

CARACTERIZAÇÃO DE CALDAS DE INJEÇÃO À BASE DE CAL HIDRÁULICA PARA CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIAS DE PEDRA

Bernardo Klosowski

Relatório Final de Projeto Apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Março 2019

**CARACTERIZAÇÃO DE CALDAS DE INJEÇÃO À BASE DE CAL HIDRÁULICA
PARA CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIAS DE PEDRA**

Bernardo Klosowski

Relatório Final de Projeto Apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção
No âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadora:

Prof.^a Eduarda Cristina Pires Luso

Orientador:

Prof. Arthur Medeiros

Março 2019

Aqueles que se enamoram somente da prática, sem cuidar da teoria, ou melhor dizendo, da ciência, são como o piloto que embarca sem timão nem bússola. A prática deve alicerçar-se sobre uma boa teoria, à qual serve de guia a perspectiva; em não entrando por esta porta, nunca se poderá fazer coisa perfeita nem na pintura, nem em nenhuma outra profissão.

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Politécnico de Bragança, que me recebeu de braços abertos e possibilitou o desenvolvimento desta tese e tantas outras experiências.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, instituição da qual eu sou um orgulhoso aluno, que tanto contribuiu na minha formação como homem e engenheiro.

À equipe técnica dos Laboratórios de Estruturas e Resistência dos Materiais e de Materiais de Construção: Hermínia Moraes, Luísa Barreira, João Pires e Octávio Pereira, pelo esforço e pelas boas conversas durante o desenvolvimento das atividades laboratoriais.

Ao Professor Arthur Medeiros, que me acompanhou em todo o meu percurso acadêmico, pela amizade desenvolvida desde as aulas de Materiais de Construção.

À Professora Eduarda Luso, pela contribuição científica e pessoal, através de úteis conselhos, palavras de estímulo e persistência frente às dificuldades encontradas.

Aos meus queridos avós, Antônio, Joana, Vilson e Florentina, dos quais tenho muito orgulho, pela preocupação e pelo carinho.

Ao meu amigo e irmão, Brunno, que admiro muito, por ser meu grande companheiro.

Aos melhores professores que já tive, meus pais, Ana Léa e Cezar, pelo apoio que sempre me proporcionaram. Não tenho palavras para expressar o amor que sinto por vocês.

RESUMO

A injeção de caldas é uma das técnicas mais utilizadas no reestabelecimento da resistência ao cisalhamento, à flexão e à compressão de alvenarias de pedra. O objetivo desta prática é aumentar a integridade da estrutura criando uma ligação entre os constituintes que um dia estiveram unidos. Desta forma é reestabelecida a aptidão da edificação em distribuir as cargas horizontais e verticais que atuam sobre a mesma.

O sucesso da intervenção depende dos materiais já existentes, mas também do desempenho das técnicas e dos materiais utilizados. No caso das caldas, há a necessidade de que o material tenha boas características em estado fluido e sólido: para que no primeiro momento a introdução na parede possa ser feita de maneira apropriada e após a pega haja a reconstituição das propriedades da alvenaria.

Este trabalho pretende verificar o comportamento de caldas à base de Cal Hidráulica feitas em laboratório em comparação com um produto comercializado pronto. Para isto, foram testadas diversas propriedades físicas, mecânicas e reológicas de algumas formulações deste tipo de material, bem como suas interações com pedras bastante comuns em edificações históricas portuguesas. Para isto, foi empregada uma campanha experimental que incluiu a verificação dos tempos de escoamentos em Cone de Marsh, testes de resistência a diferentes esforços e injeções em corpos de prova preenchidos com pedra britada. Conjuntamente, realizou-se uma análise financeira a fim de verificar as diferenças nos custos relacionados com a execução dos compostos estudados.

Por fim, concluiu-se que é possível realizar em laboratório caldas à base de Cal Hidráulica com adição de Cimento Portland Branco que tenham características similares à calda comercial testada, sendo possivelmente empregadas na reabilitação de edificações antigas. No entanto, em caldas cujo único aglomerante é a Cal Hidráulica, foi notada grande dificuldade em obter comportamento satisfatório, o que compromete também a sua utilização.

Palavras chave: caldas de injeção, cal hidráulica, conservação, restauro.

ABSTRACT

The injection of grouts is one of the most used techniques in the recovering of the resistance to the shear, bending and compression stresses in stone masonry. The purpose of this technique is to increase the integrity of the structure by creating a bond between the elements that once were united. Thus, the structure's ability to distribute the horizontal and vertical loads acting on it is reestablished.

The results of the intervention depends on the existing elements, but also on the materials and the techniques used. In the case of grouts, it is necessary that the material has good characteristics in the fluid and hardened states. So that, in the first moment the introduction into the wall can be made in an appropriate way and, in a second time, the hardening processes can occur inside of the masonry, improving its mechanical properties.

This work intends to verify the behavior of grouts based on hydrated lime made in laboratory in comparison with an industrialized product designed for the same use. For this purpose, several physical, mechanical and rheological properties of some grout formulations were tested. The experimental campaign used includes the verification of the times of flows in a Marsh Cone, tests of resistance to different kinds of stresses and injections in samples filled with crushed stone. Finally, a financial analysis was carried out to verify the differences in costs related to the manufacturing of the grouts studied.

The study concluded that hydraulic based grouts with the addition of White Portland Cement that have similar characteristics to the commercial grout tested can be performed in laboratory. It has also been observed that these compounds have potential to be used in the restoration of historic buildings. However, in the grouts whose the only binder is hydraulic lime, it was noticed a great obstacle in obtaining satisfactory behavior, which also compromises its use.

Key words: injection grouts, hydraulic lime, conservation, restoration.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivos gerais.....	2
1.1.2. Objetivos específicos:	3
1.2. Justificativa.....	4
1.3. Conteúdo e estrutura da tese	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. A importância da conservação das edificações antigas	6
2.2. A evolução das recomendações para o restauro	7
2.3. A aplicação de caldas na reabilitação de alvenarias de pedra	11
2.4. Propriedades de uma calda de injeção	12
2.4.1. Penetrabilidade	12
2.4.2. Fluidez.....	13
2.4.3. Estabilidade	13
2.4.4. Tempo de pega	14
2.4.5. Resistências mecânicas	14
2.4.6. Variações de volume	15
2.5. Técnicas de aplicação das caldas de injeção	15
2.6. Materiais utilizados nas caldas executadas em laboratório	17
2.6.1. Cal hidráulica	18
2.6.2. Cimento Portland Branco	19
2.6.3. Superplastificantes	21
2.7. Substratos pétreos	22
2.7.1. Xisto	22
2.7.2. Granito amarelo.....	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1. Formulação das caldas.....	25

3.2.	Caracterização das pedras.....	26
3.3.	Execução das caldas	30
3.4.	Caracterização das caldas	32
3.4.1.	Ensaio em estado fresco.....	32
3.4.2.	Execução dos corpos de prova prismáticos.....	35
3.4.3.	Execução dos corpos de prova para os ensaios de aderência.....	36
3.4.4.	Ensaio em estado endurecido.....	37
3.4.5.	Caracterização dos cilindros injetados	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1.	Formulação das caldas.....	47
4.2.	Caracterização das pedras.....	49
4.3.	Caracterização das caldas	49
4.3.1.	Ensaio em estado fresco.....	49
4.3.2.	Ensaio em estado endurecido.....	53
4.3.3.	Caracterização dos cilindros injetados	63
4.4.	Análise financeira	72
4.4.1.	Pesquisa de preços.....	72
4.4.2.	Análise do rendimento e custos totais	75
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
5.1.	Considerações finais	77
5.2.	Trabalhos futuros	79
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Simbologia utilizada na química de aglomerantes hidráulicos.	18
Tabela 2 – Materiais aplicados na execução das caldas.	25
Tabela 3 – Composição das caldas estudadas.	26
Tabela 4 – Faixas granulométricas e proporções utilizadas.	27
Tabela 5 – Tempos de escoamento de Marsh das caldas produzidas com Legante per Iniezioni.	47
Tabela 6 – Tempos de fluidez obtidos para dimensionamento da calda CHL.	48
Tabela 7 – Tempos de fluidez obtidos para dimensionamento da calda CHLCP.	48
Tabela 8 – Resultados obtidos para caracterização das pedras.	49
Tabela 9 – Tempos obtidos no ensaio de Cone de Marsh.	50
Tabela 10 – Volumes de sólidos observados para cada uma das caldas (em mL).	50
Tabela 11 – Porcentagens de exsudação.	51
Tabela 12 – Resultados obtidos para tempo de enchimento dos corpos de prova cilíndricos (s).	51
Tabela 13 – Volumes, pesos e massas específicas médias dos corpos de prova prismáticos.	54
Tabela 14 – Desvios padrão e valores médios de tensão de ruptura à flexão.	54
Tabela 15 – Desvios padrão e valores médios de tensão de ruptura à compressão.	56
Tabela 16 – Desvios padrão, números de amostra e valores médios de tensão de ruptura à tração.	60
Tabela 17 – Características físicas dos corpos de prova cilíndricos compostos por pedra e calda.	64
Tabela 18 – Valores médios encontrados na análise dos corpos de prova injetados. ..	64
Tabela 19 – Tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão uniaxial.	65
Tabela 20 – Tensões médias de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão diametral.	69
Tabela 21 – Custos associados à compra dos produtos fabricados pela Secil.	73
Tabela 22 – Custos associados à compra do produto Mapei Dynamon SX35.	74
Tabela 23 – Custos associados à compra do produto Fassa Bortolo Legante per Iniezioni 790.	75
Tabela 24 – Rendimento e massas para composição de 1 metro cúbico das três caldas estudadas.	75

Tabela 25 – Custos totais para composição de 1 metro cúbico das três caldas estudadas.

