

**Caracterização de Caldas Fluidas para Injeção em
Alvenaria Antiga.
Estudo da Aderência em Tijolos e da Durabilidade.**

Fredy Wilson Montrond do Rosário

Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Outubro 2019

**Caracterização de Caldas Fluidas para Injeção em
Alvenaria Antiga.
Estudo da Aderência em Tijolos e da Durabilidade.**

Fredy Wilson Montrond do Rosário

Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientadora:

Prof.^a Eduarda Cristina Pires Luso

Outubro 2019

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha orientadora, Professora Eduarda Cristina Pires Luso, pela orientação, empenho e disponibilidade.

Ao Instituto Politécnico de Bragança, que muito contribui na minha formação.

A equipa técnica do Laboratório Materiais de Construção e de Laboratório de Estruturas e Resistência do Materiais: João Pires, Octávio Pereira e Luísa Barreira.

Aos meus pais, em especial à minha mãe por tudo, pela confiança, apoio incondicional e todos os esforços feitos. Amo-te. Aos meus irmãos e família pelo apoio, pelas palavras de conforto e ânimo. Às famílias que me escolheram e acolheram nesta jornada em que não pude ter a minha família de sangue por perto. Agradeço à família Vieira. Muito obrigado

À minha namorada e amiga, pela força, companheirismo e dedicação.

Aos meus amigos, que foram a minha família e o meu pilar nesta caminhada.

RESUMO

A presente dissertação, de cariz experimental, aborda a técnica de injeção de paredes de alvenaria antiga para sua consolidação e em particular estuda, duas caldas apropriadas para injeção e seu comportamento face a suportes de tijolo.

Neste estudo compara-se o desempenho físico de duas caldas à base de cal, com composições diferentes de modo a avaliar as suas características. Uma é composta por cal hidratada, cimento branco, metacaulino e água, sendo que a outra é composta por cal hidráulica, cimento branco e água.

A durabilidade das caldas foi feita com ensaio de molhagem e secagem e ensaios de envelhecimento acelerado em câmara climática variando a temperatura e a humidade relativa. Para a avaliação do comportamento mecânico foram realizados ensaio no estado endurecido relativos à resistência à flexão e à compressão e ensaio de aderência entre a calda e o tijolo.

Palavras-Chave: injeção de paredes, alvenaria antiga, caldas à base de cal, aderência, durabilidade.

ABSTRACT

The present dissertation, on natural terms (natural effects), approach the technique of injection of old masonry walls for its consolidation and it studies in particular two appropriate grouts (for injection) and their behavior against brick supports.

In this study there is a comparison of the physical performance of two lime based grouts, with different compositions in order to evaluate their characteristics. One is composed of hydrated lime, white cement, metakaolin and water, while the other is composed of hydraulic lime, white cement and water.

The durability of the grout was done by wet and dry test and accelerated aging tests in climatic chamber varying the temperature and relative humidity. For the evaluation of the mechanical behavior, tests were performed in the hardened state concerning the flexural and compressive strength and adhesion test between the grout and the brick.

Key words: wall injection, old masonry walls, lime based grouts, adhesion, durability.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivo do estudo	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. Alvenaria antiga de tijolo	4
2.1. Construções antigas em alvenaria de tijolo	4
2.2. Principais Anomalias.....	8
3. Calda para injeção. Estado de conhecimento	10
3.1. Consolidação com calda de injeção	10
3.2. Durabilidade	14
4. Descrição do programa experimental.....	15
4.1. Considerações Iniciais.....	15
4.2. Materiais constituintes das caldas	15
4.2.1. Cal hidratada	16
4.2.2. Metacaulino.....	16
4.2.3. Superplastificante.....	17
4.2.4. Cal hidráulica natural	17
4.2.5. Cimento branco	18
4.3. Processo de elaboração das caldas	18
5. Apresentação e discussão de resultados	19
5.1. Ensaio de Fluidiez	19
5.2. Determinação da exsudação	20
5.3. Ensaio de flexão	21
5.4. Ensaio de compressão	23
5.5. Ensaio de aderência tijolo/calda	25
5.6. Ensaio de molhagem e secagem.....	31

5.6.1. Variação de Massa	31
5.6.2. Variação de Volume	33
5.7. Avaliação da Durabilidade por Ensaio de Envelhecimento Acelerado	34
5.8. Ensaio de flexão após o ensaio de envelhecimento acelerado	37
6. Conclusões e trabalhos futuros.....	39
6.1. Conclusões finais.....	39
6.2. Trabalhos futuros.....	40
7. Referências	41
ANEXO I	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1– Construções antigas em tijolo: a) alvenaria em tijolo; b) alvenaria em tijolo e estrutura em madeira.....	1
Figura 2 - Utilização de adobe em alvenaria (Espanha).	5
Figura 3 - Churrasqueira com tijolos refratários.	6
Figura 4 - Construção antiga em tijolo maciço.	6
Figura 5 - Arco feito com tijolos furados.....	7
Figura 6 - Misturador utilizado na elaboração das caldas, modelo Rubimix 10; aspeto das caldas: b) durante a mistura; c) após a mistura.....	19
Figura 7 - Dimensões dos provete e posicionamento dos cilindros [27].	21
Figura 8 - Rotura dos provetes quando submetidos à esforços de flexão.	23
Figura 9 - (a) Moldagem com a composição 1; (b) Moldagem com a composição 2; (c) Ensaio de compressão.....	24
Figura 10 - a) Aspeto visual do tijolo, b) Aplicação do acetato, c) Aplicação da calda com uma seringa.	26
Figura 11 - – Provete aos 90 dias de idade: a) remoção do acetato; b) lixagem da pastilha; c) aplicação pistola de ar.	27
Figura 12 – a) aplicação da pastilha metálica; b) fissura na pastilha da calda CHL....	27
Figura 13 - Ensaio para determinação da aderência calda/tijolo.....	28
Figura 14 - Rotura pela interface	29
Figura 15 - Rotura pela cola.....	29
Figura 16- Rotura pela calda.....	29
Figura 17 - Rotura pelo tijolo.....	29
Figura 18 - Tipos de rotura registados nos ensaios: a) rotura pelo tijolo; b) rotura calda/tijolo.....	30
Figura 19 - Estado dos provetes após o fim dos ciclos.	34
Figura 20 - Ciclo usado no ensaio de 12 horas.	35
Figura 21 - Colocação de provetes na câmara de envelhecimento artificial acelerado.	36
Figura 22 - Estado dos provetes após o fim dos ciclos.	37
Figura 23 - Estado do provete após o ensaio de flexão.....	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das caldas com rácio água/cimento.....	16
Tabela 2 – Tempos total obtidos no ensaio de Cone de Marsh.....	20
Tabela 3 – Percentagens de exsudação.	21
Tabela 4 – Valores médios obtidos em ensaios de flexão (f_{cf}) e desvio padrão (s) aos 90 dias.	22
Tabela 5 - Valores médios obtidos em ensaios de compressão (σ) e desvios padrão (s) e, aos 90 dias.	24
Tabela 6 - Valor médio de tensão de rotura à tração.....	29
Tabela 7 - Esquema das condições de exposição usadas, que representa um ciclo de 12 horas de duração, como indicado pelo tempo inicial (T_{inicial} , em horas) e final (T_{final} , em horas) de cada etapa.	35
Tabela 8 - Valores médios obtidos em ensaios de flexão (f_{cf}) e desvio padrão (s) após o ensaio de envelhecimento acelerado.	37

ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfico 1- Variação de massa, em g, dos provetes durante o ensaio de molhagem e secagem.....	32
Gráfico 2 - Variação de volume, em cm ³ , dos provetes durante o ensaio de molhagem e secagem	33
Gráfico 3 - Material perdido após o fim do ciclo de envelhecimento.....	36

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Requisitos a garantir às caldas, com vista à injeção de paredes de alvenaria de pedra [15].	13
---	----

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Desde muito cedo que as construções em alvenaria estão presentes na existência do Homem, tida como a solução construtiva mais antiga, dado conciliarem as funções de envolvente exterior e de compartimentação têm sido usadas em todos os tipos de construções desde tempos remotos [1]. A construção em alvenaria de pedra e mais tarde em tijolo, encontra-se bastante presente em muitos edifícios e monumentos em toda a Europa, ver figura 1.



Figura 1– Construções antigas em tijolo: a) alvenaria em tijolo; b) alvenaria em tijolo e estrutura em madeira.
Fonte: Imagens retiradas do Google.

Antigamente as construções eram feitas tendencialmente em alvenaria porque resultavam elementos resistentes, com boa durabilidade, baixos custos de execução e reuniam outras exigências funcionais. As construções em alvenaria antigas, eram inicialmente feitas maioritariamente com pedra e escassilhos em madeira normalmente os materiais mais abundantes na região e, mais tarde aparecem as alvenarias em tijolo cerâmico. Diferentes tipologias e características tais como, a natureza das unidades, o material de ligação e o modo da colocação de todos os componentes podem ser encontrados na mesma construção.

Os tijolos têm características mais regulares do que as unidades de pedra natural e como consequência, o uso de unidades de tijolo cerâmico, traduz-se, também, numa maior regularidade e homogeneidade das suas alvenarias. O processo de fabrico do tijolo era manual, até ao princípio do século XIX e devido ao aumento populacional e revolução industrial surge o tijolo cerâmico como produto industrializado da construção iniciando-se uma produção em larga escala [2]. Desde então assistiu-se a uma notável expansão da alvenaria de tijolo, devido

à aptidão daquele elemento na garantia do conforto da construção como em construções de paredes, casas, chaminés, pontes, igrejas, etc.

Atualmente muitos são os edifícios e monumentos antigos em elevado estado de degradação e que requerem intervenções urgentes. Para tal, exige-se a identificação das anomalias características das alvenarias, de modo a se encontrar a técnica de intervenção mais adequada. Além de apontar as deficiências existentes, há que ter em conta a importância da conservação dos materiais já presentes de modo a preservar as características iniciais e específicas do edifício [3]. Assim sendo, é imprescindível a necessidade de se estudarem as técnicas adequadas para a conservação, manutenção e restauro do património de valor inenarrável.

Segundo recomendações prescritas no ICOMOS [4] ou mesmo em cartas de restauro [5] existem técnicas específicas para a consolidação e reparação de paredes de alvenaria. Uma dessas técnicas possíveis é o recurso à injeção de caldas no interior das alvenarias, cujo objetivo consiste em preencher tanto grandes como pequenos vazios, fazendo simultaneamente a ligação entre todos os materiais não coesos aumentando a continuidade da alvenaria e, portanto, sua resistência mecânica [6]. Embora seja uma técnica irreversível com a intervenção através de injeção de caldas pretende-se que a identidade do património histórico seja mantida, com o menor custo e maior eficácia de modo que a história e a cultura sejam preservadas.

1.2. Objetivo do estudo

Existe uma série de caldas adequadas para injeção de alvenaria quer comerciais, com composição pronta à qual é só necessário juntar água, como também uma série de formulações à base de cal estipuladas após vários estudos elaborados por diversos investigadores com interesse na área. No entanto dados relativos à capacidade de aderência em suportes de tijolo cerâmico bem como relativos à durabilidade destes materiais, são escassos. Pretende-se, desta forma, com esta dissertação avaliar o desempenho de duas caldas elaboradas em laboratório para injeção e consolidação de alvenarias antigas em que a cal é o constituinte principal.

A resistência à compressão e flexão bem como a capacidade de aderência a um suporte cerâmico das duas caldas elaboradas “in-situ”, é avaliada. A durabilidade nestes materiais, está ligada a uma série de fatores internos e externos, quer de origem química quer de origem física

que afetam as características destes materiais. O estudo engloba apenas a avaliação do desempenho das caldas face a variações das condições ambientais extremas, com ciclos gelo-degelo, ou seja, sujeitas a ensaios de envelhecimento acelerado, e ciclos de imersão e secagem, por forma a determinar durabilidade de provetes de cal.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

Após a introdução, onde se pretende apresentar o enquadramento da dissertação, os seus objetivos e a organização do texto, no capítulo 2 irão ser abordadas algumas das anomalias mais comuns em alvenarias antigas, a tipologia construtiva das paredes de tijolo e as possíveis técnicas de intervenção, referindo em particular quando se deve usar a injeção de caldas.

No capítulo 3 será feita uma descrição do estado de conhecimento das caldas, no que respeita às suas principais características e durabilidade, bem como da técnica por injeção.

No capítulo 4 será feita uma descrição do programa experimental bem como os materiais usados na elaboração das duas caldas.

O capítulo 5 será dedicado à análise experimental da calda para injeção de paredes de alvenaria de tijolo, descrevendo-se os ensaios realizados, resistência à compressão e flexão e ensaio de aderência. Apresentam-se ainda os ensaios realizados às duas caldas e os resultados obtidos, tendo em vista a caracterização da durabilidade. Os ensaios englobaram ensaios de envelhecimento acelerado e ciclos de imersão e secagem.

Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Alvenaria antiga de tijolo

2.1. Construções antigas em alvenaria de tijolo

Entende-se por alvenaria um conjunto de elementos de pequena dimensão (pedras, tijolos ou blocos) de tal maneira sobrepostos ligados ou não por argamassa, que formam elementos estruturais como paredes, pontes, fundações ou muros [7]. De acordo com as últimas descobertas arqueológicas, os primeiros exemplos conhecidos da construção em tijolo são da Mesopotâmia. Neste povo que vivia em terras do Tigre e do Eufrates (atual Iraque), nasceu um estilo determinado pelo tijolo, já que abundava muita argila e pouca pedra e/ou madeira. A alvenaria de tijolo de barro é uma das mais antigas e duráveis técnicas de construção usadas pela humanidade. Durante o período romano, o uso de tijolos de barro aumentou e se especializou para maximizar seus benefícios.

A alvenaria de tijolos de barro continuou sendo usada durante os tempos medievais e modernos. Apesar de várias modificações da constituição do tijolo, da forma e da fabricação ao longo de milhares de anos de constante evolução, a simplicidade, que fez o seu sucesso, permaneceu. Numerosos edifícios construídos com tijolos de barro prevaleceram até o século XXI, o que comprova a eficácia deste material ao longo de séculos de tempestades de chuva, neve, ciclos de congelamento e descongelamento, altas temperaturas bem como a deterioração induzida pelo homem. Além disso, o tijolo pode ser fácil, barato e rapidamente manuseado e produzido por um processo de fabrico simples. É constituído basicamente por argila, uma matéria-prima disponível em grandes quantidades em toda a Terra. Seu amplo uso provou que o tijolo de barro era um material de construção efetivo que podia fornecer tanto resistência às condições climáticas prevalentes quanto a isolamento do frio e do calor [8].

O modo de fabrico e a variação de matéria-prima podem resultar diferentes tipologias de tijolo.

- **Adobes (ou crus):**

É um dos materiais de construção mais antigos e utilizados no mundo. Na sua composição encontra-se terra crua, palha e fibras naturais, água, que são moldados e cozidos ao sol. Embora atualmente a sua utilização tenha caído em desuso, este tipo de tijolo possui vantagens tal como o facto de ser um material económico, ecológico e que regula a temperatura interna da construção. A sua principal desvantagem deve-se à

implementação condicionada aos locais húmidos, visto que se decompõe rapidamente em contato direto com a chuva. Na Europa, observam-se alguns exemplos de construção em adobe, apesar de serem mais comuns em zonas de fraca pluviosidade. Consta-se que esta técnica não foi utilizada apenas em construções pequenas e modestas, como casas rurais, muros de propriedades e abrigos para animais. Uma das razões para a construção em adobe em relação a outros sistemas de construção é devido às suas dimensões que permitem construir de forma versátil e rápida, a variedade de aparelhos permite construir, paredes interiores e exteriores, para além de construções de cúpulas, abóbadas e arcos. Na figura 2 podem observar-se alguns exemplos da alvenaria de adobe, existentes na Europa.



Figura 2 - Utilização de adobe em alvenaria (Espanha).
Fonte: Imagens retiradas do Google.

- **Refratários:**

São tijolos feitos com argilas refratárias, cozidos a altas temperaturas (entre 1600°C e 1800°C). Estas argilas resistem a altas temperaturas sem perder as suas propriedades físico-químicas, tais como, resistências, alta condutividade térmica e elétrica. Estes tijolos normalmente são maciços e podem ter várias dimensões.

Usualmente são encontrados em fornos industriais, estufas, laboratórios de pesquisa, fornos domésticos, churrasqueiras, entre outros.

Visto que as argamassas normais não suportam altas temperaturas, é preciso utilizar a massa refratária propícia que acompanha os tijolos.



Figura 3 - Churrasqueira com tijolos refratários.
Fonte: Imagem retirada do Google.

- **Ordinários**

O tijolo ordinário é um dos materiais mais antigos nas construções em alvenaria e atualmente é um dos mais utilizados nas construções. Está composto por argilas impuras, fusíveis, terracotas, que são amassadas, moldadas a fiação e cozidas em fornos que lhes concede dureza e resistência. As suas características principais são a aparência visual e resistência mecânica. Em relação à sua forma os tijolos podem ser maciços ou furados:

Maciços: são tijolos muito resistentes que têm um volume de argila cozida superior a 85% do seu volume aparente, podendo ter uma grande diversidade de texturas e cores, sendo fabricados à mão ou mecanicamente. Estes tijolos são muito usados em países do norte da Europa devido ao seu aspecto quente que envelhece bem com o decorrer do tempo.



Figura 4 - Construção antiga em tijolo maciço.
Fonte: Imagens retiradas do Google.

Furados: Têm a mesma forma exterior que os maciços, mas são atravessados por dois ou mais furos paralelos ao leito e no sentido da maior dimensão. A sua área de furos varia entre 30 e 75% da área da face correspondente, o que resulta que em igual volume sejam mais leves que os primeiros. A sua principal função é de enchimento e de isolamento térmico. A vantagem dos furos é de se conseguir:

- Aumentar o volume – permitem com igual peso, obter peças de maior volume e acelerar a construção;
- Diminuir o peso por metro cúbico – preferidos em relação aos maciços porque aligeiram o peso próprio das alvenarias superiores, diminuindo as cargas das mesmas;
- Aumentar a capacidade isolante – pelo que se usam frequentemente em paredes exteriores de usos domésticos (para reduzir as perdas de calor), e também em paredes divisórias, interiores, pelo seu isolamento acústico; impedindo assim a propagação do calor, do frio e da humidade;
- Resistência ao fogo – pelas suas câmaras isolantes, sendo usados para revestir estruturas metálicas;
- Maior duração – por não estarem tão sujeitos a dilatações e contrações;
- Melhor travamento e colocação em obra - porque a argamassa penetra nos orifícios a uma profundidade de 1 cm, aproximadamente, o que confere um bom travamento do aparelho.



Figura 5 - Arco feito com tijolos furados.
Fonte: Imagem retirada do Google.

2.2. Principais Anomalias

Torna-se necessário efetuar a distinção entre patologias inerentes ao comportamento estrutural (aspetos relacionados com a conceção) e inerentes ao comportamento material (dependente das características dos materiais utilizados, das técnicas construtivas, da tipologia da secção, etc.). Na prática é difícil estabelecer a fronteira entre este tipo de patologias, dado que muitas vezes as manifestações das patologias podem ter diversas origens.

As características dos materiais, a execução e as ações de manutenção são fatores decisivos para o bom funcionamento das alvenarias durante o tempo da vida útil, minimizando a ocorrência de anomalias. As principais anomalias que se desenvolvem em alvenarias de tijolo estão relacionadas com fenómenos de fissuração ou associados à ação da água. É importante notar que estes dois fenómenos não são independentes, podendo cada um deles originar ou agravar o outro [7]. Outros fatores que tem grande influência no aparecimento de patologias e na degradação progressiva das alvenarias de tijolo são o abandono ou falta de manutenção, por parte dos proprietários, e os problemas de base relacionados com a má execução construtiva, muito correntes nas construções antigas de tijolo.

As construções antigas em tijolo, de forma geral apresentam espessuras entre 30 a 50 cm o que o torna mais vulnerável a ações exteriores. No entanto podem-se construir paredes de boa qualidade e dispostas de forma correta, revelando-se elementos com boas características ao nível de resistência.

Em construções em tijolo, os tetos são formados por estruturas de madeira leve revestidas com acabamento em tábuas finas de madeira e quando sujeitos a presença de água e de cargas impostas pelo peso da queda do telhado, que colapsa para dentro da construção não apresentam resistência, sendo que ao entrar em contato com a água leva ao apodrecimento destes, nas zonas das paredes de tijolo, fazendo com que colapse.

Os beirados com proteção insuficiente, falta de limpeza e vegetação junto da construção, leva a acumulação da água no solo próximo das paredes e com o tempo, o contato da humidade com a base das paredes dá origem a ascensão capilar. Este fenómeno consiste na subida progressiva e penetração de humidade no interior das paredes, que como consequência leva numa fase inicial à degradação do reboco e dos blocos de tijolo posteriormente.

Um dos fatores construtivos que afetam as alvenarias de tijolo são a degradação devido a insuficiente proteção dos beirados que está relacionado com a degradação dos panos de tijolo e revestimentos, que ao terem comprimentos insuficientes, não afastam o escoamento das águas do telhado das paredes. Sendo que em alguns casos a água infiltra-se pela face superior das paredes onde assenta o beirado, degradando os blocos de tijolo e revestimento posteriormente.

Para além das patologias acima referidas, dos mecanismos associados às patologias mais frequentes, destacam-se os seguintes fenómenos em alvenarias de tijolo: microfissuração, macrofissuração e separação dos paramentos:

- microfissuração: uma fina e difusa malha de microfissuração, com andamento vertical (ou quase vertical), que afeta, principalmente, as juntas de argamassa (em função da textura da parede) mas também os próprios blocos;
- macrofissuração: fissuração que atravessa toda a secção da parede e é atribuível a ações estáticas ou dinâmicas correntes (concentração de esforços nas zonas dos cantos, assentamentos das fundações, acréscimo rápido das cargas permanentes, sismos etc.);
- separação dos paramentos: frequente em paredes compostas devido à sua fraca ligação transversal.

Todas as anomalias afetam a durabilidade. Contudo, a durabilidade depende da manutenção efetuada e está também relacionada em grande parte com os “defeitos” intrínsecos e inevitáveis da alvenaria como é o caso da retração das argamassas entre outros, que provocam pequenas fendilhações com capacidade de desenvolvimento e, ao não serem controladas, originam verdadeiras anomalias [9].

A maioria das anomalias afeta o aspeto visual das alvenarias, as propriedades mecânicas da alvenaria, as propriedades físicas dos materiais e as condições de habitabilidade e a durabilidade dos edifícios. No levantamento das anomalias, deve ser feita a distinção entre as anomalias de tijolos, de argamassa de assentamentos e de revestimento [10].

3. Calda para injeção. Estado de conhecimento

3.1. Consolidação com calda de injeção

Tal como tem sido usada em alvenaria de pedra, a injeção de materiais no interior das alvenarias como preenchimento de fissuras e consolidação de partes deterioradas, constituiu uma alternativa de intervenção com grande margem de aplicação. Esta técnica implica a injeção de caldas compatíveis com o suporte. Em geral, a utilização das caldas tem como objetivo unir todos os elementos soltos de modo a consolidar, preencher grandes e pequenos vazios e fendas aumentando a continuidade da alvenaria e eventualmente reforçar. Assim sendo, é necessário uma calda que seja fluida e que preencha os vazios o mais uniformemente possível ao ser injetada no interior de uma alvenaria, aumentando desta forma a coesão da estrutura. Estas intervenções relacionadas com a consolidação têm por objetivo aperfeiçoar as características mecânicas dos componentes existentes, sem adulterar negativamente as outras características [7].

O objetivo só pode ser alcançado sabendo a morfologia da secção da parede, os materiais que constituem a parede e sua composição, a fim de evitar incompatibilidades químicas e físicas com a calda, a distribuição da fenda, o tamanho, percentagem e distribuição de vazios [6].

Ao injetar-se a calda o agente ligante curará e aumentará a coesão interna da alvenaria, aumentando também seu comportamento monolítico, juntamente com a capacidade de carga. Como a calda é introduzida na parte interna da alvenaria, ela não prejudica a aparência estética do edifício e quando se utilizam materiais em conformidade com os materiais originais, é uma técnica aceitável de acordo com a Carta de Veneza [11].

É necessário fazer uma avaliação cuidada para saber a melhor intervenção a ser feita e de modo a preservar e respeitar a integridade e a autenticidade do elemento. Para além de uma inspeção visual rigorosa, é também preciso realizar uma avaliação através de técnicas não destrutivas, nomeadamente, ensaios termográficos ou de velocidade de propagação de ultrassons para avaliar o interior das paredes. Em situações mais extremas, quando não se possui informações suficientes através do método não-invasivo, pode-se adotar a hipótese de utilizar técnicas moderadamente destrutivas, tais como macacos planos e arranque de varões

chumbados à alvenaria, para analisar as características mecânicas. Muitas vezes, podem ser utilizadas várias técnicas para uma avaliação mais completa e fiável [12].

O método a ser utilizado no reforço depende não somente do estado de degradação do edifício e dos materiais com que foi construído, mas também da função que desempenha e a sua configuração arquitetônica, histórica e artística, que levam a adotar técnicas por vezes mais onerosas, porém menos destrutivas e que, por conseguinte, garantem a preservação da matriz original do edifício. Assume-se que o objetivo final de qualquer intervenção num edifício antigo é o aperfeiçoamento das características mecânicas da estrutura e a criação das condições de segurança global do edifício, expressas na estabilidade das fundações e na boa ligação entre elementos estruturais verticais e horizontais [13]. Posteriormente ao diagnóstico, torna-se mais fácil a escolha da técnica a ser aplicada tendo em conta a anomalia identificada e a sua localização.

