_TR	0,0068	0,0008

A Cal aérea pré-doseada, tomou valores não esperados, valores muito pequenos de absorção de água com um valor de 0,0253 kg/(m².s^{0.5}), valor bastante inferior aos valores característicos de fabrico em que a absorção de água (após 24h) toma valores ≥ 0.3 kg/m² (Anexo B) de valor bastante abaixo aos valores de 0,11 kg/(m².s^{0.5}) artigo de (Silveira *et al*, 2021) e 0,2 kg/(m².s^{0.5}) artigo de (Bellei *et al*, 2021), poderá ter sido influencia dos aditivos de fábrica da cal aérea pré-doseada, que tivesse causado valores de absorção muito pequenos.

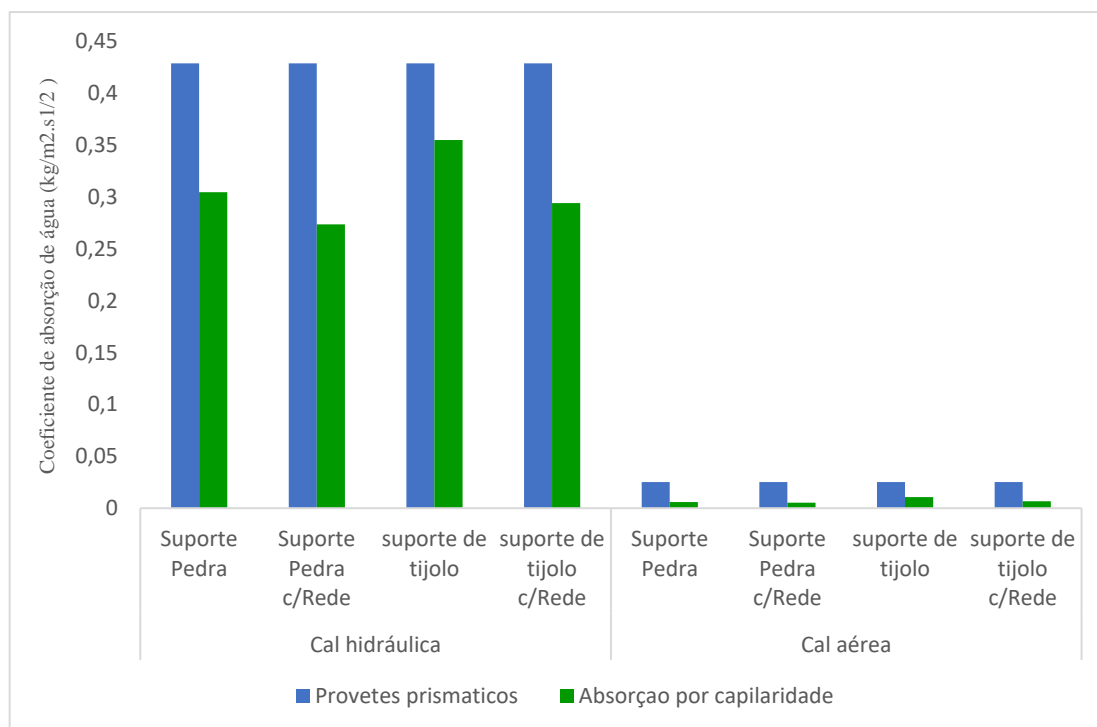


Figura 4.3 Coeficiente de absorção de água das argamassas nos moldes e aplicadas nos suportes após 28/90 dias

Na análise da Figura 4.4 e do Quadro 4.8, constatamos que a cal hidráulica permite uma maior transferência de vapor de água, sendo mais permeável ao vapor de água e tendo um menor índice de secagem com a argamassa de cal aérea.

Não foi possível a realização dos ensaios para a permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem para as argamassas de cal hidráulica nos suportes de pedra e nos suportes de tijolo maciço devido não se ter conseguido o destacamento da argamassa com os suportes. Tendo só para a cal hidráulica, os ensaios para ambos os suportes com rede.

A influencia dos suportes fez com que o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água fosse mais baixo na argamassa de cal hidráulica como o seu índice de secagem. A argamassa de cal hidráulica teve um comportamento diferente em cada suporte, sendo mais permeável ao vapor de água e uma menor capacidade de secagem quando esta foi destacada no suporte de tijolo, tendo um comportamento oposto a argamassa de cal hidráulica ensaiada no suporte de pedra.

Na cal aérea houve um comportamento diferente ao esperado, o coeficiente de vapor de água subiu na argamassa de cal aérea destacada no suporte de pedra sem rede em relação à argamassa de referência, embora o seu índice de secagem descesse como o esperado. Assim como o coeficiente de permeabilidade foi mais elevado na argamassa destacada no suporte de pedra do que no suporte de

tijolo maciço, sendo resultados não esperados, pelas propriedades dos suportes sendo que os valores do suporte de tijolo de absorção de água por capilaridade são superiores.

Na argamassa de cal aérea, há um comportamento contrário, no suporte de pedra a cal aérea aumenta enquanto no tijolo diminui tendo um comportamento inverso na absorção de água.

Na cal aérea houve valores muito baixos no coeficiente de absorção para os moldes e para ambos os suportes, este comportamento poderá ter sido condicionado pelos componentes existentes de fábrica da argamassa pré -doseada, que poderão fazer com que esta argamassa tenha uma resistência à penetração de água.

No Quadro 4.5 e na Figura 4.3, estão representados os valores das argamassas e dos suportes do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e em simultâneo os resultados dos índices de secagem:

Quadro 4.8 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem das argamassas

Provetes	Valor médio δ (kg/m.s. Pa)	Desv. Padrão (kg/ (m.s. Pa))	Índice de Secagem IDmédio	Desvio Padrão
IF_CH	1,51E-11	1,16E-13	0,21	1,11E-02
IF_CH_PR	1,13E-11	5,71E-13	0,17	2,80E-02
IF_CH_TR	1,18E-11	2,06E-13	0,15	5,72E-03
IF_CA	1,31E-11	4,76E-13	0,25	1,19E-02
IF_CA_P	1,36E-11	3,58E-13	0,14	1,40E-02
IF_CA_PR	1,28E-11	6,29E-13	0,19	1,91E-02
IF_CA_T	1,16E-11	2,87E-13	0,15	4,25E-04
IF_CA_TR	9,53E-12	5,17E-13	0,20	1,29E-04

Os desvios padrões para a cal aérea endurecida nos suportes de pedra com rede foram muito pequenos em comparação com os provetes restantes, tendo sido as amostras mais homogêneas.

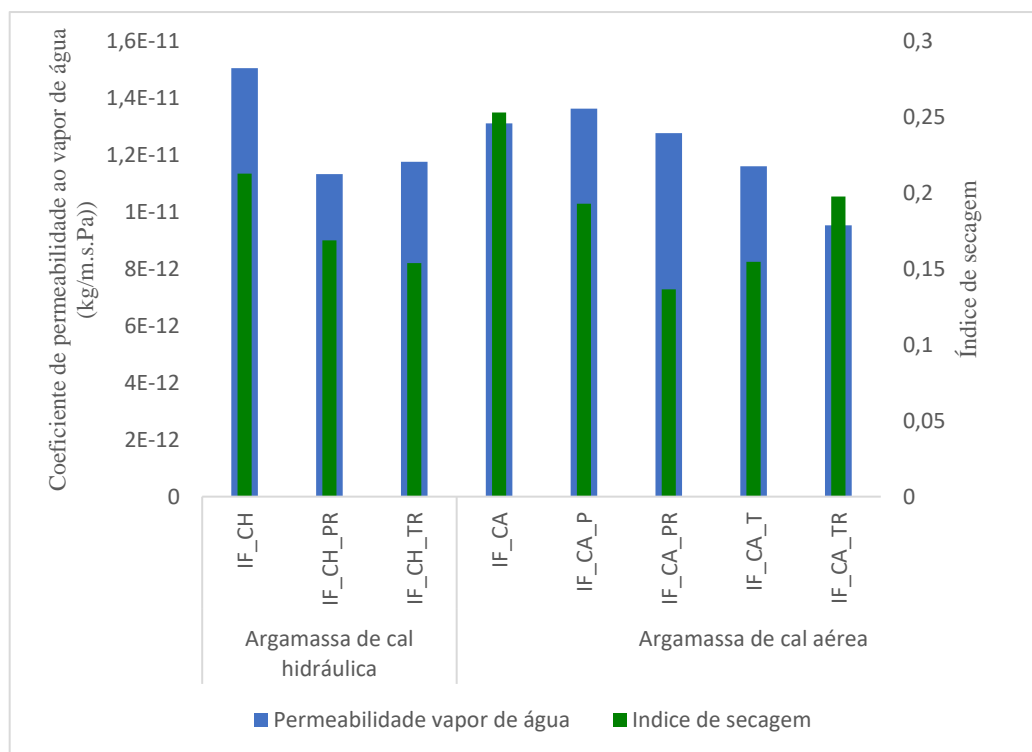


Figura 4.4 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem das argamassas de cal hidráulica e cal aérea endurecidas em moldes prismáticos aos 28/90 dias, e endurecidas em suportes de pedra e de tijolo aos 28/90 dias;

4.3.4 Resistências mecânicas

Para o estudo das resistências mecânicas das argamassas, foi só possível o ensaio de resistência mecânica à flexão para os provetes prismáticos não sendo possível o mesmo ensaio para os provetes ensaiados nos suportes, não sendo possível a análise comparativa entre os moldes prismáticos com as argamassas ensaiadas nos suportes.