..... 76

Tabela 26 – Valores médios das propriedades estudadas nesta tese. 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Castelo de Pierrefonds ainda em ruínas. Fonte: Archives Photographiques, Paris.....	8
Figura 2 – Castelo de Pierrefonds depois do restauro de Viollet-Le-Duc. Fonte: Cornell University Library.....	9
Figura 3 – Proteção através de facing. Fonte: Tavares [9].....	16
Figura 4 – (a) Inserção de tubos poliméricos; (b) Realização da injeção. Fonte: Silva [29].....	17
Figura 5 – Representação esquemática dos fenômenos que ocorrem durante a hidratação dos sulfatos de cálcio. Fonte: Adaptado de Gartner et al. [43].	20
Figura 6 – Utilização de xisto em construções: (a) com função de telhado; (b) coberto por argamassa de Cimento Portland.....	23
Figura 7 – Aspecto do granito amarelo utilizado nos ensaios laboratoriais.....	24
Figura 8 – Determinação das massas: (a) na condição saturado superfície seca; (b) submerso em água.....	27
Figura 9 – Determinação da massa unitária: (a) recipiente utilizado; (b) pesagem do recipiente e do agregado.....	29
Figura 10 – (a) Balança de precisão utilizada para pesagem dos materiais; (b) Equipamento utilizado para ajuste de temperatura da água; (c) Verificação da temperatura da água utilizada na amassadura.....	30
Figura 11 – (a) Misturador modelo Rubimix 10 utilizado para a amassadura; (b) Ponta misturadora utilizada para a amassadura.....	31
Figura 12 – Dimensões do cone utilizado para determinação da fluidez.....	32
Figura 13 – Execução do teste para determinação da exsudação.....	33
Figura 14 – Injeção dos cilindros: (a) aspecto da forma antes do enchimento; (b) aspecto da forma logo após ao enchimento. Fontes: (a) o autor e (b) Luso [28].....	35
Figura 15 – Execução dos corpos de prova para o ensaio de flexão e compressão.	36
Figura 16 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos: (a) aspecto da forma antes do enchimento; (b) aspecto da forma logo após ao enchimento.....	37
Figura 17 – Dimensões do corpo de prova e posicionamento dos cilindros. Fonte: NP EN 12390-5 [59].....	38
Figura 18 – Realização do ensaio para determinação da resistência à compressão.	40
Figura 19 – Aplicação da cola bicomponente na pastilha metálica.....	41
Figura 20 – Corpo de prova que se rompeu durante a operação de desmoldagem.	41
Figura 21 – Execução do ensaio de aderência.....	42

Figura 22 – Modos de ruptura quando o corpo de prova é submetido à tração. Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13558 (2010) [64].	43
Figura 23 – Ensaio de compressão uniaxial realizado em corpo de prova composto por pedra e calda.	45
Figura 24 – Determinação da resistência à tração: (a) esquema representativo do ensaio; (b) posicionamento do corpo de prova no equipamento.	46
Figura 25 – Ensaio de injetabilidade da calda CCOM em corpo de prova preenchido com granito.	52
Figura 26 – Tempo médio de enchimento dos corpos de prova preenchidos com pedra.	53
Figura 27 – Tensões médias de ruptura por flexão.	55
Figura 28 – Rompimento dos corpos de prova quando submetidos à esforços de flexão.	56
Figura 29 – Tensões médias de ruptura por compressão.	57
Figura 30 – Corpo de prova rompido por compressão uniaxial.	58
Figura 31 – Corpos de prova após 7 dias de cura: (a) calda CHL; (b) calda CHLCP; (c) calda CCOM.	59
Figura 32 – Tensões médias de ruptura por tração.	61
Figura 33 – Superfícies de ruptura com tempo de cura de 90 dias: (a) calda CCOM; (b) calda CHLCP; (c) calda CHL.	63
Figura 34 – Tensões médias de ruptura por compressão uniaxial.	67
Figura 35 – Fendas verticais e destacamentos observados nas faces dos corpos de prova.	68
Figura 36 – Tensões médias de ruptura por compressão diametral.	70
Figura 37 – Falhas de preenchimento nos corpos de prova constituídos por CHL: (a) falhas frequentes de menor dimensão; (b) falhas excepcionais de maior dimensão.	71
Figura 38 – Interior dos cilindros: (a) composto por granito e CCOM; (b) composto por granito e CHLCP e (c) composto por granito e CHL.	71
Figura 39 – Interior dos cilindros: (a) composto por xisto e CCOM; (b) composto por xisto e CHLCP e (c) composto por xisto e CHL.	72

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	Centímetro
CP	Cimento Portland
CSH	Silicato de cálcio hidratado
EN	Norma Europeia
g	Gramma
HL	Cal Hidráulica
ICOMOS	Conselho Internacional de Monumentos e Sítios
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
kg	Quilograma
kN	Quilonewton
L	Litro
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma da Associação Mercosul de Normalização
NP	Norma Portuguesa
RPM	Rotação por minuto
s	Segundo
W	Watt

1. INTRODUÇÃO

O processo de preservação do patrimônio histórico arquitetônico faz-se basicamente de duas maneiras: preferencialmente com pequenas manutenções periódicas ou então com grandes intervenções quando o estado da estrutura já está bastante afetado. Nos dias de hoje ainda encontram-se muitas estruturas em graus já altamente avançados de deterioração, sendo necessárias maiores operações para o tratamento destas patologias.

Deve-se ter total domínio sobre as técnicas aplicadas sobre peças históricas, uma vez que são insubstituíveis, sejam estas uma escultura de Michelangelo, uma pintura de Van Gogh, um manuscrito de McCartney ou uma alvenaria transmontana cujo executor é desconhecido. Estes objetos merecem o mesmo respeito pois tratam-se de testemunhos de valor incalculável do progresso humano.

Posto isto, desenvolveram-se diversas estratégias utilizadas para o restauro e reabilitação de peças históricas. No caso das alvenarias, uma das mais utilizadas é a injeção de caldas. Estes materiais, que comumente também são chamados de *grouts*, referem-se às misturas fluidas geralmente compostas por aglomerantes, água e aditivos.

Apesar de atualmente existir o Cimento Portland, cujas características mecânicas são excelentes e o fazem ser o material mais utilizado em construções modernas, sabe-se que a cal ainda é o material com melhores características para o restauro de edificações antigas. O que se deve à sua compatibilidade físico-química com os materiais utilizados outrora.

Existe uma grande variedade de alvenarias quando se trata em edificações antigas: enquanto algumas são compostas por diversos panos ligados por múltiplos tipos de materiais, outras apresentam apenas uma camada. Ainda existem aquelas feitas com diferentes tipos de cerâmica ao passo que outras são constituídas pelos mais variados tipos de pedras. Desta forma, deve-se ter em mente que não existe uma fórmula única de calda de injeção que seja completamente eficaz para todos estes usos, por outro lado, acredita-se que algumas características devem ser sempre mantidas.

O objetivo da injeção deste tipo de material é reestabelecer ligações que previamente ocorriam entre os diversos constituintes da alvenaria, reestruturando as propriedades mecânicas, nomeadamente as resistências à flexão, compressão e

cisalhamento. Para isto, estes compostos devem oferecer algumas características que de certa forma podem ser concorrentes: estabilidade, injetabilidade e resistência mecânica.

Portanto, verifica-se que as características em estado fresco são tão importantes quanto àquelas apresentadas em estado sólido, dado que o processo de pega deve ocorrer no interior da parede. Afinal, não faz sentido ter boas características em estado sólido se não se consegue injetar este material de maneira apropriada.

Com o intuito de realizar uma contribuição ao avanço científico deste tipo de material, foi desenvolvida uma metodologia para testar as propriedades das caldas de injeção em estado fluido e sólido, bem como as suas interações com dois tipos de pedra comumente encontradas em construções históricas no norte de Portugal: o xisto e o granito amarelo.

Visto que a eficácia de uma calda não seja medida só no ganho de resistências mecânicas mas também em sua ductilidade, durabilidade e compatibilidade com o substrato, tomou-se o cuidado de utilizar apenas materiais e proporções recomendadas pelos documentos que gerenciam as técnicas de restauro atualmente [1]. Por outro lado, sabe-se que são muitos os parâmetros que influenciam o sucesso ou o fracasso de um processo de restauro, sendo assim, o foco desta pesquisa ficou direcionado apenas para as características dos materiais, o processo de injeção, a interação entre pedra e calda e a análise financeira.

1.1. Objetivos

Em meio a tantas incertezas técnicas e morais que permeiam a interferência antrópica em artefatos históricos, pretende-se, em suma, que este trabalho seja uma contribuição ao movimento de conservação e restauro do patrimônio arquitetônico português, brasileiro e mundial. Desta forma, definem-se os seguintes objetivos gerais e específicos para a realização desta pesquisa.

1.1.1. Objetivos gerais

- Sistematizar os conhecimentos já existentes a respeito do restauro das edificações antigas, da importância de sua manutenção, das principais técnicas de restauro e da empregabilidade das caldas de injeção.

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas significativas para o processo de injeção de pré-dosada, tanto em seu estado isolado quanto na interação com diferentes suportes pétreos.
- Desenvolver caldas à base de Cal Hidráulica e Cimento Portland Branco, com adição de superplastificante, cuja fluidez seja semelhante à da calda pré-dosada também estudada.
- Verificar se há a viabilidade da substituição de caldas comerciais por caldas executadas *in loco*, considerando suas particularidades físicas, mecânicas e financeiras.

