

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Kátia Maria Pereira Soares

**A INFLUÊNCIA DOS SUPORTES  
TRADICIONAIS NO COMPORTAMENTO DAS  
ARGAMASSAS DE CAL**  
THE INFLUENCE OF TRADITIONAL SUBSTRATES  
ON THE BEHAVIOUR OF LIME MORTARS

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, no Ramo não Estrutural, orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e a Professora Doutora Inês Flores-Colen e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2021

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

Kátia Maria Pereira Soares

# A INFLUÊNCIA DOS SUPORTES TRADICIONAIS NO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSA DE CAL

## THE INFLUENCE OF TRADITIONAL SUBSTRATES ON THE BEHAVIOUR OF LIME MORTARS

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, no Ramo Não Estrutural,  
orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e pela Professora Doutora Inês Flores Colen.

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

Colaboração Institucional



Setembro de 2021



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e Professora Doutora Inês Flores-Colen pelo aprendizado compartilhado e direção no decorrer desta dissertação.

Ao IteCons, pela disponibilização dos laboratórios, equipamentos e equipes.

Ao Rafael Travincas obrigada não somente pelo companheirismo nos dias de realização dos ensaios, mas também por coparticipar suas experiências, conhecimentos e pela amizade constituída ao longo desta investigação.

À Dora Silveira e Poliana Bellei pela realização dos ensaios.

A todos os professores do curso de Mestrado em Reabilitação de Edifícios Antigos, em especial aos professores Raimundo Mendes da Silva, António Bettencourt, Diogo Mateus, João Negrão, Carlos Martins e professor Paulo Providência.

A todos os amigos de profissão, em especial, à Gloria Rodrigues, e aos engenheiros Aloísio Júnior, Andreas Bredet, Fernando Guimarães, e Paulo Fernandes, obrigada pela amizade, e por me inspirarem profissionalmente!

À minha família, em especial aos meus pais José Faria e Kleuma Soares, às minhas irmãs Dagmar Dutra e Kênia Toubes e ao meu irmão Antônio Soares. A vocês o meu eterno amor e gratidão!

À DEUS – *“Senhor eu não sou digna que entreis em minha morada, mas dissei uma só palavra e serei salva!”*

Este trabalho está enquadrado no 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.

## RESUMO

Nas últimas décadas tem-se observado uma tendência crescente na opção pela reabilitação dos edifícios antigos em vez da sua demolição integral. Existe uma percepção crescente que o antigo e o novo se podem integrar harmonicamente. Esta mudança vem corroborar com a crescente necessidade de encontrar soluções sustentáveis, especialmente para a área da construção.

Para se proceder as intervenções no edificado antigo, é muitas vezes inevitável ter de se proceder à substituição parcial ou integral dos rebocos quando estes se encontram num estado de degradação avançado. Investigações recentes têm comprovado que após aplicação sobre suportes reais as argamassas de revestimento (“rebocos”), ficam com as suas propriedades alteradas, comparativamente com as propriedades obtidas em moldes laboratoriais.

Os objetivos deste estudo são comparar o comportamento de argamassas de revestimento tradicionais de cal aérea e argamassas de cal hidráulica moldadas em moldes laboratoriais, com o seu comportamento quando aplicadas em suportes de tijolos cerâmicos maciços e blocos de pedras calcárias, e compreender como as características mecânicas e físicas destes suportes interferem no comportamento destas argamassas. Secundariamente, serão estudadas as alterações deste comportamento ao longo do tempo submetendo as argamassas ao processo de cura com envelhecimento acelerado.

A caracterização das argamassas endurecidas nos moldes laboratoriais e das argamassas destacadas dos suportes foi expressa através da determinação da massa volúmica aparente, porosidade aberta, porometria, permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, índice de secagem e resistência à compressão. Para todos os parâmetros estudados, os resultados obtidos para as argamassas endurecidas nos suportes diferenciam-se dos resultados obtidos para as argamassas em moldes laboratoriais.

Concluiu-se que a caracterização das argamassas em moldes laboratoriais conduz à obtenção de resultados diferentes da caracterização das argamassas após aplicadas aos suportes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comportamento, Reboco, Cal Aérea e Cal Hidráulica, Alvenarias Tradicionais, Durabilidade.

## ABSTRACT

In recent decades, there has been a tendency to opt for rehabilitating old buildings instead of their complete demolition. It is noticed that the old and the new can harmoniously integrate. This change confirms the growing need for sustainable solutions, especially in the construction area.

To meet these interventions in the old building, it is often unavoidable to partially or entirely replace them when they are in a degradation condition. Recent researches show that after rendering mortars are applied to real substrates, their properties change, compared to the properties obtained in laboratory molds.

The objectives of this study will be to compare the behaviour of traditional air lime and hydraulic lime lining mortars, in laboratory molds, with them applied to real reduced substrates, such as solid ceramic bricks, and stone blocks and to understand how the mechanical and physical characteristics from the substrates, interfere with the behaviour of these mortars. Secondly, changes in these performance over time will be studied using the accelerated aging curing process.

The mortars characterization hardened in laboratory moulds and mortars detached from substrates specimens was expressed by: the apparent density, open porosity, porometry, water vapor permeability, capillary water absorption, drying index and compression strength. The results obtained for mortars hardened on substrates differ from the results obtained for mortars in laboratory moulds, for all parameters studied.

It is concluded that the characterization of mortars in laboratory moulds leads to different results from the characterization of mortars after applied to substrates of the reduced real model type.

**KEY-WORDS:** Behaviour, Render, Air and Hydraulic Lime, Traditional Masonry, Durability.

---

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos da investigação.....	3
1.3.	Metodologia.....	3
1.3.1.	Descrição da metodologia.....	4
1.4.	Organização do texto.....	4
2.	ESTADO DA ARTE.....	6
2.1.	Conhecimento existente.....	6
2.2.	Breve história da utilização de argamassas de cal.....	9
2.3.	Rebocos tradicionais.....	10
2.3.1.	Traços.....	10
2.3.2.	Exigências funcionais das argamassas antigas.....	11
2.4.	Estrutura porosa das argamassas.....	15
2.5.	A Cal.....	17
2.5.1.	Os tipos de cal da construção.....	18
2.5.1.1.	Cal aérea.....	19
2.5.1.2.	A cal hidráulica.....	20
2.5.2.	A influência dos ligantes na estrutura porosa das argamassas.....	21
2.6.	Os agregados.....	21
2.6.1.	As areias.....	22
2.6.1.1.	Influência da areia na estrutura porosa das argamassas.....	23
2.7.	Alvenarias tradicionais.....	24
2.7.1.	Alvenarias de pedra.....	24
2.7.2.	Alvenarias de tijolos maciços.....	25
3.	CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	27
3.1.	Introdução.....	27
3.1.1.	Caracterização das matérias-primas.....	30
3.1.1.1.	Análise granulométrica.....	30
3.1.1.2.	Baridade.....	30
3.1.2.	Caracterização dos suportes e argamassas.....	30

---

3.1.2.1. Consistência por espalhamento .....	31
3.1.2.2. Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	31
3.1.2.3. Porosimetria .....	32
3.1.2.4. Absorção de água por capilaridade .....	32
3.1.2.5. Índice de secagem .....	34
3.1.2.6. Permeabilidade ao vapor de água .....	35
3.1.2.7. Resistência à tração por flexão e resistência à compressão.....	37
4. RESULTADOS OBTIDOS .....	39
4.1. Introdução.....	39
4.2. Caracterização dos agregados e das cais.....	40
4.2.1. Análise granulométrica da areia .....	40
4.2.2. Baridade da areia e da cal.....	41
4.3. Caracterização dos suportes.....	41
4.3.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	41
4.3.2. Porosimetria .....	41
4.3.3. Absorção de água por capilaridade .....	42
4.3.4. Permeabilidade ao vapor de água .....	42
4.3.5. Índice de secagem.....	43
4.4. Caracterização das argamassas em moldes laboratoriais.....	43
4.4.1. Consistência por espalhamento .....	43
4.4.2. Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	44
4.4.3. Porosimetria .....	44
4.4.4. Absorção de água por capilaridade .....	45
4.4.5. Índice de secagem.....	45
4.4.6. Permeabilidade ao vapor de água .....	46
4.4.7. Resistência à tração por flexão e resistência à compressão.....	46
4.5. Caracterização das argamassas destacadas dos suportes.....	47
4.5.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	47
4.5.2. Porosimetria .....	47
4.5.3. Absorção de água por capilaridade .....	48
4.5.4. Índice de secagem.....	49
4.5.5. Permeabilidade ao vapor de água .....	49

---

---

4.5.6.	Resistência à compressão.....	50
4.6.	Caracterização das argamassas após envelhecimento acelerado.....	50
4.6.1.	Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	51
4.6.2.	Absorção de água por capilaridade .....	51
4.6.3.	Índice de secagem.....	52
4.6.4.	Permeabilidade ao vapor de água .....	52
4.6.5.	Resistência à compressão.....	53
5.	ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	54
5.1.	Introdução.....	54
5.2.	Os suportes.....	54
5.3.	Análise comparativa das argamassas - Cura corrente.....	55
5.3.1.	Porosimetria.....	55
5.3.2.	Massa volúmica aparente, porosidade aberta e porosimetria.....	56
5.3.3.	Absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem .....	57
5.3.4.	Resistência à tração por flexão e à compressão.....	60
5.4.	Análise comparativa das argamassas - Cura com envelhecimento acelerado .....	63
5.4.1.	Massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	63
5.4.2.	Absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem .....	64
5.4.3.	Resistência à compressão.....	67
6.	CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS.....	68
6.1.	Análise global.....	68
6.2.	Trabalhos futuros .....	71
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
	ANEXO A – Curvas de absorção de água por capilaridade.....	1A



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Às argamassas atribui-se não somente a função de aglomerar os elementos construtivos que erguem as paredes, mas principalmente a função de proteção e durabilidade dos suportes onde estão aplicadas. São as argamassas de revestimentos (“os rebocos”) que desempenham esta função de proteção e a elas estão associadas as manifestações patológicas mais comuns que afetam não somente as propriedades e durabilidade destes suportes, como também o conforto e salubridade das edificações, sendo responsáveis por uma fração significativa das necessidades de reabilitação.

Ao longo dos anos, os rebocos sofrem desgastes naturais, e, também, deterioração por ação de agentes externos, como a poluição, vibrações do tráfego de automóvel, alterações de uso e alterações climáticas. Estes processos de desgastes obrigam a uma crescente necessidade de reabilitação de edifícios, quer sejam antigos ou não, e os quais podem requerer a substituição parcial ou integral dos rebocos, em função do estado de degradação em que se encontram.

A designação de edifícios antigos, nesta dissertação, será dada aos edifícios que utilizaram suportes antigos e argamassas antigas em sua construção. São considerados suportes antigos os elementos construtivos das paredes edificadas com pedra, tijolo cerâmico de barro vermelho, adobe, ou superfícies monolíticas de taipa (Japiassú, 2011). A designação de argamassas antigas, será dada, ao longo deste trabalho, àquelas utilizadas antes da descoberta do Cimento Portland, entre 1812-1835, e resultante da mistura de um ligante (cal aérea ou hidráulica), com um agregado miúdo e água, com propriedades de aderência e endurecimento. Entretanto, verifica-se na história, inclusive nas argamassas de cal, o acréscimo de outros materiais como material cerâmico pulverizado, limalha de ferro, óleo, cinzas vulcânicas e pozolonas (na sua origem, são rochas de origem vulcânica que, quando finamente moídas e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio (da cal ou do cimento) formando compostos com propriedades cimentícias, (ECIVIL@2021). Atualmente existe pozolanas artificiais provenientes de subprodutos industriais ou derivadas de algumas rochas após tratamento térmico adequado, (Torres, 2014).

As argamassas antigas são essencialmente utilizadas na reparação de alvenarias, fechamento de juntas, nas injeções de consolidação, e na substituição dos revestimentos interiores e exteriores. Embora adotem a mesma designação em todas estas situações – *argamassas* –obedecem a requisitos diferentes, pelo que cada caso deve ser considerado separadamente (Rodrigues, 2004).

Frequentemente as argamassas de substituição aplicadas revelaram reduzida compatibilidade com os suportes antigos, constituindo-se nestes casos como soluções pouco duráveis e potencialmente geradoras de novos processos de degradação das alvenarias. Nas mais recentes intervenções de reabilitação, vem-se dando preferência à utilização de argamassas de cal por possuírem maior compatibilidade com os suportes, harmonizando-se esteticamente com as alvenarias tradicionais, sendo materiais de alta plasticidade, o que favorece sua conservação.

Há que se ressaltar que as argamassas têm características, exigências e definições específicas e devem ser adaptadas a cada situação, tendo em conta fatores como as características dos suportes, o tipo de edifício e respetiva época, os processos e tecnologias de construção, o clima da região e as condições ambientais a que estarão sujeitas.

No intuito de se fazer escolhas mais assertivas, relativamente aos tipos de argamassas e aos seus traços, muito se tem investigado nas últimas décadas sobre as propriedades das argamassas empregues nas construções, como também, no aperfeiçoamento tecnológico das mesmas, inclusive com novas funções incorporadas, como é o caso das argamassas térmicas.

A caracterização das argamassas é, quase sempre, realizada em provetes executados em moldes laboratoriais de material não poroso, e de acordo com a normalização aplicável. Após a aplicação das argamassas sobre suportes reais, estas irão sofrer influência das propriedades dos suportes e terão comportamentos diferentes quando comparadas com as argamassas em moldes laboratoriais, Torres et al (2020).

Seguindo essa linha de investigação, este trabalho de dissertação, com diretriz em agregar conhecimentos na área de reabilitação de edifícios antigos, tem como objetivo principal proceder ao estudo comparativo do comportamento de argamassas de cal aérea e argamassas de cal hidráulica, moldadas em moldes laboratoriais, com o comportamento das mesmas aplicadas sobre suportes reais de tijolo cerâmico maciço e bloco de pedra calcária, no sentido compreender como a estrutura porosa, a distribuição de poros, a absorção de água, a permeabilidade ao vapor e as características mecânicas desses suportes irão influenciar o comportamento dos rebocos que farão parte na implementação de processos de manutenção e reabilitação das edificações antigas.

## 1.2. Objetivos da investigação

O objetivo principal dessa investigação é comparar o comportamento das argamassas de revestimento de cal aérea e argamassas de cal hidráulica, determinado sobre provetes laboratoriais, com o comportamento das mesmas aplicadas em suportes reais reduzidos, do tipo tijolos cerâmicos maciços e blocos de pedras calcárias, e compreender como as características mecânicas, as propriedades porosas, a distribuição de poros, a absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao vapor de água dos suportes interferem no comportamento destas argamassas.

Para concretizar esse objetivo foram formulados dois tipos de argamassas de cal aérea e dois tipos de argamassas de cal hidráulica. A diferença entre os dois tipos de argamassas foi no agregado utilizado. Foi utilizada uma areia corrente com granulometria corrente com dimensão inferior aos 4 mm e uma areia fina com granulometria inferior aos 0,5 mm. Foram avaliadas as seguintes propriedades: porosidade aberta, porosimetria, absorção de água por capilaridade, permeabilidade do vapor de água, capacidade de secagem, resistências mecânicas e durabilidade. Os suportes foram, também, caracterizados.

Expecta-se ao final das caracterizações poder responder, para as situações ensaiadas, quais os parâmetros dos suportes influenciarão o comportamento das argamassas após aplicadas sobre os mesmos e ainda se, após a cura com envelhecimento acelerado, as argamassas se comportarão de forma semelhante, para um mesmo tipo de suporte e de que forma a escolha dos agregados interferirão no comportamento das argamassas. Caso ocorra uma variabilidade significativa, serão apontados os fatores que influenciaram os resultados.

Em um segundo plano, pretende-se contribuir para auxiliar os técnicos nos conhecimentos necessários para intervenções em edifícios antigos com e sem valor histórico, garantindo a compatibilidade de elementos antigos e novos sem criar novos pontos de tensões, com soluções pouco invasivas, de durabilidade satisfatória e harmónica. Com esta abordagem o edificado é adequadamente preservado ao longo do tempo contribuindo assim com a diminuição do passivo ambiental da construção civil.

## 1.3. Metodologia

Esta é uma *Pesquisa Aplicada*, e *Exploratória* que objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas e dirigidas à solução de problemas específicos na área de reabilitação de edifícios antigos, revestidos por argamassas de cal, proporcionando maior familiaridade com o

problema com vista a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos será uma *Pesquisa Experimental*, onde se encontram definidos os objetos de estudo, as variáveis capazes de influenciá-los, assim como as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz nos objetos. A abordagem será *Quantitativa* e os dados obtidos dos ensaios característicos serão traduzidos em números, através de técnicas estatísticas e será utilizada para chegar à conclusão a *Metodologia Dedutiva*, com o objetivo de explicar o conteúdo das premissas, por intermédio de uma cadeia de raciocínio em ordem descendente, de análise do geral para o particular.

### **1.3.1. Descrição da metodologia**

O desenvolvimento dessa pesquisa decorreu de outubro/2020 a julho/2021, nos laboratórios do ItECons, em 2 fases.

A 1ª fase foi destinada à caracterização dos agregados, dos suportes, das cais e das argamassas no seu estado fresco. A 2ª fase foi destinada à caracterização das argamassas no seu estado endurecido sob os processos de cura corrente e cura com envelhecimento acelerado.

As escolhas das argamassas e dos suportes tiveram em conta que, para os casos reais de reabilitação de edifícios antigos, há uma maior predominância desses materiais. Foram escolhidos quatro tipos de argamassas de revestimento: argamassa de cal aérea com areia fina, argamassa de cal aérea com areia corrente, argamassa de cal hidráulica com areia fina e argamassa de cal hidráulica com areia corrente. Os traços, em volume, foram formulados em laboratório, sendo para as argamassas de cal aérea, 1:2 e para as argamassas de cal hidráulica, 1:3. Os suportes reais escolhidos incluem blocos de pedra calcária e tijolos cerâmicos maciços.

### **1.4. Organização do texto**

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos. No Capítulo 1 faz-se uma breve introdução sobre o tema, os objetivos e como será a abordagem. O Capítulo 2 inicia-se com a apresentação de trabalhos científicos relacionados com o tema, e em sequência, é apresentada uma breve história sobre a utilização das argamassas de cal. Dando prosseguimento é reportando sobre a composição dos rebocos antigos, referenciando-os aos traços, seus componentes e suas exigências. Neste capítulo também se faz referência às propriedades das argamassas de cais, às características dos agregados, e por fim, parcamente, sobre as alvenarias antigas.

As metodologias para execução dos ensaios das diversas caracterizações, estão descritas no Capítulo 3 e estão em conformidade com as normas requeridas, sendo que os resultados obtidos destes ensaios figuram no Capítulo 4. O Capítulo 5 é aplicado à análise dos resultados incluindo a identificação das variantes e suas prováveis causas. Finalmente, o Capítulo 6 reporta sobre o cumprimento dos objetivos traçados nesta investigação e de delinear também, algumas vias de desenvolvimento futuro para elucidação das variantes e ampliação do conhecimento sobre o tema.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Conhecimento existente

No que diz respeito aos edifícios antigos, é usual a substituição integral dos rebocos com a utilização de argamassas correntes não compatíveis com os suportes existentes, originando soluções de manutenção ou reabilitação pouco duráveis e potencialmente geradoras de novos processos de degradação das alvenarias:

*“O desconhecimento da constituição e da tecnologia envolvida fazem com que a opção comum para a reparação seja a extração de todo o revestimento e a sua substituição por uma solução atual, em geral não adaptada ao funcionamento do revestimento antigo. Muitas vezes, as soluções adotadas, além de descaracterizarem os edifícios, são funcionalmente desadequadas e têm um desempenho e uma durabilidade inferiores aos pré-existentes.” Adriano (2008, p.3).*

Veiga (2003) estudou quatorze composições de argamassa recomendadas para revestimento de edifícios antigos, e apontou as argamassas com base em cal aérea - com a cal aérea como único ligante<sup>1</sup>, ou em misturas com teores reduzidos de cimento, como as mais adequadas para revestimentos de paredes antigas. Já as argamassas de cimento como único ligante, além de esteticamente não apresentarem textura compatível com as argamassas existentes, contêm na sua composição, sais solúveis que se cristalizam no interior das paredes deteriorando-as, somando-se, rigidez excessiva - tendem a degradar as alvenarias fracas por transmissão de esforços elevados e a fendilhar por dificuldade em acomodar as deformações elevadas que são expectáveis nesse tipo de alvenaria, e, ainda, uma capacidade limitada de permitir a secagem da parede.

Há que se referenciar que a cal aérea necessita do contacto com o dióxido de carbono do ambiente para poder carbonatar e atingir as características que lhe são atribuídas. Devido a sua

---

<sup>1</sup> *Ligante, aglomerante ou aglutinante são materiais geralmente pulverulentos, com propriedade fundamental de aglutinar outros materiais (agregados) entre si, quando se adiciona água, atribuindo ao material resultante, grande coesão e resistência mecânica.*

presa lenta, não é recomendada a sua utilização em locais de elevada humidade relativa por não conseguirem atingir, em um período de tempo razoável, resistências mecânicas consideradas necessárias. Nessas situações, torna-se necessário o uso de argamassas hidráulicas respeitando-se as condições de compatibilidade mecânica, física e química com as paredes dos edifícios antigos ou a utilização de argamassas de cal aérea com a incorporação de componentes pozolânicos.

Rodrigues (2004) estudou dezanove tipos de argamassas de cal aérea com diferentes componentes pozolânicos, e concluiu que, com a utilização de componentes pozolânicos, as argamassas de cal aérea adquiriram características hidráulicas sem, contudo, ter sido posta em causa a necessária compatibilidade mecânica, física e química com os suportes. Velosa (2006), em seus estudos, também concluiu ser possível a elaboração de traços de argamassas de cal aérea e pozolanas naturais e artificiais, compatíveis com as argamassas antigas e com os suportes antigos, inclusive suportes de adobe.

No que tange ao objetivo principal desta dissertação - compreender como as características dos suportes influenciam o comportamento das argamassas - é de suma importância para tal, entender os comportamentos que ocorrem na interface entre as argamassas e os suportes.

Segundo Costa e John (2011), a aderência é um dos mais importantes requisitos a ser exigido no desempenho de sistemas multifásicos. É um fenômeno de contato entre superfícies, regida pelas interações químicas e mecânicas que ocorrem na interface e por sua vez está associada com as características superficiais e a natureza porosa dos suportes e das argamassas, pela técnica de execução do reboco e pela cura. Ainda, Costa e John (2011) cita os estudos de Farran que introduziu o conceito de zona de transição entre fases. A aderência mecânica ocorre quando a argamassa no seu estado fluido, entra em contato com o suporte, e parte da água de amassadura contendo em dissolução os componentes do aglomerante, penetra nos poros e nas reentrâncias dos suportes, onde ocorrerá a precipitação dos silicatos do cimento (para as argamassas de cimento) e do hidróxido de cal (para as argamassas de cal puras ou mistas) e ao longo da cura, irá propiciar a ancoragem da argamassa ao suporte. A aderência química é oriunda das forças de atração moleculares entre as ligações primárias e secundárias, e quanto mais forte estas ligações, melhor é a adesão. Uma má aderência entre a argamassa e o suporte pode conduzir a manifestações patológicas como: retração, fissuração, destacamento e outros.

Nos sistemas argamassas-alvenaria, a aderência mecânica tem sido considerada o principal mecanismo de adesão e somente irá ocorrer se o suporte apresentar porosidade aberta ou rugosidade que permitam a ancoragem da argamassa.

---

Carasek et al (2005) estudaram a influência da estrutura dos poros de argamassas mistas (cimento, cal e areia) e de blocos de concreto e cerâmicos no desempenho dos revestimentos e concluíram que, tanto as propriedades e características dos suportes, bem como as variações nas curvas granulométricas das areias, geram estruturas porosas distintas, decisivas no desempenho dos revestimentos e em especial na resistência de aderência.

Nesta mesma linha de estudos, Kazmierczak et al (2007), estudou a influência das características dos suportes (bloco cerâmico de vedação, bloco de concreto e tijolo maciço) na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa industrializada, classificada segundo a ABNT-NBR 13281/95 como AC-II. Também relacionou nos seus estudos a influência da utilização de chapisco. Novamente observou-se que a distribuição de poros da argamassa endurecida variou em função das características de cada suporte e que a utilização de chapisco pode inferir aumento da resistência de aderência à tração.

Scartezini (2002) estudou os fatores que influenciam na resistência de aderência, e além das influências já relacionadas (tipo de suporte, microestrutura da interface e cura) vale ressaltar as observações apontadas sobre o tipo de preparação realizado nos suportes antes da aplicação das argamassas. A utilização de chapisco é uma prática corrente empregue para aumentar a rugosidade dos suportes em revestimentos argamassados. A pesquisa mostrou que este tipo de preparação do suporte possibilitou obtenção de maiores resistências de aderência em blocos cerâmicos. Em blocos de concreto, houve uma queda de resistência de aderência, ao contrário do observado por Kazmierczak et al (2007).

Ainda, Muller (2010), avaliou vários tipos de chapisco - chapisco rolado (aplicado com rolo de espuma), chapisco desempenado (aplicado com desempenadeira dentada) e chapisco convencional (lançado com colher de pedreiro) – e chegou à conclusão que os diferentes tipos de chapisco, apresentam variação quanto á resistência de aderência à tração. De suas investigações ele concluiu que o valor mais alto para a resistência de aderência foi obtido com a utilização do chapisco rolado, e o menor para o chapisco lançado com colher de pedreiro.