Na Figura 4.5 e do Quadro 4.9, estão representados os valores da resistência à tração por flexão das argamassas endurecidas nos moldes prismáticos.

Nas argamassas de referência de cal aérea o valor de resistência à tração por flexão foi mais elevado significativamente do que a argamassa de referência de cal hidráulica, embora os valores de resistência para ambas as argamassas são muito baixas.

Quadro 4.9 Resultados das Resistências à flexão por tração

Provetes	Resist. flexão (N/mm ²)	Desvio Padrão
IF_CH	0,30	0,04
IF_CA	0,74	0,04

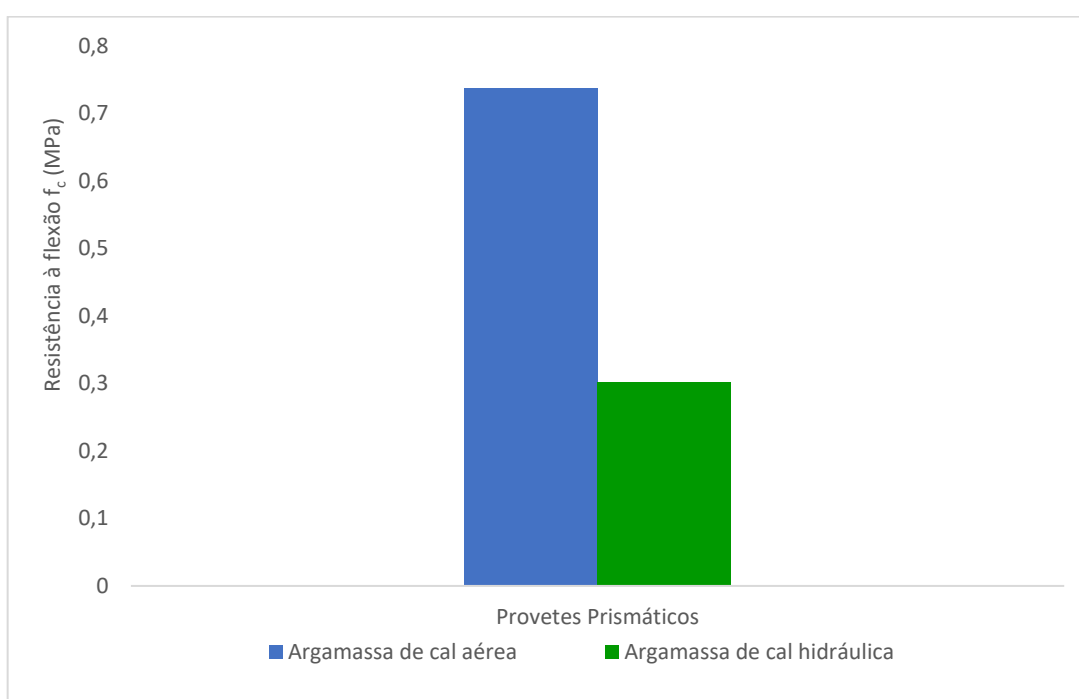


Figura 4.5 Resistência à flexão por tração das argamassas dos moldes prismáticos após 28/90 dias

Na cal aérea de referencia os valores de resistência à flexão tiveram um valor superior ao valor de $>0,5$ MPa, (Anexo B) com um valor médio de resistência de 0,737 MPa, perante as características de fabrico da argamassa, e bastante inferior á capacidade de resistência de 2,9 MPa de tensão de flexão na argamassa de cal aérea dos artigos (Bellei et al, 2021) (Silveira et al, 2021), foram bastantes superiores que os 0,737 MPa das argamassas de cal aérea de referencia.

No Quadro 4.10 e na Figura 4.6 estão representados os resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas de cal hidráulica destacadas nos dois tipos de suportes.

Nos resultados que seguem foram feitos testes em provetes de dimensões diferentes os provetes endurecidos nos moldes prismáticos têm dimensões diferentes aos dos provetes ensaiados nos suportes,

em que o provete prismático tem as dimensões normalizadas de 40x40x160mm e os provetes ensaiados nos suportes a dimensão de 40x40x15mm, onde os resultados são condicionados pela diferença de volumetria, em que análise da resistência por si só não é a análise mais verosímil mais absoluta.

Verificou-se que o comportamento das argamassas nos moldes, a cal aérea é que possui maior resistência à compressão. Na influência do suporte verificamos que a resistência à compressão aumentou os resultados na cal aérea, enquanto que na qual hidráulica foi o comportamento inverso, embora que na cal hidráulica em suporte de pedra com rede tenha aumentado bastante a sua resistência à compressão, sendo maior o valor com a argamassa de referência de cal hidráulica.

Na resistência à compressão da cal aérea os suportes tiveram uma influência significativa aumentaram a capacidade de resistência na cal aérea, onde os aumentos mais significativos foram, em suporte de pedra, foi um aumento exponencial da sua resistência como o comportamento da cal aérea em suporte de tijolo com rede. Confirmamos que o tipo de suporte influencia bastante a resistência mecânica em ambas as calças.

Quadro 4.10 Resultados das Resistências à compressão

Provetes	Resist. comp. (fc) (N/mm²)	Desvio Padrão
IF_CH	6,93	0,58
IF_CH_P	4,03	0,66
IF_CH_PR	9,90	2,00
IF_CH_T	3,65	0,84
IF_CH_TR	3,55	1,17
IF_CA	10,48	4,33
IF_CA_P	11,12	3,52
IF_CA_PR	21,84	6,59
IF_CA_T	10,90	5,38
IF_CA_TR	15,47	10,39

Os valores dos provetes da cal aérea em suporte de tijolo com rede foram bastante dispersos em comparação com as restantes argamassas endurecidas nos suportes Quadro 4.10.

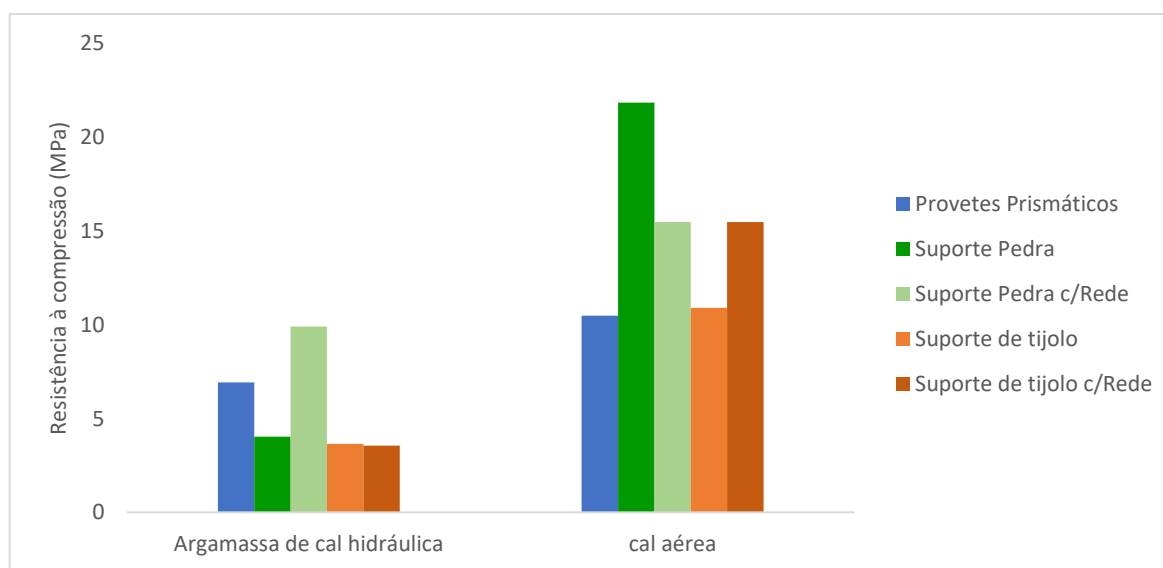


Figura 4.6 Resistência à compressão das argamassas nos moldes e aplicadas nos suportes após de 28/90 dias

Na cal aérea pré-doseada a resistência à compressão tem um valor de fabrico superior $>1,5$ MPa (Anexo A) tendo um valor médio de 10,48 MPa nos testes realizados, sendo um valor superior aos 2,9 MPa do artigo da Silveira, 2021, e do artigo de Bellei, 2021. Na cal hidráulica em relação com argamassa de referência, verificamos, que a resistência à compressão de fabrico entre $\geq 3,5$ e ≤ 10 MPa (Anexo B) tendo 6,93 MPa de resistência à compressão na argamassa “in situ”.

4.3.5 Modulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade numa argamassa tem o objetivo de determinar a capacidade que esta tem em absorver deformações, dependendo do valor do modulo de elasticidade, quanto mais elevado for, menor será a deformabilidade da argamassa. Para a escolha de uma argamassa para reabilitação de um edifício antigo, este parâmetro é muito importante de ser analisado, uma vez que as alvenarias antigas têm uma capacidade significativa de deformação e, portanto, as argamassas têm que ter baixos módulos de elasticidade. Em suma, para uma maior compatibilidade de materiais (suporte e argamassa de revestimento) as argamassas estão dependentes do tipo de suporte, para escolha do tipo de argamassa ser mais rígida ou mais deformável.