1.1.2. Objetivos específicos:

- Verificar as características da cal da comercial Ex Novo Legante Per Iniezioni produzida pela Fassa Bortolo quanto à sua capacidade de escoamento através do Cone de Marsh.
- Desenvolver uma calda composta unicamente por Cal Hidráulica do tipo HL 5 e superplastificante do tipo Dynamon SR1 que apresente fluidez semelhante à da calda comercial citada anteriormente.
- Substituir 30% da Cal Hidráulica da calda citada no item anterior por Cimento Portland Branco e verificar qual será a redução proporcionada por esta mudança na concentração de superplastificante para que se mantenha a mesma fluidez.
- Verificar as características destas três caldas quanto:
 - Às características físicas em estado fresco e sólido.
 - À estabilidade relacionada com processos de segregação e expansão em estado fresco.
 - À aderência em suportes pétreos de xisto e granito amarelo aos 7, 28 e 90 dias.
 - À resistência à flexão e compressão uniaxial aos 7, 28 e 90 dias.
 - Ao comportamento na injeção em alvenarias de xisto e granito através dos ensaios de injetabilidade e Cone de Marsh.
 - A resistência à compressão diametral e uniaxial aos 28 dias de corpos de prova constituídos por as caldas e as pedras estudadas.

- Realizar pesquisa de preço dos constituintes para que seja possível determinar o custo de produção das três caldas estudadas.
- Comparar os resultados obtidos com os requisitos descritos na literatura já existente e verificar se os materiais em questão podem ser satisfatoriamente empregados no restauro de alvenarias antigas de pedra.

1.2. Justificativa

Em adição à importância de se aprofundar o conhecimento relacionado com as técnicas de reabilitação e restauro, que já foi introduzido anteriormente e será completado no item 2.1, destacam-se os seguintes motivos que justificam a elaboração deste ensaio:

- Até este momento, existem poucos estudos significativos que caracterizam o comportamento físico e mecânico do produto Legante per Iniezioni 790 produzido pela Fassa Bortolo. Ainda, não se tem conhecimento de nenhuma pesquisa que tenha abordado o seu desempenho quando é aplicado ao restauro de alvenarias compostas pelas pedras típicas do norte português.
- Na literatura científica da área, frequentemente as incorporações de cimento em caldas à base de cal são acompanhadas de outras adições, como pozolanas e metacaulino [2]. Apesar de as caldas resultantes terem desempenhos bastante satisfatórios, não fica claro qual é a real influência do cimento nas suas propriedades físicas e mecânicas.
- Existem muitos trabalhos que estudam a relação entre aditivos à base de polímeros acrílicos com argamassas ou concretos cujo aglomerante é unicamente o Cimento Portland [3]. Por outro lado, são escassos aqueles que estudam o relacionamento deste tipo de superplastificante com as caldas à base de Cal Hidráulica, visto que em grande maioria são utilizadas substâncias à base de formaldeídos.

Além disso, cita-se a necessidade de que a consciência sobre a preservação da história seja perpetuada em todos os meios, inclusive no científico. Destaca-se que durante o desenvolvimento desta tese ocorreu o bombardeio do templo de Ain Dara, na Síria, que havia sobrevivido por aproximadamente 3000 anos e agora é apenas um

amontoado de pedrasⁱ; na Alemanha a Igreja de São Lambertus, fundada no século XII e reformada em 1888, foi desmantelada para dar lugar à uma mina de carvãoⁱⁱ e no Brasil, por motivos obscuros mas certamente antrópicos, o Museu Nacional, fundado em 1818 por Dom João VI de Portugal, ardeu em chamasⁱⁱⁱ.

1.3. Conteúdo e estrutura da tese

Após esta seção introdutória, o presente trabalho divide-se em mais 4 capítulos: Revisão Bibliográfica, Procedimento Experimental, Resultados e Discussão e Conclusões e Trabalhos Futuros.

No Capítulo 2 faz-se um levantamento do conhecimento já existente a respeito da importância da conservação de edificações históricas, da evolução das recomendações para o restauro, da usabilidade de caldas de injeção e das técnicas utilizadas para esta finalidade. Além disso, foram reunidas informações relevantes sobre as propriedades fundamentais das pedras e dos materiais utilizados na composição das caldas.

No Capítulo 3 estão descritos os procedimentos empregados na campanha experimental. São apresentadas as normas e equipamentos aplicados na formulação das caldas, na execução dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

O Capítulo 4 dedica-se à exposição e discussão dos resultados obtidos em laboratório. Para isto, são feitas comparações entre as três caldas estudadas, os dois suportes pétreos e também com os resultados obtidos por outros autores. Ainda, fez-se uma análise financeira a fim de contrapor as características físicas e mecânicas com o custo de produção de cada material.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

ⁱ Disponível em <<https://www.telegraph.co.uk/news/2018/01/29/turkish-bombing-damages-3000-year-old-temple-northern-syria/>>, acesso em janeiro de 2019.

ⁱⁱ Disponível em <<https://www.thelocal.de/20180110/historic-church-demolished-to-make-way-for-brown-coal-mine/>>, acesso em janeiro de 2019.

ⁱⁱⁱ Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2018/sep/03/fire-engulfs-brazil-national-museum-rio/>>, acesso em janeiro de 2019.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A importância da conservação das edificações antigas

É comum que durante as restaurações haja a substituição de materiais antigos por equivalentes modernos que muitas vezes são incompatíveis com os originais. Isto frequentemente ocorre em consequência da falta de conhecimento técnico ou pela escolha dos métodos mais baratos. Em alguns casos chega a haver a destruição indiscriminada de toda a edificação, ignorando seu valor histórico e estético, simplesmente para que se possa construir algo novo no mesmo local [4].

Existem três grandes desvantagens relacionadas com estas práticas:

1. Os registros históricos, ligados às técnicas que eram empregadas no momento da construção, o estado do conhecimento da população que ali habitava e também seu modo de vida são perdidos. Há a possibilidade de inventariar um registro descritivo ou fotográfico da edificação, porém, mesmo nos raros casos em que são feitos, muitas informações ainda são esquecidas.
2. Embora possam ser utilizados materiais similares aos originais e tente-se simular as técnicas como eram executadas antigamente, é impossível que o resultado seja completamente fidedigno ao original. Por mais que no médio prazo haja grande correspondência, o envelhecimento ocorrerá de maneira desigual.
3. Os materiais modernos muitas vezes não são compatíveis física ou quimicamente com o substrato que se pretende reparar. Esta é a desvantagem mais preocupante, visto que o emprego de materiais inadequados altera o funcionamento estrutural, podendo em casos extremos levar a ruína da edificação [5].

Ainda existem grandes dificuldades ligadas com o reparo e a manutenção dos edifícios antigos, algumas destas relacionadas com a perda ou desconhecimento das técnicas ou dos materiais rudimentares. Por outro lado, pressupõe-se a possibilidade de achar meios de conservar estes patrimônios sem comprometer sua viabilidade econômica

de continuar existindo. De modo geral, é mais razoável que respeite-se o funcionamento das estruturas: seja mantendo os materiais originais, reparando-os com técnicas adequadas ou em último caso, realizando a substituição por materiais compatíveis com os pré-existentes [5, 6].

2.2. A evolução das recomendações para o restauro

Desde a antiguidade há a intenção em realizar a recuperação de artefatos antigos, sejam estas edificações, obras de arte ou até mesmo objetos de uso cotidiano. Contudo, na maioria das vezes, não existia a preocupação com a manutenção do registro histórico, mas apenas na reconstituição de funcionalidades ou da estética [7, 8].

Durante o período greco-romano houve a tentativa de obter a “imortalidade” da matéria, ou seja, manter sempre “vivos” os edifícios. Esta mentalidade acarretou diversas reconstruções radicais, visto que o compromisso era com as formas originais, mas não com a história. Por outro lado, há um relato de que no tempo de Nero um restaurador foi demandado pelo imperador para recompor uma pintura de Vênus, curiosamente a deusa da beleza, que já não tinha mais o aspecto original. Este profissional, já naquela época, teve a consciência de que não tinha as habilidades necessárias para concluir tal trabalho e decidiu que guardaria o afresco original e apresentaria uma cópia ao imperador [7, 9].

O início do reconhecimento histórico das edificações e obras de arte antigas deu-se durante o Renascimento, quando houve uma grande valorização estética das obras clássicas. Ainda que em 1692 tenha sido publicado o documento que é considerado como a primeira legislação a respeito do restauro, a Bula Cum Alman Nostram Urbem, de Pio II, as intervenções desta época são marcadas pela radicalidade dos repintes, muitos destes tendo mudado inclusive o sentido simbólico das obras originais. Datam da mesma época os primeiros inventários das ruínas de Roma e das técnicas de limpeza que foram utilizadas nestas tarefas [7, 10].

No século XVI inicia-se o período Barroco, que foi marcado pela ascensão do colecionismo e pela criação das primeiras galerias de arte da Europa. Apesar de a arte e a arquitetura estarem plenamente reconhecidas, muitas intervenções de restauro foram feitas objetivando apenas a estética das peças. Frequentemente, os retoques eram feitos conforme as preferências dos donos das galerias sem que houvesse a preocupação em manter a originalidade das peças. A limpeza e o restauro do teto da Capela Sistina foram grandes feitos deste tempo [7].

O romantismo do século XIX foi marcado por interpretações antagônicas quando trata-se de restauro: de um lado, o ponto de vista francês, personificado em Viollet-Le-Duc e do outro, a perspectiva inglesa cuja grande referência era John Ruskin [8].

Eugène Viollet-Le-Duc foi um arquiteto e historiador francês de ideais polêmicos acerca da restauração de edificações históricas. Segundo o arquiteto, o objetivo da modificação seria voltar o edifício ao seu estado de quando novo ou então, prevendo como seria após a sua conclusão. Em sua perspectiva, o restaurador não deveria utilizar conceitos pessoais na reconstrução, mas sim colocar-se na pele do construtor original, baseando-se em documentos, regras de estilo, projetos ou desenhos originais [8].

De forma contraditória, observa-se que Viollet-Le-Duc não seguiu à risca suas recomendações. O Castelo de Pierrefonds, na França, é o exemplo característico de restauro em que este arquiteto adicionou modificações que não constavam nos planos dos construtores iniciais. A obra original data de 1396, quando o Duque de Orleães ordenou que a fortaleza fosse construída como uma fortificação militar. Já em 1617 foi destruído parcialmente pelo Rei Luís XIII, sendo então chamado de “Ruínas Pitorescas” (Figura 1). Em 1857, Napoleão III decide restaurar o edifício e designa Viollet-Le-Duc para a função. O resultado (Figura 2) foi um Castelo do período da Idade Média, com interior em estilo romântico, um pavimento a mais em algumas regiões e diversas alterações que atestam o emprego das concepções pessoais do arquiteto [11].