Rato (2006) avaliou a forma como se relacionam o tipo de ligante, a granulometria das areias, as propriedades da microestrutura morfológica e o comportamento das argamassas. Em referência à granulometria das areias, observou uma tendência generalizada que areias mais grossas dão origem a menores valores de porosidade aberta. No âmbito microestrutural, verificou que a porosidade de uma argamassa depende não só da quantidade de poros, mas também de suas dimensões. E por fim, identificou um conjunto de tendências que revelou existir uma diferenciação entre ligante aéreos e ligante hidráulicos, sobretudo no que se refere á absorção de água por capilaridade.



Referenciando algumas dentre as muitas das pesquisas realizadas até então, no que se refere ao conhecimento aprofundado dos tipos de argamassas, seus componentes e seus comportamentos, principalmente sobre os fatores que influenciam a adesão, pois como visto na literatura, a aderência das argamassas aos suportes é fator preponderante na qualidade dos rebocos, há que se aprofundar o conhecimento sobre quais serão as outras propriedades das argamassas que também são influenciadas pelas características dos suportes. Neste sentido, o projeto de investigação IF-Mortar, em desenvolvimento no Itecons, em colaboração com o IST vem procurando responder a estas questões.

Torres (2014) estudou a influência de suportes de betão, tijolo cerâmico vazado e chapa acrílica em três tipos de argamassas (argamassa de cimento, argamassa de cal aérea e monocamada). Desse estudo confirmou-se que as características dos suportes influenciam diversas características das argamassas. Genericamente, observou que as argamassas após aplicadas aos suportes viram sua porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor diminuírem e a massa volúmica aparente, resistência à compressão e índice de secagem aumentarem, quando comparadas aos resultados obtidos em moldes laboratoriais.

Neste sentido, ampliar o conhecimento da influência de outros tipos de suportes sobre outros tipos de argamassa, representa uma lacuna a ser preenchida, em referência aos estudos dos comportamentos dos revestimentos em situações que simulam condições de aplicação reais.

## **2.2. Breve história da utilização de argamassas de cal**

De acordo com a literatura, não é possível determinar ao certo quando a humanidade descobriu a cal. Existe uma teoria que a partir da descoberta do fogo os homens antigos tenham utilizado a pedra calcária para proteger as fogueiras. O fogo aqueceu as rochas, transformando-as na primeira cal calcinada. Depois choveu e a cal extinguiu-se até transformar-se em hidróxido de cálcio que, por sua vez, reagiu com as cinzas e areias ao redor da fogueira, originando-se a primeira argamassa da antiguidade, Lhoist@ (2021).

O uso da cal, como ligante em argamassas de revestimento de alvenarias em edifícios remonta há milénios. Segundo Margalha (2011), Malinowsky (1982 e 1991) referiu que as primeiras argamassas só de cal teriam sido empregues em Jericó, na Palestina, por volta de 7.000 a. C., e que, Reller (1992), encontrou em Nevoli Çori, na Turquia, restos da utilização de argamassas de cal em pavimentos, que datam de 10.000 a 8.000 a. C.

Os primeiros revestimentos com argamassa de cal terão sido usados na Grécia, no entanto, foi

durante o Império Romano (27 a.C. a 395 d.C.), que esses desenvolveram uma vasto conhecimento sobre as argamassas de cal, permitindo-lhes difundir sua utilização como revestimento – a utilização de argamassas de cal permitia uma escolha menos criteriosa das pedras empregadas na alvenaria por colmatarem seus defeitos e por tornarem mais confortáveis os edifícios.

### **2.3. Rebocos tradicionais**

A terminologia *rebocos tradicionais* ou *rebocos tradicionais de ligantes minerais* é regularmente aplicada aos revestimentos preparados e doseados em obra, de acordo com as tecnologias tradicionais, e resultantes basicamente, da mistura de cimento, cal aérea ou hidráulica, areia, água, eventualmente, adjuvantes e aditivos<sup>2</sup>, com propriedades de aderência e endurecimento.

Os rebocos em geral têm a função de regularizar o suporte, servindo como base para outros acabamentos ou constituindo o próprio acabamento final, para além da finalidade de proteção das alvenarias.

Segundo Torres (2014), no que se refere aos revestimentos exteriores, pode-se dizer que estes são a ‘pele’ dos edifícios e nesta função, serão os rebocos exteriores que protegerão o interior das edificações, contribuindo com o desempenho termo-acustico, com a permeabilidade ao vapor de água, com a estanquidade e resistência mecânica.

#### **2.3.1. Traços**

A escolha do traço das argamassas que farão parte dos processos de reabilitação de edifícios antigos, é um processo complexo que deve ter em conta a satisfação das exigências funcionais mais significativas e tentar reproduzi-las, sendo que, recriá-las exatamente como quando foram aplicadas aos suportes, não é possível e nem apropriado uma vez que as condições em que se encontram os suportes, já não são as mesmas, devido à idade e às ações de envelhecimento. Outro caminho é formular uma argamassa compatível com a argamassa existente e/ou com o suporte.

Para seguir esta metodologia tem-se então que caracterizar as argamassas existentes no edificado conhecendo a composição de cada camada, suas características físicas e mecânicas.

---

<sup>2</sup> Adjuvantes e aditivos são substâncias adicionadas às argamassas e betões, com o objetivo de melhorar, de forma significativa, uma ou mais de suas propriedades.

É imperativo também, inteirar-se das principais causas e patologias associadas às argamassas, identificar as funções e requisitos a cumprir pela argamassa de substituição, assim como determinar o nível das intervenções.

Pode-se obter a caracterização das argamassas existentes através de amostras recolhidas no local e encaminhadas para análise laboratorial, recorrendo-se a ensaios parcialmente destrutivos ou destrutivos, ou a ensaios realizados *in-situ*, neste caso, não destrutivos.

Embora as argamassas de cal sejam menos resistentes mecanicamente que as argamassas bastardas<sup>3</sup>, têm a resistência adequada para a aplicação em alvenarias antigas, tanto para assentamento como revestimento. Por outro lado, apresentam boa plasticidade, baixa retração, com constância de volume em condições variáveis de humidade, boa durabilidade e compatibilidade com as tintas e outros acabamentos.

### 2.3.2. Exigências funcionais das argamassas antigas

É consenso entre os estudiosos que as principais características requeridas para as argamassas de revestimento de paredes antigas, de forma a reduzir a sua degradação e aumentar o seu desempenho, devem satisfazer as suas exigências funcionais – Veiga (1998); Rodrigues (2004) e Guerreiro et al (2007):

- *Boa trabalhabilidade*: reflete o grau de facilidade de aplicação da argamassa, podendo ser obtida com o aumento do teor de ligante, com o aumento do teor de finos das areias ou com o aumento de água do traço. O aumento desses elementos deve ser cuidadosamente estudado pois pode trazer consequências negativas noutras características requeridas às argamassas. Muito do comportamento dos rebocos depende de uma boa aplicação da argamassa, que por sua vez só é possível se a argamassa tiver uma boa trabalhabilidade.
- *Compatibilidade com o suporte*: entre a argamassa de revestimento e o suporte deve existir compatibilidade geométrica, física, mecânica e química. A compatibilidade geométrica é satisfeita através das camadas que constituem os rebocos antigos, onde devem ter espessura suficiente para encobrir os defeitos e irregularidades da alvenaria. A compatibilidade física é traduzida no potencial de aderência e permeabilidade ao vapor de água, e coeficiente de condutibilidade térmica seme -

---

<sup>3</sup> Quando a argamassa for constituída por apenas um ligante, ela tomará o nome desse ligante; quando for constituída por mais que um ligante, denominar-se-á argamassa bastarda.

- lhante ao do suporte. A compatibilidade mecânica implica que a resistência mecânica da argamassa não deve ser mais elevada que a do suporte para não haver a introdução de tensões que os deteriore. Por fim, a compatibilidade química infere numa boa resistência aos sulfatos e cloretos, pois os sulfatos, devido a ações mecânicas, propiciam o aumento do volume dos sais ao longo de sua cristalização/dissolução; e os cloretos, devido a ações químicas, geram a formação de produtos expansivos que conduzem à rotura e desagregação das argamassas; e baixa libertação de sais solúveis, não só para a preservação da alvenaria como para a minimização da degradação da argamassa.

- *Boa aderência ao suporte*: esta é uma característica fundamental a ser exigida entre as argamassas e suportes antigos e é um fenômeno essencialmente mecânico, que promove a aderência das argamassas aos suportes, de modo que não se descolem sob efeitos de trações e compressões. A aderência mecânica ocorre quando a argamassa penetra nos suportes através da porosidade e da rugosidade destes. Em superfícies lisas e sem poros o que se verifica é uma aderência essencialmente química. Uma boa aderência da argamassa ao suporte contribui para uma distribuição de tensões mais eficiente no que se traduz em resistência à fendilhação, colaborando com a capacidade de impermeabilização e durabilidade do reboco. No caso dos rebocos tradicionais não adjuvados, a aderência decorre por penetração capilar da água de amassadura, que arrasta os finos da pasta para os poros do suporte. A qualidade da aderência é avaliada através de ensaios de arrancamento. Suportes rugosos promovem melhor a aderência que suportes lisos e poucos absorventes. Suportes muito absorventes também podem prejudicar a aderência pois tendem a desidratar rapidamente a argamassa tornando a interface entre reboco e suporte, pulverulenta. É, em muitos casos, possível atuar sobre o suporte para melhorar as suas condições de aderência, como por exemplo, fazendo a picagem do suporte para aumentar a rugosidade, ou o simples humedecimento prévio.
- *Função impermeabilizante das zonas não fendilhadas*: o revestimento deve limitar a quantidade de água que pode atingir o suporte. Para revestimentos de cal, esta impermeabilidade implica que o revestimento seja suficientemente espesso, para constituir, de certa maneira, uma barreira à penetração de água. A espessura é atingida através das distintas camadas de reboco – crespido, camada de base e camada de acabamento. Por outro lado, a capacidade de impermeabilização de um reboco externo não pode impedir a capacidade de secagem do suporte e a capacidade do vapor de água sair.

- 
- *Baixa absorção capilar*, quer em termos de velocidade de absorção (coeficiente de capilaridade), quer quanto à quantidade total de água absorvida. A capilaridade é a capacidade de um material saturar por forças de sucção e é tanto maior quanto mais finos forem os capilares dos materiais.
  - *Boa permeabilidade ao vapor de água*, de forma a favorecer a evaporação de água que eventualmente possa ter penetrado através de áreas fendilhadas e/ou da água absorvida pelo reboco e/ou das condensações. A permeabilidade ao vapor de água das argamassas não deve ser inferior à do suporte, aumentando de dentro para fora nas várias camadas que constituam o revestimento. As argamassas usadas em rebocos tradicionais têm, habitualmente, boa permeabilidade ao vapor de água.
  - *Boa deformabilidade* de modo a absorver os movimentos de tensão a que são submetidas, sem fendilhar. A resistência à fendilhação será maior quanto menor for a retração e quanto menor for a relação entre módulo de elasticidade/resistência à tração. Outros fatores influenciam a resistência à fendilhação, como uma boa aderência ao suporte, as condições de aplicação e um poder de retenção de água elevado.
  - *Devem ter resistências mecânicas decrescentes* desde o suporte até a camada de acabamento - regra do teor de ligante decrescente no sentido suporte-exterior, para que o revestimento seja mais poroso e mais deformável do interior para o exterior.
  - *Estabilidade dimensional* é um fator muito importante, tanto a curto prazo, quando as eventuais retrações podem induzir a fendilhação, ou a longo prazo, quando as variações dimensionais podem criar esforços dentro da alvenaria ou no reboco ou a perda de aderência entre eles.
  - *Boa resistência a ciclos de gelo/degelo* – requerida resistência mecânica elevada.
  - *Resistência aos choques* - A resistência ao choque para revestimentos de ligantes minerais está normalmente assegurada, especialmente para as alvenarias tradicionais e pode ser determinado experimentalmente através de ensaios de dureza superficial.
  - *Harmonização Estética*: um aspeto estético satisfatório dos revestimentos internos e externos é premissa desejável para a aparência global dos edifícios e de suas com-

-partimentações. O revestimento deverá conferir acabamento uniforme na textura e na cor e, o tanto quanto possível, satisfazer as exigências funcionais para evitar as fendilhações, eflorescências e outras manifestações patológicas que comprometam a harmonia do edificado.

- *Durabilidade*: A durabilidade dos rebocos é assegurada quando são garantidas as exigências funcionais. Segundo Guimarães et al (2004) as argamassas de cal duram de 50 a 500 anos.

Deseja-se, então, encontrar um ponto de equilíbrio para que as argamassas tenham uma permeabilidade à água e um coeficiente de capilaridade reduzidos e uma permeabilidade ao vapor de água elevada. Uma vez ser comum a pintura dos rebocos, ressalta-se a importância da permeabilidade ao vapor de água das tintas ser também elevada.

As características em referência à resistência aos sulfatos, aluminatos e ciclos gelo/degelo também são difíceis de combinar. A boa resistência aos sulfatos implica que os constituintes das argamassas possuam baixo teor de silicatos e aluminatos, o que conduz a baixas resistências mecânicas. Para um bom comportamento aos cloretos e ciclo gelo-desgelo é necessária uma alta resistência mecânica. Para resolver este impasse, uma porometria adequada, que permita o aumento de volume resultantes da cristalização e expansão, poderá ser suficiente.

Rodrigues (2004), citou em seus estudos os trabalhos de Veiga e Carvalho que elaboraram os quadros 2.1 e 2.2, que definem, respetivamente, de forma genérica, as características recomendadas para as argamassas antigas em função dos elementos pré-existentes com que vão interagir e, os requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos.

*Quadro 2.1 – Características recomendadas para argamassas antigas em função dos elementos pré-existentes (Veiga, 1998)*

Aplicabilidade	Características mecânicas aos 90 dias			$R_a$ Aderência ao suporte	$F_{r_{max}}$ Forças desenvolvidas por retração restringida	Comportamento à água			Comportamento térmico
	$R_t$ Resistência Tração	$R_c$ Resistência Compressão	E Módulo elasticidade dinâmico			Permeabilidade de ao vapor de água	Coeficiente de capilaridade	Porosidade e porometria	
	(Mpa)					(N)	(ng / m.s.Pa)		
Reboco exterior	Características semelhante às argamassas originais e inferiores às do suporte			$R_a < R_t$ do suporte (rotura na coesiva pelo suporte)	$F_{r_{max}} < R_t$ do suporte	Capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhantes às argamassas originais e superiores ao do suporte	Semelhante às argamassas originais e com maior percentagem de poros grandes que o suporte	Coeficiente de dilatação e condutibilidade térmicas semelhantes às argamassas originais e às do suporte	
Reboco interior									
Refechamento de juntas									

*Quadro 2.2 - Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos (Veiga, 1998)*

Aplicabilidade	Características mecânicas aos 90 dias			Aderência ao suporte aos 90 dias $R_a$
	Resistência tração $R_t$	Resistência compressão - $R_c$	Módulo elasticidade dinâmico - E	
	(Mpa)			
Reboco exterior	0,20	0,40	2000	0,1 - 0,3 ou rutura coesiva pelo reboco
	0,70	2,50	5000	
Reboco interior	0,20	0,40	2000	0,1 - 0,3 ou rutura coesiva pelo reboco
	0,70	2,50	5000	
Refechamento de juntas	0,40	0,60	3000	0,1 - 0,5 ou rutura coesiva pela argamassa
	0,80	3,00	6000	

Cada vez mais exige-se edificações saudáveis e confortáveis, por isso assegurar a durabilidade dos revestimentos externos não só é importante por razões de saúde, mas também por razões econômicas, uma vez que a sua fragilidade exige gastos com reparações; e também por razões ecológicas, já que a tomada de consciência da limitação de recursos de que dispomos impõe, também ela, a conservação do patrimônio (Veiga, 1998).

#### 2.4. Estrutura porosa das argamassas

O estudo da influência da estrutura porosa no comportamento das argamassas é imperativo para a compreensão das propriedades e comportamento das argamassas e para tanto, deve-se entender o conceito, a forma como pode ser analisada, representada e quantificada.

A nível laboratorial, a estrutura porosa das argamassas está diretamente relacionada com os seus componentes, o traço, a quantidade de água, o processo de amassadura e ao tipo de cura. A nível de argamassas aplicadas, o suporte, o processo de aplicação e o tipo de cura é que assumem relevância. Em conjunto, determinam a estrutura interna dos materiais e com propriedades distintas.

Citado por Rato (2006, p.7), Dullien define material poroso como aquele que cumpre pelo menos uma das seguintes características:

*“ – contém espaços intersticiais não preenchidos por matéria sólida (poros), distribuídos na matriz sólida ou semi-sólida; estes espaços são geralmente ocupados por um fluido como ar, água ou vapor de água);*

*- é permeável ao fluxo de diversos fluidos, assumindo neste caso a designação de material poroso permeável".*

A estrutura porosa de uma argamassa pode ser caracterizada segundo aspetos químicos, mineralógicos ou morfológicos e interessa-nos passar em revista, os morfológicos.

Em referência às propriedades relacionadas com a estrutura porosa das argamassas, existem as macroscópicas e as microscópicas. As primeiras dizem respeito às características globais do material, definindo o seu comportamento integrado. As segundas dizem respeito às dimensões e a forma dos poros, como se distribuem e suas interconectividades com as faces.

Conceitualmente, porosidade é a fração do volume aparente que corresponde aos poros. Em argamassas correntes o seu valor varia de 18% a 45% (Velosa, 2006). Existem dois tipos de porosidade, a porosidade aberta, constituída por poros que comunicam entre si, formando uma rede contínua de vazios e contribui para o transporte de fluidos através do material. Dentro desta rede, podem existir os poros cegos, que apenas contactam com a rede porosa através de uma de suas extremidades. Os poros cegos pouco contribuem para o fluxo dentro do material. O outro tipo de porosidade é a porosidade fechada, constituída por poros que estão isolados daquela rede contínua, não contribuindo para o transporte de fluidos.

De acordo com a localização no interior do material, a porosidade também é classificada por porosidade de interface, constituída por poros que se encontram entre a matriz da pasta de ligante e as partículas de areia, e porosidade de matriz que é a formada pelos poros que se encontram no interior da pasta. Geralmente é aceite que as zonas de interface são mais porosas que as zonas de matriz.

A rede porosa, no que se relaciona com a porosidade aberta, é um meio contínuo no qual os poros de maiores dimensões contactam entre si através dos poros mais pequenos. Quanto à dimensão dos poros existem várias classificações, De Quervain (1967), DIN 66131(1973), Klopder (1985), sendo a de Pipilikaki e BeaziKatsioti (2009), a que será reportada:

**(a) Poros  $\emptyset > 10 \mu\text{m}$  :** são geralmente vazios de ar sem influência relevante na capilaridade da água e frequentemente fechados, portanto, não influenciam o transporte de água em geral, mas podem ser vazios interpartículas, influenciando o transporte de vapor.

**(b) Poros capilares:  $0,0025 < \emptyset < 10 \mu\text{m}$ :**



- ❖ **0,0025<math>\varnothing</math><math><0,010\ \mu\text{m}</math>**: São considerados poros capilares pequenos, ou poros de gel, afetando principalmente o encolhimento e característica de matrizes de cimento hidratado.
- ❖ **0,010<math>\varnothing</math><math><0,050\ \mu\text{m}</math>**: São considerados poros médios capilares e têm efeito na permeabilidade ao vapor
- ❖ **0,050<math>\varnothing</math><math><10\ \mu\text{m}</math>**: são considerados poros grandes capilares e têm alto efeito na capilaridade.

## 2.5. A Cal

A cal é um aglomerante de natureza mineral cujo constituinte principal é o óxido de cálcio (CaO) e/ou óxido de cálcio em presença natural com o óxido de magnésio (MgO), e/ou outros hidróxidos (Ca(OH)<sub>2</sub> e Mg (OH)<sub>2</sub>), sendo obtido por cozedura da rocha calcária.

Na construção civil, a cal é empregada na produção de argamassas, pinturas, nas misturas asfálticas, na estabilização de solos, entre outros. Para o nosso estudo, interessa-nos passar em revista, a utilização da cal como ligante uma vez que a cal foi a matéria prima mais utilizada durante séculos, com esta finalidade, tanto para as argamassas de assentamento, quanto para os rebocos e por serem o constituinte das argamassas que mais influenciam as propriedades e desempenho, destas.

Os ligantes são classificados como ligantes hidráulicos, aéreos e orgânicos:

- Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos que, amassados com água, formam uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reação química entre o pó e a água. Além de endurecerem ao ar, podem atingir as suas características mesmas imersas.
- Os ligantes aéreos pelo contrário, não podem endurecer dentro de água, pois dependem do dióxido de carbono da atmosfera para os transformar em carbonatos.
- De entre os ligantes de natureza orgânica podem referir-se os casos dos hidrocarbonetos e das resinas sintéticas, atualmente numa fase de franco desenvolvimento, Rodrigues (2004).

A Figura 2.1, esquematiza a classificação dos ligantes, sendo que, nesta dissertação, será dado foco às cals aéreas e cals hidráulicas:

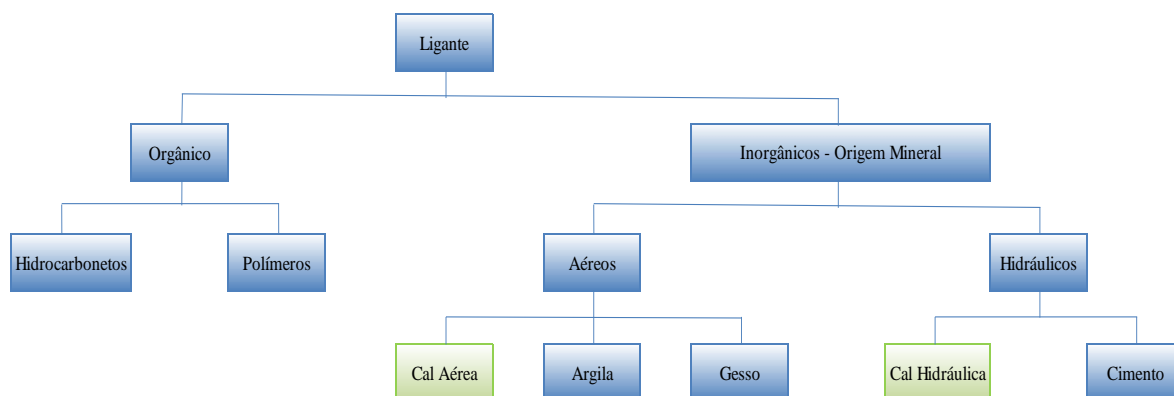


Figura 2.1 - Classificação dos ligantes

### 2.5.1. Os tipos de cal da construção

Segundo a Norma NP EN 459-1:2015, existem diferentes tipos de cal de construção utilizados no fabrico das argamassas, estando representados na figura 2.2, a seguir:

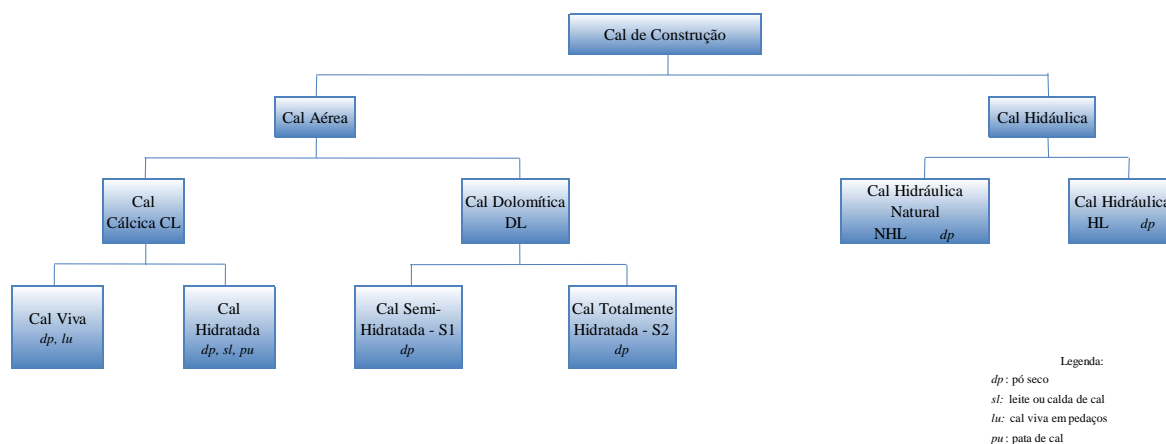


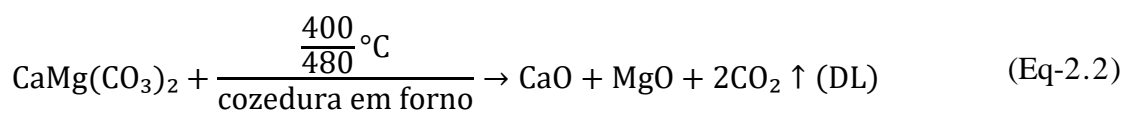
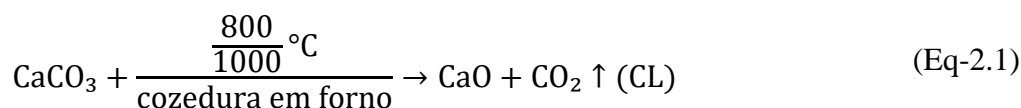
Figura 2.2 - Tipos de cal de construção

Nota: Para as cals aéreas, o número que segue às siglas CL e DL, indica a percentagem mínima de óxido de cálcio e óxido de magnésio que a cal contém. Para as cals hidráulicas, as siglas HL e NHL é seguida dos números 2; 3,5 ou 5, conforme a classe de resistência.