Neste ensaio foram testadas exclusivamente as argamassas de referência, ou seja, a argamassa de cal aérea e cal hidráulica endurecidas nos moldes prismáticos. No Quadro 4.11 e na Figura 4.7 encontram-se os valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de referência, argamassa de cal aérea nos moldes prismáticos e a argamassa de Cal Hidráulica.

Pela análise da Figura 4.6, verifica-se que o módulo de elasticidade mais elevado foi o da argamassa de cal hidráulica de referência, sendo uma argamassa mais rígida.

Quadro 4.11 Módulo de elasticidade dinâmico da cal aérea e cal hidráulica

Módulo de elasticidade dinâmico (longitudinal)		
Provetes	Ed_L (MPa)	Ed_L, médio
IF_CA1	1646,05	
IF_CA2	1663,41	1729,1
IF_CA3	1877,90	
IF_CH1	2010,12	
IF_CH2	1921,80	1964,1
IF_CH3	1960,43	

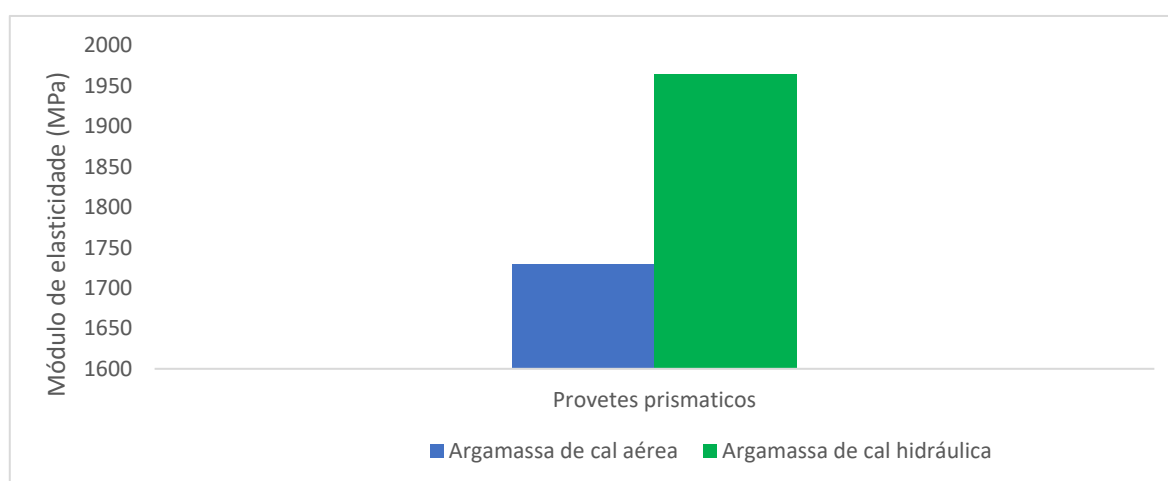


Figura 4.7 Módulo de elasticidade das argamassas nos moldes prismáticos após 28/90 dias

Obteve-se um módulo de elasticidade dinâmico cerca de 1729 MPa, para a argamassa de referência de cal aérea, enquanto no artigo (Silveira et al, 2021) teve um valor bastante superior na cal aérea pré-doseada de 9486 MPa e 6300 MPa no artigo (Bellei et al, 2021), valor muito inferior tendo a argamassa de referência uma maior capacidade de deformação.

4.3.6 Aderência ao suporte

Nos provetes de argamassa de cal aérea com cura normal no suporte de pedra e no suporte de tijolo com rede não foi possível realizar ensaios *pull-off*, uma vez que estes não criaram aderência ao suporte (isto é, a sua resistência adesiva é igual a zero), apenas foi possível obter resultados válidos para os provetes de argamassa de cal aérea aplicados sobre suportes de tijolo, cujos resultados são apresentados no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa de cal aérea

	Provete	Força de Rotura (N)	Tensão de Rotura (MPa)	Tipo de rotura
Arg. cal aérea em tijolo	IF_CA_T1	218	0,111	pela interface
	IF_CA_T2	33,47	0,017	pela interface
	IF_CA_T3	241,78	0,123	pela interface
	IF_CA_T4	218,97	0,112	pela interface

Na cal aérea, nas características de fabrico a sua aderência é de 0,1 MPa (Anexo B), o valor médio da argamassa de referência de cal aérea foi de 0,091 MPa, ou seja, próximo de 0,1MPa.

Para os provetes de argamassa de cal hidráulica em suporte de tijolo com e sem rede em cura normal assim como aplicados sobre suportes de pedra com e sem rede em cura normal, estão exemplificados nos Quadros, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16.

Quadro 4.13 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica

	Provete	Força de Rotura (N)	Tensão de Rotura (MPa)	Tipo de rotura
Arg. cal hidráulica em tijolo (sem rede)	IF_CH_T1	988,89	0,504	pela argamassa
	IF_CH_T2	1033,19	0,516	pela argamassa
	IF_CH_T3	1435,39	0,731	pela argamassa
	IF_CH_T4	1154,94	0,588	pela argamassa
	IF_CH_T5	772,44	0,401	pela argamassa
	IF_CH_T6	226,65	0,115	pela argamassa
	IF_CH_T7	600,52	0,306	≈ 30% pela interface e 70% pela argamassa
	IF_CH_T8	1424,65	0,726	pela argamassa
	IF_CH_T9	541,12	0,276	pela argamassa

Verifica-se no Quadro 4.14, que a rotura nas argamassas de cal hidráulica no tijolo sem rede, em média a rotura deu-se pela argamassa, havendo uma maior homogeneização entre a argamassa e o suporte.

Quadro 4.14 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica com Rede

	Provete	Força de Rotura (N)	Tensão de Rotura (MPa)	Tipo de rotura
Arg. cal hidráulica em tijolo (com rede)	IF_CH_TR1	677,71	0,338	pela interface
	IF_CH_TR2	106,27	0,054	pela interface
	IF_CH_TR3	692,83	0,353	pela interface
	IF_CH_TR4	333,98	0,170	pela interface
	IF_CH_TR5	(Sem efeito - o provete não destacou completamente na 1ª tentativa)		
	IF_CH_TR6	835,79	0,426	pela interface

Como exemplificado no quadro 4.15, o Quadro 4.16 remete-nos ao mesmo comportamento, a rotura dos provetes de cal hidráulica no suporte de pedra sem rede e com rede, a rotura deu-se na argamassa em grande parte dos provetes testados, teve uma rotura coesiva.

Quadro 4.15 Tensão de aderência no suporte de pedra em provetes de argamassa hidráulica

	Provete	Força de Rotura (N)	Tensão de Rotura (MPa)	Tipo de rotura
Arg. cal hidráulica em pedra (sem rede)	IF_CH_P1	1121,65	0,571	≈ 50% pela interface e 50% pela argamassa
	IF_CH_P2	993,57	0,506	pela argamassa
	IF_CH_P3	632,23	0,321	≈ 25% pela interface e 75% pela argamassa
	IF_CH_P4	(Sem efeito - o destacamento aconteceu pela cola)		
	IF_CH_P5	958,9	0,469	pela argamassa
	IF_CH_P6	845,87	0,414	pela interface
	IF_CH_P7	(Sem efeito - o destacamento aconteceu pela cola)		
	IF_CH_P8	948,38	0,464	pela argamassa

Quadro 4.16 Tensão de aderência no suporte de pedra em provetes de argamassa hidráulica com Rede

	Provete	Força de Rotura (N)	Tensão de Rotura (MPa)	Tipo de rotura
Arg. cal hidráulica em pedra (com rede)	IF_CH_PR1	409,51	0,208	pela interface
	IF_CH_PR2	659,2	0,335	≈ 50% pela interface e 50% pela argamassa
	IF_CH_PR3	(Sem efeito - o destacamento aconteceu pela cola)		
	IF_CH_PR4	361,94	0,184	pela interface
	IF_CH_PR5	130,85	0,066	pela interface
	IF_CH_PR6	85,31	0,043	pela interface

Pelas as análises dos Quadros 4.14 e Quadro 4.16, anui-se que nas argamassas com rede em ambos os suportes, o destacamento originou-se pela interface do suporte com a argamassa, uma rotura adesiva.

4.4 Argamassa de cal hidráulica após envelhecimento acelerado

Este processo de envelhecimento acelerado foi só aplicado nas argamassas de cal hidráulica endurecidas nos dois tipos de suporte com rede, devido à forte aderência após o envelhecimento não foi possível analisar as argamassas sem rede, impossibilitando o destacamento da argamassa com os dois tipos de suporte, como também não foi feito em cal aérea devido ao seu processo demoroso de cura que seriam mais 90 dias.

Neste capítulo será feita a análise comparativa de argamassas de referência de cal hidráulica, endurecidas nos moldes prismáticos com as argamassas de cal hidráulica ensaiadas nos suportes em processo de envelhecimento acelerado e com as argamassas de cal hidráulica aplicadas nos suportes com cura normal.

4.4.1 Massa volúmica e porosidade aberta

No Quadro 4.17 e na Figura 4.8, estão indicados os valores da massa volúmica e da porosidade aberta para a argamassa de cal hidráulica destacados em ambos os suportes em processo de envelhecimento acelerado em comparação com a referência cal hidráulica de referência.