Figura 1 – Castelo de Pierrefonds ainda em ruínas. Fonte: Archives Photographiques, Paris^{iv}.

John Ruskin foi um crítico de arte e sociólogo inglês com ideias antagônicas a Viollet-Le-Duc. Em seu ponto de vista, deve-se respeitar rigorosamente o monumento, mesmo que este esteja em estado de ruínas, inaugurando assim o movimento anti-

^{iv} Disponível em <<http://www.raybishophistory.co.uk/lawrence-rides-south-and-into-the-middles-ages/a-selection-of-castles-visited-by-lawrence/pierrefonds/>>, acesso em Junho de 2018.

restauro. A solução seria realizar a manutenção preventiva de modo com que não fosse necessária a intervenção corretiva. Segundo Ruskin, as intervenções posteriores ao período da obra são “mentiras arquitetônicas” em razão de que as obras do passado deveriam ser mantidas imaculadas [7, 10, 12].



Figura 2 – Castelo de Pierrefonds depois do restauro de Viollet-Le-Duc. Fonte: Cornell University Library^v.

O surgimento de diversos grandes museus durante o período do neoclassicismo levou a um grande aumento nas atividades de restauro. Esta função passou a ser atribuída a profissionais capacitados, que haviam estudado o assunto e sabiam como empregar os conhecimentos de física e química que existiam [9].

O grande nome do restauro desta época foi Pietro Edwards, um italiano de origem inglesa que atuava na região de Veneza. Este restaurador tinha o costume de escrever relatórios a respeito das tarefas que realizava bem como dos diagnósticos e causas das degradações encontradas. Edwards estabeleceu normas e critérios a respeito do armazenamento, da intervenção e dos exames das obras de arte, tendo inclusive se preocupado com a reversibilidade das interferências realizadas. Também foi de Edwards o primeiro projeto de criação de uma escola totalmente voltada para o restauro de obras de arte. Considera-se este restaurador como o pioneiro do restauro científico [9].

Um dos resultados da Revolução Francesa foi a grande quantidade de monumentos, edifícios e demais obras de arte degradadas e vandalizadas. Por consequência, no ano de 1794, o governo francês finalmente regulamenta a atividade de restauro, publicando o documento chamado de Princípio da Conservação dos Monumentos [7, 13].

^v Disponível em <<https://digital.library.cornell.edu/catalog/ss:3875007>>, acesso em Junho de 2018.

Já no século XX, Camillo Boito sugere novos conceitos que serviram de base para os critérios atuais de restauro. Este arquiteto, escritor e historiador italiano propõe uma visão intermediária entre os ideais de Ruskin e Viollet-Le-Duc. De acordo com Boito, a manutenção preventiva deveria sempre ser feita, de modo com que as intervenções de restauro só devessem ser feitas quando não houvesse outra opção. Boito também recomenda que deva-se manter o respeito sobre todas as partes do edifício, mesmo que estas tenham sido adicionadas depois do período da construção, por outro lado, condena que sejam feitos restauros estilísticos visto que estes “falsificam o monumento” [10, 11].

Camillo ainda sugeriu algumas diretrizes que são aceitas até hoje: realizar apenas as intervenções necessárias e identificá-las muito bem; deixar evidentes quais foram as partes e os materiais adicionados e caso existam partes eliminadas, expô-las junto com registros e fotografias da obra em um local público. Boito ainda sugeriu que no próprio monumento fosse gravada a data e a descrição das intervenções [11].

Em função das diversas correntes de pensamento e teorias a respeito do restauro, estabeleceu-se a necessidade de criar regras internacionais aceitas por todos a respeito deste tema. A Carta de Atenas, escrita em 1931, veio para dar início a resolução deste problema. Inspirada em grande parte pelos ideais de Camillo Boito, a Carta criou um ponto de referência para a tutela e manutenção dos monumentos arquitetônicos e obras de arte da Europa. Entre as suas ideias principais estava a importância da manutenção preventiva, da reutilização do edifício, da valorização da envolvente, da possibilidade de uso de materiais modernos e também da conscientização das pessoas. Por influência, outros regulamentos e cartas de restauro foram publicados posteriormente em diversos países da Europa [9, 11].

Após o final da Segunda Guerra Mundial em 1945, diversas cidades, monumentos arquitetônicos e obras de arte da Europa estavam em ruínas, em vista disso, o panorama do restauro precisou ser revisto. O líder desta remodelagem foi Cesare Brandi, um italiano, que além de fundador e diretor do Istituto Centrale di Restauro, também era crítico de história e formado em Direito [9, 13].

Brandi foi o inaugurador da corrente conhecida por Restauro Crítico. Em função das grandes destruições provocadas pelos incêndios e bombardeiros na década de 40, o valor histórico de um monumento deveria ser superado pelo seu valor estético e artístico. Seria justificável realizar intervenções mais intensas do que as descritas na Carta de Atenas em função de reestabelecer a unidade potencial da obra de arte [11, 14].

Desta forma, cada edificação deveria ser restaurada de uma maneira específica, porém, sem apagar as marcas da passagem do tempo, cometer ilegitimidades artísticas ou históricas ou impossibilitar intervenções futuras. Em 1963, Brandi escreveu o livro chamado Teoria do Restauro, que foi uma das maiores bases para a Carta de Veneza, publicada em 1964. No mesmo período, destaca-se também a criação do ICOMOS (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios), uma organização não governamental cuja missão é promover a conservação, proteção e valorização de centros urbanos e monumentos [9, 14].

Ao longo do século XX diversas outras cartas foram escritas, até que no ano de 2000, durante a Conferência Internacional Sobre Conservação foi publicada a Carta de Cracóvia. Este documento, além de abordar as premissas da Carta de Veneza, também englobou outros conceitos como a noção de diversidade cultural e o meio ambiente. O período foi marcado por grandes avanços tecnológicos e mudanças nos conceitos de obras de arte e monumentos arquitetônicos [9, 15].

Este documento declara que os instrumentos e métodos utilizados na preservação do patrimônio histórico estão sujeitos a um processo de mudança contínua, visto que devem adaptar-se às situações onde são empregados [15]. Portanto, faz-se necessário realizar uma revisão sobre a injeção de caldas para reabilitação de alvenarias de pedra.

2.3. A aplicação de caldas na reabilitação de alvenarias de pedra

A injeção de caldas é amplamente reconhecida como uma técnica adequada no reparo e reabilitação de alvenarias antigas. Sua eficiência já foi comprovada através de testes em modelos de pequena escala e também em estruturas reais. Os resultados positivos são muito visíveis quando analisa-se o ganho na uniformidade das resistências mecânicas, na continuidade e na homogeneidade das paredes [16, 17].

A eficiência é ainda maior na consolidação de alvenarias de vários panos, visto que o restabelecimento das ligações verticais entre os blocos acaba por melhorar também as características de resistência à flexão sem necessariamente criar uma parede com rigidez excessiva [18].

Em contrapartida, as repercussões positivas só podem ser obtidas se houver sucesso na aplicação do material. De acordo com Binda et al. [19], os maiores problemas relacionados com esta etapa são:

- a. A dificuldade em descobrir a distribuição dos tamanhos dos vazios na parede.
- b. A resistência que os vazios mais finos (entre 2 e 3 milímetros) apresentam ao fluxo do líquido.
- c. A presença na mesma parede de vazios muito finos e muito grossos, dificultando a escolha da viscosidade que se comporte bem em todas as situações.
- d. A segregação e retração da calda devido às altas taxas de absorção.
- e. A resistência à penetração da calda, especialmente na presença de materiais siltosos ou argilosos.
- f. A necessidade de se fazer a injeção com baixos valores de pressão, evitando a retenção de ar ou até mesmo problemas estruturais com a parede.

Portanto, observa-se que a efetividade não depende apenas das características do material injetado, mas também da técnica de injeção empregada e do substrato que o receberá. Em virtude de tratar-se de um processo irreversível, deve-se ter a consciência de apenas executar o serviço se houver certeza de que este será feito com o material correto. Isto é, o que melhor se adapte às necessidades químicas, físicas e mineralógicas da alvenaria em questão [19, 20].

2.4. Propriedades de uma calda de injeção

Qualquer intervenção em peças históricas requer um estudo prévio e individualizado para determinar o estado em que se encontra a estrutura afetada. Só então podem ser definidos os melhores materiais e técnicas a serem empregadas. No caso da injeção de caldas, deve-se observar as características químicas e físicas do substrato e também as propriedades inerentes ao material que pretende-se injetar [21]. A seguir, estão listadas as propriedades mais relevantes pertinentes às caldas de injeção.

2.4.1. Penetrabilidade

Segundo Miltiadou-Fezans e Tassios [22], a penetrabilidade é a capacidade de introduzir-se sem obstruções através das fissuras. De modo geral, observam-se bons

resultados desta propriedade quando existem diferenças substanciais entre o tamanho máximo dos grãos da calda e a menor dimensão efetiva das fissuras da alvenaria.

Caso estas grandezas sejam muito semelhantes, existem três motivos que justificam o desempenho insatisfatório da injeção: a fricção entre os grãos e o substrato, potencializada caso existam grandes irregularidades superficiais; a aglomeração das partículas na hidratação dos finos e a presença de uma resistência eletrostática entre os diversos componentes sólidos. Outros fatores a serem considerados são a curva granulométrica dos sólidos presentes na calda e o procedimento de mistura. O primeiro pois altera o fator de empacotamento e o segundo devido à necessidade de homogeneizar a fase sólida na água [23].