A opção de injetar caldas fluidas deve ser muito cuidada e previamente avaliada, visto que, é uma técnica, que modifica de forma definitiva a estrutura da parede. Através do estudo prévio das características do suporte onde será injetada, é preciso escolher uma calda que tenha uma composição compatível e com as devidas propriedades ajustadas, tais como a de fluidez e de aderência necessárias.

Segundo Binda [6] os principais problemas ligados à injeção de caldas podem ser resumidos como:

- 1) Falta de conhecimento sobre a distribuição de tamanhos de vazios na parede;
- 2) A dificuldade da calda para penetrar em finas fissuras (2-3 mm), mesmo se forem usados ligantes microfinos;
- 3) A presença de vazios na parede grandes e finos, o que dificulta a escolha da calda (injetar em vazios grandes com calda fina pode induzir a segregação);
- 4) A segregação e a retração da calda devido à alta taxa de absorção do material a ser consolidado;
- 5) A dificuldade de penetração da calda, especialmente na presença de materiais silteoso ou argiloso, mas também de qualquer tipo de materiais soltos;
- 6) A necessidade de a pressão de injeção ser suficientemente baixa para evitar aprisionamento de ar dentro das fendas e vazios finos ou até mesmo rotura da parede.

A eficácia desta técnica tem sido bem-sucedida em alvenarias, com um índice de vazios compreendido entre os 2% e os 15%. Abaixo de 2% os resultados são em geral fracos, salvo os casos em que esta percentagem corresponda à presença de vazios de grande dimensão. Na ausência de tais condições a injeção não é aplicável, ou é pouco eficaz, havendo que recorrer a técnicas combinadas ou alternativas. Por outro lado, os vazios devem estar interligados, para que permitam a sua injeção total, a partir do furo de injeção [14].

A injeção das caldas não deve ser feita numa altura superior a 1 metro/dia, em estruturas mais vulneráveis do ponto de vista mecânico, para evitar pressões excessivas hidrostáticas das caldas que podem danificar a estrutura. A injeção deve ser feita por empresas especializadas com operários experientes e equipamentos adequados para a injeção das caldas, seja qual for o método utilizado.

A definição da composição das caldas que seja compatível com as características do suporte é um dos obstáculos, resultado da influência dos vários parâmetros envolvidos que caracterizam as paredes, como composição química, a porosidade, a capacidade de absorção, a percentagem de vazios, entre outros. Os principais requisitos que devem obedecer as caldas para injeção estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1- Requisitos a garantir às caldas, com vista à injeção de paredes de alvenaria de pedra [15].

Requisitos Reológicos	Pretende-se fluidez durante tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, de modo que todos os vazios sejam preenchidos de igual forma – injetabilidade (propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.); De preferência, ausência de segregações (para evitar heterogeneidades); A exsudação deve ser mínima, para diminuir a presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido;
Requisitos Químicos	Deverá ter características químicas estáveis no tempo, ou seja, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis; Deverá ser resistente aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências; O teor de álcalis deverá ser mínimo;
Requisitos Físicos	O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; As propriedades higroscópicas deverão ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; Pretende-se que a calda tenha uma retração baixa;
Requisitos Mecânicos	As características de resistência mecânica e, essencialmente, de rigidez deverão ser similares às da argamassa original ou apenas ligeiramente superiores; As caldas e argamassas deverão ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto;
Requisitos Térmicos	Pretende-se que a calda tenha baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que possam prejudicar a aderência ao suporte.

De entre os requisitos referidos, destacam-se a fluidez das caldas, sua resistência à compressão e à flexão, a sua capacidade de aderência ao suporte onde vai ser aplicada e durabilidade, fatores determinantes para o sucesso da técnica de injeção e que neste trabalho irão ser objeto de estudo.

Relativamente à composição das caldas, várias têm sido as tentativas de encontrar soluções de formulações de caldas à base de cal, sem adição de cimento para substituição das mais utilizadas e de fácil preparação como são as caldas comerciais. O uso de caldas tricompostas com cal hidratada, cimento e pozolanas, bem como caldas de cal hidráulica com ou sem adição de cimento, têm vindo a ser estudadas e parecem constituir uma alternativa interessante visto terem a vantagem adicional de se tornarem mais económicas. A preparação das caldas comerciais é mais simples, uma vez que só precisa de adicionar a água, mas segundo uma análise do rendimento e custo total realizado por Klosowski [16], o custo de produção de uma calda comercial equivale a aproximadamente 4 vezes o observado numa calda elaborada *in situ* sem se ter em conta o custo de mão de obra.

3.2. Durabilidade

A palavra durabilidade provém do latim *durabilis*, definida como aquilo que é durável, ou seja, que se conserva através do tempo. Entretanto um material de construção, só pode considerar-se como sendo durável, quando consegue manter ao longo do tempo (vida útil), a sua capacidade de resistência à ação de forças e a sua integridade estrutural mesmo após ser sujeito a fenómenos de degradação mecânicos, físicos e químico quando colocado em serviço, quer por ação do meio ambiente ou consequente da atividade humana.

A durabilidade está associada à qualidade, ou seja, à caracterização daquilo que resiste no tempo e assume-se que quanto mais durável for o material ou um produto maior qualidade apresenta. Nos edifícios a durabilidade é um problema relativamente recente, quer se trate de construções novas quer se trate de construções antigas. Este problema torna-se uma questão de extrema importância quando se lida, particularmente, com aplicação de materiais para reabilitação e reforço de estruturas pertencendo ao património edificado. A durabilidade é um requisito fundamental exigido às caldas de injeção, principalmente por não serem materiais facilmente substituíveis ou submetidos periodicamente a trabalhos de conservação [3].

Na verdade, uma das características importantes que se deve ter em conta nas caldas é a durabilidade, na medida em que estas devem cumprir as suas exigências funcionais durante todo o período de vida útil para a qual é projetada a obra a que se destinam. Nesse sentido, qualquer calda preparada com uma qualidade deficiente poderá originar danos que afetam as suas propriedades, ficando comprometida a sua durabilidade [17].

Precisam, por isso, apresentar uma estabilidade físico-química ou, pelo menos, previsivelmente satisfatória, tendo em conta as inter-reacções que se podem desenvolver, a curto prazo, entre os diversos materiais. Mais concretamente devem conferir resistência aos agentes climáticos, ao desgaste e à erosão pela água, aos agentes químicos, aos efeitos da poluição atmosférica, aos movimentos repetidos dos componentes e, fundamentalmente, boa aderência ao suporte mesmo em condições severas, conferindo assim um vínculo permanente e completo entre as unidades de alvenaria ou entre as partes a consolidar [3].

Diferentes fatores de deterioração podem afetar a durabilidade de uma calda. Os mais importantes são: ciclos húmidos e secos; ii) exposição à chuva e afins; lixiviação; iii) ciclos de gelo/degelo; iv) exposição a poluentes; e v) raios do sol [18].

Entre todos estes fatores destaca-se o efeito da exposição a condições climáticas severas que produzem degradação especialmente por ações de congelamento e descongelamento e a existência de sais solúveis que desempenham igualmente um papel importante na deterioração das alvenarias antigas. Embora a cristalização dos sais ser, de fato, um poderoso agente de deterioração, particularmente quando combinado com a ação do gelo [19], não vai ser objeto de estudo no presente trabalho

4. Descrição do programa experimental

4.1. Considerações Iniciais

Neste Capítulo procede-se ao estudo de duas caldas à base de cal com composições diferentes elaborados em laboratório, tendo em conta que se supõe serem adequadas para aplicação em trabalhos de reparação e reforço de alvenarias de tijolos, e que constituem assim uma alternativa às caldas comerciais existentes no mercado.

4.2. Materiais constituintes das caldas

No presente trabalho optou-se por estudar uma calda à base de cal com adição de uma pozolana artificial, no caso um metacaulino, a qual apresentou resultados bastantes satisfatórios em termos de características mecânicas e físicas do material em si, bem como relativamente ao seu comportamento em suportes pétreos e ainda com resultados bastante positivos quando aplicada em paredes experimentais [20]. A segunda calda escolhida para este estudo é uma calda composta na maioria por cal hidráulica a qual foi igualmente avaliada em trabalhos anteriores [16]. A primeira calda, designada por “CA” no presente texto, é então composta por cal hidratada, cimento branco, metacaulino, água e um adjuvante (superplastificante). A segunda calda, designada no texto por “CHL”, é composta por cal hidráulica, cimento branco,

água e um adjuvante (superplastificante). Na tabela 1 apresentam-se as composições e quantidades usadas nas duas caldas.

Tabela 1 - Composição das caldas com rácio água/cimento.				
Composição das caldas				
Calda	Materiais	Tipo e Classe	Massa (g)	A/C
CA	Cal hidratada	CL80-5	350	0,6
	Cimento branco	II/B-L 32,5R	300	
	Metacaulino	-	350	
	Superplastificante	-	3%	
CHL	Cal hidráulica	HL5	850	0,5
	Cimento branco	II/B-L 32,5R	150	
	Superplastificante	-	1%	

4.2.1. Cal hidratada

A cal hidratada (hidróxido de cálcio), também denominada de cal apagada resulta da reação entre a cal viva e a água. Esta cal é extremamente fina e leve, e possui características compatíveis com o meio a injetar. Pode ser fornecida em pó (ensacada) ou em pasta (recipientes plásticos), mas nesta campanha experimental em particular optou-se por utilizar uma cal em pó produzida pela Calcidrata, de acordo com a norma NP EN 459-1:2015 [21].

4.2.2. Metacaulino

O metacaulino, nos últimos anos, tem vindo a ser utilizado na substituição de parte do cimento em betões apresentando um crescimento na procura da sua utilização, devido a aspetos relacionados com a durabilidade e o conceito de construção sustentável, que atualmente está em voga. O metacaulino é uma adição pozolânica obtida pela calcinação do caulino, seguida de trituração, resultando um material amorfo, com uma superfície específica elevada e um conteúdo de $AL_2O_3+SO_2 > 90\%$, o que lhe confere uma elevada pozolanicidade. Assim como outras pozolanas (cinzas volantes e sílica de fumo por exemplo), o metacaulino reage com o hidróxido de cálcio, presente na cal ou nos subprodutos produzidos durante a hidratação do cimento.

O metacaulino é uma adição pozolânica adequada a argamassas de cal, fornecendo comportamento mecânico adequado para aplicação como argamassas de conservação [22]. A introdução de metacaulino, no entanto, reduz significativamente a trabalhabilidade devido à extremamente elevada área superficial, o que implica um aumento de água para manutenção da consistência. Tem também partículas irregulares e são difíceis de misturar, pelo que, geralmente, é necessário adicionar um adjuvante (plastificante), reduzindo também o tempo de presa [3]. Na calda CA utilizou-se um metacaulino da marca Exopack, proveniente dos Estados Unidos da América.

4.2.3. Superplastificante

Os plastificantes e os superplastificantes permitem a redução da quantidade de água de amassadura e fluidificam o material, ou seja, possibilitam um aumento da trabalhabilidade sem ser necessário aumentar a quantidade de água, e eventualmente reduzi-la. Os principais efeitos secundários dos plastificantes são o retardamento da presa e a redução das resistências iniciais. Os superplastificantes são mais poderosos do que os plastificantes, concebendo aos materiais maior fluidez e trabalhabilidade do que os plastificantes. As suas limitações são o seu custo elevado e a curta duração de ação.

Os superplastificantes são agentes ativos de superfície, ou seja, modificam as cargas superficiais das partículas do ligante e assim fazem com que as partículas se dispersem. Deste modo, a capacidade de fluxo e consistência é aumentada. Os superplastificantes têm reatividade variada, dependendo da sua configuração química e peso molecular. A sua reatividade ou capacidade para dispersar as partículas, também depende do tipo de ligante utilizado [23]. O superplastificante utilizado foi o *Dynamon SR1* produzido pela Mapei (Portugal).

4.2.4. Cal hidráulica natural

A cal hidráulica é constituída por silicatos ($\text{SiO}_2 / 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$) que se hidratando endurecem na água ou ao ar. Contém também óxido de cálcio (CaO) – em pelo menos 25%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação ou por reação com a pozolana, caso existam. Utilizou-se a cal hidráulica natural HL 5 como ligante. A HL 5

utilizada foi produzida pela Secil, de acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1:2011 [21].