Tomaram -se valores muito dispersos de desvio de padrão para a argamassa endurecida em suporte de tijolo em envelhecimento acelerado em comparação com os restantes, tendo sido a cal hidráulica em processo de envelhecimento em suporte de pedra com rede o valor mais pequeno tendo sido os resultados mais homogêneos para estes provetes.

Quadro 4.17 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta das argamassas e dos suportes com envelhecimento acelerado

	Massa volúmica aparente (kg/m ³)		Porosidade aberta (%)	
	$\rho_{b,médio}$	Desv. Padrão	$\rho_{0,médio}$ (%)	Desv. Padrão
IF_CH	1828,7	21,2	26,5	0,8
IF_CH_PR	1775,51	15,1	21,5	0,4
IF_CH_TR	1761,90	35,8	23,0	0,7
IF_CH_PR_e.a.	1828,03	7,4	20,7	0,4
IF_CH_TR_e.a.	1875,4	51,1	19,8	1,3

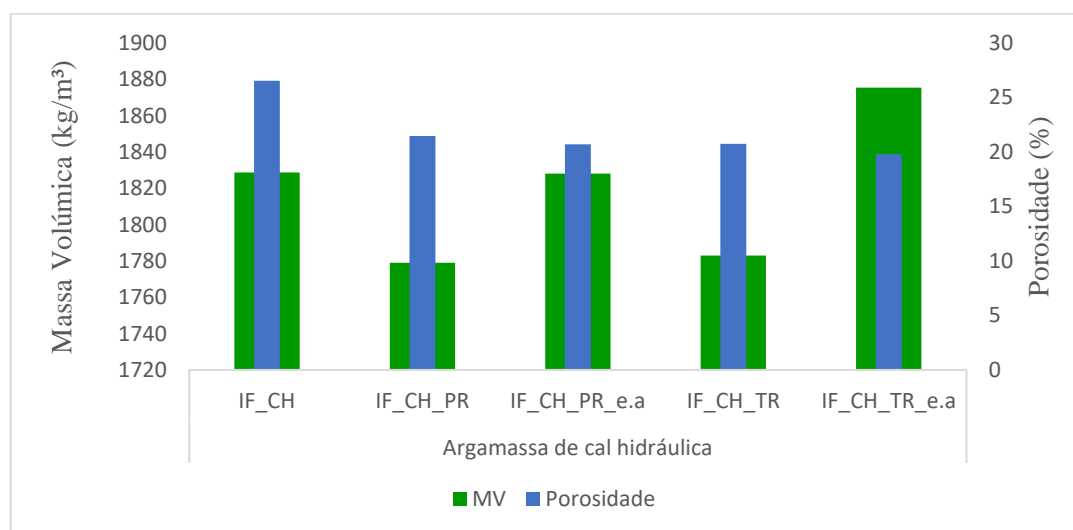


Figura 4.8 Massa volúmica e porosidade aberta da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.

Pela análise da Figura 4.7 constata-se que o processo de envelhecimento em ambos os suportes tiveram uma influência no aumento da massa volúmica e na porosidade.

4.4.2 Coeficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água

Estão apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10, os valores comparativos do coeficiente de absorção de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e os valores do índice de secagem para as argamassas de cal hidráulica destacadas nos dois tipos de suportes com rede em processo de envelhecimento rápido com as argamassas de cal hidráulica destacadas com tempo de cura normal aos 28 dias em ambos os suportes, como a de referência a argamassa endurecida nos moldes prismáticos aos 28 dias.

A Figura 4.9 indica os valores das argamassas ensaiadas em ambos os suportes após envelhecimento acelerado em comparação com a argamassa de referência, onde nos apresentam valores menores de coeficiente de absorção de água.

Os resultados apresentados no quadro 4.18, demonstram que o processo de envelhecimento acelerado na cal hidráulica em ambos os suportes, fez com que aumentasse o coeficiente de absorção de água, com um ligeiro aumento da cal hidráulica aplicada no suporte de pedra com rede em comparação com a argamassa de cal hidráulica aplicada no suporte de tijolo com rede.

Quadro 4.18 Resultados do coeficiente de absorção das argamassas em envelhecimento acelerado

Provetes	A_w, médio kg/ (m².s^{0.5})	Desvio Pa- drão
IF_CH	0,4288	0,0944
IF_CH_PR	0,2736	0,0071
IF_CH_PR_e.a	0,3370	0,0480
IF_CH_TR	0,2942	0,0997
IF_CH_PR_e.a	0,3333	0,0494

Como referido no quadro 4.18, os valores de desvios padrão para as argamassas de envelhecimento acelerado tomaram valores baixos os resultados das amostras tiveram uma tendência homogénea.

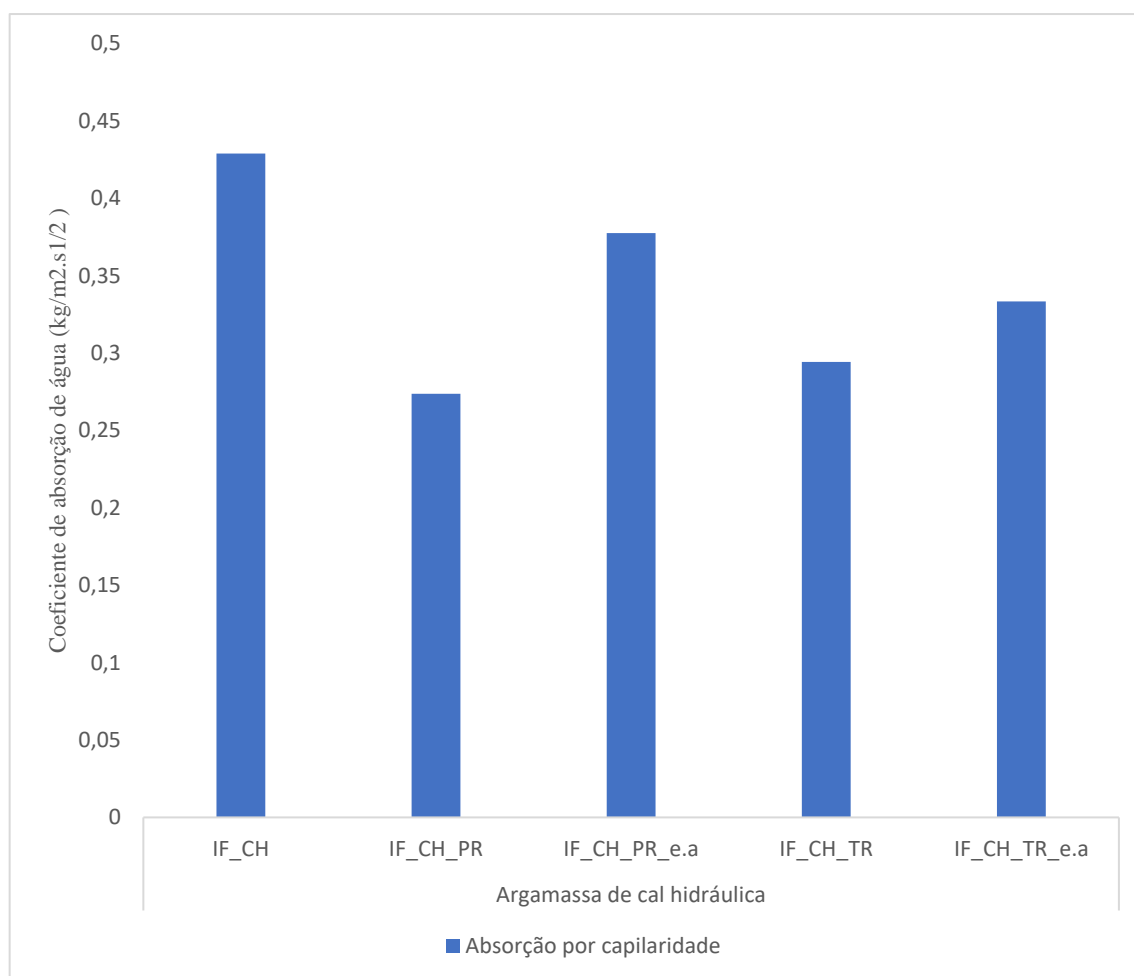


Figura 4.9 Coeficiente de absorção de água por capilaridade da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado

A Figura 4.9, demonstrou-nos que o processo de envelhecimento acelerado deu à argamassa ensaiada no suporte de pedra uma maior permeabilidade de vapor de água e com uma queda significativa do seu índice de secagem. Como na argamassa de cal hidráulica ensaiada no suporte de tijolo o processo de envelhecimento fez com que o seu índice de secagem diminuísse drasticamente tendo um comportamento idêntico, havendo uma ligeira diminuição da sua capacidade de permeabilidade ao vapor de água.

Para ambos os suportes com o processo de envelhecimento acelerado, os seus valores de permeabilidade ao vapor de água assim como do índice de secagem foram menores que a argamassa de referência.

A evolução da permeabilidade e índice de secagem com o processo de envelhecimento acelerado nas argamassas foi evidenciado. Conclui-se que o envelhecimento acelerado na argamassa de cal hidráulica tem influência no seu comportamento ao longo do tempo.