De acordo com Eklund [24], esta propriedade pode ser severamente afetada em caldas que apresentam grandes dosagens de Cimento Portland, isto é, porcentagens de massa acima de 50%. Observa-se uma grande tendência de entupimento durante o processo de injeção deste tipo de *grout* em pequenas cavidades, o que torna o desempenho insatisfatório [24].

2.4.2. Fluidez

Esta propriedade depende fundamentalmente do fator água/aglomerante, da distribuição granulométrica, da superfície específica, da natureza e do formato dos grãos presente nas caldas. Pode ser estimada medindo o tempo necessário para que certo volume de calda, sob pressão controlada, passe através de uma determinada seção. Caso não haja fluidez suficiente, faz-se necessário o uso de maiores pressões de injeção, o que em alguns casos pode causar fissuras e deterioração da alvenaria [25].

Verifica-se que aglomerantes com fatores de empacotamento menores, isto é, cujos grãos tem menor dimensão, apresentam melhores propriedades de fluidez. Por outro lado, este tipo de material ocasiona um rápido tempo de pega e conseqüentemente um grande aumento no calor de hidratação. Em aglomerantes com maior granulometria é verificado o contrário, porém, faz-se necessária a adição de água para manter as mesmas características reológicas [24].

2.4.3. Estabilidade

É a capacidade de evitar que ocorram dois comportamentos indesejados: a exsudação excessiva, determinada pela passagem de parte da água presente na calda para

a sua superfície e a segregação, isto é, a separação dos constituintes em estratos. Estes fenômenos implicam em falhas de preenchimento das fissuras, visto que aumentam a resistência ao fluxo, ocasionando o bloqueio dos canais de injeção [25].

Uma calda estável deve manter a sua homogeneidade desde a aplicação até o endurecimento [25]. Para que isto possa ser possível, é comum que se usem agentes estabilizadores, como a betonita. Contudo, verifica-se que a alta absorção de água deste mineral afeta negativamente nas características de penetrabilidade e resistência de um *grout* [24].

De acordo com a norma NP EN 447 (2008) [26], os valores máximos para exsudação em caldas à base de cimento deverão ser inferiores aos 2%, por outro lado, Vintzileou [25] considera que em caldas à base de cal estes valores possam chegar a até 5% [26].

2.4.4. Tempo de pega

Segundo Eklund, o processo de enrijecimento é responsável pela degradação das propriedades reológicas de uma calda hidráulica logo na primeira hora após a realização da mistura. A ABNT NBR NM 65 (2003) [27] define que o tempo decorrido entre o início deste fenômeno até sua estabilização, determinado quando um agulha de Vicat penetra 0,5 mm do material, é chamado de tempo de pega [24, 27].

Apesar de proporcionar o surgimento das características mecânicas esperadas para a consolidação de uma alvenaria, este processo também é relacionado com o calor que emana do material após a amassadura. Dado que o tempo de pega é inversamente proporcional à temperatura apresentada pela calda, há a preocupação em que este intervalo se estenda por tempo suficiente para que haja a dissipação da energia liberada. Como medida paliativa, Eklund [24] cita a possibilidade de utilizar aditivos retardantes de pega [24, 28].

2.4.5. Resistências mecânicas

É a capacidade do material não manifestar deformações plásticas mediante a aplicação de esforços externos de compressão, flexão e cisalhamento. Estas características devem estar em concordância com os materiais constituintes da alvenaria visto que as dissemelhanças resultam em tensões internas ao material [9].

Espera-se que uma calda contribua com o aumento da coesão e da resistência mecânica da parede, no entanto, sem criar rigidez excessiva. A incompatibilidade destas propriedades pode provocar riscos ainda mais graves quando são realizadas intervenções parciais em uma estrutura. A consequência é a alteração do fluxo de forças na edificação, que terá comportamentos distintos nas frações primárias e restauradas [28].

2.4.6. Variações de volume

Quaisquer 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.

No caso das caldas de injeção, a mais comum é a retração, que tem origem em três fenômenos que ocorrem simultaneamente: as forças capilares que movimentam a água pelos poros mais finos, definida como retração autógena; a diferença de volume de alguns produtos de hidratação, principalmente os silicatos de cálcio hidratados (CSH), caracterizando a retração química; e a evaporação da água residual, proveniente da não reação com os aglomerantes hidráulicos. Estas ocorrências não podem ser evitadas, porém, podem ser amenizadas, portanto, sugere-se que o valor máximo de retração seja de 4% [4].

2.5. Técnicas de aplicação das caldas de injeção

A injeção de caldas à base de cal tem o objetivo de preencher as cavidades em um determinado substrato, sejam: fissuras, lacunas, fendas ou vazios interiores. Para que os resultados sejam adequados, alguns cuidados devem ser tomados na preparação da calda e da parede, durante a injeção e após o término do serviço.

O primeiro passo a ser tomado é o diagnóstico da degradação, que pode ser realizado através da utilização de câmeras de inspeção ou aparelhos de ultrassom para diagnosticar os locais mais deteriorados [9].

Em seguida, deve-se observar se não existem revestimentos, pinturas ou outros registros históricos afixados na parede. Caso haja, é preciso que se crie uma barreira mecânica que segure as peças caso haja destacamento e também proteja as suas superfícies. Um método bastante comum é a realização de um *facing*, como está ilustrado na Figura 3 [9].



Figura 3 – Proteção através de facing. Fonte: Tavares [9].

A etapa seguinte consiste em verificar se os vazios já existentes na parede permitem a entrada de calda, a saída de ar e se são comunicantes. Caso não haja orifícios superficiais, tem de se realizar a abertura de furos com uma agulha manual ou furadeira elétrica. É recomendado que os furos tenham diâmetros próximos de 15 ou 20 milímetros [29] e sejam distribuídos uniformemente com distancias horizontais e verticais de 20 a 30 centímetros. Se houver a possibilidade de injetar de ambos os lados da parede, deve-se tomar cuidado para que os orifícios não estejam na mesma posição [9, 30–32].

Para eliminar eventuais substâncias nocivas para a técnica de reforço, deve-se realizar a limpeza superficial da parede utilizando jatos de água com baixa pressão. Em seguida, com o objetivo de melhorar a aderência ao substrato, injeta-se água com a finalidade de umedecer os canais e evitar que estes absorvam a água que deve ser utilizada na hidratação dos aglomerantes [9]. Ainda pode-se verificar a comunicação entre os orifícios observando por quais ocorre a drenagem do líquido [32].

Com o objetivo de melhorar a aderência da calda ao substrato, realiza-se a limpeza dos vazios com trinchas, pincéis ou até mesmo um aspirador de pó de baixa pressão. Em seguida, deve-se inserir tubos poliméricos (Figura 4a) nos vazios e injetar a calda de maneira uniforme, sem provocar turbulências e com pouca pressão, com intenção de que bolhas de ar não sejam geradas. É importante que se faça o registro para todos os furos dos pontos de entrada e saída de material, o volume de calda que foi utilizada e se houve a existência de variação de pressão [9, 18, 31].

A injeção propriamente dita pode ser feita por gravidade (Figura 4b), no caso de paredes fortemente degradadas; sob pressão, em estruturas que ainda podem suportar a

tensão das injeções ou sob vácuo, geralmente realizada em elementos menores, onde faz-se a aspiração nos orifícios superiores e a calda é injetada nos inferiores [29].

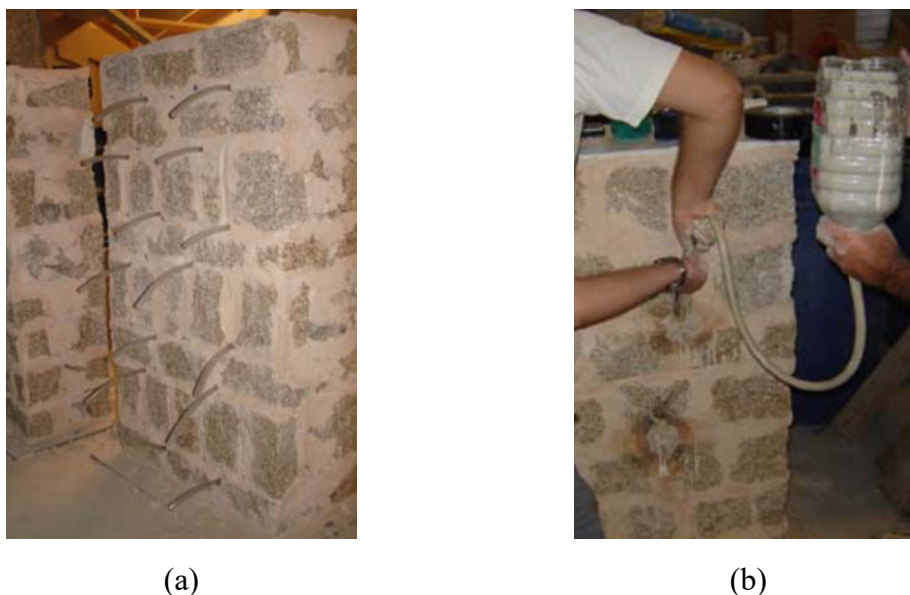


Figura 4 – (a) Inserção de tubos poliméricos; (b) Realização da injeção. Fonte: Silva [29].

Após a retirada dos tubos e das proteções, deve-se apertar com uma espátula os locais de entrada e saída de material para que a calda seja melhor distribuída nos vazios. Por fim, deve-se selar a região com uma argamassa à base de cal semelhante à que foi utilizada nas demais partes da alvenaria [9].

2.6. Materiais utilizados nas caldas executadas em laboratório

Nesta seção, serão abordadas formulações de caldas executadas em laboratório contendo diferentes porcentagens de Cal Hidráulica, cimento branco e superplastificante de base polimérica. A seguir, estão expostas as características mais relevantes a respeito destes materiais.