4.2.5. Cimento branco

Utilizou-se cimento branco devido a sua cor. Apesar de alguns autores defenderem a não utilização de cimento branco, devido à sua fraca resistência aos sulfatos, hoje em dia, estes cimentos apresentam uma composição química semelhante em termos de percentagem de alumina (responsável pela formação de gesso e etringite) e percentagem de sílica e carbonato (responsáveis pela formação de tobasite) [3]. No caso em particular da elaboração de ambas as caldas utilizou-se cimento CEM II/B-L – 32,5R.

4.3. Processo de elaboração das caldas

A maneira como a calda é misturada tem influência a nível reológico, não dependendo apenas da sequência adotada como também do tipo de misturadora usada e da temperatura a que os constituintes se encontram. Resumidamente, fatores como o tempo de mistura, o equipamento utilizado e a sua capacidade, a velocidade de rotação que a mistura é sujeita, a temperatura e a humidade no local de preparação afetam a resposta da calda, tanto reológica como a sua estabilidade [24].

A elaboração das caldas é, desta forma, um fator importante que influencia as suas propriedades. Para a elaboração das caldas deste estudo utilizou-se um misturador com ponta helicoidal operada manualmente da marca Rubi, modelo Rubimix 10 com potência de 950 Watts (W) (figura 6), acoplado em uma vareta misturadora da mesma marca com o qual ambas as caldas foram misturadas em um balde com capacidade de 10 litros. As duas composições foram elaboradas de igual modo, colocando-se primeiramente 80 % dos materiais e misturar por aproximadamente trinta segundos.

Após uma breve mistura adicionaram-se os restantes 20 % e mistura-se tudo por mais 8 minutos. Na figura 6 pode-se observar o aspeto das caldas durante e após a mistura.

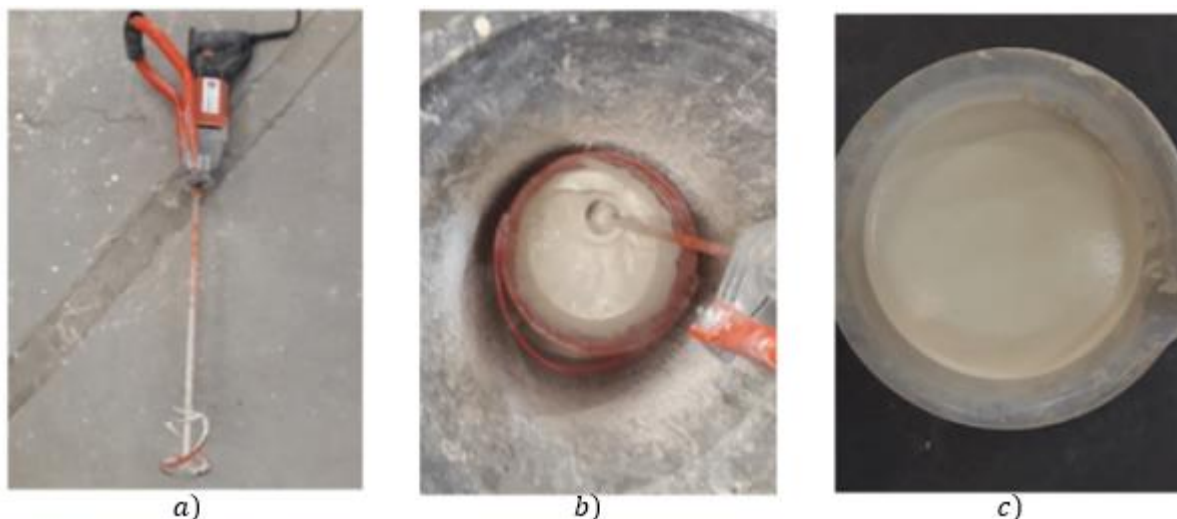


Figura 6 - Misturador utilizado na elaboração das caldas, modelo Rubimix 10; aspecto das caldas: b) durante a mistura; c) após a mistura.

5. Apresentação e discussão de resultados

Para verificação do cumprimento dos requisitos que os materiais devem cumprir para serem utilizados numa intervenção de conservação, procede-se geralmente à avaliação do seu comportamento em condições de laboratório. A apresentação e discussão de resultados relativos às duas caldas apresentadas no Capítulo 5. está dividida em duas partes. A primeira parte engloba os resultados obtidos em trabalhos já executados anteriormente por vários autores, nomeadamente ensaios de fluidez, ensaios de exsudação/segregação e ensaios de compressão e flexão.

Na segunda parte, apresenta-se o programa experimental realizado neste trabalho dedicado às mesmas caldas, e que compreendeu a determinação da aderência a suportes de tijolo e uma avaliação da durabilidade de ambas as caldas, quando submetidas a ensaios de molhagem e secagem e ensaios de envelhecimento acelerado.

5.1. Ensaio de Fluidez

A fluidez das caldas é uma propriedade importante que influencia a sua injetabilidade principalmente em injeções manuais (sob ação da gravidade e sem pressão), facilidade de colocação em obra, o preenchimento do maior número de vazios possíveis no interior das alvenarias assim como o eventual entupimento do equipamento de injeção. Sendo assim a calda

deve assegurar uma boa fluidez em simultâneo com uma consistência máxima. A caracterização das duas caldas no estado fresco relativamente à fluidez foi feita através do método do cone (cone de Marsh), que regista o tempo de escoamento de um determinado volume de calda. O tempo de escoamento depende, da viscosidade, rigidez e do peso volúmico da calda. Embora não haja uma correlação direta com as outras propriedades físicas da calda, constitui um parâmetro bastante útil, sendo que na prática pode definir bem as possibilidades de penetrabilidade no meio a injetar.

Os resultados apresentados na tabela 2, correspondem a ensaios realizados em trabalhos, com caldas com a mesma composição por Luso e Klosowski [3] [16].

Tabela 2 – Tempos total obtidos no ensaio de Cone de Marsh.

Calda	Tempo para escoamento total (s)
CA	80
CHL	71.9

5.2. Determinação da exsudação

A exsudação consiste em medir a quantidade de água que reflui à superfície em uma calda deixada em repouso numa proveta de 100 ml de capacidade durante 3 horas impedindo a evaporação da água essencial a hidratação da calda. Para evitar a segregação e a sedimentação dos materiais a exsudação das caldas deve ser suficientemente baixa.

Para que não sofram um processo de segregação e sedimentação as caldas até serem injetadas devem manter-se em constante agitação, mantendo-se assim homogêneas e permitindo assim que possuam características uniformes, sendo que uma das formas de evitar este fenómeno é reduzir ao máximo o tempo que separam as etapas de preparação e injeção das caldas.

Segundo Júlio [25] a relação água/cimento assume um papel preponderante na exsudação e na resistência das caldas, sendo que uma relação água/cimento mais baixa leva a valores de exsudação inferiores e a resistências à compressão mais elevadas. Os plastificantes são indispensáveis na composição das caldas, melhorando o seu desempenho, permitindo reduzir a relação água/cimento, com boa fluidez. A inclusão de um adjuvante expensor e retentor de água na composição das caldas permite controlar a variação de volume.

Os resultados apresentados na tabela 3, correspondem a ensaios realizados em trabalhos, com caldas com a mesma composição por Luso e Klosowski [3] [16]. Verificou-se que não houve expansão na calda CA, sendo que os volumes iniciais e finais mantiveram-se os mesmos e a calda CHL superou ligeiramente o limite máximo de 2% de exsudação segundo a NP EN 447(2008) [26] [3] [16].

Tabela 3 – Percentagens de exsudação.	
Calda	Percentagem de exsudação
CA	0%
CHL	2,06%

5.3. Ensaio de flexão

Para a realização do ensaio de resistência à flexão, os provetes foram submetidos ao ensaio descrito em NP EN 12390-5 (2009) [27]. Utilizou-se o equipamento de tração nomeado de AGS-X, fabricado pela empresa Shimadzu, que se encontra no Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

Após a elaboração das caldas moldaram-se provetes prismáticos de $16 \times 16 \times 4 \text{ cm}^3$ que foram colocadas em uma câmara húmida por 90 dias mantendo as condições de cura ($T = 20^\circ\text{C}$ e $Hr = 90 \pm 5\%$) e de seguida realizaram-se os ensaios de flexão e de compressão.

Os provetes prismáticos foram colocados nos apoios cilíndricos espaçados 120 mm, de modo a ficar igual a figura 7.

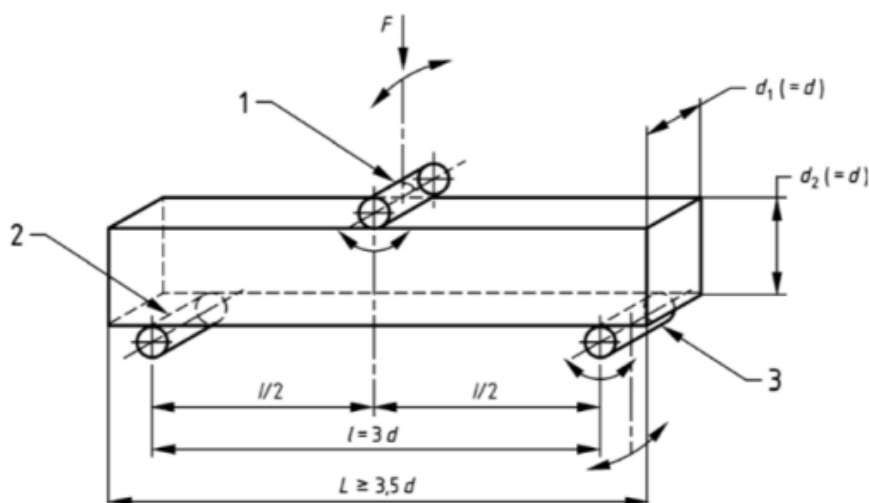


Figura 7 - Dimensões dos provete e posicionamento dos cilindros [27].

Não sendo possível configurar a velocidade do equipamento em grandezas de tensão por tempo, mas apenas de deslocamento por tempo, realizaram-se três ensaios prévios a fim de

garantir que a velocidade de aplicação permanecesse dentro do intervalo de 0,04 MPa/s e 0,06 MPa/s. Sendo assim, verificou-se que estes valores seriam mantidos caso a velocidade fosse configurada em 0,17 mm/min. Após configurar o equipamento aplicou-se a carga e registrou-se a força de rotura dos provetes.

Para determinação da resistência à flexão dos provetes utilizou-se a equação 1.

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot I}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Equação 1

Onde:

f_{cf} – Resistência à flexão, expressa em MPa;

F – Carga máxima, em N;

I – Distância entre apoios, em mm;

d_1 e d_2 – Dimensões laterais do provete, em mm.

Observa-se que este método onde ocorre a aplicação da força apenas no centro do vão, geralmente fornece valores mais elevados para a resistência à flexão, que o método de aplicação da carga em dois pontos. No caso de betões, a norma indica que o método de aplicação no ponto central dá resultados consistentemente mais elevados em 13 % em relação ao outro método [27].

Como pode observar-se na Tabela 4 a calda CHL, com o mesmo período de dias (90 dias), obteve resultados superiores a calda CA.

Tabela 4 – Valores médios obtidos em ensaios de flexão (f_{cf}) e desvio padrão (s) aos 90 dias.

Calda	f_{cf} (MPa)	s (MPa)
	90 dias	90 dias
CA	3,14	0,23
CHL	4,19	0,51



Figura 8 - Ruptura dos provetes quando submetidos à esforços de flexão.

Na figura 8 pode-se observar as rupturas dos provetes de forma vertical no centro dos provetes, indicando uma boa distribuição de tensões em decorrência da homogeneidade do material e um bom resultado dos ensaios, uma vez que o centro da peça concentra os maiores esforços de flexão.

Comparativamente a calda CA com os valores encontrados por Luso [3] de 4,7 MPa obtidos aos 90 dias os resultados foram inferiores em 49%. Em relação aos resultados obtidos por Klosowski [16] com a calda CHL, que obteve valores de resistência de 2,5 MPa, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho foram superiores em 70%.

5.4. Ensaio de compressão

Depois de efetuar os ensaios de flexão, o trabalho experimental prosseguiu com a realização de ensaios de resistência à compressão para melhor caracterização e avaliação das suas propriedades mecânicas.