Quadro 4.19 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem das argamassas com envelhecimento acelerado

Provetes	Valor médio do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água δ (kg/m.s. Pa)	Desv. Padrão (kg/ (m.s. Pa))	Índice de Secagem IDmédio	Desvio Padrão
IF_CH	1,51E-11	1,16E-13	0,21	1,11E-02
IF_CH_PR	1,13E-11	5,71E-13	0,17	2,80E-02
IF_CH_TR	1,18E-11	2,06E-13	0,15	5,72E-03
IF_CH_PR_e.a	1,47E-11	5,56E-13	0,09	9,17E-03
IF_CH_TR_e.a	1,14E-11	6,98E-13	0,08	5,72E-03

O desvio padrão teve valores mais dispersos na cal hidráulica com envelhecimento acelerado, devido a algumas amostras nos suportes em envelhecimento acelerado não ter sido possível fazer o seu des-tacamento havendo poucas amostras para serem testadas e terem sido feito uma média mais precisa do coeficiente de permeabilidade.

No comportamento face à permeabilidade do vapor de água, verificou-se que para as argamassas de cal hidráulica no suporte de pedra o envelhecimento aumentou a sua permeabilidade ao vapor de água e aumentou a capacidade de absorção e diminui a sua capacidade de secagem. No suporte de pedra a sua capacidade de permeabilidade desce, como também a sua capacidade de absorção e desce a sua capacidade de secagem.

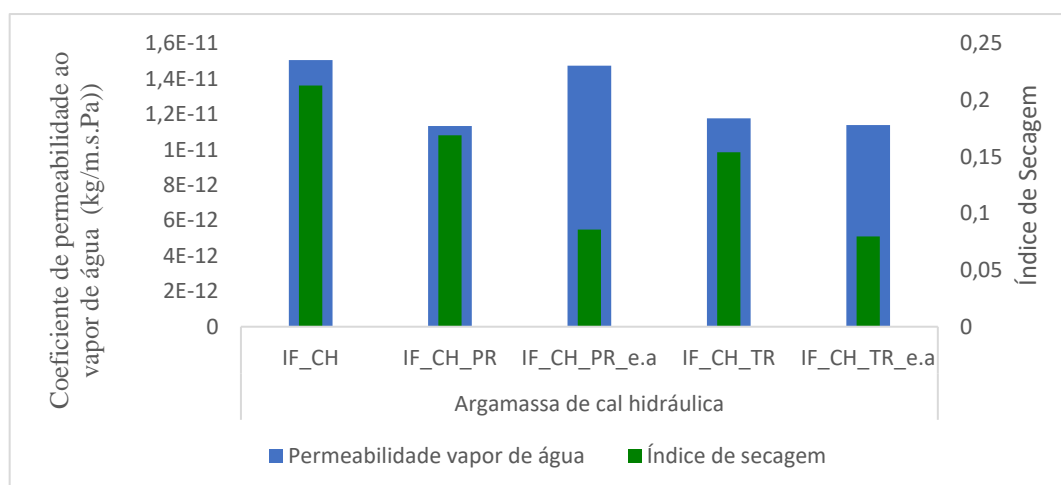


Figura 4.10 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem da argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.

4.4.3 Resistência mecânica

Na Figura 4.11 e no Quadro 4.20, estão apresentados os valores da resistência à compressão das argamassas de cal hidráulica de referência, e das argamassas de cal hidráulica destacadas nos suportes com os dois tipos de cura, normal e a envelhecida. Como a resistência à tração por flexão da argamassa de cal hidráulica de referência. Podemos observar que o processo de envelhecimento tem influência na argamassa de cal hidráulica em ambos os suportes, aumentando a sua capacidade de resistência à compressão ao longo do tempo, evidenciando-se mais na argamassa destacada no suporte de tijolo maciço.

Quadro 4.20 Resultados das Resistências à flexão por tração e da resistência de compressão

Provetes	Resist. comp. (fc) (N/mm ²)	Desvio de Padrão	Resist. flexão (N/mm ²)	Desvio Padrão
IF_CH	6,93	0,58	0,30	0,04
IF_CH_PR	9,90	2,00	-	-
IF_CH_PR_e.a	10,01	8,11	-	-
IF_CH_TR	3,55	1,17	-	-
IF_CH_PR_e.a	5,90	1,46	-	-



Figura 4.11 Resistência à compressão da cal hidráulica em ambos os suportes com rede ao fim de 28 dias e após o processo de envelhecimento acelerado.

Na cal hidráulica em suporte de pedra com envelhecimento acelerado a resistência à compressão foi de 10,01 MPa, em comparação com a resistência à compressão de fabrico está entre $\geq 3,5$ e ≤ 10 MPa. (Anexo B) A cal hidráulica em suporte de tijolo com envelhecimento acelerado tem uma resistência à compressão de 5,9 MPa estando entre os valores de fabrico de (3,5 e 10 MPa) (Anexo A).

Como esperado perante os valores de resistência da cal hidráulica destacadas em suporte de pedra com cura normal, a resistência da cal hidráulica ensaiada em suporte de pedra com cura envelhecida, os valores de resistência são bem superiores à resistência da argamassa de referência com processo de cura normal.

4.4.4 Aderência aos suportes

Não foi possível realizar ensaios *pull-off* nos provetes de argamassa de cal hidráulica em pedra (com rede), com envelhecimento acelerado, uma vez que estes, após o processo de envelhecimento acelerado, perderam a aderência ao suporte (isto é, a sua resistência adesiva é igual a zero).

No Quadro 4.21, estão apresentados os resultados de aderência aos suportes de tijolo com rede com cal hidráulica, onde verificamos que a rotura da argamassa com o suporte foi pela a sua interface, em todos os provetes.

Quadro 4.21 Tensão de aderência no suporte de tijolo em provetes de argamassa hidráulica com Rede em processo de envelhecimento acelerado

	Provete	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tipo de ruptura
Arg. cal hidráulica em tijolo (com rede)	IF_CH_TR1_e.a.	1490,55	0,759	pela interface
	IF_CH_TR2_e.a.	853,55	0,435	pela interface
	IF_CH_TR3_e.a.	569,66	0,290	pela interface
	IF_CH_TR4_e.a.	621,71	0,317	pela interface
	IF_CH_TR5_e.a.	1199,34	0,611	pela interface

4.5 Comparação das características dos suportes

Para o estudo profundo do comportamento e da evolução das argamassas de cal em contacto com os suportes, foi necessário o estudo das propriedades dos suportes.

4.5.1 Massa volúmica e porosidade aberta

No Quadro 4.22 e na Figura 4.12, estão apresentados os valores da massa volúmica e porosidade aberta dos dois tipos de suporte.

No suporte de pedra em comparação com o suporte de tijolo anuímos que, o suporte de pedra tem uma percentagem de porosidade mais pequena e contém uma massa volúmica significativamente maior.

Quadro 4.22 Massa Volúmica aparente e Porosidade aberta dos suportes

	Massa volúmica aparente (kg/m ³)		Porosidade aberta (%)	
	$\rho_{b,médio}$	Desv. Padrão	$\rho_{0,médio}$ (%)	Desv. Padrão
IF_T	1976,2	8,0	20,9	0,2
IF_P	2407,9	12,5	9,1	0,2

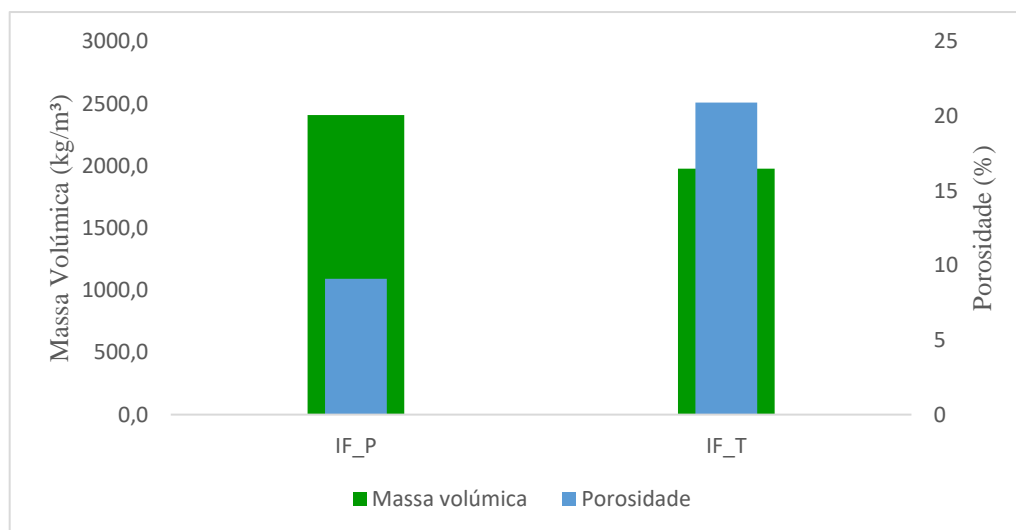


Figura 4.12 Massa volúmica e a porosidade aberta dos suportes; IF_P – Suporte de pedra; IF_T – Suporte de tijolo

4.5.2 Coeficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água

Nas figuras seguintes, 4.13 e 4.14 assim como nos Quadros 4.23 e 4.24 estão os valores comparativos do coeficiente de absorção de água, índice de secagem e permeabilidade ao vapor de água nos dois tipos de suporte.