### 2.5.1.1. Cal aérea

A cal aérea é obtida a partir da cozedura de calcários com elevado grau de pureza – rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio (rocha cálcica  $\text{CaCO}_3$ ), ou carbonato de cálcio e magnésio (rocha dolomítica ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), que amassados com água, endurecem lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa dentro da água, visto não ter propriedades hidráulicas.

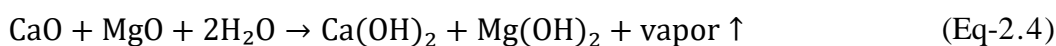
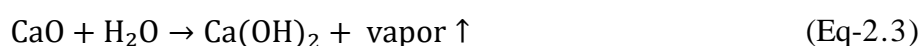
No processo de calcinação, o carbonato de cálcio da rocha decompõe-se em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que é liberado para o ar, e em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), também designado por a Cal Viva. O processo de calcinação para a rocha cálcica e para a rocha dolomítica, estão representados nas equações Eq-2.1 e Eq-2.2, respectivamente:



De acordo com as condições de fornecimento, as cais aéreas são subdivididas em Cal Viva (*Q - quicklime*) ou Cal Hidratada (*S - slaked lime*). No caso específico para as cais dolomíticas hidratadas, o grau de hidratação é identificado por S1, para as semi-hidratadas e S2, para as totalmente hidratadas.

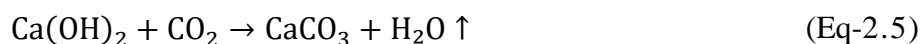
Quanto ao teor de impurezas, as cais aéreas se subdividem-se em gordas (de cor branca) e magras (de cor acinzentada). As cais aéreas gordas são provenientes de calcários quase puros, com teores de carbonatos não inferiores a 96%; as cais aéreas magras derivam de calcários com teores de argila e de outras impurezas entre 1% e 5%.

A cal viva é um produto muito instável, pelo que necessita de ser hidratada. A hidratação da cal viva é também designada por extinção da cal viva e desenvolve-se por imersão (cal apagada em pasta) ou por aspersão com água (cal apagada em pó). As equações Eq-2.3 e Eq-2.4, representam os processos de extinção da cal viva por imersão e por aspersão, respectivamente:



Outra possibilidade de extinção da cal viva é obtida da mistura com areia molhada, durante um mínimo de 12 horas.

A carbonatação é o processo onde a cal hidratada, por recarbonatação com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera, endurece, reconstituindo a composição química da pedra que o originou, transformando-se de novo em carbonato de cálcio, conforme representado na equação Eq-2.5:



A velocidade de carbonatação das argamassas de cal é influenciada pelo teor em água e em cal hidratada da argamassa, permeabilidade ao vapor, temperatura, humidade relativa do ar, concentração em CO<sub>2</sub> e pela espessura da argamassa.

#### **2.5.1.2. A cal hidráulica**

Segundo a NP EN 459-1:2015, as cals hidráulicas (HL), artificiais e naturais, são cals constituídas principalmente por silicatos, aluminatos e hidróxido de cálcio, produzidos pela queima de rocha calcária argilosa que, hidratando-se (por extinção com água necessária para a hidratação da cal viva), dão origem a produtos que fazem presa e endurecem debaixo de água, embora o dióxido de carbono da atmosfera, também contribua para o endurecimento (contêm pelo menos 3% de massa de cal livre). Segundo Vicat, a hidráulica da cal, depende da maior ou menor proporção de argila no calcário, e que, além de 20%, o produto resultante obtido por cozedura, já não se extingue por adição de água.

Verifica-se três fases distintas durante a preparação da cal hidráulica:

1ª fase – entre 400° e 700°C: ocorre a desidratação da argila.

2ª fase – entre 850° e 900°C: verifica-se a calcinação do calcário.

3ª fase – entre 1000° e 1500°C: dá-se a reação da sílica e da alumina da argila com o óxido de cálcio, originando silicatos (SiO<sub>2</sub>.2CaO) e aluminatos de cálcio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaO).

No processo final, é encontrado além dos aluminatos e silicatos, uma percentagem de 3% a 10% de cal viva, e a qual deve ser extinta, uma vez que é necessário hidratar o óxido de cálcio que não reagiu. A extinção da cal hidráulica é uma operação delicada e uma extinção imperfeita pode provocar danos no revestimento por expansão do óxido de cálcio (CaO) que se transforma em hidróxido de cálcio (Ca(OH<sub>2</sub>)).

### **2.5.2. A influência dos ligantes na estrutura porosa das argamassas**

Tendo-se em consideração as diferenças existentes no processo de endurecimento de pastas de ligantes aéreos e hidráulicos, é necessário entender como estas diferenças influenciam a estrutura porosa das argamassas.

Também, as argamassas de cal aérea necessitam de mais água de amassadura. Este fato, justifica a maior retração de secagem que se verifica nas argamassas de cal aérea comparada às argamassas de cal hidráulica. Se, além de exigir maior quantidade de água e soma-se que toda esta água será evaporada dando lugar a volume poroso, é de se esperar que as argamassas de cal sejam mais porosas.

Os trabalhos de Rodrigues (2004), retrataram o exposto quando comparou diversos tipos de argamassa, utilizando mesma areia, idêntico traço em volume (1:3) e igual processo de cura. As argamassas de cal aérea hidratada apresentaram valores para a porosidade aberta que variaram de 34% a 39%, enquanto as argamassas de cal hidráulica obtiveram 28%, e argamassas bastardas, obtiveram valores intermediários variando de 31% a 33%.

Em referência á porometria, os estudos de Rato (2006) cita os estudos de Peroni et al (1982), Mosquera et al (2004), Lanas e Alvarez (2003), Magalhaes et al (2004), Diamond (2004) e outros. Em síntese, as argamassas de cal aérea têm poros de maiores dimensões e distribuição da dimensão dos poros bimodal, enquanto as argamassas hidráulicas, apresentam maiores quantidades de poros pequenos e distribuição unimodal. Todas as argamassas apresentam poros de forma aproximadamente circular, embora de dimensões variáveis, e poros do tipo fissura não detetáveis para as argamassas com maior teor de cimento e nas de cal hidráulica. Porém, para as argamassas com baixos teores de cimento e nas de cal aérea ou com predominância de cal aérea, há poros fissura de grandes dimensões, que podem justificar a característica bimodal da distribuição porométrica reportada pelos autores.

### **2.6. Os agregados**

Agregados são materiais granulares usados na construção, sem forma nem volume definidos, com dimensões características e propriedades adequadas para a preparação de argamassas e betões. Podem ser naturais, artificiais ou reciclados.

Os agregados naturais são de origem mineral, encontrando-se disponível na natureza, como é o caso das areias, seixos e pedras britadas. Alguns passam por processos de beneficiação como é

o caso das britas, cuja rocha é extraída de uma jazida e precisa passar por diversos processos de beneficiamento para chegar aos tamanhos adequados aos diversos usos.

Os agregados artificiais são de origem mineral resultante de um processo industrial envolvendo modificações térmicas ou outras. É o caso da escória de alto-forno, que é um resíduo resultante da fabricação de ferro gusa. As cinzas volantes, obtidas por combustão do carvão nas centrais térmicas; subprodutos da indústria corticeira e ainda outros produtos como poliestireno expandido, porém, seus usos se restringem a aplicações onde o critério resistência é menos significativo.

Os agregados reciclados são resultantes do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção, como é o caso, por exemplo, de agregados obtidos da trituração de escombros de betão endurecido.

Os agregados desempenham um importante papel nas argamassas, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista técnico, exercendo influência sobre algumas características importantes como a retração e o aumento da resistência aos esforços mecânicos.

### **2.6.1. As areias**

É reconhecida, através dos estudos realizados nos últimos anos, a importância da seleção do tipo de agregado a ser usado nas argamassas, uma vez que eles constituem cerca de 75 a 85% do volume das argamassas, assumindo um importante papel no comportamento físico, químico e mecânico das mesmas, além de influenciarem o aspecto final dos rebocos.

A forma e a distribuição granulométrica das areias têm influência, essencialmente, na microestrutura das argamassas, no que se retrata nas características mecânicas e hídricas, à medida que a natureza mineralógica tem ação diretamente sobre as suas propriedades mecânicas e na durabilidade das argamassas.

As areias são grãos resultantes da desagregação ou decomposição das rochas, gerando um conjunto de partículas cuja dimensão está compreendida, maioritariamente, entre 0,063 e 4 mm. São compostas de minerais granulares, dentre os quais predomina o quartzo.

Do ponto de vista químico pode-se dividir as areias em quatro grupos: areias ferruginosas (apresentam óxidos de ferro), areias basálticas (têm cor negra e são de origem vulcânica), areias calcárias (apresentam calcário) e areias silicosas (subdividem-se em quartzosas e graníticas), sendo esta última utilizada no fabrico das argamassas antigas.

---

A cor da areia pode ser utilizada como um critério de avaliação de impurezas que apresentam. Areias misturadas com saibro ou argila têm coloração amarelada ou avermelhada. Cor castanha pode indicar a presença de feldspatos, alterados ou não, embora muitas vezes seja devida à presença de quartzo escuro. Areias com micas (muscovita, biotita, ilmenita ou pirita) têm brilho. Cores cinzentas podem indicar a presença de lamas ou lodos, Chaves (2009).

As areias que apresentam algum percentual (maior ou menor) de argila, e extraídas de areeiro, são conhecidas por *amarelas*. Estas argilas conferem maior trabalhabilidade e resistência mecânica às argamassas devido aos finos que possuem, porém, a utilização com percentagem elevada de argila, podem reduzir a ligação da areia à cal e implicar na necessidade de uma maior adição de água na argamassa, tendo como consequência, a retração e o comprometimento da durabilidade. As areias de areeiro apresentam grãos mais angulosos sendo, portanto mais ásperas, e geralmente contém mais impurezas. As areias de rio geralmente conferem menor resistência às argamassas devido ao grão serem rolados, mas é naturalmente mais “lavada”.

A qualidade final das argamassas está diretamente relacionada com o tipo de areia e a proporção que é usada. Em resumo, os agregados a integrar nas argamassas devem ter forma e granulometria adequadas às utilizações, não sofrerem alterações ao ar à presença de água e de outros agentes externos, serem compatíveis quimicamente com o ligante e outros constituintes da argamassa, serem isentos de impurezas, tais como material orgânico (folhas, raízes, caules), partículas friáveis ou demasiadas finas, placas de micas, grãos de minerais em estágio de alteração, como feldspato evoluindo para caulim, entre outras e por fim, terem resistência mecânica e à erosão adequadas às aplicações previstas.

#### **2.6.1.1. Influência da areia na estrutura porosa das argamassas**

Referenciado anteriormente, a forma e a dimensão das partículas dos grão das areias, influenciam diretamente na estrutura porosa das argamassas.

As formas das partículas da areia influenciam a aderência da pasta de ligante ao agregado, a trabalhabilidade do material fresco, e a compacidade do material endurecido, sendo determinante para o valor da superfície específica da areia, conseqüentemente para a quantidade de água da amassadura.

Genericamente, pode-se afirmar que as ligações entre a pasta de ligante e as partículas de areia e a quantidade de água de amassadura dependem da esfericidade do volume, angularidade da superfície e da textura das partículas dos agregados.

No que diz respeito à dimensão das partículas, a superfície de cada partícula é menor em areias mais finas do que areias mais grossas. Então, pode-se afirmar, genericamente, que argamassas com areias mais finas, têm mais poros de interface. Esta ideia pode ser observada no fabrico de argamassas: quanto mais fina a areia, maior a quantidade de água de amassadura, o que se deve à superfície específica acrescida. Em suma, em argamassas com areias mais finas, exige-se uma maior quantidade de água para o endurecimento da pasta, em consequência, existem mais poros.

Em referência ao parágrafo anterior, ainda se conclui que, considerando que os poros de interface são resultante essencialmente da evaporação de água concentrada junto às partículas de areia, é coerente dizer que estes poros terão maiores dimensões nas argamassas com areias mais grossas - na media corresponderão maiores volumes individuais de água concentrada - porém em menor quantidade.

## **2.7. Alvenarias tradicionais**

Em muitos continentes, observa-se a existência de estruturas de alvenaria antigas em centros históricos, urbanos e em aldeias, e estão representadas por diferentes tipos de construções, desde edificações mais suntuosas como castelos, palacetes e igrejas ou nas de característica mais ordinárias como os fortes e muralhas. O valor patrimonial, cultural e arquitetónico, que apresentam faz com que a sua conservação e reabilitação seja, hoje em dia, de grande interesse não somente para a comunidade técnica que os tutela, mas também para os cidadãos e a sua perceção sobre o edifício antigo.

Recentemente, tem-se assistido à preservação das paredes exteriores dos edifícios antigos, em profundas intervenções que podem considerar-se no limiar mínimo da conservação do património arquitetónico não-monumental, frequentemente, mais motivadas por rentáveis programas de utilização subjacentes à pressão das especulações imobiliárias, do que pelo estado de degradação exibido. Junta-se a este fato político-económico, as peculiares dificuldades de reparação dos edifícios antigos, em parte inerentes ao pequeno domínio que se possui das técnicas e dos materiais envolvidos, Roque (2002).

### **2.7.1. Alvenarias de pedra**

Segundo Roque (2002), *“as estruturas de alvenaria são resultantes da aprendizagem empírica, por métodos iterativos de tentativa-erro, numa associação de elementos resistentes em que a transmissão de cargas se fazia por “trajetórias” de tensões de compressão”*. Assim, as unidades de alvenaria eram justapostas e sobrepostas de forma mais ou menos imbricada



(amontoada), quer longitudinalmente, quer transversalmente, de forma que da associação resultasse uma interação de equilíbrio, entre os diferentes elementos, assegurada através de tensões de compressão e de atrito, sob a ação da gravidade.

Em paredes e muros, as juntas verticais entre elementos resistentes eram desencontradas, num “imbrincado” que dificultasse a progressão das fendas, o que vulgarmente se designa por “matar as juntas”. Como resultado tem-se um material compósito heterogéneo, intrinsecamente descontínuo, com boa resistência à compressão, fraca resistência à tração e, sob a ação exclusiva da gravidade, com um baixo risco de deslizamento. As alvenarias de pedra sem ligante nas juntas, também designadas de alvenarias de “junta seca”, são menos frequentes em estruturas - homogeneidade, isotropia (possuir as mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada), e propriedades mecânicas uniformes, hipóteses vulgarmente assumidas na análise de estruturas correntes, não podem aqui aplicar-se com rigor.

É fato que estas primeiras construções de pedra deram provas da sua eficácia e mantiveram a sua forma durante séculos, apesar do tipo de sistema de construtivo, baseado na justaposição de elementos e com fraca ligação entre si. Sob este sistema construtivo se pode referir a facilidade nos processos de manutenção e substituição dos elementos degradados uma vez que o seu desmonte é facilitado.

Com o desenvolvimento das argamassas, tanto de assentamento como para reboco, foi-se desaparecendo o uso das pedras aparelhadas, seguras pelo seu peso, dando lugar à utilização de fragmentos irregulares da pedra com uma ligação sólida obtida pela argamassa. Com este novo processo construíram-se melhores alvenarias, com menores vazios e maior ligação entre os elementos. Para além de o reboco ter incorporado qualidade estética escondendo as irregularidades, conferiu também, maior conforto térmico.

### **2.7.2. Alvenarias de tijolos maciços**

O tijolo cerâmico é um produto de cor avermelhada, elaborado a partir de uma pasta de material argiloso, mais ou menos homogénea, que depois de enformados em fôrmas de ferro ou madeira, geralmente em forma de paralelepípedos, eram cozidos por exposição ao sol – tijolos de adobe – ou em fornos de alta temperatura. Tem características mais regulares que as pedras. Como consequência, o uso do tijolo cerâmico na construção de alvenarias, traduz-se, também, numa maior regularidade e homogeneidade do produto final.

Nas primeiras alvenarias antigas, o uso de argamassa, ou material ligante, geralmente era de natureza muito pobre (terra, argila ou argamassas pobres), desempenhava mais a função de

preencher os espaços livres entre as unidades de alvenaria, criando boas condições para o seu assentamento, do que propriamente para constituir “ligações químicas” com as unidades utilizadas.

Segundo Pinho (1997) e Roque, (2002, p.15), em igualdade de circunstâncias, as paredes de tijolo podiam ser menos espessas que as de pedra porque a horizontalidade do assentamento e a maior regularidade de sobreposição lhes conferia maiores resistências. No entanto, as paredes de alvenaria de tijolo antigas eram, geralmente, de grande espessura (mais de 60 cm) e com uma distribuição dos tijolos muito menos homogênea da que apresentam hoje. Por vezes apenas o(s) paramento(s) exterior(es) eram construídos com uma disposição regular dos tijolos, enquanto o interior, por razões económicas, era preenchido com restos de tijolos e pedras com juntas de argamassa espessas.

As características essenciais dos tijolos são:

- Regularidade na forma e dimensões;
- Arestas vivas e resistentes;
- Som “aberto” quando percutido;
- Homogeneidade da massa e cor uniforme;
- Ausência de fendas e cavidades;
- Facilidade no corte;
- Resistência suficiente para esforços de compressão;
- Pouca porosidade (baixa absorção).

Artesanais ou industriais, os tijolos cerâmicos são um dos mais tradicionais materiais usados na construção civil.

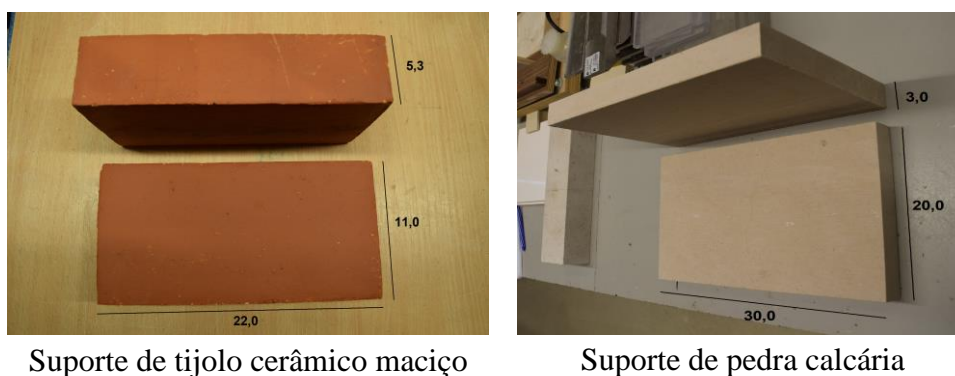
Atualmente, por motivos ecológicos, está-se a retomar a utilização de adobe e bloco de terra comprimida, por não precisarem de cozedura e poder serem feitos localmente.

### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introdução

Como referenciado nesta dissertação, o objetivo central é compreender como as características dos suportes influenciam o comportamento das argamassas e o objetivo complementar focou-se na escolha dos materiais que fazem parte das alvenarias e rebocos tradicionais e com maior predominância em casos reais.

Para tal, foram escolhidas argamassas de cal hidráulica com areia fina e argamassas de cal hidráulica com areia corrente, ambas com traço 1:3, em volume; argamassas de cal aérea com areia fina e argamassas de cal aérea com areia corrente, ambas com traço 1:2, em volume, todas formuladas em laboratório. Para suportes foram escolhidos tijolos cerâmicos maciços (22x11x5,3) cm e blocos de pedra calcária (30x20x3) cm, ilustrados na figura 3.1:



*Figura 3.1 - Suporte de tijolo cerâmico maciço e pedra calcária*

A 1ª fase foi destinada à caracterização dos materiais, onde, para os suportes, determinou-se a massa volúmica aparente, porosidade aberta, porosimetria, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água. Para a areia fina e corrente, fez-se a análise granulométrica e determinou-se a baridade. Para a cal hidráulica e cal aérea aérea foi determinada a baridade.

A caracterização das argamassas iniciou-se com a formulação de seus traços em laboratório e com a caracterização destas, em seu estado fresco, através dos ensaios de espalhamento.

A 2ª fase foi destinada á caracterização das argamassas após cura corrente e cura com envelhecimento acelerado. Todas realizadas após 90 dias, por limitações de acesso ao laboratório, devido à pandemia por COVID 19.

O processo de preparação dos provetes para a realização dos ensaios de caracterização é descrito a seguir, diferenciando entre si, apenas o processo de cura:

1) Provetes laboratoriais – Cura corrente:

Os provetes em moldes metálicos laboratoriais foram confeccionados com as diversas argamassas e de acordo com a Norma NP EN 1015-11:2019 - provetes prismáticos com dimensões  $\pm 4,0 \times 4,0 \times 16,0^*$  cm, e cilíndricos com  $\pm 10$  cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura, ilustrados na figura 3.2:



Provete 4,0x4,0x16,0 cm



Provete cilíndrico 10x1,5 cm

*Figura 3.2 - Provetes em moldes laboratoriais*

*\*Após a realização dos ensaios mecânicos, foram cortados provetes com dimensões de  $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm para a realização do ensaios de caracterização (massa volúmica, porosidade aberta, absorção de água, índice de secagem e resistência à compressão).*

2) Provetes de argamassas aplicadas nos suportes e destacadas – Cura corrente e cura com envelhecimento acelerado:

Antes da aplicação das argamassas, os suportes foram previamente humedecidos. As diversas argamassas foram aplicadas sobre os suportes formando uma camada uniforme de 1,5 cm, obtida com o auxílio de moldes de madeira. Aplicou-se uma rede na interface argamassa-suporte para facilitar o destacamento. Após os processos de cura, procedeu-se ao destacamento das argamassas dos suportes para os ensaios. A figura 3.3 ilustra os provetes das argamassas aplicadas nos suportes e após destacados.



Figura 3.3 - Provetes de argamassas destacados dos suportes após cura

Na 2ª fase da 1ª etapa, o processo de cura aplicado às argamassas antes de serem destacadas e/ou ensaiadas, foi o de cura corrente: 20°C e 95% HR durante 7 dias e depois por mais 83 dias a 20°C e 65%HR.

A 2ª etapa correspondeu à caracterização das argamassas após o processo de envelhecimento acelerado, de acordo com a Norma EN 1015-21:2002: cura inicial corrente mencionada anteriormente seguida de duas séries de condicionamento de quatro ciclos, conforme detalhado abaixo:

1ª série – quatro ciclos

- Colocar a 60±2°C durante 8 h±15min.
- Colocar a 20±2°C / 65±5% HR durante 30min±2min.
- Colocar a -15±1°C durante 15min±15min.
- Colocar a 20±2°C / 65±5% HR durante 30min±2min.

2ª série – quatro ciclos

- Emergir parcialmente (5mm) os provetes com a face rebocada na água a 20±1°C durante 8 h±15min.
- Colocar a 20±2°C / 65±5% HR durante 30min±2min.
- Colocar a -15±1°C durante 15min±15min.
- Colocar a 20±2°C / 65±5% HR durante 30min±2min.

A caracterização das argamassas em moldes laboratoriais foi conseguida pela determinação da massa volúmica aparente, porosidade aberta, porosimetria, permeabilidade ao vapor de água,

absorção de água por capilaridade, índice de secagem, resistência à compressão e resistência à tração por flexão.

A caracterização das argamassas destacadas dos suportes foi expressa através da determinação da massa volúmica aparente, porosidade aberta, porosimetria, permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, índice de secagem e resistência à compressão.

### **3.1.1. Caracterização das matérias-primas**

#### **3.1.1.1. Análise granulométrica**

A análise granulométrica da areia foi realizada de acordo com a Norma NP EN 933-1:2000, pelo Método de peneiração, com lavagem seguida de peneiração a seco. Segundo a Norma, o ensaio consiste na separação, por meio de um conjunto de peneiros, do material em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente. A massa das partículas retida nos diversos peneiros é relacionada com a massa inicial do material e as percentagens cumulativas que passam em cada peneiro são apresentadas sob forma numérica e graficamente.

#### **3.1.1.2. Baridade**

Segundo a Norma NP EN 1097-3:2002, a baridade de um material é o quociente entre a massa do agregado seco preenchendo, sem compactação, um dado recipiente pela capacidade do recipiente.

A execução do ensaio de baridade foi realizada em um recipiente devidamente calibrado em conformidade com os requisitos da norma, com capacidade de 1,02164 litros e peso de 1,343 kg. A massa seca dos agregados, preenchendo o referido recipiente, é determinada e a baridade ( $\rho_b$ ) é obtida da média dos valores de três amostras.

### **3.1.2. Caracterização dos suportes e argamassas**

Na sequência dos ensaios de caracterização das matérias primas, foram realizados os ensaios de caracterização dos suportes e das argamassas no estado fresco.

Os ensaios seguiram as normas específicas, porém, quando necessário, foram realizadas adaptações das dimensões dos provetes aplicados sobre os suportes. Contudo, foram respeitadas as metodologias de ensaios e as determinações dos parâmetros referenciados nas normas.

### 3.1.2.1. Consistência por espalhamento

A Norma que especifica o método para determinar a consistência de argamassas recém-misturadas (referidas brevemente como argamassas frescas), é a EN 1015-3:1999.