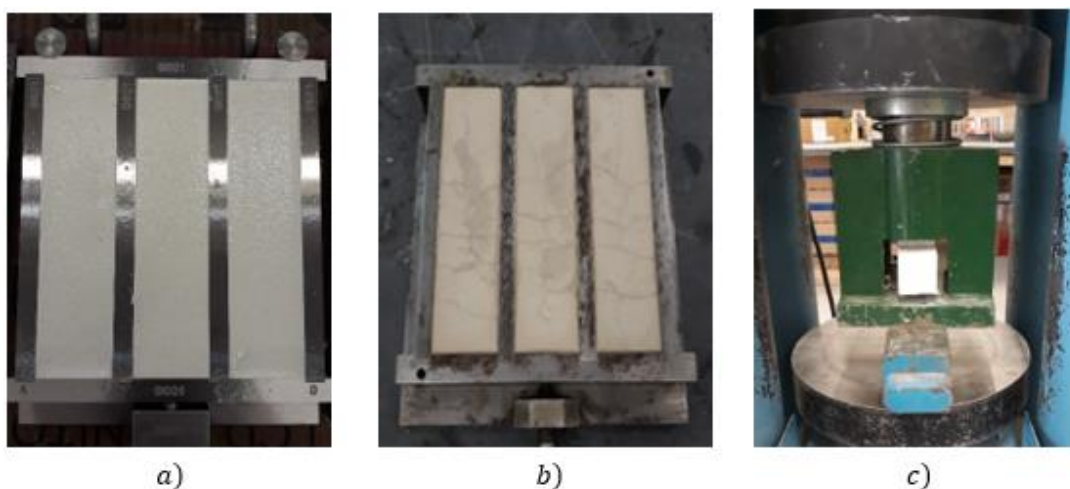


Figura 9 - (a) Moldagem com a composição 1; (b) Moldagem com a composição 2; (c) Ensaio de compressão.

O ensaio de resistência à compressão realizado foi adaptado da norma NP EN 12390-3:2009 [28], onde os valores obtidos são medidos para cada composição em seis meios-prismas obtidos no ensaio de resistência à flexão. Os provetes foram posicionados na prensa hidráulica, fabricada pela Matest (figura 9 c)) e disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção do IPB, onde foram submetidos a esforços de compressão uniaxial com carregamento controlado até à carga máxima. Os valores máximos de força foram anotados, em seguida utilizou-se a equação 2 para determinar a tensão de compressão dos materiais:

$$RC = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

RC – Resistência à compressão, expressa em MPa;

F – Força máxima, em N;

A – Área do provete, em mm².

Na Tabela 5 estão dispostas as tensões médias de rotura à compressão observadas aos 90 dias. Quanto aos resultados dos ensaios, a calda CHL apresentou maiores resultados.

Tabela 5 - Valores médios obtidos em ensaios de compressão (σ) e desvios padrão (s) e, aos 90 dias.

Calda	σ (MPa)	s (MPa)
	90 dias	90 dias
CA	12,60	0,51
CHL	15,69	0,72

Ao analisar a tabela 5 observa-se que a calda CHL mostra um valor mais elevado para a resistência à compressão comparativamente a calda CA, tal como na resistência à flexão. Comparando a calda CA com os valores encontrados por Luso [3] de 19,6 MPa obtidos aos 90 dias os resultados foram inferiores em 55%. Em relação aos resultados obtidos por Klosowski [16] com a calda CHL, que obteve valores de resistências de 8,40 MPa, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho foram superiores em 87%.

5.5. Ensaio de aderência tijolo/calda

A resistência à compressão e flexão, embora sejam parâmetros importantes que caracterizam mecanicamente os materiais, não constituem por si só, no caso em particular das caldas para injeção, valores que traduzam a eficácia desta intervenção em qualquer tipo de alvenaria. A aderência é uma propriedade importante na interação dos materiais com o suporte, quanto maior a compatibilidade do material com o suporte, maior a aderência. Esta propriedade está intimamente relacionada com a capacidade do material absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o suporte, ou seja, com a capacidade para resistir a deslocamentos por tração e por corte puro, sem causar danos.

A aderência dos materiais ao suporte é, deste modo, uma propriedade determinante para o seu desempenho, quando aplicada em suportes, dado que é necessário garantir uma distribuição eficiente de tensões de modo a evitar a tendência para a fendilhação. Esta aderência não deve ser excessiva, nem superior à resistência de tração do suporte, para não levar à degradação do mesmo. Sendo assim, é fundamental avaliar a capacidade de aderência que estes materiais têm, após a injeção e endurecimento, em relação aos materiais onde vão ser injetados, nomeadamente argamassas existentes, pedras ou tijolos. Neste caso de estudo pretende-se avaliar o comportamento do conjunto calda/tijolo nomeadamente aderência em tijolos cerâmicos, previamente humedecidos e avaliar o tipo de rotura ocorrido.

Os estudos de aderência de caldas em paredes de alvenaria de tijolo são escassos, sendo a maioria realizados em pedras, o que suscitou o interesse deste estudo de modo a se ter conhecimento acerca deste tema. Depois de ensaiar as duas composições, fez-se um estudo das mesmas, acoplados a um tijolo de modo a determinar a capacidade de aderência destas caldas

aos 90 dias de idade. Fizeram-se 30 pastilhas de calda no total, sendo que algumas apresentaram fissuras o que levou a serem descartadas.

Através de ensaios de arrancamento quantificou-se a tensão de aderência calda/tijolo. O ensaio de arrancamento por tração, ou “ensaio *pull - off*”, é um ensaio utilizado para determinar, resistência da calda a tração e a aderência de ligação entre os materiais determinando assim a força de tração máxima, que é necessário aplicar numa área circular, com cerca de 48 mm de diâmetro de calda aplicada sobre o suporte. Os tijolos levaram um jato de areia fina, de modo a aumentar a rugosidade superficial.

Os tijolos foram divididos em dois de modo a ficarem com as dimensões apropriadas para serem ensaiados. Depois foram lavados e colocados a secar, em seguida foi aplicada uma película de acetato para servir de molde com dimensões 2,5 mm de altura e 48 mm de diâmetro, com pistola de cola quente. Colocou-se depois as caldas com uma seringa de bico largo neste processo de injeção.

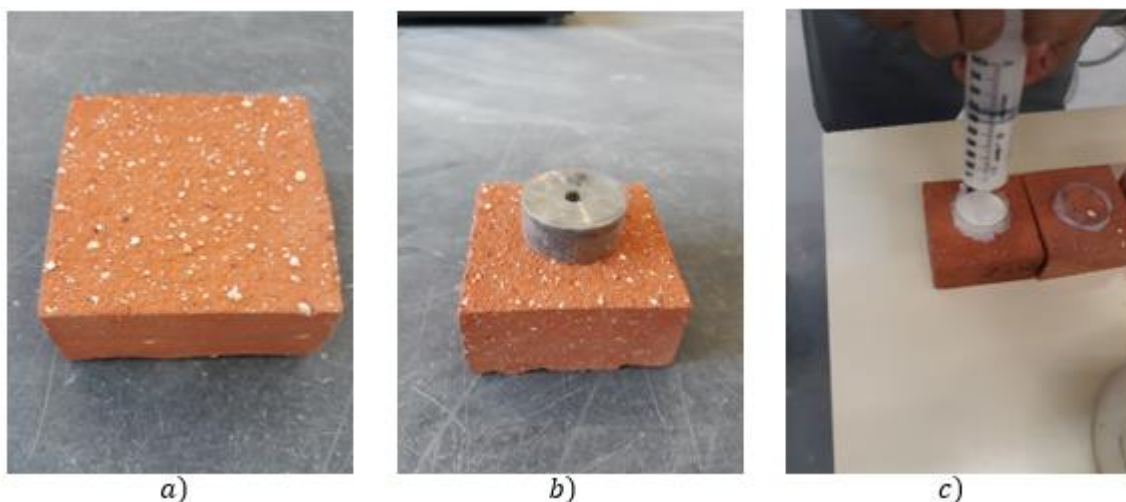


Figura 10 - a) Aspetto visual do tijolo, b) Aplicação do acetato, c) Aplicação da calda com uma seringa.

Por fim os provetes foram depois colocados em câmara húmida, em condições de exposição, temperatura $T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa $HR = 95\%$ com água na superfície. Após permanecerem na câmara húmida, os provetes foram retirados, de seguida foram retiradas as películas de acetato e aplicou-se uma lixagem na superfície nas caldas de modo a lhe conferir o mesmo nível na superfície, depois limpou-se o pó na superfície com pistola de ar como mostra a figura 11.

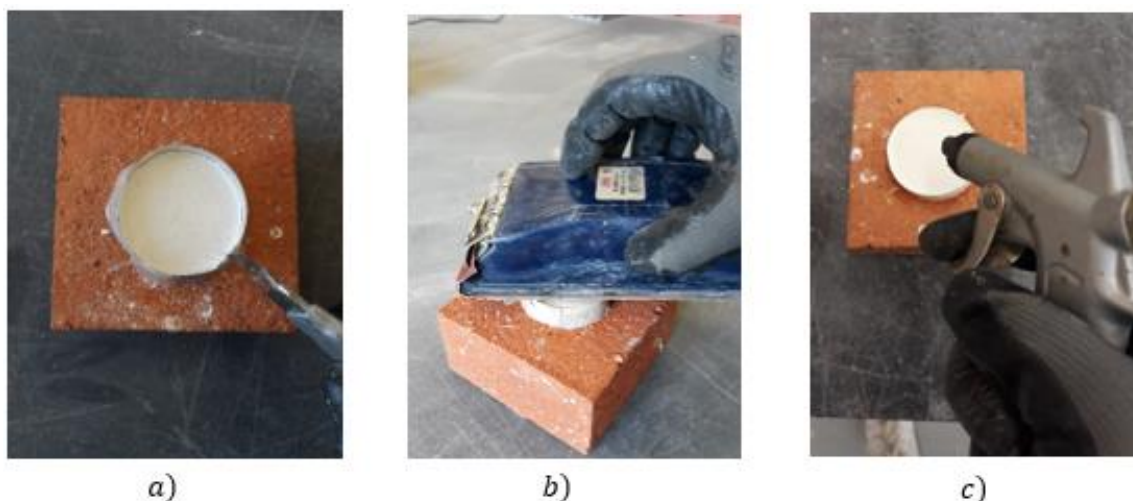


Figura 11 - – Provete aos 90 dias de idade: a) remoção do acetato; b) lixagem da pastilha; c) aplicação pistola de ar.

Colaram-se pastilhas metálicas de 48 mm de diâmetro de rosca centrada com cola de alta resistência à base de resina epoxídica, 48 horas antes do ensaio de tração. Evidencia-se que algumas pastilhas da calda CHL, apresentaram fendilhação sendo descartados dos ensaios.

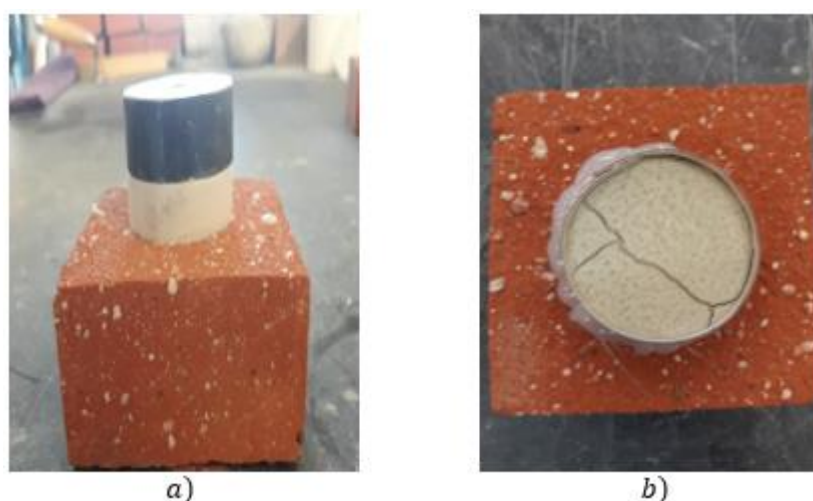


Figura 12 – a) aplicação da pastilha metálica; b) fissura na pastilha da calda CHL.

Posteriormente, foram ensaiados os provetes aos 90 dias de idade. Os ensaios de arrancamento foram realizados no Laboratório de Resistência dos Matérias do Instituto Politécnico de Bragança. Para realizar o ensaio utilizou-se equipamentos de tração constituído por um pórtico de reação equipado com uma célula de carga com 10kN de capacidade máxima, ligados ao computador. A pastilha metálica liga-se ao sistema através de um parafuso de cabeça redonda. Prenderam-se os provetes com gancho no sistema de modo a não se moverem. Foram ensaiados três provetes da calda CA e três de CHL. A tensão aderência à tração dos provetes é calculada pela equação 3:

$$f_{ad} = \frac{F_t}{A}$$

Onde:

f_{ad} – Tensão de aderência à tração, em megapascal (MPa);

F_t - Força de rotura, em newtons (N);

A - Área do provete, em milímetros quadrados (mm²)

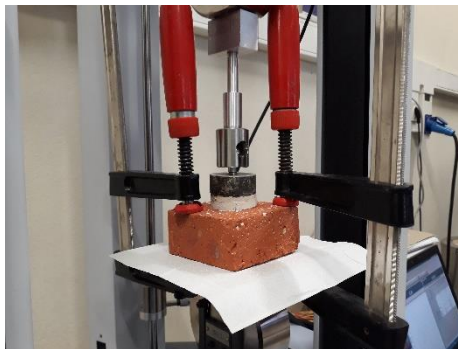


Figura 13 - Ensaio para determinação da aderência calda/tijolo

Após a realização dos ensaios de arrancamento, tentou-se identificar a tipologia de rotura ocorrida nos provetes, pois a rotura nem sempre ocorre entre a calda e o tijolo (chamando-se “interface” no texto) ou entre a calda e a pastilha metálica (chamando-se “cola”).