Quadro 4.23 Resultados do coeficiente de absorção de água dos suportes

Provetes	A_w , médio kg/ (m ² .s ^{0.5})	Desvio Padrão
IF_P	0,162	0,001
IF_T	0,036	0,031

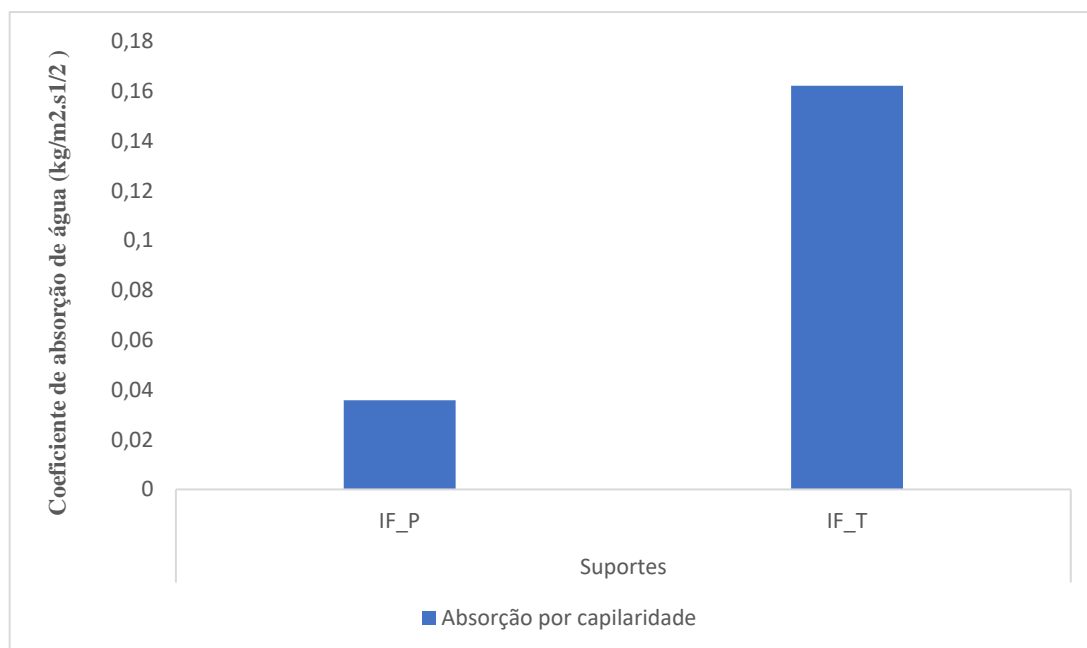


Figura 4.13 Coeficiente de absorção de água dos suportes; IF_P – Suporte de Pedra; IF_T – Suporte de Tijolo

Na análise do coeficiente de absorção de água feitos exclusivamente aos suportes Figura 4.12, os valores do tijolo são os mais altos inequivocamente, devido a este suporte ser o mais poroso.

A Figura 4.14 como no Quadro 4.24, demonstra que o suporte de pedra tem um coeficiente de permeabilidade ao vapor de água superior, há uma maior transferência de vapor de água no suporte de pedra, sendo este mais permeável do que o suporte de tijolo. Enquanto que o índice de secagem o suporte de pedra tem um maior valor de índice de secagem, representa menor rapidez de secagem. O suporte de tijolo maciço tem uma maior capacidade de secagem.

Quadro 4.24 Resultados dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e do índice de secagem nos suportes

Provetes	Valor médio δ (kg/m.s. Pa)	Desv. Padrão (kg/ (m.s. Pa))	Valor médio com envelhecimento acelerado (e.a) δ (kg/m.s. Pa)	Índice de Secagem IDmédio	Desvio Padrão
IF_T	4,77E-12	1,93E-13	-	0,16	4,76E-03
IF_P	5,96E-12	3,12E-13	-	0,17	5,27E-03

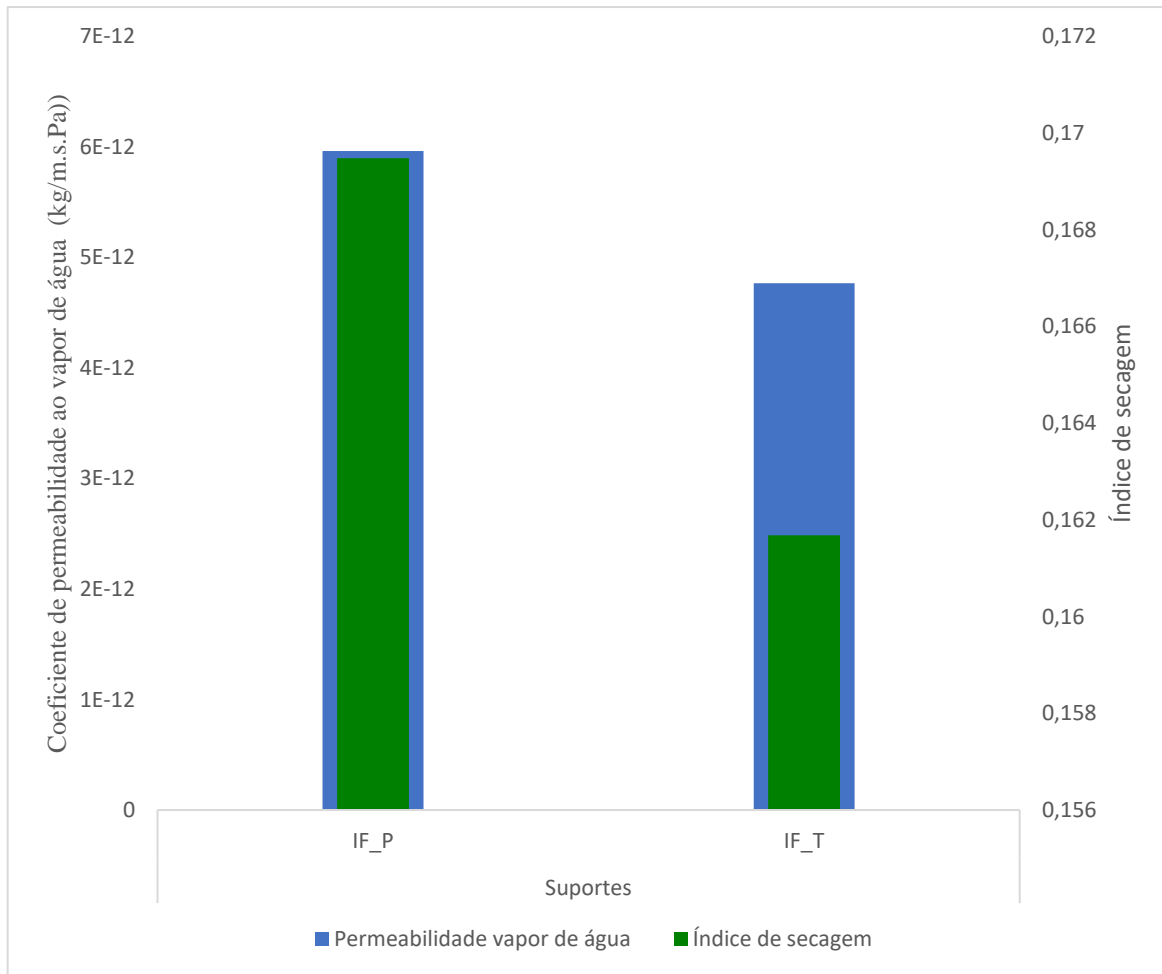


Figura 4.14 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e Índice de secagem dos suportes; IF_P – Suporte de Pedra; IF_T – Suporte de Tijolo

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Considerações Finais

O trabalho realizado teve como principal foco o estudo das propriedades físicas e mecânicas de argamassa à base de cal, para aplicação na reabilitação de edifícios, nomeadamente a comparação das características das argamassas determinadas sobre provetes laboratoriais com as características das mesmas argamassas após aplicação em suportes de tijolo maciço e de pedra. Foram realizados ensaios laboratoriais com dois tipos de argamassas de cal, cal aérea e cal hidráulica, sobre provetes prismáticos, e após aplicação em suportes de tijolo maciço e suportes de pedra.

Após o estudo geral do comportamento das argamassas, concluiu-se que as características dos suportes influenciam o comportamento de ambas as argamassas, e que cada suporte diferencia o comportamento das argamassas aplicadas.

Na análise da massa volúmica aparente, a cal hidráulica de referência e ambos os suportes tomaram valores superiores ao da cal aérea. Os suportes para a cal hidráulica neste parâmetro não tiveram influência no comportamento da argamassa, enquanto que na cal aérea os suportes tiveram influência no parâmetro da massa volúmica fazendo com que aumentasse a sua massa volúmica para ambos os suportes.

No envelhecimento acelerado para as argamassas de cal hidráulica nos suportes, houve influência em ambos os suportes, a argamassa em processo acelerado com rede aumentou significativamente a sua massa volúmica, em comparação com a de cura normal, sendo que o aumento na argamassa endurecida no suporte de tijolo também foi superior à argamassa de referência.

Quanto à porosidade, as argamassas de cal aérea de referência apresentaram valores mais elevados do que as argamassas de cal hidráulica de referência. Nas argamassas de cal aérea e cal hidráulica destacadas em ambos os suportes, os valores de porosidade foram semelhantes, não se evidenciando em cada tipo de suporte a sua influência no comportamento das argamassas. A porosidade de uma argamassa está relacionada com a quantidade de água adicionada na amassadura da argamassa, quanto menor quantidade de água menor a sua porosidade. A absorção da água pelo suporte provocou uma diminuição de água na argamassa provocando a diminuição da sua porosidade, como aconteceu na campanha realizada, tornando a argamassa mais compacta.