A consistência é uma medida da fluidez e/ou humidade da argamassa fresca e dá uma medida da deformabilidade da argamassa fresca quando submetida a um determinado tipo de esforço.

### 3.1.2.2. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Segundo a Norma EN 1936:2008, a massa volúmica aparente é o quociente entre a massa do provete seco e o seu volume aparente. Já a porosidade aberta é o quociente (sob forma de percentual) entre o volume dos poros (abertos) e o volume aparente do provete.

Para a realização dos ensaios das argamassas, foram preparados provetes ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm) e ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 8,0$  cm) de cada tipo de argamassa. Os provetes foram secos em uma estufa ventilada à temperatura constante de  $60^\circ\text{C}$  até atingirem a massa constante e pesados ( $m_k$ ). Na sequência, estes provetes foram imersos em água (durante 24 horas, no mínimo) e realizada a pesagem do provete imerso ( $m_h$ ). Dando andamento ao ensaio, foi retirado o excesso de água dos provetes com um pano húmido e realizada a pesagem do provete saturado com água ( $m_s$ ).

O volume de poros abertos ( $V_0$ ), em milímetros, é dado pela equação Eq-3.1:

$$V_0 = \frac{m_s - m_k}{\rho_{rh}} \times 1000 \quad (\text{Eq-3.1})$$

O volume aparente ( $V_b$ ), em milímetros, é dado pela equação Eq-3.2:

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \times 1000 \quad (\text{Eq-3.2})$$

A massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ), em quilogramas por metro cúbico, é dada pela equação Eq-3.3:

$$\rho_b = \frac{m_k}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (\text{Eq-3.3})$$

A porosidade aberta ( $P_0$ ), sob a forma percentual, é dada pela equação Eq-3.4:

$$P_0 = \frac{m_s - m_k}{m_s - m_h} \times 100 \quad (\text{Eq-3.4})$$

onde,

- $m_k$  massa do provete seco, em g
- $m_h$  massa do provete imerso em água, em g
- $m_s$  massa do provete saturado, em g
- $\rho_{rh}$  massa volúmica real da água, em kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.2.3. Porosimetria

A Porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica que permite quantificar a percentagem e a distribuição de tamanhos de poros existentes numa dada amostra sólida, e os ensaios foram executados conforme a norma ISO 15901-1:2005, utilizando-se de um porosímetro de mercúrio da marca Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que possui duas câmaras internas, uma de alta pressões (até 33000 psi) e uma de baixa pressões (até 60 psi), permitindo a avaliação da distribuição de tamanho de poro numa gama compreendida entre os 500  $\mu\text{m}$  - 0,003  $\mu\text{m}$ .

Após a preparação das amostras, estas são colocadas em um porta-amostras limpo e seco e é feita a selagem deste. Em seguida o porta-amostras é introduzido no equipamento na unidade de baixa pressão. Faz-se a evacuação dos vapores e gases retidos na amostra e inicia-se a introdução do mercúrio a baixa pressão. É medida a pressão e o volume de mercúrio introduzido. Quando a pressão máxima é atingida esta deve diminuir até a pressão atmosférica e faz-se nova medição da massa do provete ( $m_{sh+s+Hg}$ ) e o porta-amostras é transferido para a unidade de alta pressão. Nesta unidade, inicia-se, então, a intrusão do mercúrio a alta pressão: a pressão no sistema aumenta até atingir a pressão final da fase de baixa pressão e é registrado o volume de mercúrio introduzido para esta pressão, de forma que, o volume subsequente a introduzir, seja calculado a partir do volume inicial. O *software* do equipamento registra os valores do comprimento decrescente da coluna de mercúrio em função da pressão e quando a pressão máxima é atingida, esta é diminuída lentamente até atingir a pressão atmosférica, sendo determinada a curva de extrusão do mercúrio.

### 3.1.2.4. Absorção de água por capilaridade

O coeficiente de absorção de água ( $A_w$ ) de um material é obtido pela massa de água absorvida por área de material em contacto com a água. Os ensaios foram realizados conforme estabelecido na Norma ISO 15148:2002 e a figura 3.4 ilustra a realização dos ensaios.



Foram preparados provetes prismáticos ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm) e ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 8,0$  cm) de cada tipo de argamassa e curados em uma câmara de cura. Após conclusão do período de cura dos provetes, estes tiveram as faces laterais seladas a fim de garantir um fluxo unidirecional da água.

Na sequência, os provetes foram colocados em uma tina com a base imersa em água a uma profundidade de 5 mm a 7 mm. Após aproximadamente 5 minutos da imersão, os provetes são removidos da água e pesados, tendo o cuidado de se retirar o excesso de água antes da pesagem. Foi repetido este procedimento aos 15 min, 30 min, 45 min, 1 h, 1h30 min, 2 h, 4 h e 8 h, após a imersão, incluindo pesagens de 24 em 24 horas a partir da primeira pesagem, até a massa se tornar constante. Houve sempre o cuidado de manter a tina tampada para minimizar a evaporação da água e o nível da água foi verificado periodicamente e mantido constante.

Com os dados obtidos calcula-se a diferença entre a massa em cada pesagem e a massa inicial por área, através da expressão Eq-3.5, e por fim, traça-se o gráfico desses resultados contra a raiz quadrada dos tempos de pesagem,  $\sqrt{t}$ .

$$\Delta m_t = (m_t - m_i)/A \quad (\text{Eq-3.5})$$

onde,

$m_i$  é a massa inicial, em Kg

$m_t$  é a massa do provete no instante  $t$ , em Kg

$A$  é a área do provete em contato com a água, em  $m^2$

O gráfico resultante será um de dois tipos: tipo “A” ou tipo “B”.

O gráfico é do tipo “A” quando for representado por uma reta. O cálculo do coeficiente de capilaridade é obtido da equação Eq-3.6:

$$A_w = (\Delta m'_{tt} - \Delta m'_{t0})/\sqrt{T_t} \quad (\text{Eq-3.6})$$

onde,

$A_w$  é o coeficiente de capilaridade, em  $kg/m^2 \cdot seg$

$\Delta m'_{tt}$  é a variação de massa, por área, no final do trecho reto, em  $kg/m^2$

$\Delta m'_{t0}$  é a variação de massa, por área, no início do trecho reto, em  $kg/m^2$

$T_t$  é o tempo decorrido do ensaio (geralmente 1 dia), em segundos

O gráfico é do tipo “B” quando for representado por uma curva. O cálculo do coeficiente de capilaridade é obtido da equação Eq-3.7:

$$A_{w,24} = (\Delta m'_{tt}) / (\sqrt{86400}) \quad (\text{Eq-3.7})$$

onde,

$A_{w,24}$  é o coeficiente de capilaridade, após 24 horas, em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{seg}$

$\Delta m'_{tt}$  é a variação de massa, por área, no final do troço reto, após 24 horas, em  $\text{kg/m}^2$



*Figura 3.4 - Ensaio de absorção de água por capilaridade*

### 3.1.2.5. Índice de secagem

Os ensaios de índice de secagem ( $I_s$ ) foram realizados conforme recomendação N° II.5 da RILEM: 1980 e Norma EN 16322:2013, e pretende-se avaliar a quantidade de água que se perde ao longo do tempo, por evaporação.

Os ensaios foram realizados logo após o ensaio de absorção de água por capilaridade, aproveitando-se do facto de os provetes se encontrarem saturados. Foram preparados provetes prismáticos ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm) e ( $\pm 4,0 \times 4,0 \times 8,0$  cm) de cada tipo de argamassa os quais foram envolvidos em película aderente, em todas as faces exceto uma e colocados numa câmara à temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5$  %. Efetuou-se a pesagem dos provetes de 10 em 10 minutos durante a primeira hora, de hora a hora nas 8 horas seguintes e depois diariamente até que se verifica a estabilização dos pesos. Com os dados registados, elaboraram-se as curvas de secagem, que expressam a evolução do teor de água dos provetes, em percentagem, ao longo do tempo, em horas, através da equação Eq-3.8:

$$W_i = (m_i - m_0) / m_0 \quad (\text{Eq-3.8})$$

sendo:

$W_i$  é o teor de humidade no instante “i”, em %

$m_i$  é a massa do provete no instante “i”, em g

$m_0$  é a massa do provete seco, em g

Com base nas curvas de secagem, determinar-se o índice de secagem ( $I_s$ ), o qual traduz a resistência à secagem do produto (Flores-Colen et al, 2016), através da equação Eq 3.9:

$$I_s = \sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \frac{W_{i-1} + W_i}{W_{\max} t_f}] \quad (\text{Eq-3.9})$$

onde,

$t_i$  é o tempo de ensaio “i”, em h

$W_i$  é o teor de humidade no instante “i”, em %

$t_f$  é o tempo final do ensaio, em h

### 3.1.2.6. Permeabilidade ao vapor de água

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material homogéneo define-se como sendo a quantidade de vapor de água que o permeia, por unidade de tempo e área, quando este está sujeito a uma diferença de pressão de vapor entre as suas faces. Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água ( $W$ ) foram realizados segundo as Normas EN 1015-19:2008 e ISO 12575-2016 e a figura 3.5 ilustra a realização dos ensaios.

Foram utilizadas tinas redondas de vidro – material estanque à difusão de vapor, de diâmetro de 10 cm, e adicionada a água, deixando uma altura de ar entre a água e o provete de  $15 \pm 5$  mm. Os provetes em forma de discos ( $\varnothing \pm 100 \times 15$  mm) tiveram suas faces laterais vedadas com um material impermeável e usados para tampar as tinas. Após esta montagem, foi feita a selagem da junta formada entre o disco e a tina com uma fita vedante e parafina, de modo a evitar a difusão de vapor por esta superfície. Dando seguimento ao ensaio, estes conjuntos foram colocados numa câmara climática a  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5$  % sendo feita a pesagem inicial e periódica dos conjuntos até a variação de massa por unidade de tempo, ser constante. A partir dos registos das pesagens, fez-se a representação gráfica da variação do peso em função do tempo determinando-se a inclinação da reta pela união dos pontos onde se verificou que a transmissão de vapor se manteve constante, e que é igual ao fluxo de difusão de vapor de água ( $G$ ), obtido pela equação Eq-3.10:

$$G = (m_2 - m_1)/(t_2 - t_1) \quad (\text{Eq-3.10})$$

onde,

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

$m_2 - m_1$  é a variação da massa depois de estabelecida a corrente estacionária de difusão, em kg

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

Conhecendo este valor obtém-se a densidade de fluxo de difusão de vapor de água ( $g$ ) através da expressão Eq-3.11:

$$g = G/A \quad (\text{Eq-3.11})$$

onde,

$g$  é a densidade de fluxo de difusão de vapor, em kg/s.m<sup>2</sup>

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

$A$  é a área de exposição do provete (área de abertura da tina de vidro), em m<sup>2</sup>

O cálculo da permeância média ao vapor de água a partir dos valores obtidos para os cinco provetes individuais de cada tipo de argamassa é dada pela expressão Eq-3.12:

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{A\Delta_p}{G} - R_a} \quad (\text{Eq-3.12})$$

onde,

$\Lambda$  é a permeância ao vapor de água, em kg/m<sup>2</sup>.s.Pa

$A$  é a área de exposição do provete (área de abertura da tina de vidro), em m<sup>2</sup>

$\Delta_p$  é diferença na pressão do vapor de água entre o ar ambiente e a solução de água, em Pa

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

$R_a$  é a resistência do vapor d'água da folga de ar entre o provete e a solução d'água, Pa.m<sup>2</sup>.s/kg

A pressão de vapor de água  $\Delta_p$  entre os dois lados do corpo de provas é composto pela diferença de pressão de cada um dos ambientes ( $P$ ), e é dado pela expressão Eq-3.13:

$$P = P_{sat} \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{100} \quad (\text{Eq-3.13})$$

onde:

$P_{sat}$  é a pressão de saturação à temperatura que decorreu o ensaio (23°C), em Pa

$\Phi_1 - \Phi_2$  é a diferença entre a humidade relativa existente no interior e no exterior da tina, em %

A permeabilidade ao vapor de água é calculada a partir do valor médio para a permeância ao

vapor de água, multiplicado pela espessura média dos provetes, conforme expressão Eq-3.14:

$$\delta_{vp} = \Lambda \cdot t \quad (\text{Eq-3.14})$$

sendo,

$\delta_{vp}$  é a permeabilidade ao vapor de água, em Kg/m.s.Pa

$\Lambda$  é a permeância ao vapor de água, em kg/m<sup>2</sup>.S.Pa

$t$  é a espessura média dos provetes, em m



Figura 3.5 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

### 3.1.2.7. Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

A resistência à fendilhação de uma argamassa é função, entre outros fatores, das tensões induzidas no seio da argamassa e da capacidade resistência da mesma. Quanto mais elevada for a relação entre as resistências à tração e à compressão mais dúctil será a argamassa e, portanto, maior será a resistência às tensões introduzidas.

A norma que determina os procedimentos para a realização dos ensaios de caracterização das resistências mecânicas das argamassas endurecidas é a Norma EN 1015-11:2019.

Os ensaios de resistência à tração por flexão das argamassas em moldes laboratoriais, foram realizadas em provetes prismáticos de dimensões  $\pm 4,0 \times 4,0 \times 16,0$  cm, e por três pontos de carregamentos sobre estes. As resistências à compressão foram determinadas nas duas partes resultantes do teste de resistência à flexão e em provetes de  $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm. Os ensaios de resistência à compressão das argamassas destacados dos suportes, foram realizados em provetes prismáticos de dimensões  $\pm 4,0 \times 4,0 \times 1,5$  cm. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em três amostras e os ensaios de compressão em seis amostras e a figura 3.6 ilustra a realização dos ensaios. A resistência à tração por flexão é determinada pela expressão Eq-3.15:

$$R_t = 1,5 [F_f \times (L/b^3)] \quad (\text{Eq-3.15})$$

onde:

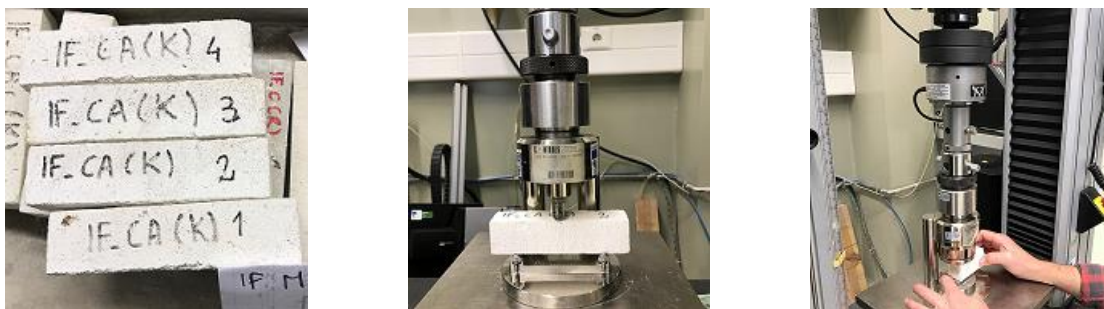
- $R_t$  é a resistência a tração por flexão, em MPa  
 $F_f$  é a carga de rotura á tração por flexão, em N  
 $L$  é a distância entre os apoios inferiores, em mm  
 $b$  é a largura da base do provete, em mm

E a resistência á compressão pela expressão Eq-3.16:

$$R_c = F_c / (b^3 \times S) \quad (\text{Eq-3.16})$$

onde:

- $R_c$  é a resistência à compressão, em MPa  
 $F_c$  é a carga de rotura à compressão, em N  
 $S$  é área de aplicação da carga, em mm<sup>2</sup>



*Figura 3.6 - Ensaio de resistência à tração por flexão e à compressão*

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1. Introdução

Inicialmente foram executados os provetes de cal aérea e posteriormente os provetes de cal hidráulica, e submetidos à cura corrente de 90 dias.

Após o processo de cura corrente, foram separados os provetes para a realização dos ensaios de cura com o processo de envelhecimento acelerado, correspondendo à fase final dos ensaios.

Refira-se que, no estudo comparativo deste trabalho de dissertação, foram utilizados os resultados das campanhas de investigação realizadas por João Braz/2019 e Poliana Bellei/2021, e estarão identificados entre parênteses pelas letras (j) e (p), respetivamente. Reporta-se ainda, que os materiais empregados (suportes, cal e agregados) e os traços das argamassas, são os mesmos empregados nesta campanha.

As nomenclaturas utilizadas para identificação dos provetes estão representadas no quadro 4.1:

*Quadro 4.1 - Nomenclatura dos provetes*

Projeto	Tipo de argamassa	Tipo de suporte	Investigador
IF- IF MORTAR: Experimental and numerical analysis of interface mortar- support	CAf- Argamassa de cal aérea com areia fina	TM- Tijolo cerâmico maciço	(k)- Kátia Soares
	CA- Argamassa de cal aérea com areia corrente		(j)- João Braz
	CHf- Argamassa de cal hidráulica com areia fina	P- Pedra Calcária	(p)- Poliana Bellei
	CH- Argamassa de cal hidráulica com areia corrente		

Quanto ao processo de cura, todos os provetes sem a nomenclatura -e.a.- envelhecimento acelerado, referem-se ao processo de cura corrente de 90 dias.

Todos os resultados apresentados foram tratados pelo método de Peirce - *Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data*. O critério de Peirce é um método baseado na

teoria da probabilidade sendo usado para eliminar dados "outliers" ou dados espúrios de forma racional.

Peirce elaborou uma tabela onde R representa a proporção do desvio máximo permitido de um valor da média dos dados para o desvio padrão, dado pela equação Eq-4.1:

$$R = \frac{(x_i - x_m)_{\max}}{\sigma} \quad (\text{Eq-4.1})$$

Onde,

$\sigma$  é o desvio padrão de "amostra" do conjunto de dados completo,

$X_i$  é um valor de dados medido,

$X_m$  é a média do conjunto de dados.

Os "outliers" são eliminados se ocorrer o estabelecido na equação Eq-4.2:

$$| X_i - X_m | > | X_i - X_m |_{\max} \quad (\text{Eq-4.2})$$

## 4.2. Caracterização dos agregados e das cais

### 4.2.1. Análise granulométrica da areia

As curvas granulométricas das areias utilizadas nas argamassas estão representadas na figura 4.1. A areia fina, com grãos inferiores a 0,50 mm, foi obtida por peneiramento da areia corrente.

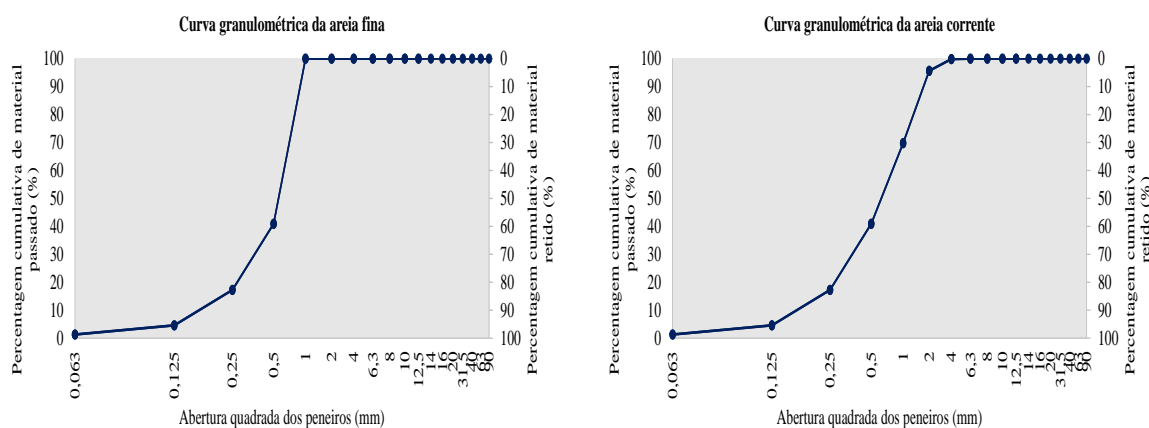


Figura 4.1 - Curvas granulométricas das areias



#### 4.2.2. Baridade da areia e da cal

No quadro 4.2, apresentam-se os valores obtidos para a baridade ( $\rho_b$ ) das areias e das cais, sendo o resultado da baridade, a média da baridade obtida do ensaio de três provetes.

*Quadro 4.2 - Baridade dos agregados e das cais*

Componentes		Baridade - $\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )
Agregados	Areia corrente	1 442
	Areia fina	1 282
Cais	Cal hidráulica (NHL 3.5)	737
	Cal aérea (CL 90 - S)	363

#### 4.3. Caracterização dos suportes

##### 4.3.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os resultados para a massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_o$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.2 e os resultados para os suportes, estão apresentados no quadro 4.3:

*Quadro 4.3 - Massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_o$ ) dos suportes*

Suporte	Provete	$\rho_b$ - Massa volúmica aparente		$P_o$ - Porosidade aberta	
		$\rho_{b,médio}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (Kg/m <sup>3</sup> )	$P_{o,médio}$ (%)	Desvio Padrão (%)
Tijolo cerâmico maciço	IF-TM 1 a 6	2071	1,62	18,33	0,32
Pedra calcária	IF-P 1 a 6	2427	7,98	8,55	0,31

##### 4.3.2. Porosimetria

Os ensaios para a porosimetria foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.3 e a distribuição de poros dos suportes estão apresentados na figura 4.2:

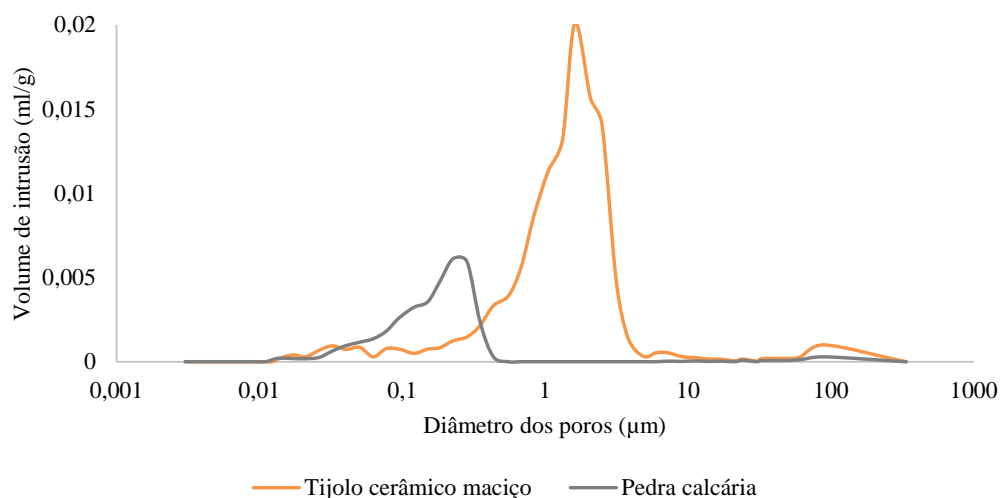


Figura 4.2 - Gráfico de distribuição dos poros dos suportes

#### 4.3.3. Absorção de água por capilaridade

Conforme disposto na norma ISO15148:2002, primeiramente traçaram-se as curvas de absorção de água por capilaridade (anexo A), representando a variação da massa por unidade de área função da raiz quadrada do tempo, para os diferentes suportes. Em seguida, procedeu-se à determinação dos coeficientes de absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) e estão apresentados no quadro 4.4, abaixo:

Quadro 4.4 - Absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) dos suportes

Suporte	Provete	$A_w$ - Absorção de água por capilaridade	
		$A_{w,médio}$ $kg/(m^2.s^{0,5})$	Desvio Padrão $kg/(m^2.s^{0,5})$
Tijolo cerâmico maciço	IF-TM 1 a 6	0,103	0,024
Pedra calcária	IF-P 1 a 6	0,028	0,002

#### 4.3.4. Permeabilidade ao vapor de água

Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.6 e os resultados obtidos, para os suportes, estão apresentados no quadro 4.5, a seguir:

Quadro 4.5 - Permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) dos suportes

Suporte	Provete	$\delta$ - Permeabilidade ao vapor de água	
		$\delta_{s,médio}$ (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))
Tijolo cerâmico maciço	IF-TM 1 a 5	$4,53975 \times 10^{-12}$	$3,10606 \times 10^{-13}$
Pedra calcária	IF-P 1 a 6	$4,86553 \times 10^{-12}$	$5,09915 \times 10^{-13}$

#### 4.3.5. Índice de secagem

Os ensaios para determinar o índice de secagem ( $I_s$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.5 e os resultados obtidos, para os suportes, estão apresentados no quadro 4.6, a seguir:

Quadro 4.6 - Índice de secagem ( $I_s$ ) dos suportes

Suporte	Provete	$I_s$ - Índice de Secagem	
		$I_{s,médio}$	Desvio Padrão
Tijolo cerâmico maciço	IF-TM 1 a 6	0,162	0,005
Pedra calcária	IF-P 1 a 5	0,169	0,005

#### 4.4. Caracterização das argamassas em moldes laboratoriais

##### 4.4.1. Consistência por espalhamento

A consistência das argamassas, no seu estado fluido, foi obtida na mesa de espalhamento.