Destaca-se ainda que a nomenclatura dos compostos químicos é abreviada quando se tratam de aglomerantes hidráulicos. Isto não acontece só em textos científicos como também na prática industrial [33]. O padrão adotado neste trabalho está apresentado na Tabela 1, onde a primeira coluna descreve a simbologia adaptada ao estudo de aglomerantes hidráulicos, a segunda descreve a fórmula química padrão e a terceira contém os nomes dos compostos segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC).

Tabela 1 – Simbologia utilizada na química de aglomerantes hidráulicos.

Simbologia adaptada	Simbologia padrão	Nomenclatura oficial
C	CaO	Óxido de Cálcio
S	SiO_2	Dióxido de Silício (Sílica)
H	H_2O	Óxido de Di-Hidrogênio
\bar{C}	CO_2	Dióxido de Carbono

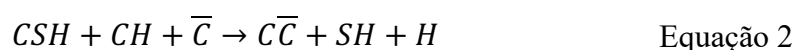
2.6.1. Cal hidráulica

Em meados do século XVIII, devido ao grande desenvolvimento econômico da época e motivado pela necessidade de se construir obras junto de mares e rios, John Smeatou iniciou seus estudos a respeito de ligantes que pudessem endurecer mesmo em contato com a água. Já no início do século XIX, Collet-Descotils descobriu que algumas “impurezas” contidas nos calcários, como as sílicas, quando combinadas com a cal poderiam aperfeiçoar as suas características hidráulicas. No entanto, foi apenas o engenheiro francês Louis Vicat, também no século XIX, quem aperfeiçoou os estudos sobre este tipo de material que atualmente é chamado de Cal Hidráulica [34, 35].

A Cal Hidráulica é um material composto por óxidos, silicatos e aluminatos de cálcio cujo processo de endurecimento é realizado em duas reações: inicialmente ocorre a hidratação dos silicatos e aluminatos, que quando entram em contato com a água promovem a formação do silicato de cálcio hidratado acompanhado de alguma cal ainda livre (Equação 1). É importante ressaltar que esta reação não necessita de oxigênio para acontecer.



A segunda reação, nomeada de carbonatação, ocorre ao longo do envelhecimento do material. Conforme a Equação 2, o dióxido de carbono que estava na atmosfera penetra gradualmente no material e ocasiona a carbonatação da cal, originando o carbonato de cálcio acompanhado de sílica e água [33, 36].



Esta fase é bastante prejudicada em caldas de injeção visto que há pouca provisão de dióxido de carbono no interior das paredes. Segundo Brás [37], em caldas formadas unicamente por aglomerantes aéreos, como é o caso da cal hidratada, o endurecimento

ocorre de forma demasiadamente lenta, comprometendo a eficácia do processo de restauro. Em alguns casos a solidificação não ocorre nem depois de longos períodos, tamanha é a escassez de \bar{C} neste tipo de ambiente.

Desta forma, a Cal Hidráulica torna-se um aglomerante bastante interessante para o uso no restauro de alvenarias antigas, visto que une a compatibilidade física e química encontrada nos aglomerantes aéreos com as boas propriedades mecânicas encontradas nos aglomerantes hidráulicos [37].

2.6.2. Cimento Portland Branco

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 16697 (2018) [38], o Cimento Portland é definido como: “aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio”. A mesma norma ainda menciona a possibilidade de adição de outros elementos: “Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos” [39]. A norma europeia EN 197-1 (2008) [40] ainda faz a complementação definindo que o cimento seja um material que quando misturado com água e agregados produza argamassas e concretos, que retenham a trabalhabilidade por tempo suficiente e continuem resistentes e estáveis mesmo quando submersos em água [40, 41].

O Cimento Portland Branco utilizado na campanha experimental tem características bastante similares às aquelas apresentadas pelos cimentos tradicionais, com exceção da sua cor e do processo de fabricação. Para preservar a coloração clara, há a preocupação de que haja pouca concentração de óxidos de ferro e manganês em sua composição, à vista disso, geralmente são utilizados tipos de argila, gesso e calcário com menor presença de impurezas. Para o processo de queima é utilizado óleo ou gás natural em substituição ao carvão. Ainda, no processo de moagem, geralmente feito com esferas metálicas, utilizam-se esferas de níquel ou molibdênio. Todas estas particularidades contribuem para que, via de regra, este produto seja mais caro que os cimentos comuns [42].

O endurecimento do cimento é resultado da hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio quando entram em contato com a água. Os primeiros reagem muito rapidamente e são os responsáveis pelo processo de pega, enquanto que os silicatos são dominantes no processo de ganho de resistência em prazos mais elevados. Esta reação pode ser dividida

em cinco etapas de acordo com a taxa de liberação de calor e com a variação da concentração de íons de cálcio:

Etapa I - Estágio Inicial: Inicia-se logo após o contato do cimento com a água. Uma camada de silicato de cálcio hidratado é formada sobre os grãos de cimento.

Etapa II – Período de Indução: É caracterizada pela hidratação da cal livre. Esta etapa dura de 30 minutos a 3 horas.

Etapa III – Período de Aceleração: Ocorre uma abundante liberação de calor, devido a reação exotérmica que forma o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio. Tem duração de três a doze horas e é neste período em que se observa o fenômeno de pega.

Etapa IV – Período de Desaceleração: A formação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado é cada vez mais lenta.

Etapa V – Estágio Final: Os grãos de cimento já estão completamente hidratados ou então não há mais água presente no material [43].

Este processo é ilustrado na Figura 5.

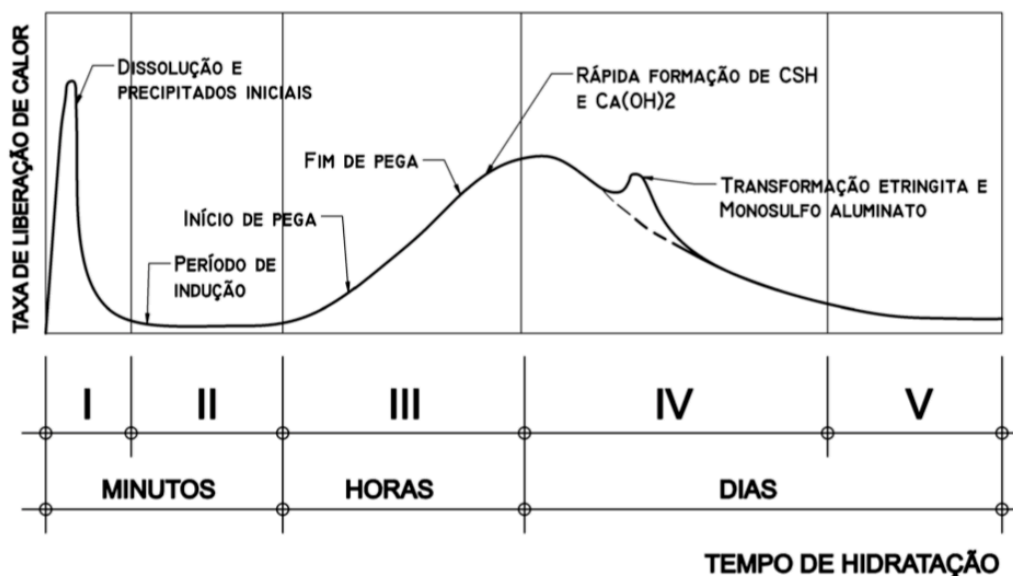


Figura 5 – Representação esquemática dos fenômenos que ocorrem durante a hidratação dos sulfatos de cálcio. Fonte: Adaptado de Gartner et al. [43].

Apesar das excelentes características mecânicas do Cimento Portland quando empregado na construção moderna, sabe-se que o produto não é eficiente quando está desacompanhado na formulação de caldas de injeção. Quanto às suas características em

estado fresco percebe-se que existem deficiências de fluidez, que por consequência causam problemas de injetabilidade, principalmente nas fissuras mais finas. Finalmente, após a solidificação do *grout*, nota-se um enrijecimento excessivo das estruturas antigas, o que pode culminar em danos estruturais bastante graves [37].

Contudo, Vintzileou [18], afirma que a adição de até 30% de Cimento Portland em caldas à base de cal pode proporcionar grandes melhoras na estabilidade, fluidez e injetabilidade destes materiais. Ainda, observa-se que a injeção destas caldas em alvenarias de pedra proporciona uma melhora significativa em sua resistência à compressão sem causar enrijecimento excessivo da estrutura [25].

2.6.3. Superplastificantes

São aditivos utilizados em concretos, argamassas e caldas com a finalidade de alterar suas propriedades no estado fresco ou endurecido. Tratam-se de polímeros solúveis em água, mais frequentemente policarboxilatos, que atuam promovendo a dispersão dos finos durante o amassamento [44, 45].

De acordo com Rixom [46], os superplastificantes são um dos avanços mais importantes na tecnologia de materiais cimentícios. Diversos benefícios na incorporação destes matérias aos concretos, argamassas ou caldas estão listados a seguir:

- O aumento da fluidez sem a necessidade de se adicionar cimento ou água.
- A diminuição da relação água e aglomerante para obtenção da mesma consistência, que implica em maiores resistências, durabilidade e menores retrações e tensões térmicas.
- Melhores resultados econômicos como resultado de todos os tópicos anteriores [41, 45–47].

Este autor ainda expõe que existem três gerações de superplastificantes: a primeira e segunda à base de formaldeídos sulfonados de naftalina e melamina, respectivamente, e a terceira, à base de polímeros acrílicos. A primeira geração foi desenvolvida na década de 1960 enquanto que a segunda veio 10 anos mais tarde. Já a terceira trata-se de um material descoberto na década de 1980 e com desempenho bastante superior.

Grande parte da produção científica a respeito do uso de superplastificantes em caldas à base de cal estuda as reações em decorrência dos produtos baseados em formaldeídos, nomeadamente primeira e segunda gerações. O aditivo a ser utilizado neste trabalho é baseado em polímeros acrílicos, um produto de terceira geração.