A porosidade nas argamassas de cal hidráulica em processo de envelhecimento acelerado, de um modo geral manteve-se para ambos os suportes, não tendo influência neste parâmetro.

No ensaio de absorção de água por capilaridade observou-se, que em termos comparativos, a argamassa de cal hidráulica tem um coeficiente de absorção muito superior à argamassa de cal aérea. As argamassas de cal hidráulica de referência deram um valor bastante superior às argamassas de cal hidráulica endurecidas nos suportes. Isto porque as argamassas endurecidas nos suportes, têm uma maior porosidade, maior capacidade de absorção de água por capilaridade devido à influência dos suportes. Na argamassa de cal hidráulica em processo de envelhecimento acelerado aumentou a sua capacidade de absorção de água por capilaridade, mas com os valores mais baixos em comparação com as argamassas de referência.

O suporte de tijolo tem um maior coeficiente de absorção de água muito superior ao do suporte de pedra, devido à sua menor massa volúmica e tendo uma maior percentagem de porosidade em comparação com o suporte de pedra.

Nas argamassas de cal aérea, embora apresentando uma porosidade mais elevada em comparação com as de cal hidráulica, a absorção da água por capilaridade foi bastante mais baixa. Esta situação pode dever-se ao facto de argamassa de cal aérea ser pré-doseada, conter aditivos hidrofugantes que impediram a absorção de água por capilaridade.

No parâmetro do índice de secagem nas argamassas endurecidas nos suportes, a argamassa de cal hidráulica, obteve um valor idêntico ao da argamassa de cal aérea endurecida nos suportes, no entanto em comparação com as argamassas de referência o índice de secagem é superior à argamassa de referência de cal hidráulica, explica-nos que a cal aérea tem um tempo superior de secagem. Explica que a velocidade de secagem da argamassa de cal hidráulica de referência é mais baixa que a cal aérea, este parâmetro foi um fator importante para avaliação da durabilidade da argamassa. As argamassas de cal hidráulica endurecidas no suporte de tijolo com rede o índice foi inferior à cal aérea endurecida no suporte de tijolo com rede, enquanto que argamassa de cal hidráulica endurecida no suporte de pedra com rede o índice de secagem foi inferior. O elemento rede teve influência na cal aérea fez aumentar o índice de secagem e diminuir a permeabilidade ao vapor de água, o coeficiente de permeabilidade teve o mesmo comportamento que o índice de secagem, na cal hidráulica endurecida no tijolo foi maior que a da cal aérea, enquanto na cal hidráulica em suporte de pedra foi menor que que a cal aérea em suporte de pedra, os suporte com a rede tiveram influência no comportamento das argamassas.

As argamassas de cal hidráulica de referência apresentam um maior coeficiente de permeabilidade de vapor de água que argamassa de cal aérea. Realçar que na argamassa de cal aérea endurecida em suporte de pedra, os coeficientes de permeabilidade tomam valores superiores à da argamassa de cal hidráulica endurecida em suporte de pedra, esta relação foi imprescindível para a importância da compatibilidade da argamassa com o suporte. Quanto menor for coeficiente de permeabilidade de vapor de água de uma argamassa, maior será a dificuldade de eliminação do vapor de água que se forma no

interior de uma argamassa ou seja uma permeabilidade reduzida é um fator negativo no sistema de revestimento, pois não permite uma boa secagem de água do interior de uma argamassa.

E processo de envelhecimento o comportamento da cal hidráulica em suporte de pedra aumenta a sua permeabilidade ao vapor de água e diminui o seu índice de secagem, comportamento contrário no suporte de tijolo a permeabilidade diminui assim como o índice de secagem. Quanto maior o coeficiente de permeabilidade menor será o tempo de secagem da argamassa, pelas características do suporte de tijolo pela a sua porosidade o índice de secagem é menor que o suporte de pedra

Nos ensaios de resistência mecânica, resistência á flexão por tração e resistência à compressão, verificou-se que a argamassa de cal aérea tem uma maior capacidade de resistência mecânica do que a argamassa de cal hidráulica, o que era expectável pois a sua porosidade foi menor. A resistência á tração por flexão foi maior na argamassa de cal aérea, 2 vezes mais que a argamassa de cal hidráulica embora sendo valores muitos baixos de resistência.

Foi inequívoca a maior capacidade de resistência à compressão na argamassa de cal aérea. Verificaram-se que os valores das argamassas endurecidas nos suportes de pedra foram os valores mais altos de resistência à compressão, tendo sido o suporte um fator de influência para a argamassa de cal aérea. Para a argamassa de cal hidráulica verificou-se uma ligeira descida, nas argamassas endurecidas nos suportes, exceto a argamassa de cal hidráulica endurecida no suporte de pedra com rede, os valores de resistência foram maiores com os valores da argamassa de cal hidráulica de referência. Tendo sido influente o suporte de pedra para ambas as argamassas, aumentando a sua capacidade de resistência à compressão.

No ensaio de modulo de elasticidade dinâmico, foram feitos única exclusivamente os testes às argamassas de referência, endurecidas nos moldes prismáticos, sendo o resultado do módulo de elasticidade maior na cal hidráulica, sendo esta uma argamassa mais rígida não absorvendo tanto as deformações dos suportes como na cal aérea, que tem um módulo de elasticidade menor.

Relativamente à capacidade de aderência os resultados são inequívocos, a cal hidráulica dá-nos um maior valor de tensão de adesão que a cal aérea, e teve uma rotura adequada a pretendida em grande maioria dos casos, rotura na cal hidráulica nos suportes deu-se no revestimento, uma rotura coesiva enquanto que a cal aérea na maioria teve uma tensão de rotura nula, ou uma rotura entre a interface da argamassa e o suporte, uma rotura adesiva.

Conforme observado nos resultados expostos, confirmam-se as alterações no comportamento da camada de revestimento aplicada na superfície do suporte. Os resultados demonstraram que as argamassas aplicadas nos suportes aumentaram a sua massa volúmica, diminuiram a porosidade aberta, coeficiente de absorção de água, bem como sua permeabilidade ao vapor de água, quando comparados com os provetes normalizados moldados em moldes metálicos. A campanha experimental produzida, sem o uso da rede, permitiu confirmar a pouca influência do material que foi utilizado para facilitar o

destacamento das argamassas dos seus respectivos suportes. Como visto, após a aplicação da argamassa fresca em uma das faces do suporte, o mesmo inicia o processo de sucção da água de amassadura e das partículas de menores dimensões nela dissolvidas, e conseqüentemente a tendência de melhorar o seu comportamento através de maior densidade, impermeabilidade e resistência.

O suporte de tijolo maciço tem uma maior porosidade e apresentou um maior coeficiente de capilaridade, provocou um maior efeito de sucção. Porém, no caso da argamassa aplicada nos suportes, a pedra calcária aparenta maior influência nos provetes, principalmente no ensaio de resistência à compressão. Esta situação poderá ficar a dever-se às dimensões dos poros que podem influenciar a capacidade de absorção dos suportes.

Comparando as características das argamassas desenvolvidas neste projeto com as argamassas pré-doseadas de fabrico de cal aérea, Rebetop Kal (cal aérea) e NHL Cal hidráulica natural verificaram-se que os valores estavam dentro dos parâmetros exigidos pela a marca.

5.2 Propostas para desenvolvimentos futuros

No desenvolvimento do estudo das argamassas de cal aérea e hidráulica, deu-nos a possibilidade de um conhecimento mais vasto sobre a interação das argamassas de cal com o próprio suporte. Para desenvolvimento futuro, será importante aprofundar o estudo das características do envelhecimento acelerado na cal aérea com interação com os suportes de pedra e de tijolo maciço, como também estudar as características das argamassas de cal aérea e hidráulica em suporte de blocos de terra.

Estudo complementares, como a análise do porosimetria serão também interessantes para melhor explicarem o comportamento das argamassas aplicadas nos suportes.

6 Referências

- Alvarez, J., Sequeira, C., & Costa, M. (2005). *Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. Paper presented at the 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Bellei, P., Arromba, J., Flores-Colen, I., Veiga, R., & Torres, I. (2021). Influence of brick and concrete substrates on the performance of renders using in-situ testing techniques. *Journal of Building Engineering*, 102871.
- Carasek, E., Cudjoe, E., & Pawliszyn, J. (2007). Fast and sensitive method to determine chloroanisoles in cork using an internally cooled solid-phase microextraction fiber. *J Chromatogr A*, 1138(1-2), 10-17. doi:10.1016/j.chroma.2006.10.092
- Carasek, H. (1997). Fatores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas. *II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais... CD ROM. Salvador: CEPED/EPUFBA/UCSAL/UEFS*, 131-146.
- Carasek, H. (2010). Argamassas, Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia dos materiais. *GC Isaia. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON*, 2, 893-944.
- Carasek, H., Cascudo, O., & Scartezini, L. M. (2001). Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 4(2001), 43-67.
- Carneiro, A. M. P. (1993). Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia: sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre.
- Cascudo, O., & Carasek, H. (2007). *Controle de produção de argamassas industrializadas em obra empregando o método de penetração do cone*. Paper presented at the 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Portugal.
- Cincotto, M. A., Silva, M. A. C., & Cascudo, H. C. (1995). Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. *Boletim*, 68, 118.
- EN 459-1: 2011. Cal de Construção. In: Parte 1.
- EN 1015-2:1999. Methods of test for mortar for masonry. Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars In.