De acordo com o recomendado pela norma, para argamassas com massa volúmica superior a  $1200 \text{ kg/m}^3$ , pretende-se que a consistência por espalhamento das argamassas, seja  $170 \pm 10$  mm. Os resultados estão apresentados no quadro 4.7, a seguir:

Quadro 4.7 - Consistência das argamassas no estado fluido

Argamassa	Traço	Consistência por espalhamento (mm)
$CA_f$ - Argamassa de cal aérea com areia fina	1:2	171
CA - Argamassa de cal aérea com areia corrente	1:2	165
$CH_f$ - Argamassa de cal hidráulica com areia fina	1:3	171
CH - Argamassa de cal hidráulica com areia corrente	1:3	174

#### 4.4.2. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

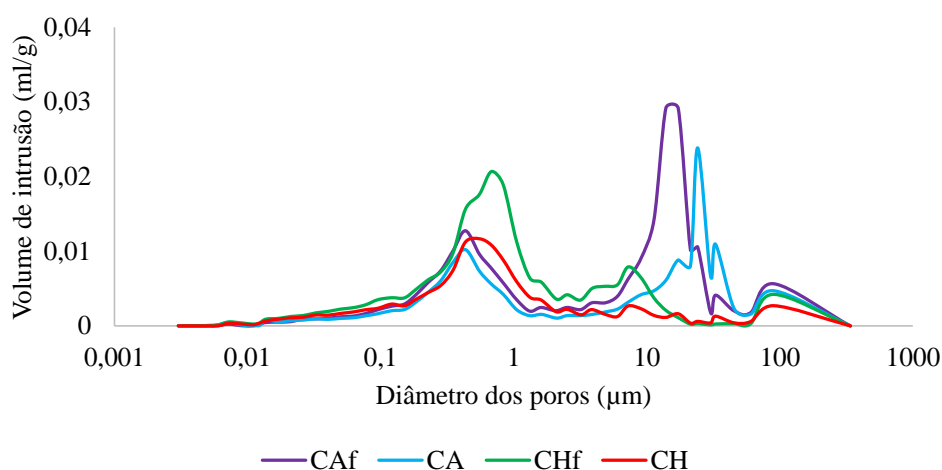
Os ensaios de massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ), para as argamassas em moldes laboratoriais, foram executados conforme descrito no item 3.1.2.2 e os resultados estão apresentados no quadro 4.8, a seguir:

*Quadro 4.8 - Massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ) das argamassas nos moldes*

Provete	$\rho_b$ - Massa volúmica aparente		$P_0$ - Porosidade aberta	
	$\rho_{b,médio}$ ( $kg/m^3$ )	Desvio Padrão ( $kg/m^3$ )	$P_{0,médio}$ (%)	Desvio Padrão (%)
IF-CA <sub>F</sub> (k) 1 a 6	1492	15,98	31,06	1,03
IF-CA-(k) 1 a 8	1650	4,41	30,39	0,57
IF-CH <sub>F</sub> (p) 1 a 10	1535	11,80	38,37	0,44
IF-CH-(j) 1 a 3	1846	28,58	26,69	1,50

#### 4.4.3. Porosimetria

Os ensaios de porosimetria foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.3 e a distribuição de poros para as diversas argamassas em moldes laboratoriais estão apresentados na figura 4.3:



*Figura 4.3 - Distribuição dos poros das argamassas nos moldes*

#### 4.4.4. Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.4 e os resultados obtidos, para as argamassas em moldes laboratoriais, estão apresentados no quadro 4.9, a seguir:

Quadro 4.9 - Absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) das argamassas nos moldes

Provetes	$A_w$ - Absorção de água por capilaridade	
	$A_{w,médio}$ kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Desvio Padrão kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )
IF-CA <sub>r</sub> -(K) 1 a 5	0,043	0,04
IF-CA-(K) 1 a 8	0,117	0,06
IF-CH <sub>r</sub> -(p) 1 a 9	0,628	0,01
IF-CH-(j) 1 a 3	0,429	0,09

#### 4.4.5. Índice de secagem

Os ensaios de índice de secagem ( $I_s$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.5 e os resultados obtidos, para as argamassas em moldes laboratoriais, estão apresentados no quadro 4.10, a seguir:

Quadro 4.10 - Índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas nos moldes

Proвете	$I_s$ - Índice de secagem	
	$I_{s,médio}$	Desvio Padrão
IF-CA <sub>r</sub> -(k) 1 a 6	0,171	0,005
IF-CA-(k) 1 a 8	0,172	0,021
IF-CH <sub>r</sub> -(p) 1 a 9	0,149	0,024
IF-CH-(j) 1 a 3	0,153	0,013

#### 4.4.6. Permeabilidade ao vapor de água

Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.6 e os resultados obtidos, para as argamassas em moldes laboratoriais, estão apresentados no quadro 4.11, a seguir:

Quadro 4.11 - Permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas nos moldes

Provete	$\delta$ - Permeabilidade ao Vapor de Água	
	$\delta$ , médio (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))
IF-CA <sub>F</sub> -(k) 1 a 5	2,33831 x 10 <sup>-11</sup>	6,14926 x 10 <sup>-13</sup>
IF-CA-(k) 1 a 5	2,01146 x 10 <sup>-11</sup>	2,22647 x 10 <sup>-13</sup>
IF-CH <sub>F</sub> -(p) 1 a 5	2,31606 x 10 <sup>-11</sup>	1,18673 x 10 <sup>-12</sup>
IF-CH-(j) 1 a 3	1,50578 x 10 <sup>-11</sup>	1,16244 x 10 <sup>-13</sup>

#### 4.4.7. Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Os ensaios resistência à compressão ( $R_c$ ) e de resistência à tração por flexão ( $R_t$ ), foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.7 e os resultados obtidos para as argamassas em moldes laboratoriais, estão apresentados no quadro 4.12, a seguir:

Quadro 4.12 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) e resistência à tração por flexão ( $R_t$ ) das argamassas em moldes laboratoriais

Provete	$R_c$ - Resistência à compressão		Provete	$R_t$ - Resistência à Tração por Flexão	
	$R_{c,médio}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)		$R_{t,médio}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
IF-CA <sub>F</sub> -(k) 1 a 8	0,842	0,369	IF-CA <sub>F</sub> -(k) 1 a 4	0,404	0,036
IF-CA-(k) 1 a 5	2,453	1,533	IF-CA-(k) 1 a 4	0,263	0,045
IF-CH <sub>F</sub> -(p) 1 a 10	1,882	0,408	IF-CH <sub>F</sub> -(p) 1 a 5	0,261	0,015
IF-CH-(j) 1 a 3	6,927	0,584	IF-CH-(j) 1 a 3	0,302	0,041

## 4.5. Caracterização das argamassas destacadas dos suportes

### 4.5.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os resultados dos ensaios de massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ), foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.2 e para as argamassas destacadas dos suportes, com cura corrente, estão apresentados no quadro 4.13, a seguir:

*Quadro 4.13 - Massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ) das argamassas nos suportes – Cura corrente*

Provete		$\rho_b$ - Massa volúmica aparente		$P_0$ - Porosidade aberta	
		$\rho_{b,médio}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (kg/m <sup>3</sup> )	$P_{0,médio}$ (%)	Desvio Padrão (%)
Suporte de tijolo cerâmico maciço	IF-CA <sub>F</sub> -TM-(k) 1 a 7	1 533	33,34	35,62	0,92
	IF-CA-TM-(k) 1 a 11	1 706	28,68	30,60	0,88
	IF-CH <sub>F</sub> -TM-(k) 1 a 7	1 495	38,02	33,92	0,83
	IF-CH-TM-(j) 1 a 3	1 762	35,78	23,04	0,74
Suporte de pedra calcária	IF-CA <sub>F</sub> -P-(k) 1 a 8	1 534	11,21	33,35	0,82
	IF-CA-P-(k) 1 a 8	1 676	9,31	31,58	0,59
	IF-CH <sub>F</sub> -P-(k) 1 a 7	1 526	8,10	33,71	0,38
	IF-CH-P-(j) 1 a 3	1 776	15,11	21,46	0,40

### 4.5.2. Porosimetria

Os ensaios para a porosimetria foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.3 e a distribuição de poros das argamassas destacadas dos suportes de tijolo cerâmico maciço e pedra calcária, com cura corrente, estão apresentados respetivamente, nas figuras 4.4 e 4.5, a seguir:

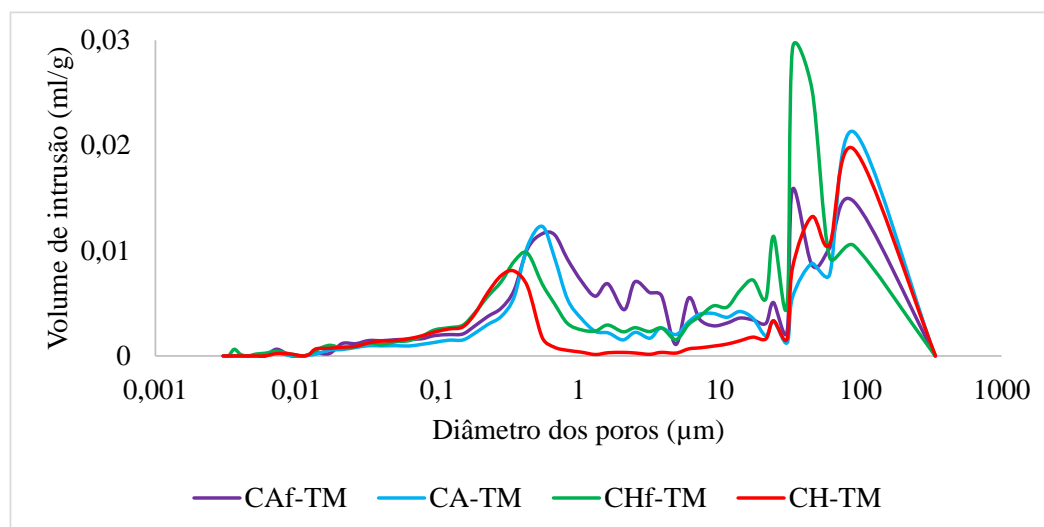


Figura 4.4 - Distribuição dos poros das argamassas nos suportes de tijolo cerâmico maciço - Cura corrente

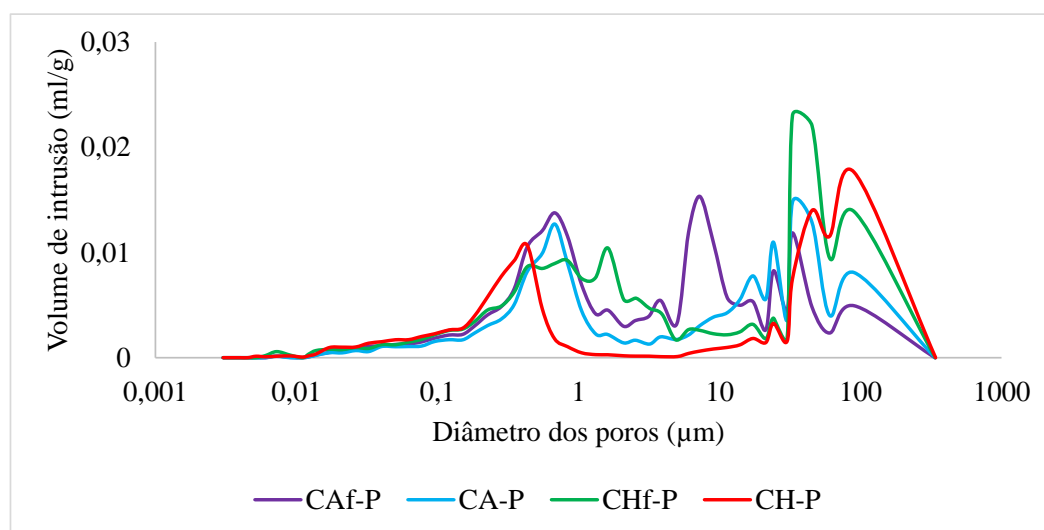


Figura 4.5 - Distribuição dos poros das argamassas nos suportes de pedra calcária - Cura corrente

#### 4.5.3. Absorção de água por capilaridade

Os ensaios para determinação dos coeficientes de absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) foram realizados conforme descrito no tópico 3.1.2.4 e os resultados obtidos para as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente, estão apresentadas no quadro 4.14, a seguir:



Quadro 4.14 - Absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) das argamassas nos suportes - Cura corrente

$A_w$ - Absorção de água por capilaridade					
Provetes	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Provetes	Suporte de pedra calcária	
	$A_{w,médio}$ kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Desvio Padrão kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )		$A_{w,médio}$ kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Desvio Padrão kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )
IF-CA <sub>r</sub> -TM-(k) 1 a 10	0,442	0,017	IF-CA <sub>r</sub> -P-(k) 1 a 10	0,486	0,023
IF-CA-TM-(k) 1 a 9	0,377	0,006	IF-CA-P-(k) 1 a 8	0,453	0,015
IF-CH <sub>r</sub> -TM-(k) 1 a 8	0,234	0,049	IF-CH <sub>r</sub> -P-(k) 1 a 8	0,251	0,009
IF-CH-TM-(k) 1 a 3	0,216	0,167	IF-CH-P-(j) 1 a 4	0,274	0,007

#### 4.5.4. Índice de secagem

Os ensaios de secagem ( $I_s$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.5 e os resultados obtidos para as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente, estão apresentadas no quadro 4.15, a seguir.

Quadro 4.15 - Índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas nos suportes - Cura corrente

$I_s$ - Índice de Secagem					
Proвете	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Proвете	Suporte de pedra calcária	
	$I_{s,médio}$	Desvio Padrão		$I_{s,médio}$	Desvio Padrão
IF-CA <sub>r</sub> -TM-(k) 1 a 10	0,150	0,025	IF-CA <sub>r</sub> -P-(k) 1 a 10	0,150	0,019
IF-CA-TM-(k) 1 a 9	0,151	0,022	IF-CA-P-(k) 1 a 8	0,246	0,027
IF-CH <sub>r</sub> -TM-(k) 1 a 8	0,136	0,010	IF-CH <sub>r</sub> -P-(k) 1 a 8	0,145	0,020
IF-CH-TM-(j) 1 a 3	0,154	0,012	IF-CH-P-(j) 1 a 4	0,157	0,016

#### 4.5.5. Permeabilidade ao vapor de água

Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.6 e os resultados obtidos, as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente, estão apresentados no quadro 4.16, a seguir:

*Quadro 4.16 - Permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas nos suportes – Cura corrente*

$\delta$ - Permeabilidade ao vapor de água					
Provete	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Provete	Suporte de pedra calcária	
	$\delta$ , médio (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))		$\delta$ , médio (kg/(m.s.Pa))	Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))
IF-CA <sub>f</sub> -TM-(k) 1 a 5	2,19268 x 10 <sup>-11</sup>	7,30746 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CA <sub>f</sub> -P-(k) 1 a 5	1,69116 x 10 <sup>-11</sup>	1,45429 x 10 <sup>-12</sup>
IF-CA-TM-(k) 1 a 5	1,66213 x 10 <sup>-11</sup>	7,59010 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CA-P-(k) 1 a 5	1,83808 x 10 <sup>-11</sup>	7,37925 x 10 <sup>-13</sup>
IF-CH <sub>f</sub> -TM-(k) 1 a 4	2,10963 x 10 <sup>-11</sup>	4,52601 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CH <sub>f</sub> -P-(k) 1 a 3	2,20289 x 10 <sup>-11</sup>	4,46890 x 10 <sup>-13</sup>
IF-CH-TM-(j) 1 a 3	1,17653 x 10 <sup>-11</sup>	2,05660 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CH-P-(j) 1 a 3	1,13326 x 10 <sup>-11</sup>	5,71431 x 10 <sup>-13</sup>

#### 4.5.6. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão ( $R_c$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.7 e os resultados obtidos, para as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente, estão apresentados no quadro 4.17, a seguir:

*Quadro 4.17 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) das argamassas nos suportes – Cura corrente*

$R_c$ - Resistência à compressão					
Provete	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Provete	Suporte de pedra calcária	
	$R_{c,médio}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)		$R_{c,médio}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
IF-CA <sub>f</sub> -TM-(k) 1 a 10	0,768	0,625	IF-CA <sub>f</sub> -P-(k) 1 a 10	1,617	0,382
IF-CA-TM-(k) 1 a 11	0,772	0,240	IF-CA-P-(k) 1 a 6	0,734	0,106
IF-CH <sub>f</sub> -TM-(k) 1 a 3	2,725	0,782	IF-CH <sub>f</sub> -P-(k) 1 a 8	1,900	0,716
IF-CH-TM-(j) 1 a 3	3,552	1,166	IF-CH-P-(j) 1 a 3	9,902	2,002

#### 4.6. Caracterização das argamassas após envelhecimento acelerado

Esta fase corresponde à caracterização das argamassas após o processo de cura com envelhecimento acelerado, de acordo com a Norma EN 1015-21:2002, onde, após a cura inicial

corrente, as argamassas são sujeitas a duas séries de condicionamento de quatro ciclos, conforme descrito no item 3.1.

Ressalta-se que somente serão apresentados os resultados dos ensaios para as argamassas de cal hidráulica com areia fina (*IF-CH<sub>f</sub>*) e cal hidráulica com areia corrente (*IF-CH*), uma vez que os ensaios com as argamassas de cal aérea com envelhecimento acelerado, não ficaram concluídos, em tempo, para a divulgação dos resultados neste trabalho.

#### 4.6.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os ensaios de massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ), para as argamassas destacadas dos suportes, cura com envelhecimento acelerado, foram executados conforme descrito no item 3.1.2.2 e os resultados estão apresentados no quadro 4.18, a seguir:

*Quadro 4.18 - Massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ) das argamassas - Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado*

Provete		$\rho_b$ - Massa volúmica aparente		$P_0$ - Porosidade aberta	
		$\rho_{b,médio}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (kg/m <sup>3</sup> )	$P_{0,médio}$ (%)	Desvio Padrão (%)
Suporte de tijolo cerâmico maciço	IF-CH-TM-e.a.-(k) 1 a 6	1550	38,35	32,88	0,90
	IF-CH-TM-e.a.-(j) 1 a 3	1875	51,09	19,84	1,28
Suporte de pedra calcária	IF-CH-P-e.a.-(k) 1 a 4	1565	8,18	32,70	0,21
	IF-CH-P-e.a.-(j) 1 a 3	1828	7,40	20,74	0,44

#### 4.6.2. Absorção de água por capilaridade

Conforme disposto na ISO 15148:2002, e no item 3.1.2.4, traçaram-se as curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas destacadas dos suportes, cura com envelhecimento acelerado, representando a variação da massa por unidade de área função da raiz quadrada do tempo. Em seguida, procedeu-se à determinação dos coeficientes de absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) e estão apresentados no quadro 4.19, a seguir:

*Quadro 4.19 - Absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) das argamassas - Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado*

$A_w$ - Absorção de água por capilaridade					
Provetes	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Provetes	Suporte de pedra calcária	
	$A_{w,médio}$ kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Desvio Padrão kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )		$A_{w,médio}$ kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Desvio Padrão kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> )
IF-CH <sub>T</sub> -TM-e.a.-(j) 1 a 7	0,224	0,034	IF-CH <sub>T</sub> -P-e.a.-(j) 1 a 8	0,237	0,016
IF-CH-TM-e.a.-(j) 1 a 4	0,333	0,049	IF-CH-P-e.a.-(j) 1 a 4	0,377	0,048

#### 4.6.3. Índice de secagem

Os ensaios de secagem ( $I_s$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.5 e os resultados obtidos, para as argamassas destacadas dos suportes, cura com envelhecimento acelerado, estão apresentados no quadro 4.20, a seguir:

*Quadro 4.20 - Índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas - Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado*

$I_s$ - Índice de secagem					
Proвете	Suporte de tijolo cerâmico maciço		Proвете	Suporte de pedra calcária	
	$I_{s,médio}$	Desvio Padrão		$I_{s,médio}$	Desvio Padrão
IF-CH <sub>T</sub> -TM-e.a.-(k) 1 a 7	0,148	0,016	IF-CH <sub>T</sub> -P-e.a.-(k) 1 a 8	0,158	0,016
IF-CH-TM-e.a.-(j) 1 a 4	0,097	0,007	IF-CH-P-e.a.-(j) 1 a 4	0,104	0,011

#### 4.6.4. Permeabilidade ao vapor de água

Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.6 e os resultados obtidos, para as argamassas destacadas dos suportes, cura com envelhecimento acelerado, estão apresentados no quadro 4.21, a seguir:

*Quadro 4.21 - Permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas – Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado*

<b><math>\delta</math> - Permeabilidade ao vapor de água</b>					
<b>Provete</b>	<b>Suporte de tijolo cerâmico maciço</b>		<b>Provete</b>	<b>Suporte de pedra calcária</b>	
	<b><math>\delta</math>, médio (kg/(m.s.Pa))</b>	<b>Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))</b>		<b><math>\delta</math>, médio (kg/(m.s.Pa))</b>	<b>Desvio Padrão (kg/(m.s.Pa))</b>
IF-CH <sub>r</sub> -TM-e.a.-(K) 1 a 5	1,95109 x 10 <sup>-11</sup>	5,92885 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CH <sub>r</sub> -P-e.a.-(K) 1 a 4	2,11691 x 10 <sup>-11</sup>	3,87691 x 10 <sup>-13</sup>
IF-CH-TM-e.a.-(j) 1 a 3	1,13879 x 10 <sup>-11</sup>	6,979684 x 10 <sup>-13</sup>	IF-CH-P-e.a.-(j) 1 a 3	1,47445 x 10 <sup>-11</sup>	5,56158 x 10 <sup>-13</sup>

#### 4.6.5. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão ( $R_c$ ) foram realizados conforme descrito no item 3.1.2.7 e os resultados obtidos, para as argamassas destacadas dos suportes, cura com envelhecimento acelerado, estão apresentados no quadro 4.22, a seguir:

*Quadro 4.22 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) das argamassas - Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado*

<b><math>R_c</math> - Resistência à compressão</b>					
<b>Provete</b>	<b>Suporte de tijolo cerâmico maciço</b>		<b>Provete</b>	<b>Suporte de pedra calcária</b>	
	<b><math>R_{c,médio}</math> (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>		<b><math>R_{c,médio}</math> (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
IF-CH <sub>r</sub> -TM-e.a.-(k) 1 a 8	1,221	1,056	IF-CH <sub>r</sub> -P-e.a.-(k) 1 a 7	0,822	0,268
IF-CH-TM-e.a.-(j) 1 a 3	5,901	1,455	IF-CH-P-e.a.-(j) 1 a 3	5,328	0,070

## 5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Este capítulo é dedicado à análise comparativa dos resultados, tendo por objetivo compreender como as características dos suportes influenciam o comportamento das argamassas de cal, e será dividido em três etapas.

Na primeira etapa comentam-se as características dos suportes. A segunda etapa dedica-se à comparação das propriedades das argamassas obtidas em moldes laboratoriais com as argamassas destacadas dos suportes, com cura corrente. A terceira etapa, e final, com o intuito de compreender o comportamento das argamassas ao longo do tempo, tem como meta, a análise comparativa entre as argamassas de cal hidráulica destacadas dos suportes, cura corrente, com as submetidas à cura com envelhecimento acelerado.

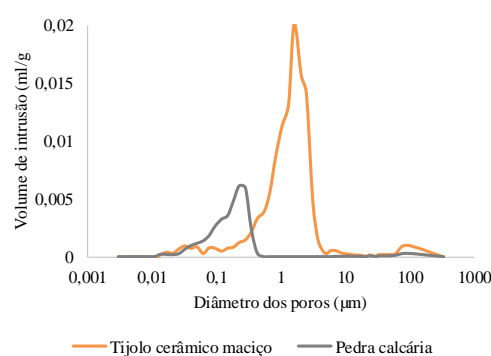
As nomenclaturas utilizadas foram reportadas no quadro 4.1, anteriormente apresentado.

### 5.2. Os suportes

Os suportes utilizados nesta investigação, apresentam propriedades distintas conforme pode-se observar no quadro 5.1, a seguir:

Quadro 5.1 - Quadro resumo das propriedades dos suportes

Suporte	Tijolo cerâmico maciço (TM)	Pedra calcária (P)
Massa volúmica aparente $\rho_b$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2071	2427
	$\rho_{b(TM)} < 15\% \rho_{b(P)}$	
Porosidade aberta $P_o$ (%)	18,33	8,55
	$P_{o(TM)} > 114\% P_{o(P)}$	
Absorção de água por capilaridade $A_w$ (kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ))	0,103	0,028
	$A_{w(TM)} > 272\% A_{w(P)}$	
Índice de secagem $I_s$	0,162	0,169
	$I_{s(TM)} < 4\% I_{s(P)}$	
Permeabilidade ao vapor de água $\delta$ (kg/(m.s.Pa))	$4,53975 \times 10^{-12}$	$4,86553 \times 10^{-12}$
	$\delta_{(TM)} < 7\% \delta_{(P)}$	



O tijolo cerâmico maciço apresentou porosidade mais elevada que a pedra calcária e como esperado, inversamente, menor massa volúmica. Também estão dentro das expectativas, os resultados para a absorção de água por capilaridade onde o tijolo cerâmico maciço apresentou maior capacidade de absorção de água em função do tempo e menor resistência à secagem.

O tijolo cerâmico apresentou menor capacidade de permeabilidade ao vapor de água que a pedra calcária embora a expectativa era que a difusão ao vapor fosse maior para o suporte que apresentasse maior porosidade. Porém, sabe-se que a permeabilidade ao vapor depende também da conectividade entre poros entre as faces do material e que grupos de poros cegos não contribui para a passagem de vapor, podendo ser atribuído à estas ponderações, o resultado.