Nos ensaios de arrancamento por tração é fundamental identificar o tipo de rotura observado (ver tabela 6). O conhecimento das tipologias de rotura é essencial pois a tensão que se obtém no ensaio representa a tensão de aderência ou o seu limite inferior, consoante a rotura é adesiva ou coesiva, respetivamente.

A rotura adesiva pode ser de dois tipos: rotura na interface entre a cola e a calda, indicando que o ensaio foi malsucedido, visto que só pode-se afirmar que a resistência oferecida pela calda e pelo tijolo são superiores a cola (figura 15) e rotura na interface entre a cola e a pastilha, indicando insucesso (figura 16).

A rotura coesiva pode ocorrer no seio calda-cola, no seio do suporte cerâmico, na calda, indicando que a força adesiva foi superior à resistência à tração da calda (figura 17) e rotura no suporte, indicando que a força adesiva foi superior à resistência à tração do substrato (figura 18) [29] [30]. Em caso de a rotura se dar na calda o valor da resistência da aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio.

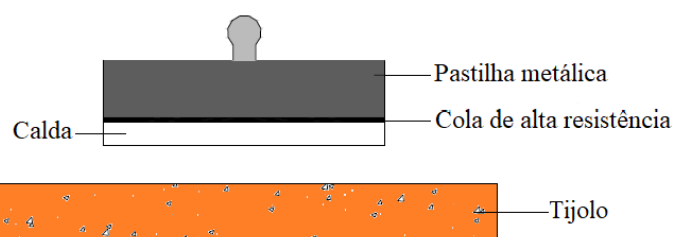


Figura 14 - Ruptura pela interface

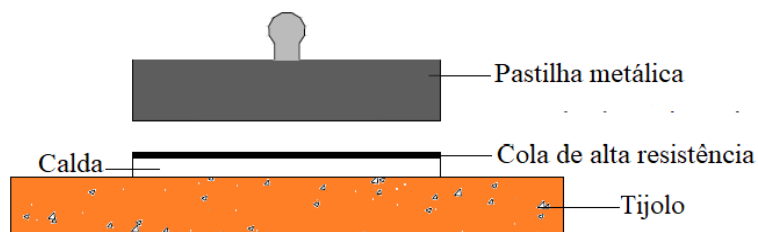


Figura 15 - Ruptura pela cola

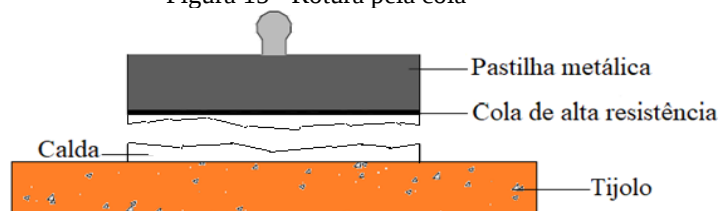


Figura 16- Ruptura pela calda

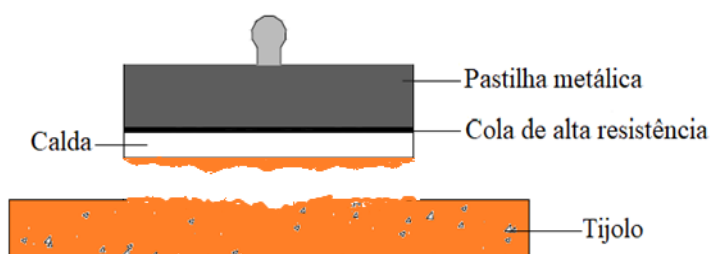


Figura 17 - Ruptura pelo tijolo

Apresentam-se na tabela 6 os valores obtidos da tensão de ruptura média à tração por aderência, em três provetes de cada uma das caldas e o tipo de ruptura. Os provetes da calda CA desprendiam-se naturalmente do tijolo ao colocar-se os ganchos no início dos ensaios.

Tabela 6 - Valor médio de tensão de ruptura à tração.

Calda	Tipo de Ruptura	Tensão de ruptura média à tração (MPa) 90 dias
CA	Calda/Tijolo (interface)	0,07
CHL	Tijolo/Tijolo (interface)	0,66

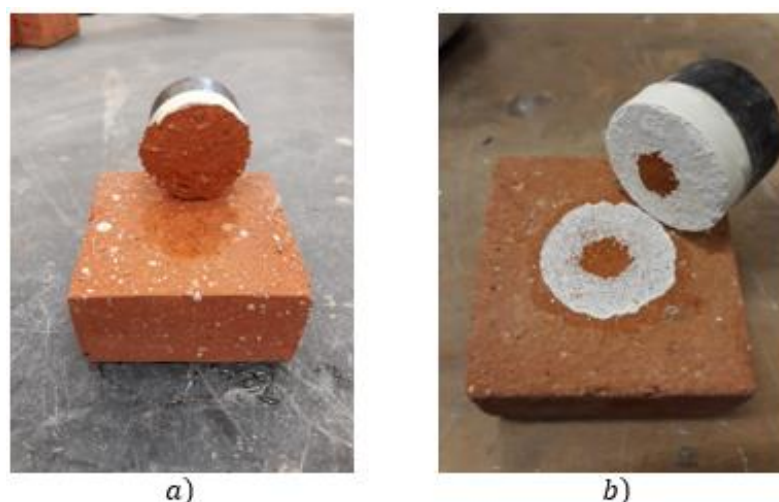


Figura 18 - Tipos de rotura registados nos ensaios: a) rotura pelo tijolo; b) rotura calda/tijolo.

Para visualizarem-se melhor os resultados obtidos, apresentam-se os resultados de forma gráfica, com os valores médios da tensão de rotura à tração por aderência no gráfico 1.

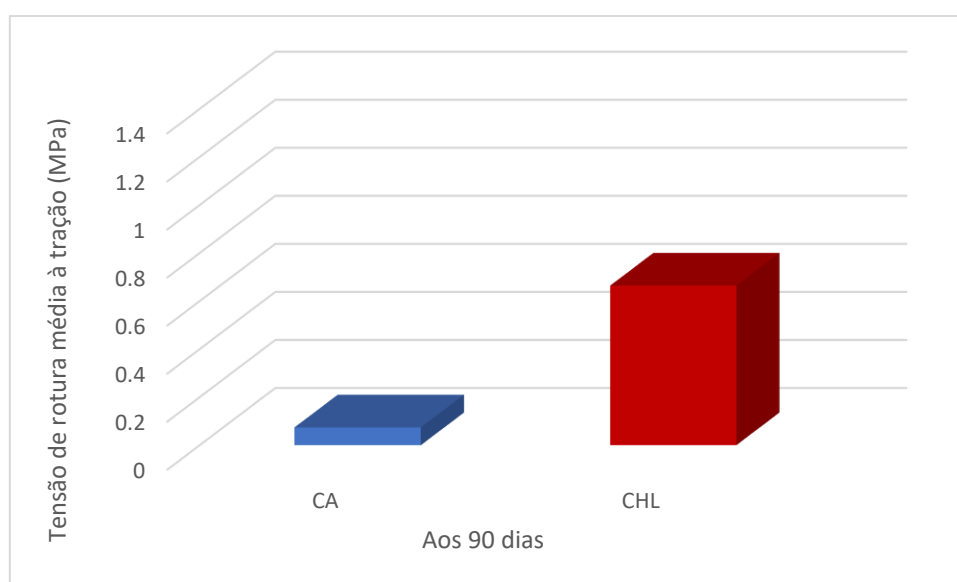


Gráfico 1 - Resultado das caldas: CA e CHL

Destacam-se os provetes da calda CA que apresentaram alguns vazios e pelo fato de na elaboração da calda, ao peneirar ficarem restos no peneiro tal como com os provetes prismáticos $16 \times 16 \times 4 \text{ cm}^3$, o que pode ter levado a uma fraca aderência e a apresentação de valores inferiores aos encontrados em estudos com a mesma composição, tendo em conta os resultados obtidos para mesma calda em ensaios de aderência de pedras.

A calda CHL apresentou melhores resultados em relação a calda CA, tendo atingido o valor máximo de tensão de rotura de 0,74 MPa, aos 90 dias de idade, sendo um valor superior

relativamente ao encontrado em estudos de aderência, nomeadamente em pedra de granito. Observou-se nos ensaios de arrancamento por tração realizados a rotura principalmente pelo tijolo, registando-se apenas uma rotura pela calda o que indica que a resistência à tração do material é bastante superior à força de aderência entre as duas superfícies.

5.6. Ensaio de molhagem e secagem

A durabilidade dos provetes das duas composições estudadas, foi avaliada utilizando numa primeira etapa ensaios de molhagem e secagem, com o objetivo de obter a variação da massa e do volume dos provetes após os 90 dias de cura. O ensaio de molhagem e secagem foi baseado no procedimento realizado por Farias Filho [31], em que os provetes foram submersos em água por 5 h, de seguida foram expostos ao ar por 30 min, depois colocaram-se em estufa por 42 h a uma temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e por fim foram expostos ao ar por mais 30 min. Cada ciclo equivale a 48 h, foram efetuados 6 ciclos para avaliar a deterioração dos provetes, sendo, que ao fim desses ciclos os provetes foram colocados na estufa por mais 24 h a uma temperatura de 105°C . Os gráficos 2 e 3 apresentam os resultados da variação de massa e volume dos provetes.

5.6.1. Variação de Massa

A equação 4 indica o cálculo efetuado para obter o valor referente à perda de massa média dos provetes após os 90 dias de idade. Para o cálculo da perda de massa é necessário corrigir a massa seca do provete, subtraindo a massa da água que ficou retida no provete seco, como se pode observar na equação 4.

Equação 4

$$M_f = \frac{M}{A + 100} + 100$$

Onde:

M_f = massa seca final corrigida;

M = massa seca a 105°C ;

A = Percentagem de água retida no provete.

A perda de massa do provete é obtida pela equação 5:

$$P_m = \frac{M_s - M_f}{M_s} \times 100$$

Onde:

P_m = perda de massa;

M_s = massa seca inicial;

M_f = massa final corrigida.

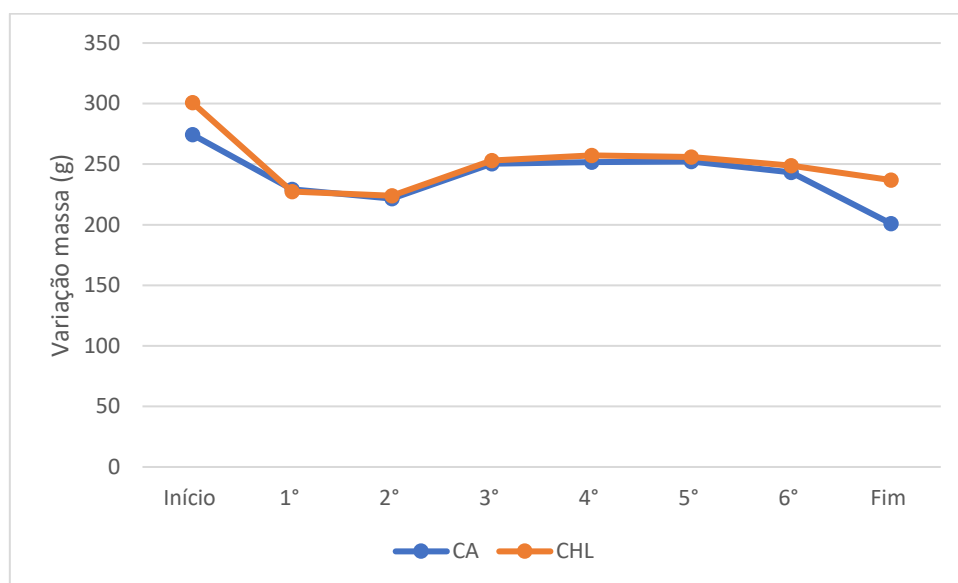


Gráfico 2- Variação de massa, em g, dos provetes durante o ensaio de molhagem e secagem

Observa-se ao analisar o gráfico 2, que as curvas referentes aos ensaios de molhagem e secagem a variação de massa após os 90 dias, apresentam um comportamento descendente até o segundo ciclo, depois há um aumento de massa e uma degradação mais acentuada dos provetes. Alguns provetes no terceiro ciclo apresentaram muitas fissuras o que levou a partirem-se (ver figura 19). As maiores percentagens de variação ocorreram com a calda CA, com uma variação de 36,5%. Com a calda CHL a maior variação entre o resultado final e o inicial localizou-se nos 26,9%.