-
- EN 1015-3:1999. Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)
- EN 1015-9:1999. Methods of test for mortar for masonry. Determination of workable life and correction time of fresh mortar
- EN 1015-11: 1999. Methods of test for mortar for masonry–Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- EN 1015-12:2016. Methods of test for mortar for masonry. Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates
- EN 1015-21:2002. Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates
- EN 16322:2013. Conservation of cultural heritage: test methods: determination of drying properties, the normalisation comite europeenne. In: Brussels.
- EN ISO 12572:2016. Hygrothermal performance of building materials and products *Determination of water vapour transmission properties-Cup Method, Brussels, 36.*
- EN ISO 15148: 2002. *Determination of water absorption coefficient by partial immersion.*
- Flores, C., Inês , & Freitas, V. P. (2009). Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva. *Conference: 3º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Patorreb 2009, FEUP.*
- Gaspar, P., Flores-Colen, I., & De Brito, J. (2007). *Técnicas de diagnóstico e classificação de anomalias por perda de aderência em rebocos.* Paper presented at the 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal.
- Grillo, K. V. F. (2010). *Análise comparativa da aderência de tipos rochosos assentados com três argamassas.* Dissertação de Mestrado Universidade de São Paulo,
- Guimarães, J. (2002). Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. In: São Paulo: Editora Pini Ltda.
- INE. (2013). Estatísticas da Construção e Habitação 2013. Retrieved from www.ine.pt

-
- INE. (2018). Estatísticas da Construção e Habitação - 2018. Retrieved from https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_bou i=315408778&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt
- Isaia, G. C. (2010). Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais. *IBRACON, 2ª Edição, São Paulo*.
- Kazmierczak, C. d. S., Brezezinski, D. E., & Collatto, D. (2007). Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, 3(1), 47-58.
- Mauro, P. C. L. (2017). Permeabilidade ao vapor de argamassas com agregados isolantese leves *Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico Lisboa - Departamento de Engenharia Civil*.
- Moura, C. B. (2007). Aderência de Revestimentos Externos de Argamassa em Substratos de Concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.
- Neville, A. M. (2015). *Propriedades do Concreto-5ª Edição*: Bookman Editora.
- NP EN 459-1:2015. Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.
- NP EN 932-2 2002. Ensaio das propriedades gerais dos agregados; Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais.
- NP EN 933-1 2012. Análise granulométrica –Método de peneiração.
- NP EN 1097-3 2002. Ensaio para determinação física e mecânica de agregados. Método para determinação
- NP EN 1936:2008. Métodos de ensaio para pedra natural Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 14146:2006. Natural stone test methods. Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). In: IPQ Portugal.
- Paulo, R. S. V. M. N. (2006). Caracterização de argamassas industriais. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro-Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro*.

- Pinto, T. M. S. R. (2014). Influência do suporte nas características da argamassa aplicada. *Tese de Mestrado FCTUC Departamento de Engenharia Civil*.
- Rosly, M. B., Jusoh, N., Othman, N., Rahman, H. A., Noah, N. F. M., & Sulaiman, R. N. R. (2019). Effect and optimization parameters of phenol removal in emulsion liquid membrane process via fractional-factorial design. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A*, 145, 268-268-278. doi:10.1016/j.cherd.2019.03.007
- Sabbatini, F. H. (1990). Tecnologia de execução de revestimentos de argamassa. *Simpósio de aplicação da tecnologia do concreto*, 13.
- Santos, D. A. F. d. (2014). *A influência das condições de cura nas propriedades das argamassas de cal para revestimentos antigos*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,
- Santos, H. B. d. (2008). Ensaio de aderência das argamassas de revestimento. *Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG*.
- Scartezini, L. M., Jucá, T. R., Linhares, H., Teixeira, F., Antonelli, G., Cascudo, O., & Carasek, H. (2002). Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa. *Ambiente Construído*, 2(2), 85-92.
- Silveira, D., Gonçalves, A., Flores-Colen, I., Veiga, M. R., Torres, I., & Travincas, R. (2021). Evaluation of in-service performance factors of renders based on in-situ testing techniques. *Journal of Building Engineering*, 34, 101806.
- Torres, I. (2014). Influência da absorção do suporte na argamassa de revestimento. *Relatório PosDoc*.
- Veiga, M. d. R. (1998). Comportamento de argamassas de revestimento de paredes: Contribuição para o estudo da sua resistência a fendilhação. *Dissertação elaborada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.
- Veiga, M. d. R., Farinha, C. B., & Brito, J. d. (2016). Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resí-duos de loiça sanitária: efeito de fíler e potencial efeito pozolânico. *Artigo Numero 53, Universidade do Minho Departamento Engenharia Civil*.

ANEXO A Ficha Técnica da Cal Aérea Pré-Doseada

composição e características

Composição:

Hidróxido de cálcio, ligantes pozolânicos, agregados de granulometrias seleccionadas, adjuvantes químicos e fibras.

Características:

Temperatura de aplicação (ambiente e suporte): +5°C a 30°C

Espessura por camada: 15-20 mm

Massa volúmica da Pasta: 1500 Kg/m³

Massa volúmica do Produto Endurecido: 1300 Kg/m³

Resistência à flexão: > 0.5N/mm²

Resistência à compressão: > 1.5 N/mm²

Absorção de água (após 24h) ≥ 0.3 kg/m²

Condutibilidade térmica:

($\lambda_{10, dry}$)=0.4W/mk (valor tabelado, P=50%)

Coefficiente de difusão do vapor de água: (μ)≤15


Aderência: 0.1 N/mm² FP - B

Reacção ao Fogo: Classe F

Nota: Resultados correspondentes a valores médios obtidos em condições de laboratório, de acordo com a norma EN 998-1. Podendo variar com a diminuição e aumento da temperatura e tipo de suporte.

Fonte | Ficha técnica Rebetop Kal novembro 2010

ANEXO B Ficha Técnica da Cal Hidráulica



CAL HIDRÁULICA NATURAL (NHL) SECIL

PROPRIEDADES FÍSICAS	Secil NHL 2	Secil NHL 3,5	Secil NHL 5
Cor	Bege	Bege	Bege
Finura - 90 µm (%)	≤ 15,0	≤ 15,0	≤ 15,0
Finura - 200 µm (%)	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 5,0
Tempo de presa (h) - Início	> 1	> 1	> 1
Tempo de presa (h) - Fim	≤ 40	< 30	< 15
Expansibilidade (mm)	≤ 2,0	< 2,0	< 2,0
Baridade (kg/dm³)	0,55 ± 0,05	0,65 ± 0,05	0,70 ± 0,05
Água livre (%)	≤ 2	≤ 2	≤ 2
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
Resistência à compressão a 2 dias (MPa)	-	-	≥ 2,0
Resistência à compressão a 28 dias (MPa)	≥ 2,0 e ≤ 7,0	≥ 3,5 e ≤ 10	≥ 5,0 e ≤ 15
PROPRIEDADES QUÍMICAS			
Sulfato SO ₃ (%)	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0
Cal livre Ca(OH) ₂ (%)	≥ 35,0	≥ 25,0	≥ 15,0
Anidrite CaSO ₄ (%)	< 1	< 1	< 1
Adições (Hidrófugantes, plastificantes, retentores de Água, pozeolanas, introduutores de ar)	0	0	0
OUTRAS PROPRIEDADES			
Marcação CE	EN 459-1:2011	EN 459-1:2011	EN 459-1:2011
Embalagem	Saco de 25 Kg	Saco de 25 Kg	Saco de 25 Kg

Fonte 2 Ficha Técnica Secil Argamassas Cal Hidráulica Natural para reabilitação e Construção sustentável

ANEXO C Ficha Técnica do Agregado

7. Desempenho(s) Declarado(s):

CARACTERÍSTICA	NORMA HARMONIZADA		
	EN 12620	EN 13139	EN 13242
Dimensão nominal (d/D)	0/2		
Granulometria	G _{F85}	N/A	G _{F85} GT _{F20}
Massa volúmica:			
- Material impermeável	(2,64 ± 0,05) Mg/m ³		
- Partículas secas	(2,63 ± 0,05) Mg/m ³		
- Partículas saturadas	(2,63 ± 0,05) Mg/m ³		
Teor de finos	f _s	Categoria 1	f _s
Qualidade de finos	N/A		
Cloretos	< 0,010%		N/A
Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}		
Enxofre total	< 1%		S ₁
Húmus	Não contém		
Carbonato de cálcio	NPD	N/A	
Retracção por secagem	< 0,075%	N/A	
Absorção de água	(0,3 ± 0,1) %		
Reactividade álcalis-silica	Classe 1	N/A	

GRANULOMETRIA DECLARADA		
Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
8	100	
6,3	100	
4	100	100
2	96	91-100
1	66	46-86
0,5	33	
0,25	11	0-36
0,125	2	
0,063	1,0	0,0-3,0

Fonte 3 Sabril Ficha técnica do Agregado (Areia 0/2)