No que tange a dosagem destes materiais, destaca-se a grande importância de sua otimização. Apesar de geralmente representarem menos de 1% da massa do aglomerante, é notado que o seu excesso pode converter-se em prejuízos aos comportamentos mecânicos, reológicos, econômicos e de sustentabilidade [41].

2.7. Substratos pétreos

Apesar de a injeção de caldas também ser utilizada na reabilitação de alvenarias compostas por elementos cerâmicos, este trabalho tem foco nas interações com estruturas de pedra. Mais especificamente, o estudo é limitado a duas variedades bastante comuns em construções antigas no norte de Portugal: o xisto e o granito amarelo.

2.7.1. Xisto

Trata-se de um grupo de rochas metamórficas, ricas em mica e de estrutura cristalina. Foram formados devido ao depósito de diversas camadas de argila expostas a grandes pressões e temperaturas, o que os proporciona a aparência estratificada. As lâminas, visíveis a olho nu, são a característica mais marcante dos xistos [48].

De acordo com o Noronha [49], os xistos provenientes da região nordeste de Portugal mais especificamente de Trás-os-Montes e Alto Douro, têm potencial para serem empregados na construção civil moderna, inclusive em alvenarias estruturais e pavimentos, devido às suas boas características mecânicas.

Segundo o mesmo autor, por tratar-se de um material natural, é esperado que tenha propriedades muito heterogêneas: sua resistência à compressão pode variar entre os 30 e os 200 MPa, contudo, frequentemente são encontrados valores superiores aos 90 MPa. Quando se trata de resistência à flexão são encontrados valores também muito dispersos: entre 10 e 80 MPa, porém, com média próxima dos 35 MPa. Além do mais, têm alta resistência à transferência térmica e a passagem de umidade [49].

Devido a estas características, os xistos foram utilizados em todo o mundo como material de construção, sendo empregados em castelos, muralhas, habitações, igrejas, muros e outras funções. Na região de Trás-os-Montes, Portugal, onde era muito comum a construção com este material, são observados também telhados executados em xisto (Figura 6a) [50].

Inicialmente este material era extraído em lascas e simplesmente sobreposto, sem qualquer tratamento, para constituir as edificações. Posteriormente, passou-se a utilizar argamassas de cal, cimento ou solo para consolidar os elementos construtivos. Atualmente este material é pouco utilizado, em resultado da sua substituição por elementos cerâmicos ou cimentícios [50].

Grande parte destas edificações históricas encontram-se bastante deterioradas devido à própria decomposição do xisto, por ataques químicos e pela variação de temperatura. Como agravante, em alguns casos ainda são feitas obras de reabilitação utilizando materiais inadequados, como argamassas de reboco a base de Cimento Portland (Figura 6b). O mau estado de conservação deve servir de incentivo para que se realizem interferências de manutenção e reabilitação nestas peças [50, 51].



Figura 6 – Utilização de xisto em construções: (a) com função de telhado; (b) coberto por argamassa de Cimento Portland.

2.7.2. Granito amarelo

Os granitos são um exemplo comum de rocha ígnea, isto é, que foram formadas através da solidificação do magma vulcânico. Sabe-se ainda que a alta cristalização dos granitos é produto do resfriamento lento que ocorreu sem o contato com a superfície terrestre, sendo assim, são classificados também como rochas intrusivas. São constituídos majoritariamente por quartzo ou sílica, feldspato e mica, porém, sempre contêm outros minerais. Estes são responsáveis pelas diferentes colorações, que vão desde tons claros como o branco e o amarelo até o preto e o marrom [48].

Na construção civil, é habitual que as pedras claras (Figura 7), que tem melhor trabalhabilidade, sejam empregadas em molduras de janelas e portas, frisos e outros elementos decorativos enquanto as escuras, mais duras, sirvam para constituir alvenarias e fundações. No entanto, devido a abundância de granito amarelo nas regiões do Minho, Douro, Beiras e Litoral de Portugal, é bastante comum encontrar alvenarias constituídas por este tipo de pedra [51].



Figura 7 – Aspecto do granito amarelo utilizado nos ensaios laboratoriais.

Da mesma forma que acontece nos xistos, os granitos também apresentam heterogeneidade de resistência, porém, apresentando valores significativamente inferiores. No caso dos granitos amarelos da região nordeste de Portugal, são encontradas resistências à flexão e à compressão próximos dos 13 e 35 MPa, respectivamente. Por outro lado, estas pedras ainda apresentam rugosidade superficial bastante elevada, o que contribui positivamente para a aderência dos constituintes de uma alvenaria [51]

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para que se possa realizar a comparação entre as caldas estudadas aqui e em outras publicações, é fundamental que seja respeitada uma metodologia sólida quanto aos procedimentos realizados em laboratório. Este capítulo apresenta, entre outras informações, a estratégia adotada no projeto dos traços, na execução das caldas e na caracterização dos materiais.

3.1. Formulação das caldas

Como já foi referido anteriormente, um dos objetivos desta investigação é comparar a calda “Legante Per Iniezioni 790”, produzida pela Fassa Bortolo, com materiais equivalentes que possam ser produzidos facilmente *in loco*. Sendo assim, optou-se pela utilização apenas de Cal Hidráulica do tipo HL5, Cimento Portland Branco do tipo CEMII/B-L 32,5R e superplastificante Dynamon SR1 à base de polímeros acrílicos. Os materiais utilizados, seus fabricantes e suas funções estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais aplicados na execução das caldas.

Material	Fabricante	Função
Cal Hidráulica (HL5)	Secil	Aglomerante
Cimento Portland Branco (CEM II/B-L 32,5R)	Secil	Aglomerante
Legante Per Iniezioni 790	Fassa Bortolo	Aglomerante
Dynamon SR1	Mapei	Aditivo superplastificante

Posto isso, foi determinado que a primeira calda produzida *in loco* deveria ser composta unicamente de água, superplastificante e Cal Hidráulica, com o objetivo de quantificar a ação deste material desamparado de qualquer outro aglomerante. A proporção água/sólidos das caldas feitas *in loco* foi fixada em 0,5 visto que este valor é frequentemente encontrado na literatura específica como limite inferior para obter um produto passível de ser injetado [52]. No caso da calda comercial, seguiu-se a recomendação do fabricante de usar a proporção entre 0,35 e 0,37. Ainda, fixou-se o objetivo de obter o mesmo tempo de escoamento em Cone de Marsh apresentado pela

calda comercial citada anteriormente modulando apenas a concentração de superplastificante.

Estabeleceu-se que a segunda calda seria baseada na formulação da anterior, porém, com substituição de 30% da massa da Cal Hidráulica pelo seu equivalente de Cimento Portland Branco. Novamente, fixou-se que a concentração de superplastificante deveria ser modulada para obtenção de tempos similares no escoamento em Cone de Marsh.

Foram realizados diversos ensaios prévios com o objetivo de equalizar os valores de fluidez até que fossem encontradas as proporções dispostas na Tabela 3, cujos tempos de escoamento de um litro aproximam-se todos dos 30 segundos. Por fim, denominou-se a calda constituída de material comercializado pronto de CCOM, a calda contendo apenas Cal Hidráulica como aglomerante de CHL e a última, contendo também uma fração de cimento branco, de CHLCP.

Tabela 3 – Composição das caldas estudadas.

Calda	FB (%)	HL (%)	CPB (%)	SR1 (%)	Água/aglomerantes
CHL	0	100	0	1	0,5
CHLCP	0	70	30	0,3	0,5
CCOM	100	0	0	0	0,37

3.2. Caracterização das pedras

A fim de entender melhor o comportamento do xisto e do granito amarelo quando submetidos aos ensaios de injetabilidade, foi definida a seguinte campanha experimental. Primeiramente, as pedras foram britadas através de esforços de compressão utilizando um equipamento mecânico, em seguida foram submetidas ao peneiramento utilizando malhas com abertura de 4,75 mm, 8 mm, 10 mm, 16 mm e 20 mm. Assim, foram obtidas porções em quatro intervalos granulométricos. A composição utilizada nos ensaios descritos a seguir foi proporcional à dimensão do intervalo granulométrico de cada faixa, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Faixas granulométricas e proporções utilizadas.

Granulometria inicial (mm)	Granulometria final (mm)	Dimensão do intervalo (mm)	Proporção utilizada
4,75	8	3,5	21,3%
8	10	2	13,1%
10	16	6	39,3%
16	20	4	26,2%

Para a determinação das massas específicas e da absorção de água, seguiu-se o procedimento descrito na ABNT NBR 53 (2009). Primeiramente o agregado foi completamente lavado a fim de que fosse removido o pó e demais substâncias. Em seguida a amostra foi submetida a temperatura de 105°C por 3 horas a fim de que toda a água presente fosse evaporada. Por fim, aguardou-se mais 3 horas até que a temperatura fosse próxima à do ambiente [53].

A amostra seca foi pesada, para determinar a sua massa nesta condição (m), e submergida em água por 24 horas, a fim de que todos as suas cavidades permeáveis fossem preenchidas. Em seguida, todos os grãos foram secos com um tecido absorvente para que a umidade superficial fosse eliminada. Em seguida, pesou-se a amostra a fim de determinar a massa ao ar na condição saturado superfície seca (m_s), conforme a Figura 8a.



(a)



(b)

Figura 8 – Determinação das massas: (a) na condição saturado superfície seca; (b) submerso em água.

O agregado foi colocado em um cesto metálico de aberturas circulares de diâmetro inferior a 3,35 mm, o qual foi submergido em água com temperatura de 17°C e acoplado em uma balança a fim de determinar sua massa em água (m_a), conforme a Figura 8b.

Por fim, os resultados obtidos foram aplicados na Equação 3, Equação 4, Equação 5 e Equação 6.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad \text{Equação 3}$$

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad \text{Equação 4}$$

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad \text{Equação 5}$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100\% \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

d é a massa específica do agregado seco, expressa em g/cm³;

d_s é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, expressa em g/cm³;

d_a é a massa específica aparente do agregado seco, expressa em g/cm³;

A é a absorção de água, expressa em porcentagem;

m é a massa ao ar da amostra seca, expressa em g;

m_a é a massa em água da amostra, expressa em g;

m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em g.