5.6.2. Variação de Volume

Todas as variações de volume, sejam de expansão ou de retração, estabelecem tensões no interior do material. Caso estas sejam superiores à resistência mecânica, resultam em fissuração. Estas ocorrências não podem ser evitadas, portanto, aconselha-se que o valor limite de contração volumétrica da calda deverá ser na ordem dos 4% [32].

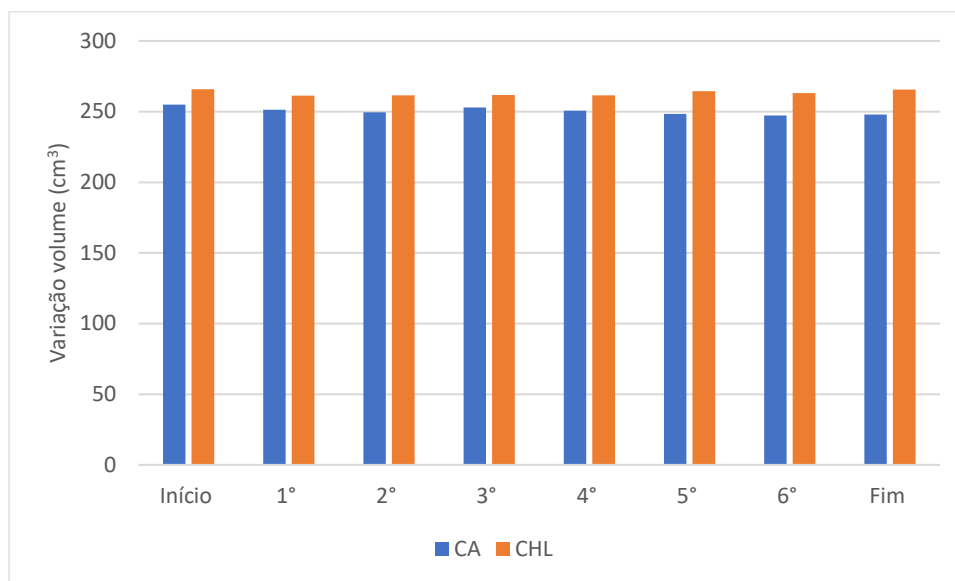


Gráfico 3 - Variação de volume, em cm³, dos provetes durante o ensaio de molhagem e secagem

Através da análise do gráfico 3, pode-se observar que praticamente não houve variação de volume dos provetes, sendo ambos inferiores a 3% respetivamente (CA 2,8% e CHL 0,09% respetivamente).

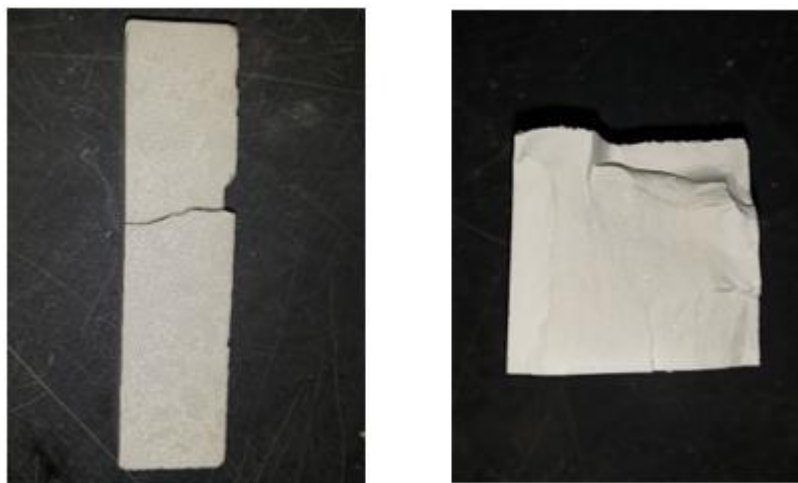


Figura 19 - Estado dos provetes após o fim dos ciclos.

5.7. Avaliação da Durabilidade por Ensaios de Envelhecimento Acelerado

Nos últimos anos, tem-se tentado correlacionar a durabilidade em ensaios cíclicos de gelo/degelo dos materiais em laboratório e relacionar se possível os valores obtidos com o respetivo tempo de vida útil. Testes de envelhecimento acelerado são a maneira mais fácil, rápida e comum de estudar a resistência de um material de construção exposto a certas condições ambientais, bem como saber quais fatores estão envolvidos em sua deterioração e de que forma as propriedades do material são afetadas.

No entanto, é preciso ter em consideração que a degradação natural é uma combinação de condições (ou seja, temperatura, humidade relativa, radiação solar, vento, chuva, sais e poluentes) que são difíceis de reproduzir fielmente por um teste de laboratório. Além disso, a camada de calda aplicada no interior de uma parede pode apresentar características texturais diferentes de uma amostra de laboratório e consequentemente, pode ser afetado de maneira diferente pela degradação. No entanto, o desempenho de testes de envelhecimento acelerado ainda é a ferramenta mais útil para entender os mecanismos de decaimento que ocorrem em rochas e estruturas de alvenaria [33].

As normas que regulam os procedimentos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado são muito reduzidas, sendo que a nível nacional desconhece-se a existência de qualquer norma deste carácter. Não sendo possível adequar documentos normativos existentes por se tratarem de materiais distintos dos estudados, os ensaios foram feitos com base em estudos de durabilidade de materiais mais próximos do estudo.

A definição de ciclos de temperatura e humidade que os provetes das caldas vão ser submetidos é difícil, assim sendo, para estudar o efeito do processo de envelhecimento nas propriedades das caldas, os dois tipos de caldas foram sujeitos a ciclos de temperatura, extrapolando as condições atmosféricas que ocorrem durante o ano na cidade de Bragança. Para conhecer qual das duas caldas apresenta os melhores resultados de durabilidade, foram expostos a extremos, de temperatura e humidade.

Fizeram-se 12 provetes para cada calda. Os provetes foram colocados individualmente na câmara climática *MyKratos*, situada no centro Brigantia EcoPark, sujeitos a 30 ciclos com duração de 12h. O primeiro passo serve apenas para, ao iniciar o ciclo de ensaios, a câmara atingir os valores de humidade relativa e da temperatura pretendida o mais rápido possível. A temperatura programada e a humidade relativa são os pretendidos no segundo passo, 40°C e 40%, respetivamente, variando assim, a temperatura e a humidade ajustando aos valores definidos até o último passo. Na tabela 8 e figura 20 sintetizam-se os 9 passos do programa, anteriormente descritos, em relação a cada parâmetro programado: Temperatura (T(°C)) e Humidade relativa (HR (%)).

Tabela 7 - Esquema das condições de exposição usadas, que representa um ciclo de 12 horas de duração, como indicado pelo tempo inicial (T_{inicial} , em horas) e final (T_{final} , em horas) de cada etapa.

T_{inicial} (h:min)	T_{final} (h:min)	T (°C)	HR (%)
00:00	03:00	40	40
03:00	06:00	15	70
06:00	09:00	-10	30
09:00	12:00	15	70

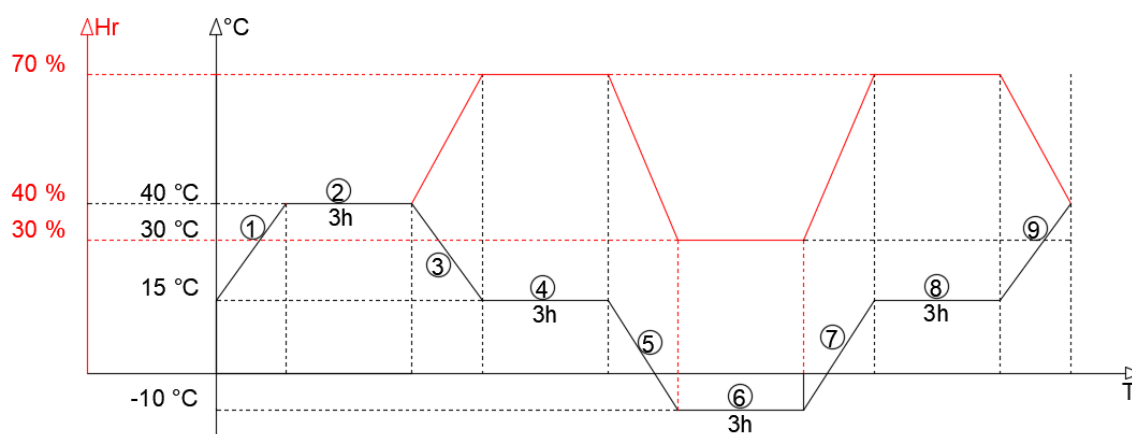


Figura 20 - Ciclo usado no ensaio de 12 horas.

A programação dos ciclos, foi feita em um computador ligado na câmara climática via wi-fi, onde pode-se ler: temperatura programada, humidade relativa, minutos decorridos e o número de repetições que faltam do mesmo programa (figura 21).

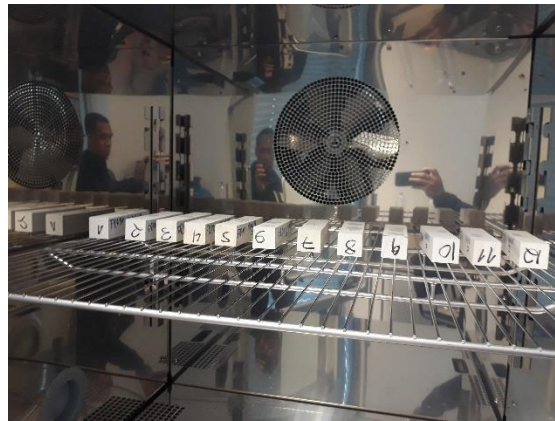


Figura 21 - Colocação de provetes na câmara de envelhecimento artificial acelerado.

Devido a uma avaria na máquina utilizada para a realização do ensaio de envelhecimento acelerado artificial só foi possível a realização do ensaio para a calda CA. Para o cálculo das perdas de massa percentuais sobre a massa inicial do provete, foi utilizado o mesmo cálculo descrito em 5.6.1. O gráfico 4 apresenta o valor obtido após o fim dos ciclos.

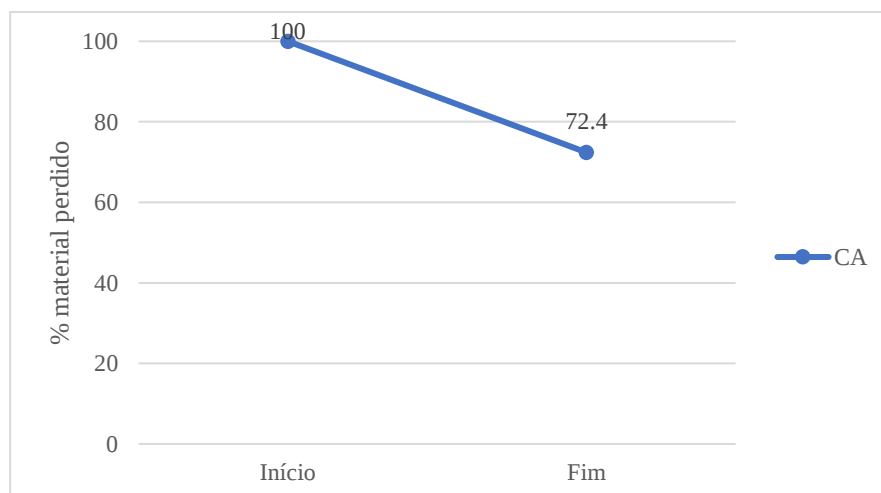


Gráfico 4 - Material perdido após o fim do ciclo de envelhecimento



Figura 22 - Estado dos provetes após o fim dos ciclos.

Após o fim dos ciclos de envelhecimento artificial acelerado em que os provetes foram sujeitos, o seu estado de degradação foi avaliado visualmente. O comportamento dos provetes foi similar em todos os provetes, sendo que a variação de temperatura e humidade foi destrutiva sendo que alguns apresentaram fissuras horizontais e verticais como ilustra na figura 22.

5.8. Ensaio de flexão após o ensaio de envelhecimento acelerado

Após a avaliação da durabilidade por ensaios de envelhecimento acelerado fez-se ensaios de flexão seguindo o mesmo procedimento efetuado anteriormente no capítulo 5.3. Os ensaios de compressão não foram possíveis de realizar devido ao estado dos provetes.

Tabela 8 - Valores médios obtidos em ensaios de flexão (f_{cf}) e desvio padrão (s) após o ensaio de envelhecimento acelerado.

	f_{cf} (MPa)	s (MPa)
Calda	Aos 90 dias/Após ensaio de envelhecimento acelerado	Aos 90 dias/Após ensaio de envelhecimento acelerado
CA	3,14/0,72	0,23/0,11



Figura 23 - Estado do provete após o ensaio de flexão.