### 5.3. Análise comparativa das argamassas - Cura corrente

#### 5.3.1. Porosimetria

Na figura 5.1, estão retratadas as curvas de distribuição de poros das diversas cais, em moldes laboratoriais e quando destacadas dos suportes. Os resultados serão correlacionados com os obtidos para porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, índice de secagem e resistência à compressão, e comentados nos respectivos itens.

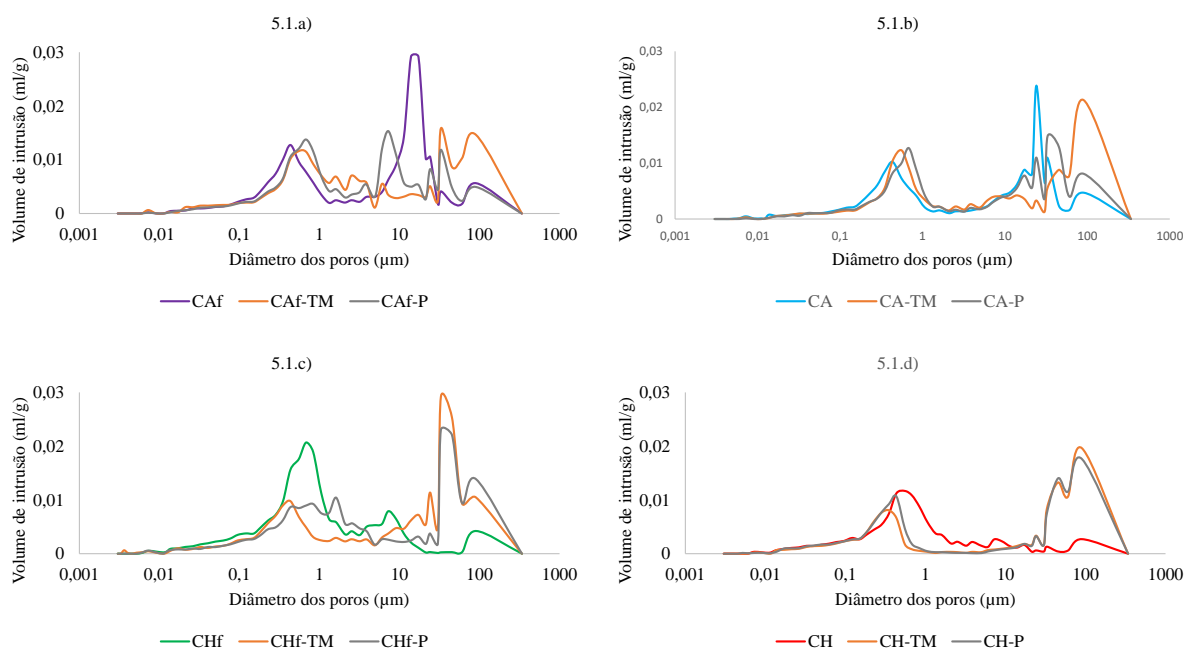


Figura 5.1 - Distribuição dos poros das argamassas - Cura corrente

### 5.3.2. Massa volúmica aparente, porosidade aberta e porosimetria

Na figura 5.2 apresentam-se os resultados obtidos massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e para a porosidade aberta ( $P_0$ ), para as argamassas de cal em moldes laboratoriais, e quando destacadas dos suportes de tijolo cerâmico e pedra calcária, simulando a aplicação em paredes reais.

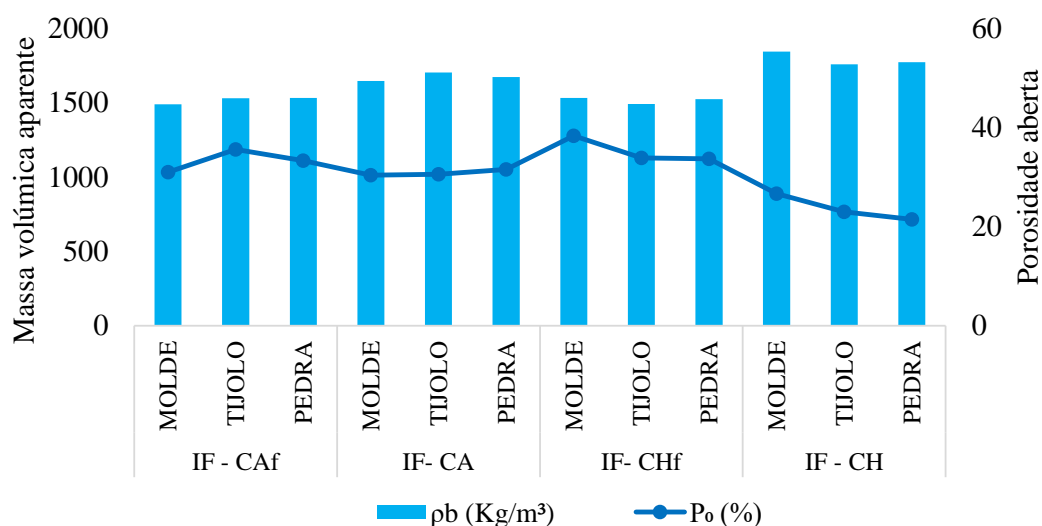


Figura 5.2 - Massa volúmica ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ) das argamassas - Cura corrente

Nesta primeira comparação de resultados pode-se confirmar a tendência observada por Carasek et al (2005), Kazmierczak et al (2007) e Torres (2014), que os suportes influenciam o comportamento das argamassas, logo, as caracterizações das argamassas em moldes laboratoriais conduzem à obtenção de resultados diferentes da caracterização das argamassas após aplicadas aos suportes do tipo modelo real reduzido.

Os resultados obtidos para a porosidade aberta variaram de 21,46% (*IF-CH-P*) a 38,37% (*IF-CHf*) e estão dentro da faixa expectada (vd. 2.4).

É expectável que a porosidade das argamassas diminua após serem aplicadas nos suportes, o que aconteceu para as argamassas de cal hidráulica. Após a aplicação das argamassas nos suportes, houve um ligeiro aumento da porosidade para as argamassas de cal aérea, sendo em média  $\pm 10\%$  para *IF-CAf*,  $\pm 2\%$  para a *IF-CA*, e diminuição da porosidade das argamassas de cal hidráulica, em média de  $\pm 13\%$  para a *IF-CHf* e  $\pm 20\%$  para a *IF-CH*.



Pode-se observar na figura 5.1 que as curvas de distribuição de poros para as argamassas em moldes laboratoriais retratam o comportamento esperado - bimodal e com poros de maiores dimensões para as argamassas de cal aérea e unimodal com poros de menores dimensões para as argamassas de cal hidráulica (vd..2.5.2). No entanto, quando aplicadas sobre os suportes, as argamassas de cal hidráulica, passaram a ter distribuição bimodal (com dois picos de grande amplitude) e um aumento de poros de maiores dimensões. Ainda, comparando as distribuições de poros com os resultados encontrados para a porosidade aberta, verificam-se coerentes entre si, onde, para as argamassas de cal aérea, houve um aumento na faixa de poros de 0,05 a 10  $\mu\text{m}$  e uma diminuição para poros acima de 10  $\mu\text{m}$ . O inverso ocorreu para as argamassas de cal hidráulica. Como referenciado na literatura (vd. 2.4), os diâmetros de poros entre 0,05 e 10  $\mu\text{m}$ , correspondem aos poros capilares que mais influenciam os fenômenos de absorção de água por capilaridade e que se correlacionam diretamente com as propriedades porosas das argamassas.

Quanto à influência do tipo específico de suporte, não houve uma tendência para as argamassas de cal aérea, porém para as argamassas de cal hidráulica, observou-se que as maiores porosidades corresponderam ao suporte com maior porosidade aberta – tijolo cerâmico maciço.

No que tange ao tipo de agregado, para um mesmo traço e tipo de ligante, os resultados estão dentro do esperado, onde a utilização de agregados mais finos correspondem a porosidades mais elevadas (vd. 2.6.1.1).

### **5.3.3. Absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem**

Na figura 5.3 são apresentados os resultados para o coeficiente de absorção de água ( $A_w$ ) das argamassas de cal tanto para os moldes laboratoriais quanto para as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente.

Era suposto que a absorção de água por capilaridade das argamassas diminuísse quando aplicadas nos suportes, à semelhança do esperado para a porosidade aberta. No entanto, tem-se para as argamassas de cal aérea destacadas dos suportes, novamente valores superiores aos das argamassas nos moldes laboratoriais. Porém, apesar deste fato não ser o esperado em relação à literatura, está totalmente condizente com os resultados obtidos para a porosidade aberta e com as curvas de porometria das amostras ensaiadas. As explicações anteriores para a porosidade aberta e para as curvas de distribuição de poros, também se aplicam para a absorção de água por capilaridade, em função da correlação direta entre estes comportamentos – o aumento da porosidade implica no aumento da absorção capilar de forma não linear, e vice-versa.

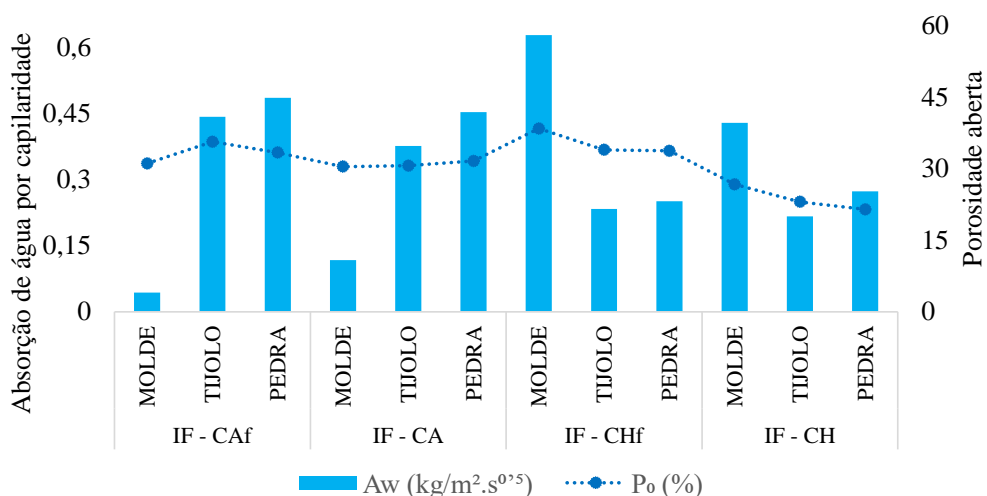


Figura 5.3 - Absorção de água por capilaridade (A<sub>w</sub>) das argamassas - Cura corrente

Ilustrando o exposto neste último parágrafo apresenta-se a seguir o quadro 5.2 de volume cumulativos intrudido por faixa de poros capilares, onde, claramente se verifica que o aumento de volumes entre poros de 0,05 a 10 μm, corresponde a um aumento de absorção de água por capilaridade, e vice-versa:

Quadro 5.2 - Volume cumulativo intrudido (ml/g) por faixa de diâmetro dos poros (μm)

Provete	Poros capilares										Volume cumulativo intrudido (ml/g)	
	0,025 < Ø < 0,01 μm		0,01 < Ø < 0,05 μm		0,05 < Ø < 10 μm		Ø > 10 μm					
	Importante para matrizes de cimento hidratado		Alto efeito no transporte ao vapor		Alto efeito na capilaridade		Não influenciam o transporte de água e influenciam o transporte de vapor					
CA <sub>f</sub>	0,0003	0%	0,0046	2%	↓	0,1152	50%	↓	0,1086	48%	↑	0,2287
CA <sub>f</sub> -TM	0,0007	0%	0,0059	3%		0,1264	62%		0,0700	35%		0,2030
CA <sub>f</sub> -P	0,0002	0%	0,0044	2%		0,1496	71%		0,0553	27%		0,2095
CA	0,0008	0%	0,0047	3%	↑	0,0807	49%	↓	0,0778	48%	↑	0,1640
CA - TM	0,0004	0%	0,0041	3%		0,0886	57%		0,0613	40%		0,1545
CA - P	0,0001	0%	0,0036	2%		0,0881	52%		0,0774	46%		0,1692
CH <sub>f</sub>	0,0010	1%	0,0088	4%	↑	0,1844	89%	↑	0,0126	6%	↓	0,2069
CH <sub>f</sub> -TM	0,0019	1%	0,0056	3%		0,0939	44%		0,1141	52%		0,2155
CH <sub>f</sub> -P	0,0010	0%	0,0057	3%		0,1211	57%		0,0837	40%		0,2115
CH	0,0006	0%	0,0072	6%	↑	0,1057	85%	↑	0,0105	9%	↓	0,1240
CH - TM	0,0004	0%	0,0059	5%		0,0525	43%		0,0627	52%		0,1215
CH - P	0,0005	0%	0,0065	5%		0,0616	48%		0,0609	47%		0,1294

Quanto à influência do tipo específico de suporte, observou-se que os coeficientes de absorção de água foram menores para o suporte com maior porosidade aberta – tijolo cerâmico maciço.

No Estado da Arte, já se havia referenciado que a permeabilidade ao vapor de água depende da porosidade, da área superficial específica e das propriedades microscópicas das argamassas, sendo a conectividade entre os poros das faces dos materiais, determinante.

Pode-se observar na figura 5.4, onde são apresentados os resultados para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) para as argamassas de cal, tanto em moldes laboratoriais quanto para as destacadas dos suportes, que as argamassas de cal hidráulica apresentaram o comportamento dentro do esperado – com a diminuição da porosidade houve uma diminuição do coeficiente de permeabilidade ao vapor. No entanto, para as argamassas de cal aérea houve aumento da porosidade e diminuição da permeabilidade ao vapor.

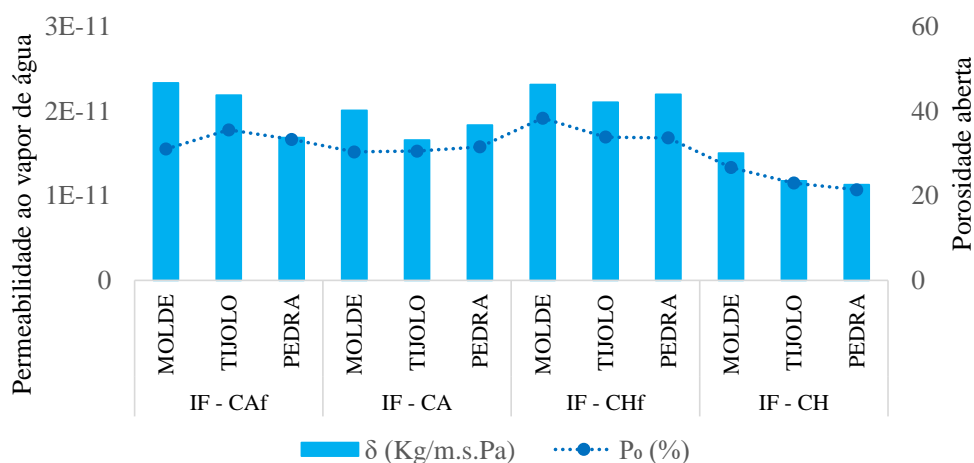


Figura 5.4 - Permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas - Cura corrente

Novamente há que se ressaltar que apesar dos resultados obtidos para as argamassas de cal aérea não estarem dentro do comportamento genérico estabelecido na literatura, eles estão coerentes com os resultados anteriores apresentados e com a literatura - referenciando os estudos de Rodrigues (2004), é expectável que o coeficiente de permeabilidade aumente com o aumento da porosidade aberta, porém não existe uma linearidade nesta correlação, em função da conectividade da rede porosa, na medida em que um grupo de poros cegos não contribui para a passagem de vapor. Novamente o quadro 5.2, ilustra o comportamento ocorrido. Vê-se que para as argamassas de cal aérea houve, genericamente, uma diminuição do volume de poros entre  $0,01$  e  $0,05 \mu\text{m}$  e poros acima de  $10 \mu\text{m}$  (vd..2.4). Logo, após a aplicação das argamassas de cal aérea sobre os suportes, houve um rearranjo dos poros, com elevação dos poros de alta influência na absorção de água e diminuição dos poros com alta influência na permeabilidade ao vapor.

Quanto à influência do tipo específico de suporte, não houve uma tendência, contudo em termos dos resultados obtidos para a permeabilidade ao vapor ( $\delta$ ), as argamassas IF-CH<sub>f</sub>-P e IF-CA<sub>f</sub>-TM, foram as que mais se aproximaram dos resultados obtidos em moldes laboratoriais, variando em relação a estes, 5,14% e 6,64%, respectivamente. Por outro lado, as argamassas IF-CA<sub>f</sub>-P e IF-CH-P, obtiveram os valores mais afastados dos valores em moldes laboratoriais, variando em relação a estes, 38,27% e 32,87%, respectivamente.

Na figura 5.5 são apresentados os resultados para o índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas, tanto para os moldes laboratoriais quanto para as argamassas destacadas dos suportes, cura corrente.

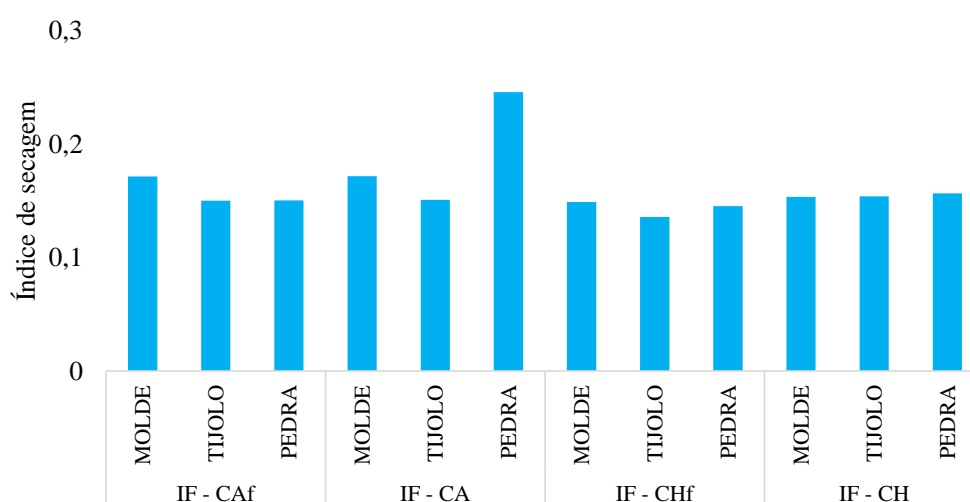


Figura 5.5 - Índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas - Cura corrente

Este índice retrata a resistência das argamassas à capacidade de secagem. Não existe, contudo, um comportamento determinante para esta propriedade. Observa-se na figura 5.5, que as argamassas de cal aplicadas sobre o suporte com maior porosidade aberta – tijolo cerâmico maciço, obtiveram melhor comportamento à secagem, considerando-se o mesmo tipo e traço e ligante. Nesse caso, de forma genérica, se poderia conjecturar que suportes com maior porosidade aberta diminuem a resistência à secagem das argamassas. Porém não corresponde ao reportado por Torres (2014).

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

No quadro 5.3, apresentam-se os resultados da resistência à tração por flexão ( $R_t$ ), para as argamassas em moldes laboratoriais, cura corrente. Não foi possível fazer a determinação desta

propriedade mecânica para as argamassas destacadas dos suportes, pelo que não é viável uma análise comparativa desses resultados.

Quadro 5.3 - Resistência à tração por flexão ( $R_t$ ) das argamassas em moldes laboratoriais

Proвете	$R_t$ - Resistência à Tração por Flexão	
	$R_t$ , médio (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)
IF-CA <sub>f</sub> -(k) 1 a 4	0,404	0,036
IF-CA-(k) 1 a 4	0,263	0,045
IF-CH <sub>f</sub> -(p) 1 a 5	0,261	0,015
IF-CH-(j) 1 a 3	0,302	0,041

Os valores de resistência ( $R_t$ ) mínimos recomendados para as argamassas de revestimento para edifícios antigos é 0,20 a 0,70 MPa, estando os resultados obtidos dentro do esperado, sendo que a resistência mais elevada foi obtida para a argamassa IF-CA<sub>f</sub> (0,404 MPa) e a mais baixa para a IF-CH<sub>f</sub> (0,261 MPa).

Os resultados para a resistência à compressão ( $R_c$ ) das argamassas de cal em moldes laboratoriais e das destacadas dos suportes, cura corrente, encontram-se na figura 5.6.

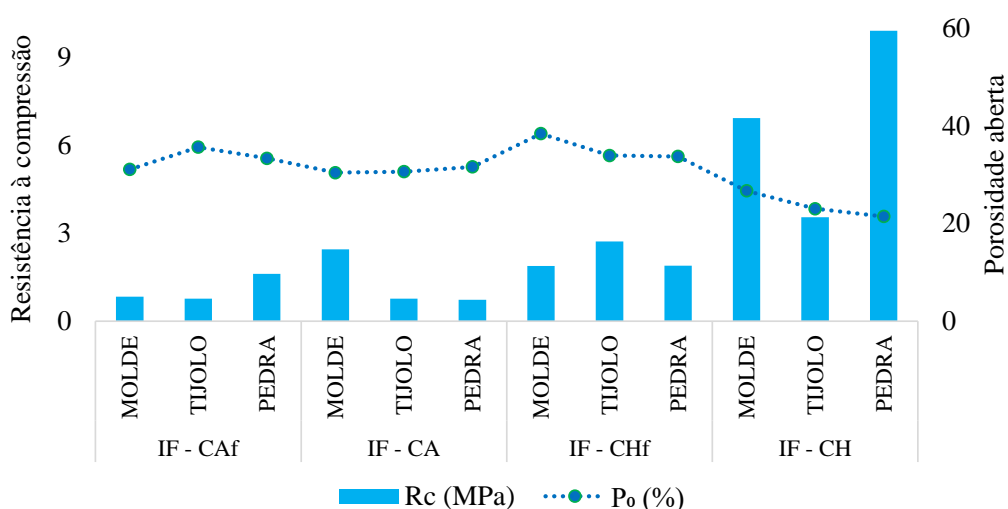


Figura 5.6 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) das argamassas - Cura corrente

Inicia-se a análise da figura 5.6, destacando os altos valores da resistência à compressão ( $R_c$ ) obtidos para as argamassas IF-CH, usualmente não expetados, sendo os valores recomendados para rebocos em edifícios antigos, na faixa de 0,40 a 2,50 MPa (vd. quadro 2.2).

No que se refere às resistências mecânicas para as argamassas de cal, Rato (2004), observou na literatura estudada uma dificuldade em estabelecer uma relação clara entre a porosidade aberta e a resistência mecânica, embora possa ter concluído, haver uma ligeira tendência para que a resistência diminua com o aumento da porosidade. Ainda, citando os estudos de Henrique et al. (2005), que observou para as argamassas de cal hidráulica, haver uma ligeira tendência para que a resistência à compressão diminua com o aumento da porosidade aberta. Citando os estudos de Mosquera et al (2000), que mostraram que algumas argamassas apresentaram elevados valores para a porosidade aberta como também para as resistências à compressão.

Os estudos de Rodrigues (2004), referenciam que para as argamassas de cal aérea, genericamente, pode-se confirmar a tendência esperada: à medida que aumenta a porosidade, diminui a resistência mecânica. Contrariando ao exposto Rato (2004) citou, Lanás e Alvarez (2003), que observaram para as argamassas de cal hidráulica e cal aérea, que o aumento da resistência mecânica se relaciona com o aumento da porosidade aberta e com a quantidade de ligante. E Rato (2004) que a o comportamento das argamassas de cal aérea e misturas de areias, não dependem da porosidade aberta, mas essencialmente da porometria.

Os resultados de Torres (2014), quanto à influência dos suportes, mostrou haver um aumento da resistência à compressão das argamassas destacadas dos suportes comparativamente com as argamassas em moldes laboratoriais.

Os resultados obtidos na figura 5.6, são retratos das diversas observações apontadas anteriormente. Porém, 75% das argamassas, tiveram a resistência à compressão aumentada com a diminuição da porosidade e vice-versa, após aplicadas aos suportes. O quadro 5.2, ajuda a explicar o comportamento observado. As argamassas destacadas dos suportes que tiveram o aumento do volume de poros entre 0,05 a 10  $\mu\text{m}$ , viram abaixar a resistência à compressão em relação às argamassas em moldes laboratoriais, para um mesmo traço e ligante. E vice-versa, viram a resistência à compressão aumentar em relação aos moldes laboratoriais, com a diminuição do volume de poros entre 0,05 a 10  $\mu\text{m}$ .

Em valores absolutos, as variações encontradas entre os resultados obtidos para a resistência à compressão em moldes laboratoriais com as argamassas destacadas dos suportes variaram entre  $\pm 1\%$  (IF-CH<sub>f</sub>-P) e  $\pm 234\%$  (IF-CA-P), em média 83%. Diante de uma variação tão expressiva, é pertinente referenciar o que apontou Rato (2006) sobre o observado por Henriques, F. (2004)

- as resistências mecânicas não constituem o grupo de propriedades mais condicionantes no comportamento das argamassas.

#### 5.4. Análise comparativa das argamassas - Cura com envelhecimento acelerado

Para a visualização de todas as etapas dos resultados, manteve-se nas figuras os resultados obtidos para as argamassas em moldes laboratoriais, porém a comparação destes resultados, foram contempladas na etapa anterior.

##### 5.4.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Na figura 5.7, tem-se os valores obtidos para massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ), para as argamassas de cal hidráulica destacadas dos suportes, cura corrente e após envelhecimento acelerado.