Comparativamente ao resultado obtido antes do ensaio de avaliação da durabilidade por envelhecimento acelerado, a calda CA apresentou valores mais baixos como já era esperado devido a perda de massa e consequentemente a menor resistência, os valores obtidos foram 5 vezes inferiores ao valor anteriormente obtido.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1. Conclusões finais

Neste ponto pretende sumarizar-se as principais conclusões do presente trabalho de investigação, a análise das limitações encontradas durante a sua realização e algumas sugestões para futuras investigações.

Este trabalho teve por objetivo principal estudar caldas de injeção, à base de cal para reforço de paredes de alvenaria antiga de tijolos. Sobre este tema conhece-se muito pouco, não havendo muitos estudos científicos, pelo que com este trabalho se pretende dar um contributo. Durante os procedimentos propostos para o ensaio de durabilidade com ensaios de aceleração artificial, encontrou-se algumas adversidades nomeadamente a avaria da máquina e a impossibilidade de continuar os ensaios.

Comparando as duas caldas elaboradas *in situ*, conclui-se que uma menor percentagem de cimento branco e cal hidráulica na composição das caldas dá origem a valores superiores.

A calda à base de cal hidratada apresentou valores abaixo do esperado, devido ao acréscimo de metacaulino e uma maior percentagem de superplastificante, esperava-se maiores valores. Assume-se que, uma das possíveis causas, deve-se a má homogeneização dos materiais.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, pode-se concluir que a calda à base de cal hidráulica apresentou valores inferiores, tanto na perda de massa como na variação de volume, sendo assim dá-se o envelhecimento mais lentamente. Embora os resultados obtidos e posteriormente comparados entre as duas caldas, devido aos fatores externos e a deficiente homogeneização dos materiais, acredita-se que, a calda CA poderá apresentar melhores resultados.

Na avaliação da durabilidade das caldas por ensaios de envelhecimento artificial acelerado, procurou-se avaliar o decréscimo de massa dos provetes, submetendo os provetes a temperaturas mais gravosas, registadas, normalmente, em Bragança e de uma forma cíclica simulou-se um ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados obtidos mostram um decréscimo de 72,4% de massa dos provetes à base de Cal Hidratada, após 30 ciclos de 12 horas de envelhecimento artificial acelerado, inferiores relativamente aos valores iniciais, sendo que foram observados o mesmo tipo de rotura nos provetes evidenciando o efeito do envelhecimento.

Em suma conclui-se, portanto, que a calda à base CHL apresenta as propriedades necessárias para ser utilizadas como uma calda de injeção para paredes de alvenaria antiga em tijolo, sendo necessário realizar mais ensaios e verificado o comportamento com tempos de curas superiores aos 90 dias de idade. Em contrapartida a calda à base CA em virtude dos resultados insatisfatórios obtidos não apresenta as componentes necessárias.

6.2.Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se os seguintes tópicos:

- Estudo com caldas à base Cal Hidráulica incorporada metacaulino;
- Caracterizar mecanicamente e quimicamente os tijolos a serem injetados;
- Envelhecimento acelerado artificial com maior número de ciclos, com acréscimo de chuvas, raios ultravioletas e superiores aos 90 dias de cura;
- Estender a caracterização do conjunto tijolo/calda realizando ensaios de envelhecimento artificial;
- Realizar ensaios de envelhecimento natural em paredes de tijolo, aplicados com caldas à base de cal;

7. Referências

- [1] H. Sousa, “Construções em Alvenaria,” Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [2] J. Correia, “Paredes de alvenaria de tijolo de barro vermelho,” Janeiro 2003.
- [3] E. Luso, “Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenarias Antigas,” Universidade do Minho, Minho, 2012.
- [4] “ICOMOS,” *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitetónico. International Council on Monuments and Sites*, 2004 .
- [5] A. Araújo, “Cartas de restauro,” *Fundamentação teórica do restauro*, Março 2003.
- [6] L. Binda, G. Cardani e A. Saisi, “A Classification of Structures and Masonries for the Adequate Choice of Repair,” *International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry Delft*, 28 January 2005.
- [7] F. Branco, J. Brito, J. Ferreira e I. Flores, “Patologia e Inspeção de Construções em Alvenaria Ordinária de Pedra”.
- [8] F. Castro, F. Fernandes e P. Lourenço, “Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties,” Janeiro 2010.
- [9] I. Flores e J. de Brito, *Diagnóstico, patologia e reabilitação de elementos não estruturais em construção em alvenaria de tijolo*, Lisboa, 2004.
- [10] F. Branco e J. de Brito, “Patologia de Alvenaria de Tijolo,” Lisboa.
- [11] A. Brás, “Grout Optimization for Masonry Consolidation,” Lisboa, 2011.
- [12] F. Pinho, M. Baião e V. Lucio, “Técnicas de Consolidação de Paredes de Edifícios Antigos,” LNEC.
- [13] A. Figueiredo, “Caldas de Injeção Pré-doseadas para Alvenarias Antigas,” Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [14] M. Valluzzi, “Comportamento meccanico di murature consolidate con material tecnico a base di calce,” Università di Padova, Italy, 2000.
- [15] E. Luso, M. Ferreira e R. Miguel, “Injecções para consolidação de construções em terra : revisão do conhecimento e métodos de ensaio,” V seminário Arquitetura de Terra em Portugal, Aveiro, 2007.

- [16] B. Klosowski, “Caracterização de Caldas de Injeção à Base de Cal Hidráulica Para Consolidação de Alvenaria de Pedra,” Bragança, Março 2019.
- [17] D. Silva, “Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em Geotecnia,” Lisboa, 2010.
- [18] J. Álvarez, J. Izaguirre e J. Lanas, “Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment,” Fevereiro 2010.
- [19] D. Benavente, M. del Cura, A. Bernabéu e S. Ordóñez, “Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method,” *Engineering Geology*, pp. 313-325, Abril 2001.
- [20] E. Luso e P. B. Lourenço, “Mechanical Behavior of Two-Leaf Masonry Wall Strengthening Using Grouts. Journal of Materials in Civil Engineering,” 2019.
- [21] NP EN 459-1:2011, “Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade,” 2011.
- [22] A. Velosa e M. Veiga, “Lime-metakaolin Mortars - Properties and Applications, Sustainable Construction,” *Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium*, Lisboa, IST, 2007.
- [23] J. Björnström e S. Chandra, “Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements,” *Materials and Structures*, p. 685–692, Dezembro 2003.
- [24] A. Brás e F. Henriques, “The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties,” *Materials and Structures*, pp. 42(10):1423-1432, Dezembro 2009.
- [25] E. Júlio, “Caldas de cimento. Aplicações, composição e caracterização,” Março 2014.
- [26] “NP EN 447. Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Requisitos,” 2008.
- [27] CEN EN 12390-5:2009, “Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens,” 2009.
- [28] CEN EN 12390-3:2009, “Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of the test specimens,” 2009.
- [29] A. Sá, “Durabilidade de cimentos-cola em revestimentos cerâmicos aderentes a fachadas,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

- [30] ASTM Internacional, “ASTM C1583:Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and,” 2013.
- [31] F. Filho, “Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito. Campina Grande,” Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- [32] M. Tavares, “A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Faculdade de Arquitectura, Universidade Técnica de Lisboa,” Lisboa, 2009.
- [33] A. Arizzi, H. Viles e G. Cultrone, “Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings,” pp. 807-818, Março 2012.
- [34] M. Baião, F. Pinho, V. Lúcio e A. Coelho, “Aspetos da Reabilitação de Edifícios Antigos de Alvenaria,” em *Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria*, Lisboa.
- [35] E. Vintzileou, Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry Before and After Grouting. Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 2006.
- [36] M. Valluzzi, “Comportamento meccanico di murature consolidate con material e tecniche a,” Università di Padova, Italy, 2000.
- [37] J. Wallevik, “Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown,” Cement and Concrete Research, Volume 39, Issue 1, January 2009, Pages 14-29, 2009.
- [38] Prefeitura do Recife, *Métodos de ensaio solo-cimento, Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem*, 2003.
- [39] ABNT NBR 13528, “Revestimentos de paredes de argamassa inorgânicas - Determinação de resistência de aderência à tração,” Setembro Fevereiro 2010.
- [40] Carta de Veneza, “Sobre a conservação e restauro dos monumentos e dos sítios,” 1964.
- [41] M. Vieira, “Betões Autocompactáveis - Reologia do betão no estado fresco,” PhD Thesis in Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa., 2008.
- [42] E. Toumbakari, Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls, Katholieke Universiteit Leuven, 2002.

- [43] J. Grilo, P. Faria, R. Veiga, A. Santos Silva, V. Silva e A. Velosa, “New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions,” pp. 378-384, 15 Março 2014.
- [44] A. Brás, “Grout optimization for masonry consolidation. PhD Thesis in Faculdade de Ciências e Tecnologia,” Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [45] J. Correia, “Patologia em paredes de alvenaria de tijolo,” Lisboa, 2010.
- [46] I. Dirkx, A. Smits e Y. Grégoire, “Research concerning the durability assessment of lime”.
- [47] R. Lima, “Estudo da Durabilidade de Paredes Monolíticas e Tijolos de Solo-Cimento Incorporados Com Resíduo de Granito,” Campina Grande, 2010.
- [48] F. Lisboa, “Materiais - Grupo de disciplinas de materiais edificacoes e ambiente,” Lisboa, 2006/2007.
- [49] J. Roque, “Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria,” Universidade do Minho, Braga, 2002.
- [50] R. Boynton e K. Gutschick, “Durability of Mortar and Masonry,” *Factors Influencing Mortar Durability*, Fevereiro 1989.
- [51] M. Teixeira, “Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Lisboa, 2013.

ANEXO I

Neste anexo, estão presentes os quadros das fichas técnicas dos materiais usados para a elaboração das caldas.

Quadro I. 1 - Características técnicas da Cal Hidratada

Caraterísticas Químicas		Desempenho	Norma
Cal disponível (% em massa)		≥ 80	EN 459-1
SO ₃ (% em massa)		≤ 2	EN 459-1
CO ₂ (% em massa)		≤ 4	EN 459-2
CaO + MgO (% em massa)		≥ 90	EN 459-3
MgO (% em massa)		≤ 5	EN 459-4

Caraterísticas Físicas		Desempenho	Norma
Água livre (%)		≤ 2	EN 459-1
Finura (resíduo em % de massa)	0.09 mm 0.2 mm	≤ 7 ≤ 2	EN 459-1
Expansibilidade (mm)		≤ 20	EN 459-1
Penetração / água necessária (mm)		> 10 e < 50	EN 459-1
Teor de ar (%)		$\leq 25,0$	EN 459-1

Caraterísticas Mecânicas	Valor	Norma
Resistência à compressão (28 dias)	$\geq 5,0$ MPa	EN 459-1

Quadro I. 2 - Características técnicas do Metacaulino Burgess Optipozz

Caraterísticas Químicas	
SiO ₂ (%)	51,0 - 52,4
Al ₂ O ₃ (%)	42,1 - 44,3
Fe ₂ O ₃ (%)	0,3 - 0,5
TiO ₂ (%)	1,56 - 2,5

Caraterísticas Físicas	
pH	4,0
Mesh Residue (%)	0,09
Specific gravity	2,2 g/cm ³
Average particle size sedigraph	1,4 μ

Quadro I. 3 - Características técnicas do Cimento Cem II/B-L 32,5 R

Caraterísticas Químicas	Valor	Norma
Sulfatos (SO ₃) (%)	≤ 3,5	EN 197-1
Cloretos (CL) (%)	≤ 0,10	EN 197-2

Caraterísticas Físicas	Valor	Norma
Início de presa (min)	≥ 75	EN 459-1
Expansibilidade (mm)	≤ 10	EN 459-1
Índice de reflectância (%)	≥ 80	EN 459-1

Caraterísticas Mecânicas	Valor	Norma
Resistência à compressão (2 dias)	10,0 MPa	EN 459-1
Resistência à compressão (28 dias)	32, 5 MPa	EN 459-1

Quadro I. 4 - Características técnicas da HL 5 - Cal Hidráulica

Caraterísticas Químicas	Valor	Norma
Cal disponível Ca (OH) ₂ (%)	≥ 4,0	EN 459-1
Sulfato (SO ₃) (%)	≤ 3,0	EN 459-1

Caraterísticas Físicas	Valor	Norma
Água livre (%)	≤ 1,0	EN 459-1
Finura (%)	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 5,0	EN 459-1
Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar (%)	≤ 25,0	EN 459-1
Início de presa (h)	> 1	EN 459-1
Fim de presa (h)	≤ 15	EN 459-1

Caraterísticas Mecânicas	Valor	Norma
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 5,0 Mpa	EN 459-1

Quadro I. 5 - Características técnicas do superplastificante Dynamon SR1

Aparência	Líquido castanho
Densidade relativa (20°C)	1,06 ± 0,02 g/cm ³
Teor em iões cloreto (%)	< 0,1
Teor em óxido de sódio (%)	< 2