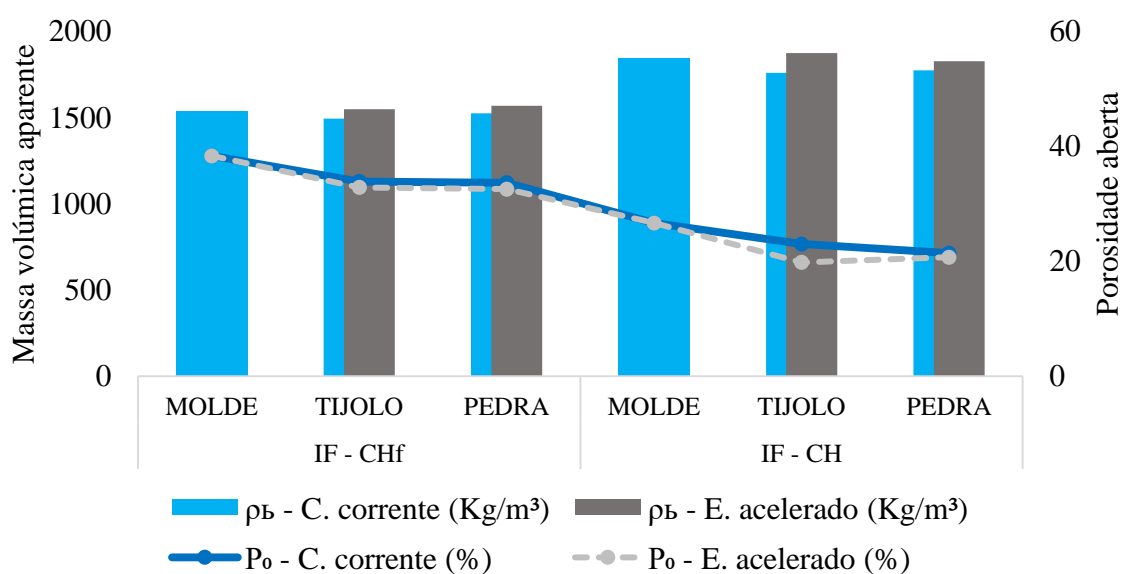


Figura 5.7 - Massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ) e porosidade aberta ( $P_0$ ) das argamassas - Cura 30/90 dias e após envelhecimento acelerado

Assim, como nos resultados de Torres (2014) e Rodrigues (2004), a porosidade aberta diminuiu e a massa volúmica aparente aumentou com o envelhecimento acelerado para todos os suportes e argamassas. A redução da porosidade variou de  $\pm 3\%$  (TF-CH<sub>f</sub>-TM; IF-CH<sub>f</sub>-P; IF-CH-P) a  $\pm 14\%$  (IF-CH-TM), com o envelhecimento acelerado.

#### 5.4.2. Absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem

Observa-se na figura 5.8, onde são apresentados os resultados para o coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ), das argamassas de cal hidráulica, destacadas dos suportes, sujeitas aos processos de cura corrente e com envelhecimento acelerado, que, as argamassas IF-CH<sub>f</sub>-TM e IF-CH<sub>f</sub>-P, se tornaram menos permeáveis à água, com uma redução que variou de  $\pm 4\%$  (IF-CH<sub>f</sub>-P) a  $\pm 5\%$  (IF-CH<sub>f</sub>-TM), enquanto as argamassas IF-CH-TM ( $\pm 54\%$ ) e IF-CH-P ( $\pm 38\%$ ), tornaram-se mais permeáveis à água, com a cura com envelhecimento acelerado. De uma forma geral, uma vez que a porosidade aberta diminuiu com a cura com o envelhecimento acelerado, expectava-se que as argamassas tornassem menos permeáveis à água, também (Rodrigues, 2004).

Os dados utilizados para as argamassas de cal hidráulica com areia corrente, fazem parte das investigações realizadas por João Braz, para o projeto IF-Mortar (vd. 4.1). Por falta de dados complementares que possam aclarar este comportamento, nenhuma justificativa será apresentada.

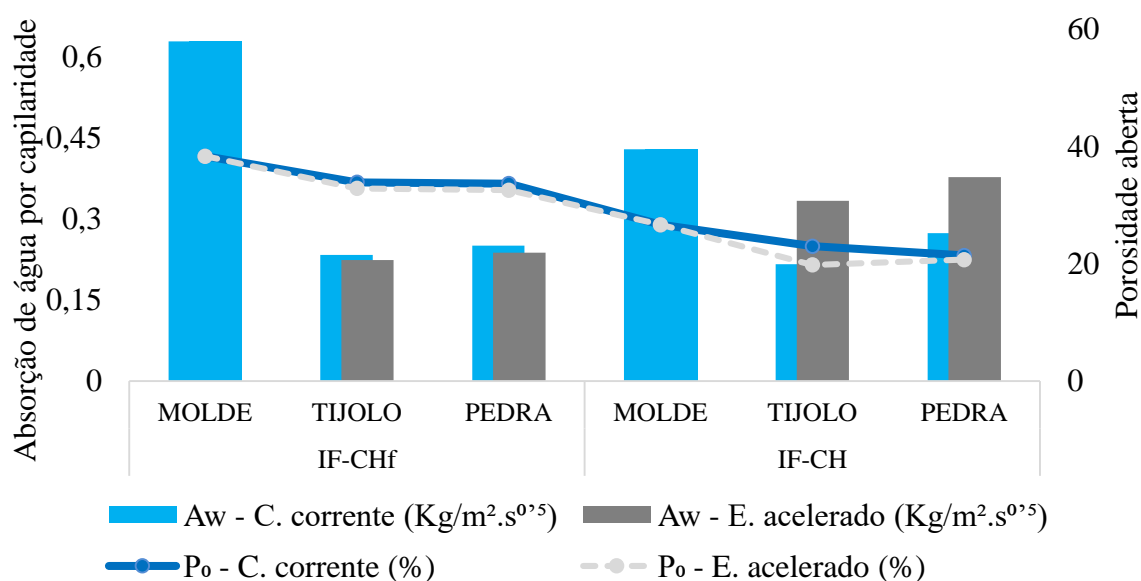


Figura 5.8 - Absorção de água por capilaridade ( $A_w$ ) das argamassas – Cura 90 dias e após envelhecimento acelerado



Verifica-se também, que para um mesmo traço de argamassa, a absorção de água por capilaridade continuou menor, com a cura com envelhecimento acelerado, para o suporte com maior porosidade aberta.

Na figura 5.9 apresentam-se os resultados para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas de cal hidráulica, destacadas dos suportes, sujeitas aos processos de cura corrente e envelhecimento acelerado, e pode-se observar que as argamassas de cal hidráulica apresentaram o comportamento dentro do esperado – a diminuição da porosidade correspondeu a uma diminuição do coeficiente de permeabilidade ao vapor, com a cura com envelhecimento acelerado.

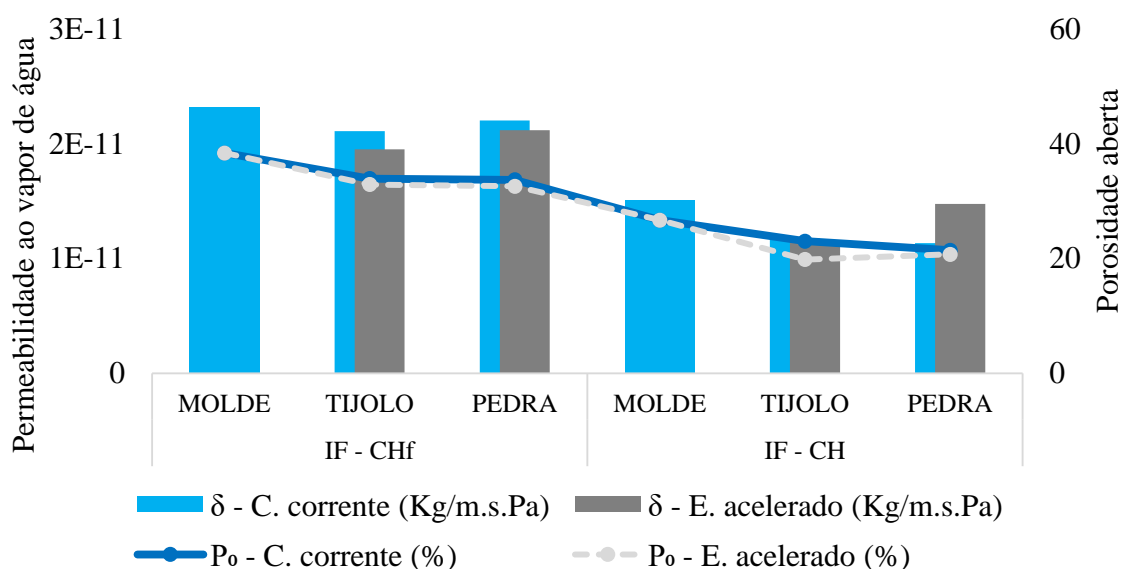


Figura 5.9 - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) das argamassas – Cura 90 dias e após o envelhecimento acelerado

No que se refere a  $\delta_{(\text{IF-CH-P})}$ , que teve um aumento absoluto da permeabilidade ao vapor, com o envelhecimento acelerado, pode-se dizer, no entanto, que ele é um aumento relativo comparando-se a  $\delta_{(\text{molde})}$  com a  $\delta_{(\text{IF-CH-P})}$ . Também é relativo e dentro do esperado, comparando com os valores da porosidade ( $P_0$ ) das argamassas: a  $P_0_{(\text{IF-CH-TM-e.a.})}$  é menor  $\pm 4\%$  que a  $P_0_{(\text{IF-CH-P-e.a.})}$ ; logo a  $\delta_{(\text{IF-CH-TM-e.a.})}$  também teria que ser menor do que a  $\delta_{(\text{IF-CH-P-e.a.})}$ , como ocorreu. De forma genérica, pode-se considerar que a permeabilidade ao vapor diminui com a cura com envelhecimento acelerado.

Constata-se ainda que houve uma diminuição em torno de 5% do coeficiente de permeabilidade

ao vapor de água ( $\pm 3\%$  para IF-CH-TM,  $\pm 4\%$  IF-CH<sub>f</sub>-P e  $\pm 8\%$  IF-CH<sub>f</sub>-TM) com o envelhecimento acelerado.

Quanto à influência do tipo específico de suporte, observa-se que os valores mais baixos para a permeabilidade ao vapor das argamassas, com o envelhecimento acelerado, para um mesmo tipo de traço e ligante, corresponderam ao suporte com maior porosidade aberta e com menor permeabilidade ao vapor de água, neste caso, o tijolo cerâmico maciço.

Na figura 5.10 apresentam-se os resultados para índice de secagem ( $I_s$ ) das argamassas de cal hidráulica, destacadas dos suportes, sujeitas aos processos de cura corrente e envelhecimento acelerado. Observa-se que houve o aumento no índice de secagem de 9% para as argamassas de cal hidráulica com areia fina (IF-CH<sub>f</sub>-TM e IF-CH<sub>f</sub>-P) e para as argamassas de cal hidráulica com areia corrente uma diminuição média de  $\pm 35\%$  ( $\pm 37\%$  para a IF-CH-TM e  $\pm 33\%$  para a IF-CH-P), com o processo de envelhecimento.

Já foi referenciado nesta literatura não haver um comportamento padrão para o índice de secagem, podendo tanto aumentar como diminuir com o envelhecimento das argamassas.

Quanto à influência do tipo de suporte, observa-se que os valores mais baixos para a resistência à secagem das argamassas, com o envelhecimento acelerado, para um mesmo tipo de traço e ligante, corresponderam ao suporte com maior porosidade aberta e com menor índice de secagem, neste caso o tijolo cerâmico maciço.

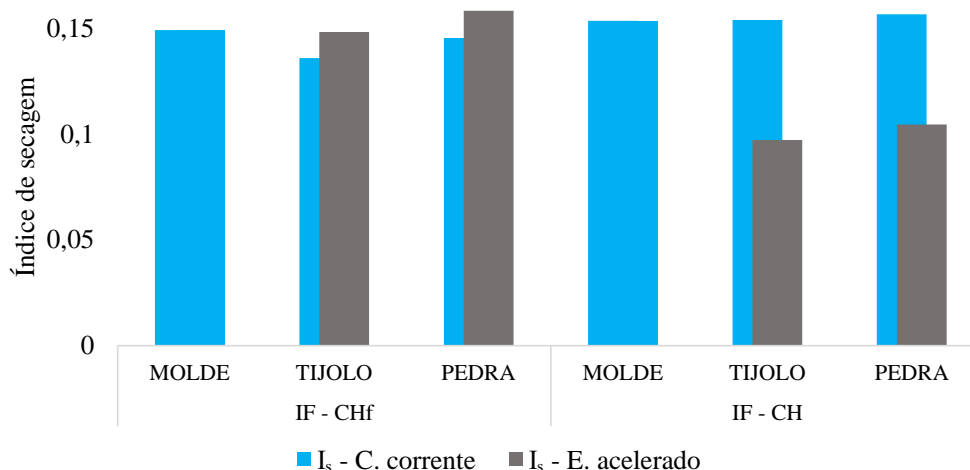


Figura 5.10 - Índice de secagem ( $I_s$ ) – Cura 90 dias e após o envelhecimento acelerado

### 5.4.3. Resistência à compressão

Na figura 5.11 são apresentados os resultados para a resistência à compressão ( $R_c$ ), das argamassas de cal hidráulica, destacadas dos suportes, sujeitas aos processos de cura corrente e envelhecimento acelerado.

Não existe uma tendência para o comportamento no que tange à resistência à compressão com o envelhecimento acelerado, porém aceita-se que há uma propensão ao aumento com o passar dos anos (Torres, 2014), especialmente para as argamassas de cal aérea (Rodrigues, 2004).

De modo geral, os resultados obtidos mostram uma redução significativa da resistência, porém os melhores resultados foram obtidos das argamassas aplicadas sobre o suporte com maior porosidade aberta – tijolo cerâmico maciço.

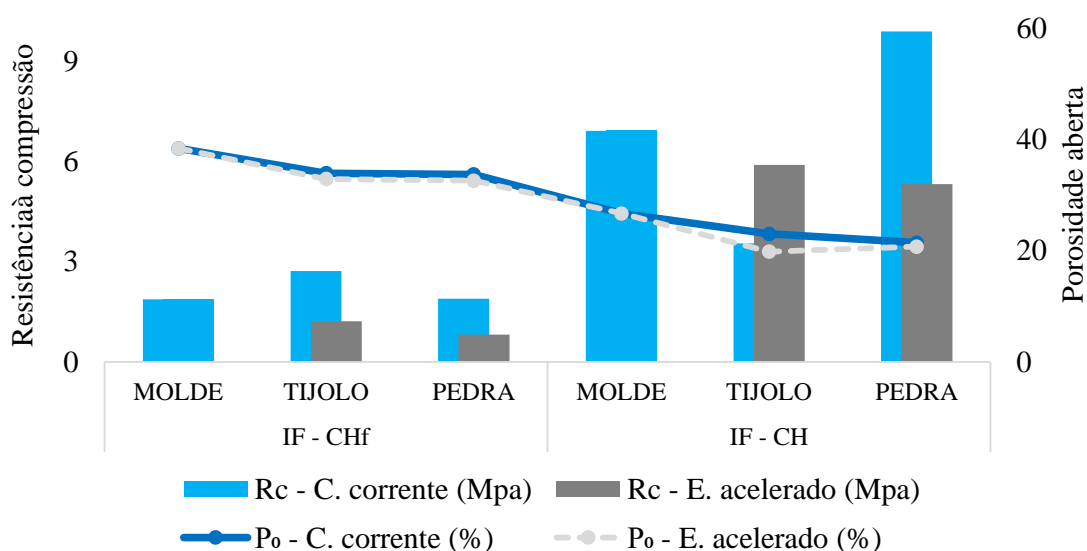


Figura 5.11 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) das argamassas - Cura 90 dias e após o envelhecimento acelerado

## 6. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

### 6.1. Análise global

É fator condicionante para o desempenho dos rebocos, a microestrutura das argamassas e que, por sua vez, está associada a um conjunto de fatores, essencialmente: os componentes, o traço, a aderência, a cura, os procedimentos de aplicação e o tipo de suporte.

As diversas análises de resultados desenvolvidas no capítulo 5, possibilitaram formular um conjunto de ilações relativas aos propósitos deste trabalho. Foram estabelecidas tendências, reiteraões, identificadas as contraposiões e justificadas.

Divulga-se agora o conjunto de observaões que permitem compreender como as características dos suportes tradicionais de tijolo cerâmico maciço <sup>(TM)</sup> e de pedra calcária <sup>(P)</sup> influenciaram o comportamento das argamassas de cal aérea <sup>(IF-CA e IF-CA<sub>f</sub>)</sup> e argamassas de cal hidráulica <sup>(IF-CH e IF-CH<sub>f</sub>)</sup>, utilizadas no revestimento alvenarias antigas.

Os traços, em volume, foram formulados em laboratório, sendo para as argamassas de cal aérea, 1:2 e para as argamassas de cal hidráulica, 1:3. Foi utilizada uma areia corrente com granulometria corrente com dimensão inferior aos 4 mm e uma areia fina com granulometria inferior aos 0,5 mm.

Para todos os parâmetros estudados, os resultados obtidos para as argamassas endurecidas nos suportes diferenciam-se dos resultados obtidos para as argamassas em moldes laboratoriais. Conclui-se que a caracterização das argamassas em moldes laboratoriais conduz à obtenção de resultados diferentes da caracterização das argamassas após aplicadas aos suportes do tipo modelo real reduzido:

(a) Quanto ao tipo de ligante, e processo de cura corrente, observou-se:

- Para um mesmo traço e tipo de ligante, genericamente, a porosidade aberta foi maior nas argamassas aplicadas sobre o suporte com maior porosidade aberta ( $P_{0(TM)} > 114\% P_{0(P)}$ ) e com dimensões de poros maiores ( $\varnothing^{\text{médio dos poros (TM)}} > 240\% \varnothing^{\text{médio dos poros (P)}}$ ), que foi o tijolo cerâmico maciço.

- Para um mesmo traço e tipo de ligante, a absorção de água por capilaridade foi menor nas argamassas aplicadas sobre o suporte com maior porosidade aberta, com dimensão de poros maiores e com maior absorção de água por capilaridade ( $A_w (TM) > 272\% A_w (P)$ ), que foi o tijolo cerâmico maciço.
- Após aplicadas aos suportes, ambas as argamassas tiveram distribuição de poros do tipo bimodal, sendo em média 54% poros de diâmetro entre 0,01 $\mu$ m e 10  $\mu$ m; 42% poros de diâmetro > 10  $\mu$ m e 3% poros de diâmetro < 0,05  $\mu$ m.
- Não houve uma tendência que correlacionasse o tipo de ligante, o tipo de suporte e a permeabilidade ao vapor de água.
- Para um mesmo traço e tipo de ligante, a resistência à secagem foi menor para o suporte com maior porosidade aberta, com dimensão de poros maiores e com menor índice de secagem ( $I_s (TM) < 4\% I_s (P)$ ), que foi o tijolo cerâmico maciço.

(b) Quanto ao tipo de agregado, e processo de cura corrente, observou-se:

- Para um mesmo traço e tipo de ligante, genericamente, com a utilização de agregados mais finos, a porosidade aberta, o coeficiente de absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao vapor de água tiveram valores mais elevados e menor resistência à secagem que as argamassas com agregados correntes.

(c) Quanto ao tipo de cura das argamassas de cal hidráulica aplicadas nos suportes, após a cura com envelhecimento acelerado, pode-se constatar:

- A porosidade aberta diminuiu e a massa volúmica aparente aumentou com o envelhecimento acelerado para todos os suportes e argamassas. Não houve uma tendência para este comportamento no que tange ao tipo de suporte.
- As argamassas de cal hidráulica com areia fina tornaram-se menos permeáveis à água, e, inversamente, as argamassas de cal hidráulica tornaram-se mais permeáveis à água com a cura por envelhecimento acelerado. Em todas as situações, a absorção de água por capilaridade foi menor nas argamassas aplicadas sobre o suporte com maior porosidade aberta, com dimensão de poros maiores e com maior absorção de água por capilaridade ( $A_w (TM) > 272\% A_w (P)$ ), que foi o tijolo cerâmico maciço, tal como aconteceu no processo de cura corrente.

- De forma genérica, pode-se considerar que a permeabilidade ao vapor das argamassas diminuiu com a cura com o envelhecimento acelerado. O pior desempenho foi para o suporte com menor permeabilidade ao vapor ( $\delta_{(TM)} < 7\% \delta_{(P)}$ ), que foi o tijolo cerâmico maciço.

- Houve aumento no índice de secagem para as argamassas de cal hidráulica com areia fina e para as argamassas de cal hidráulica com areia corrente, uma diminuição. A menor resistência à secagem foi obtida para as argamassas aplicadas sobre o suporte com melhor capacidade de secagem, que foi o tijolo cerâmico maciço, tal como aconteceu no processo de cura corrente.

Os desvios padrão e coeficiente de variação encontrados nos resultados dos ensaios à compressão foram elevados. Avalia-se, assim, que não foram conclusivos os resultados no que tange a resistência à compressão. Porém, aceita-se que há uma propensão ao aumento do seu valor ao longo do tempo.

Em síntese, pôde-se verificar que o suporte com maior porosidade aberta e com dimensão de poros maiores, neste caso, o tijolo cerâmico maciço, teve relevante influência nas propriedades das argamassas, no que se refere à porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e índice de secagem.

A propriedade com maior variabilidade entre as comparações de resultados para as argamassas em moldes laboratoriais e as destacadas do suporte, foi a absorção de água por capilaridade. As variabilidades encontradas foram: porosidade aberta ( $\pm 13\%$  a  $16\%$ ), absorção de água por capilaridade ( $\pm 69\%$  a  $169\%$ ), permeabilidade ao vapor de água ( $\pm 7\%$  a  $38\%$ ) e índice de secagem ( $\pm 0,3\%$  a  $14\%$ ).

Ao final deste trabalho de investigação, esperava-se responder, para as situações ensaiadas, quais os parâmetros que influenciariam o comportamento das argamassas após aplicadas aos suportes, e se, após a cura com o envelhecimento acelerado, as argamassas se comportariam de forma semelhante, para um mesmo tipo de suporte, e de que forma a escolha dos agregados interfeririam no comportamento das argamassas. Em um segundo plano, pretendia-se contribuir para auxiliar os técnicos nos conhecimentos necessários para intervenções em edifícios antigos com e sem valor histórico, garantindo a compatibilidade de elementos antigos e novos sem criar novos pontos de tensões, com soluções pouco invasivas, de durabilidade satisfatória e harmônica.

Terminada esta investigação, pode-se dizer que os objetivos foram atingidos, embora existam ainda pontos a serem esclarecidos, conforme indicado.

## 6.2. Estudos futuros

Enunciam-se alguns trabalhos que ampliariam os conhecimentos adquiridos e elucidariam os pontos divergentes encontrados.

- I. Ensaios que estavam previstos serem executados e que em função da situação pandêmica, ou em função das indisponibilidades de equipamentos não foram realizados ou encontram-se aguardando resultados:
  - Completar os resultados do envelhecimento acelerado para as argamassas de cal aérea;
  - Execução dos ensaios de módulo de elasticidade;
  - Execução de ensaios de aderência;
  - Execução de ensaios de resistência à ação de sais solúveis (cloretos e sulfatos);
  - Ensaios de variação dimensional;
  - Execução do ensaio de microscopia ótica e eletrônica.
  - Realização de novos ensaios com o humedecimento e sem o humedecimento dos suportes, para avaliar a influência na porosidade aberta.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, P. (2008). “Caracterização de Argamassas Tradicionais e Históricas de Edifícios Religiosos do Alentejo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Química da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1 vol..

Carasek, H., Paes, I., Bauer, E., (2005). “Influência da Estrutura de poros de Argamassas Mistas e de Blocos de Concreto e Cerâmico no Desempenho dos Revestimentos”. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, VI SBTA / I International Symposium on Mortars Technology, Florianópolis.

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

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

CEN (2002). “Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion”, ISO 15148, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2013). “Conservation of cultural heritage: test methods: determination of drying properties”. EN 16322, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2016). “Hygrothermal performance of building materials and products: determination of water vapor transmission properties”. EN ISO 12572, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2019). “Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11, European Committee for Standardization, Brussels.



Chaves, A. e Whitaker, W. (2009). “Operações de Beneficiamento da Areia”. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Governo Federal Manual de Agregados para a Construção Civil, p.131 a 157.

Colen, I, Silva,L., Brito, J. e Freitas, V. (2016). “Drying index for in-service physical performance assessment of renders”. ELSEVIER – Journal of Construction and Building Materials, Issue 112, pp1101-1109.

Costa, E., John, V. (2011). “Aderência Substrato-Matriz Cimentícia – Estado da Arte”. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Belo Horizonte.

ECIVIL@(2021). <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pozolana.html>. ECIVIL-Descomplicando a Engenharia (página internet oficial), Brasil.

Guerreiro, C., Henriques, F., Pinto, A. (2007). “Análise Comparativa de Argamassas de Cal Aérea, Medianamente Hidráulicas e de Ligantes Mistos Para Rebocos de Edifícios Antigos”. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas/APFAC, Lisboa.

Guimarães, J., Gomes, R. e Seabra, M. (2004). “Guia das Argamassas nas Construções. Construindo Para Sempre Com Cal Hidratada”. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 8ª Edição, Brasil.

IPQ (2000). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise Granulométrica – Método de Peneiração”. NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2002). “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”. NP EN 1097-3, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2008). “Métodos de ensaio de argamassas para Alvenaria, Parte 19: Determinação de permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas”. NP EN 1015-19, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2008). “Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta”. NP EN 1936, Instituto Português da Qualidade Caparica.

IPQ (2015). “Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade”. NP EN 459-1, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

ISO (2005). “Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry”. 15901-1, International Organization for Standardization, Geneva.

Japiassú, P (2011). “Estudo do Mecanismo de Aderência de Azulejos e Argamassas de Cal em Revestimentos Históricos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiás, 1 vol..

Kazmierczak, C., 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, ISSN 1808-7310, Rio Grande do Sul, Vol. 3, n° 1:47-58.

LHOIST@(2021). <https://www.lhoist.com/br/Br/cal-ao-longo-da-história>. Grupo Lhoist Produtor de Cais (página internet oficial), Bélgica.

Margalha, M. (2011). “Conservação e Recuperação do Património”, <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4969/1/Argamassas.pdf>, Documento de Apoio às Aulas de Conservação e Recuperação do Património, Universidade de Évora, Évora.

Muller, A. (2010). “Avaliação da Aderência dos Diferentes Tipos de Chapisco Sobre Substrato de Concreto”. Trabalho de Diplomação, Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1 vol..

Pinho, F. (1997). “Sistematização do estudo sobre paredes de edificios antigos”. Ingenium, 2º série, Nº19, Julho 1997, pp. 49-59.

Rato, V. (2006). “Influência da Estrutura Morfológica No Comportamento das Argamassas”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1 vol..

RILEM (1980). "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Commission 25- PEM: Protection et Erosion des Monuments". RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages, France, pp. 175-253

Rodrigues, M. (2004). “Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas: Contribuição para o Estudo da Influência dos Ligantes”. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1vol..

Roque, J. (2002). “Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 1 vol..

Scartezini (2002). “Influência do Tipo e Preparo do Substrato na aderência dos revestimentos de Argamassas: Estudo da Evolução ao Longo do Tempo, Influência da Cura e Avaliação da Perda de Água da Argamassa fresca”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiás, 1 vol..

Torres, I. (2014). “Influência da absorção do suporte na argamassa de revestimento. Relatório de Pós-Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol..

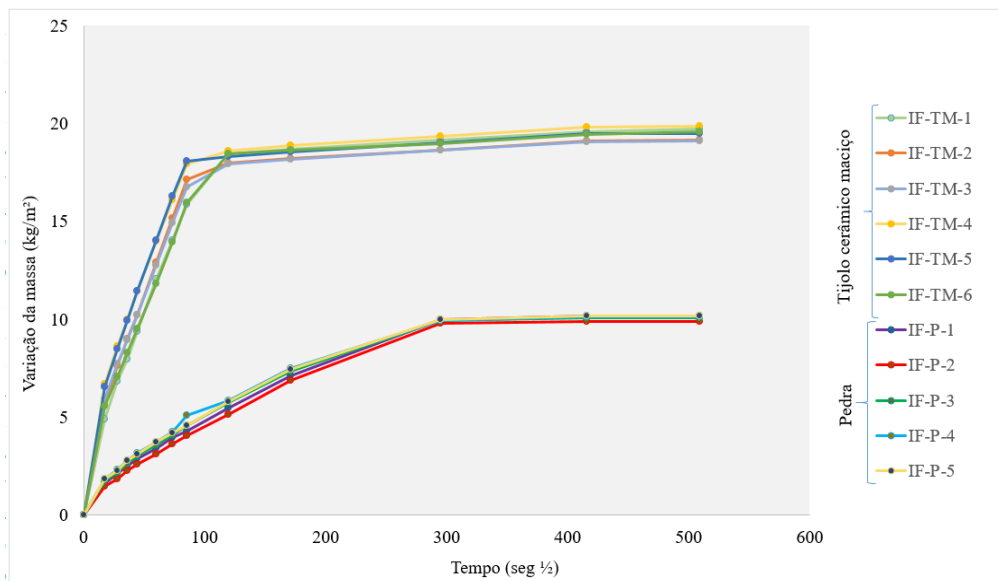
Torres, I., Colen, I., Silveira, D., Travincas, R. e Matias, G. (2020). “Interface Argamassa\_suporte: Análise das Características Físicas com Base em Várias Campanhas Experimentais”. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 331-342.

Veiga, M. (1998). “Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes - Contribuição Para o Estudo da Sua Resistência à Fendilhação”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto, 1 vol..

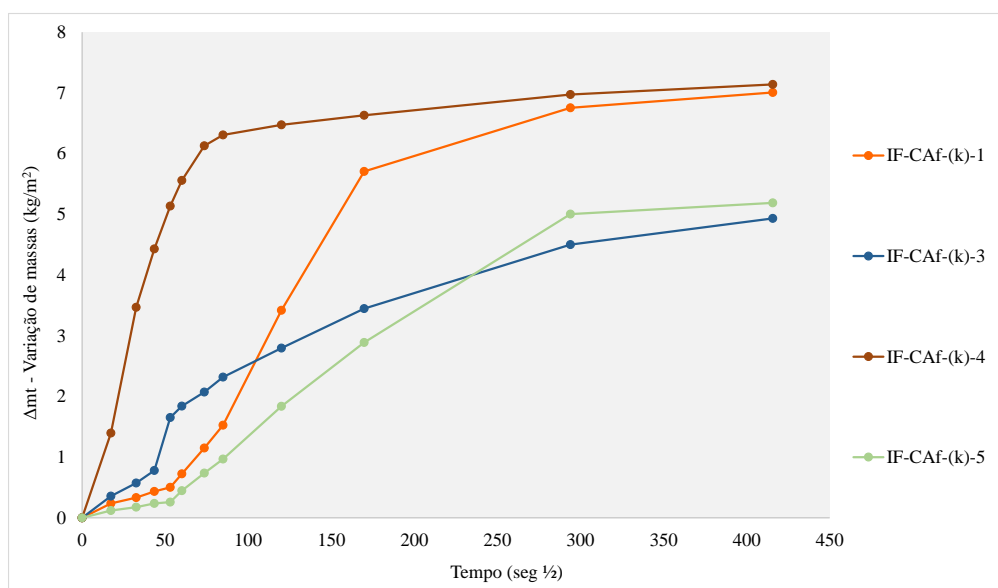
Veiga, M. (2003). “Argamassas para Revestimento de Paredes de Edifícios Antigos. Características e Campo de Aplicação de Algumas Formulações Correntes”. Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE, Lisboa, Actas do 3º ENCORE.

Velosa, A. (2006). “Argamassas de Cal com Pozolanas para Revestimentos de Paredes Antigas”. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 1 vol..

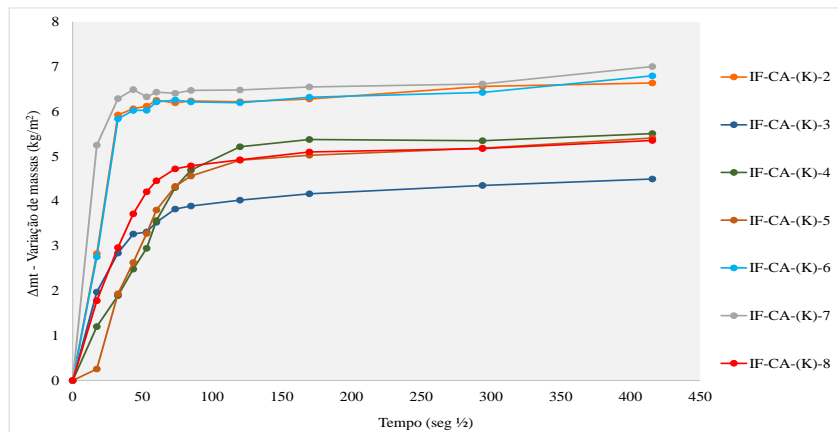
## ANEXO A – Curvas de absorção de água por capilaridade



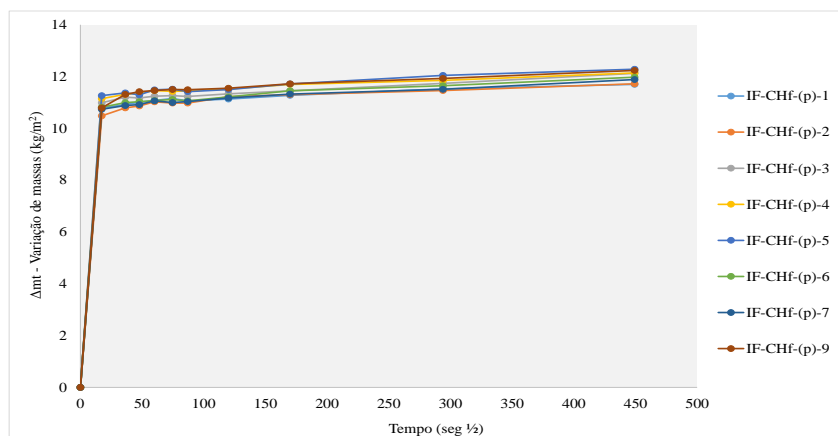
Anexo A.1 - Curvas de absorção de água por capilaridade dos suportes



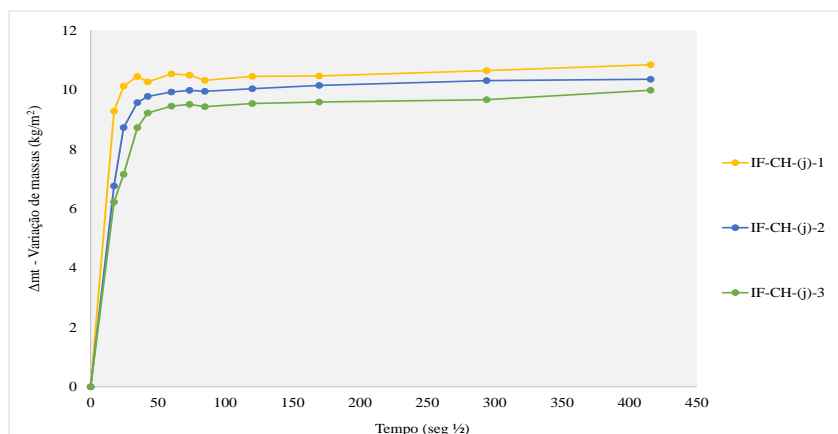
Anexo A.2 - Curva de Absorção de água por capilaridade - IF-CA<sub>f</sub>-cc



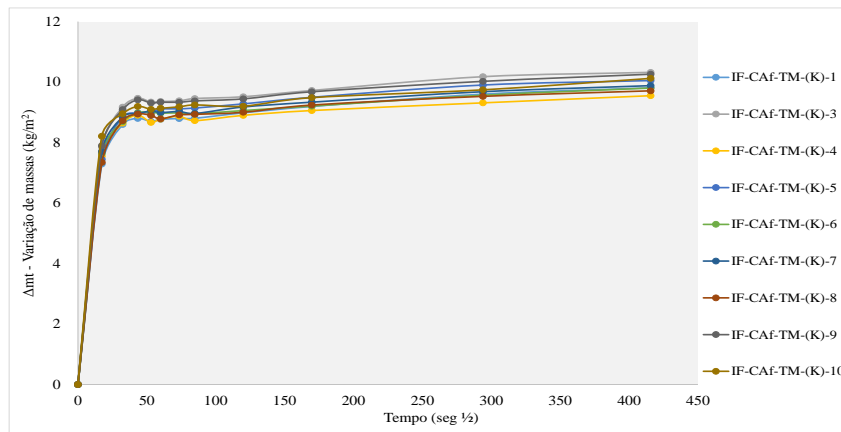
Anexo A.3 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CA-cc



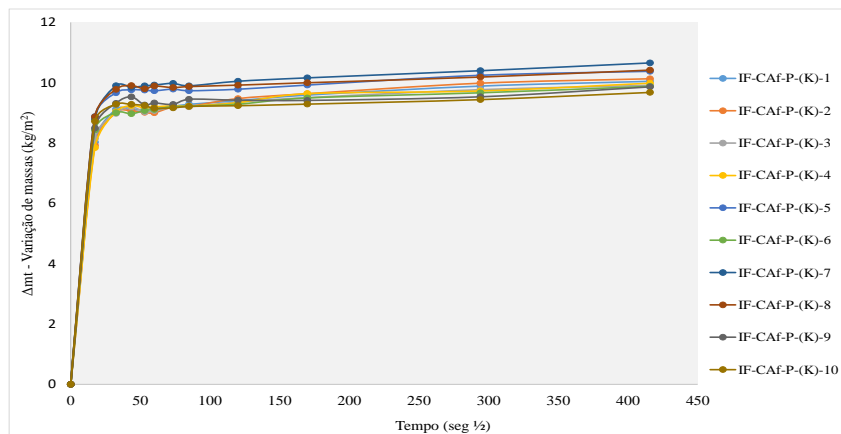
Anexo A.4 - Curvas de absorção de água por apilaridade - IF-CH<sub>f</sub>-cc



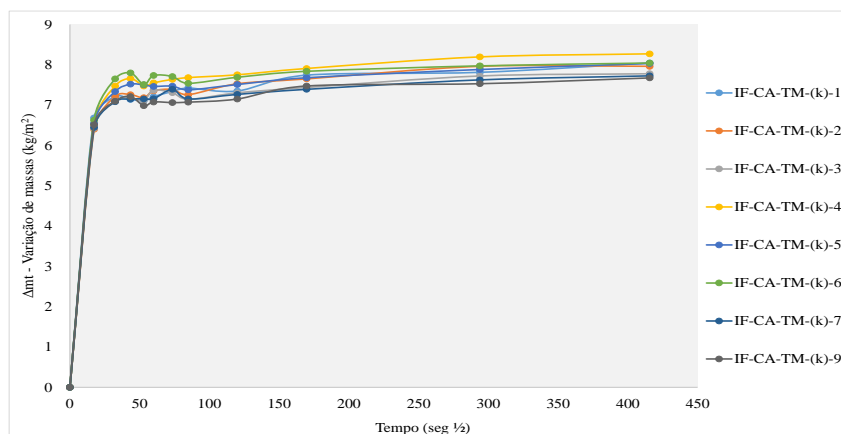
Anexo A.5 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CH-cc



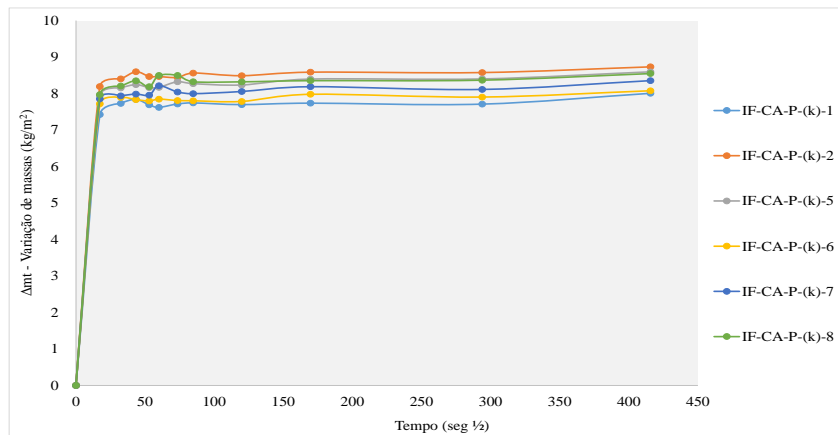
Anexo A.6 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CAF-TM-cc



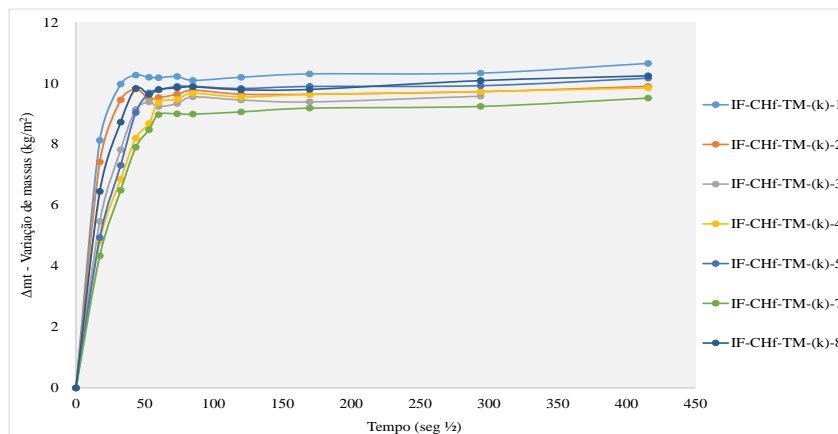
Anexo A.7 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CAF-P-cc



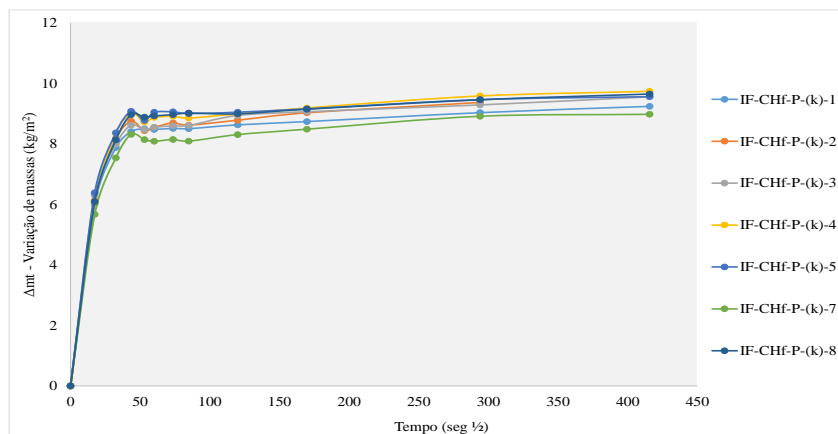
Anexo A.8 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CA-TM-cc



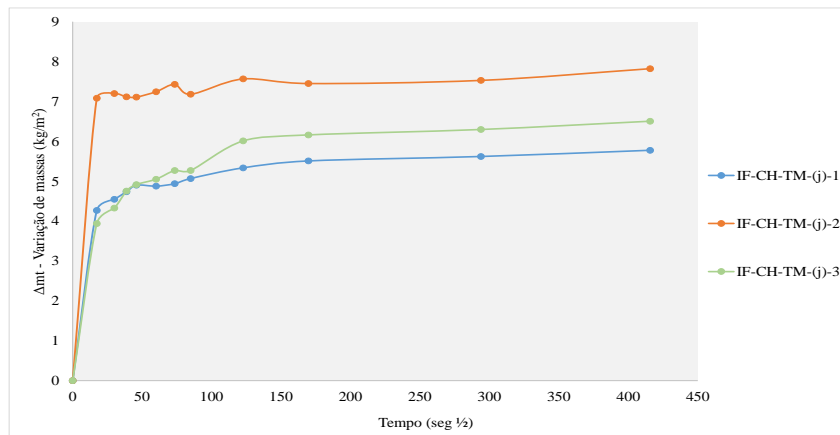
Anexo A.9 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CA-P-cc



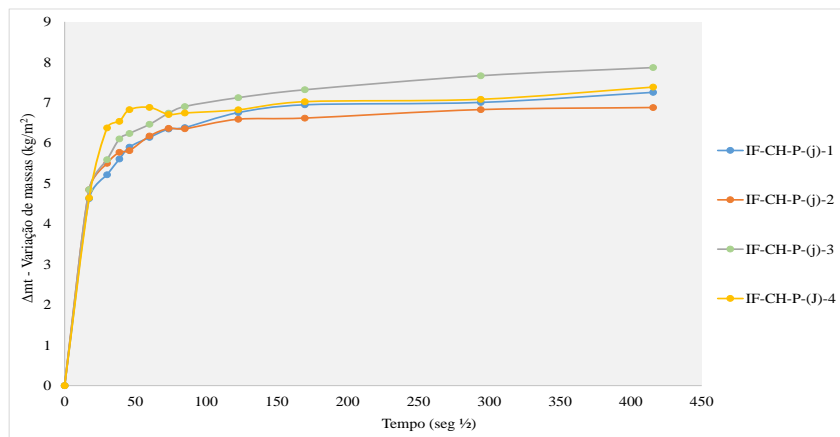
Anexo A.10 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CHF-TM-cc



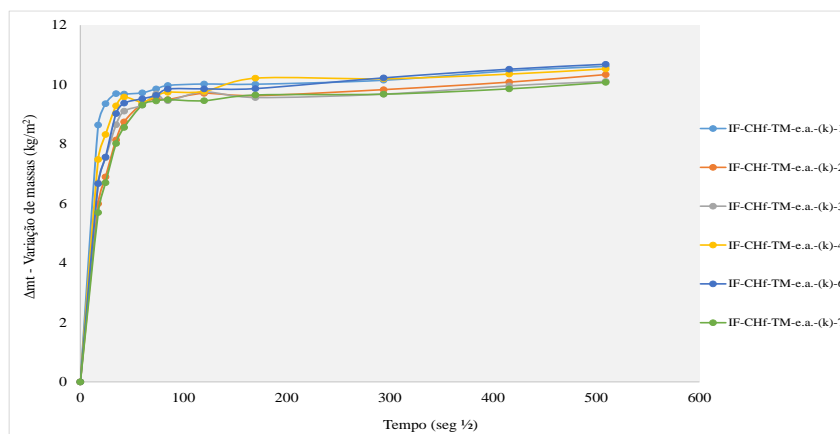
Anexo A.11 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CHF-P-cc



Anexo A.12 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CH-TM-cc

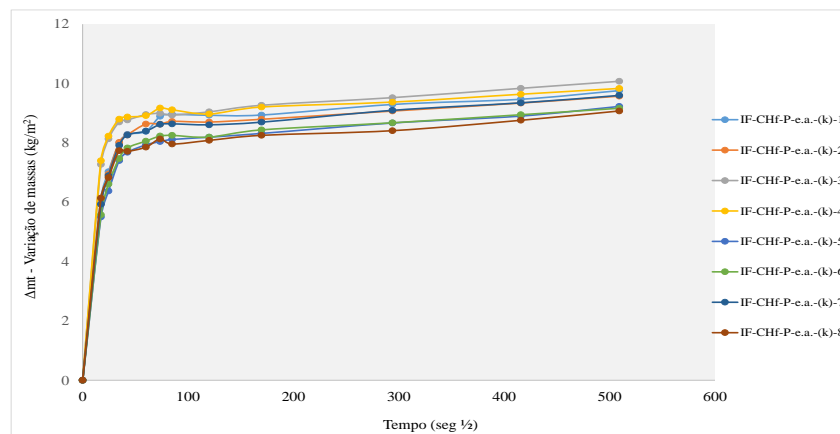


Anexo A.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CH-P-cc

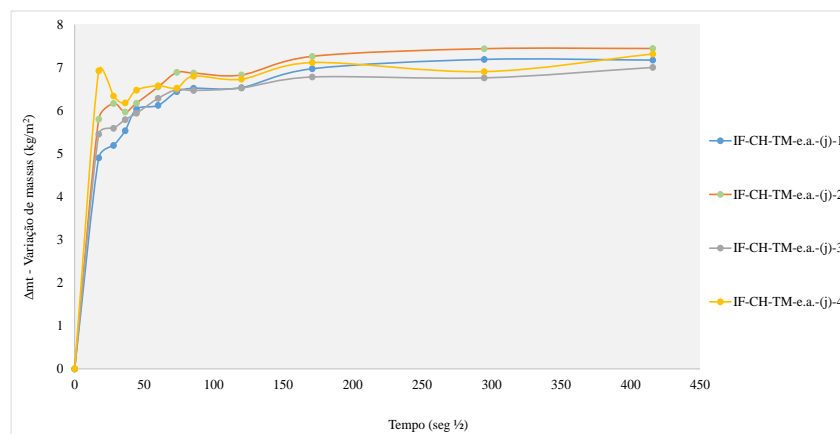


Anexo A.14 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CHf-TM-e.a.

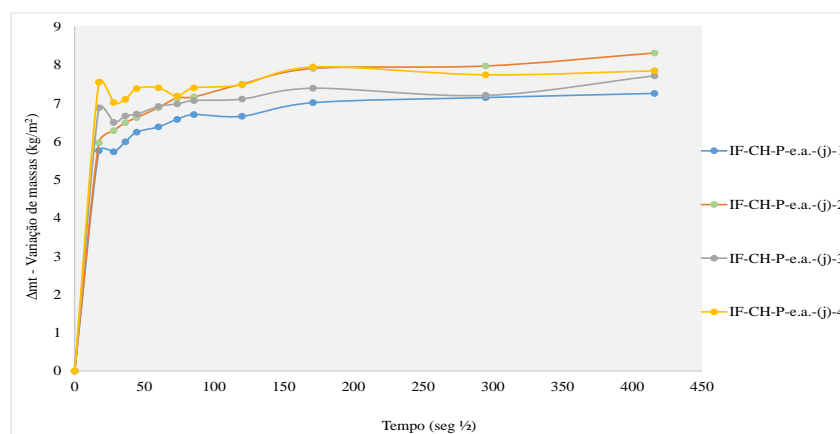




Anexo A.15 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CHf-P-e.a.



Anexo A.16 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CH-TM-e.a.



Anexo A. 17 - Curvas de absorção de água por capilaridade - IF-CH-P-e.a.