As massa unitárias e o índice de vazios dos agregados foram determinados de acordo com a ABNT NBR 45 (2006) [54]. O recipiente ilustrado na Figura 9a, previamente calibrado e pesado (m_r), foi utilizado para determinação da massa unitária dos agregados em questão. Realizou-se o enchimento do frasco com o agregado até 1/3 de sua altura, onde foram proferidos 25 golpes utilizando uma haste de extremidade semiesférica. Repetiu-se o processo duas vezes até que o receptáculo estivesse cheio. Tomou-se o cuidado de distribuir os golpes de maneira uniforme e evitar que atingissem o terço inferior ou o fundo do recipiente.



Figura 9 – Determinação da massa unitária: (a) recipiente utilizado; (b) pesagem do recipiente e do agregado.

Em seguida, utilizou-se uma espátula para nivelar a camada superficial do agregado. Por fim, conforme a Figura 9b, pesou-se registrou-se a massa do recipiente mais seu conteúdo (m_{ar}) e aplicou-se os valores obtidos na Equação 7, onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, expressa em kg/m^3 ;

m_{ar} a massa do recipiente mais o agregado, expressa em kg;

m_r é a massa do recipiente vazio, expressa em kg;

V é o volume do recipiente, expresso em m^3 .

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad \text{Equação 7}$$

A fim de determinar a massa unitária na condição saturado superfície seca (ρ_{as}), os valores determinados na Equação 6 e Equação 7 foram aplicados na Equação 8, onde:

ρ_{as} é a massa unitária na condição SSS, expressa em kg/m^3 ;

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, expressa em kg/m^3 ;

A é a absorção, determinada através da Equação 6, expressa em porcentagem.

$$\rho_{as} = \rho_{ap} \cdot \left(1 + \frac{A}{100}\right) \quad \text{Equação 8}$$

Por fim, para determinar o índice de volume de vazios dos agregados (E_v), os valores determinados em Equação 3 e Equação 7 foram aplicados na Equação 9, onde:

E_v é o índice de volume de vazios nos agregados, expresso em porcentagem;

d é a massa específica relativa do agregado seco, determinada pela Equação 3 e expressa em kg/m^3 ;

ρ_w é a massa específica da água, expressa em kg/m^3 ;

ρ_{ap} é a massa unitária média do agregado, determinada pela Equação 7, expressa em kg/m^3 .

$$E_v = \frac{100 \cdot [(d \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{d \cdot \rho_w} \quad \text{Equação 9}$$

3.3. Execução das caldas

Primeiramente, todos os materiais foram pesados utilizando uma balança de precisão da Marca Precisa, modelo 30000D SCS (Figura 10a) com precisão de 0,1g, com exceção do superplastificante que teve seu peso obtido através da balança modelo 400C-3000D de mesma marca e precisão de 0,01g. Para maior exatidão, a água foi mantida a temperatura de 20°C com auxílio do equipamento Matest B052-01 (Figura 10b) e posteriormente aferida com um termômetro digital de precisão 0,1°C conforme a Figura 10c.

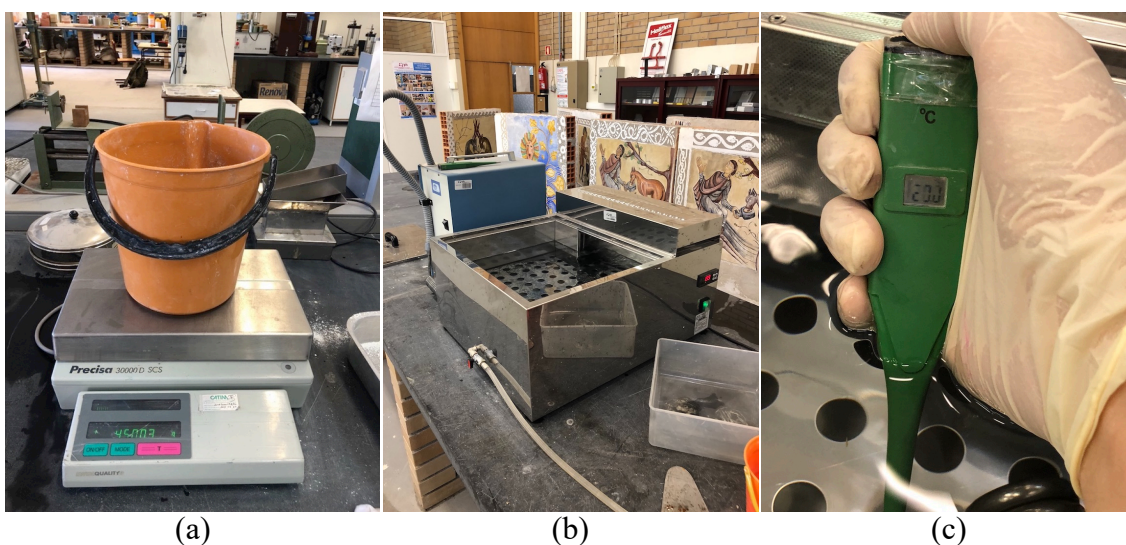


Figura 10 – (a) Balança de precisão utilizada para pesagem dos materiais; (b) Equipamento utilizado para ajuste de temperatura da água; (c) Verificação da temperatura da água utilizada na amassadura.

Posteriormente, realizou-se a mistura dos materiais em um recipiente plástico de acordo com a seguinte ordem de carregamento: primeiramente misturou-se o aditivo superplastificante na água da amassadura e em seguida, adicionou-se metade da solução ao recipiente de mistura. Posteriormente, foram colocados os materiais sólidos (Cal Hidráulica, Cimento Portland Branco ou a calda industrializada) e por fim, foi adicionado

o restante do material líquido. Vale lembrar que a superfície de todos os recipientes foi previamente umedecida, evitando a perda de água da amassadura.

A homogeneização foi realizada utilizando um misturador de argamassas elétrico da marca Rubi, modelo Rubimix 10 com potência de 950 Watts (W) (Figura 11a), acoplado em uma vareta misturadora da mesma marca (Figura 11b). Foi estipulado tempo de mistura de 10 minutos, sendo que nos 3 primeiros minutos utilizou-se a velocidade média, pressionando o gatilho até a metade. No tempo restante, foi utilizada a velocidade máxima, equivalente a 700 rotações por minuto (RPM), obtida pressionando o gatilho até o fim do curso. O equipamento foi movimentado circularmente durante toda a amassadura e eventualmente utilizou-se uma espátula para homogeneizar algum material depositado no fundo ou nas laterais do recipiente.



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Misturador modelo Rubimix 10 utilizado para a amassadura; (b) Ponta misturadora utilizada para a amassadura.

Após o final do processo, o produto resultante foi lançado em uma peneira de abertura igual a 2 milímetros com o intuito de retirar os materiais de grandes dimensões eventualmente presentes. Para verificar o volume de material produzido, a calda foi vertida em um segundo recipiente e o nível alcançado foi verificado com o auxílio de uma escala metálica. O recipiente foi limpo, pesado para que se pudesse adicionar água em temperatura controlada até o nível observado anteriormente. Por meio da relação entre a diferença de massas e a massa específica da água foi possível determinar o rendimento de cada *grout*.

3.4. Caracterização das caldas

3.4.1. Ensaios em estado fresco

3.4.1.1. Determinação da fluidez

Experimentalmente, a fluidez pode ser mensurada através do tempo necessário para que um litro de determinado material possa escoar através de um Cone de Marsh. A determinação desta propriedade pode ser feita de acordo com a NP EN 445 (2008) [55]. O procedimento aqui aplicado foi baseado na norma referida anteriormente, porém, com a utilização de um cone com dimensões diferentes. As medidas do cone utilizado estão apresentadas na Figura 12.

A alteração do procedimento foi feita em vista de que não houve a disponibilidade de um instrumento de grandezas idênticas, portanto, admite-se a impossibilidade de confrontar os resultados com outros testes realizados com a utilização do cone sugerido pelas normas, porém, julga-se que o procedimento seja válido para fins de comparação entre os materiais aqui estudados.

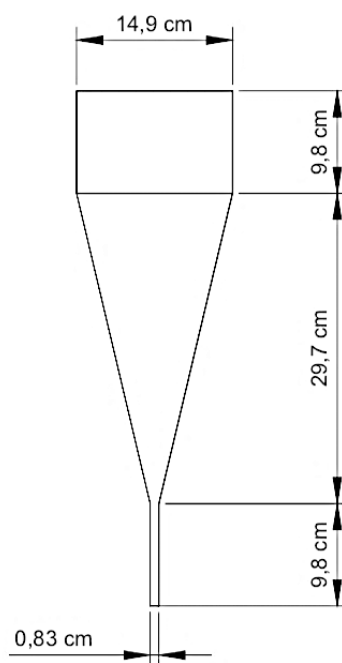


Figura 12 – Dimensões do cone utilizado para determinação da fluidez.

Sendo assim, o cone e o recipiente de coleta foram umidificados. Em seguida, o orifício de saída foi obstruído e adicionou-se a calda até a marcação que delimita o fim

do cone e início do cilindro. Verificou-se o nivelamento do equipamento e posicionou-se o cronômetro. Assim que o orifício inferior é desobstruído, acionou-se a contagem de tempo. A primeira marcação foi feita assim que notou-se o escoamento de um litro de material. A segunda marcação de tempo ocorre quando o fluxo foi interrompido. Os testes foram repetidos três vezes com cada material a fim de mitigar qualquer erro.

3.4.1.2. Determinação da exsudação e da expansão

Devido à escassez de normas destinadas à caracterização de caldas à base de cal, foram realizados ensaios adaptados da ABNT NBR 7681 (2013) [56], que destina-se às caldas à base de cimento. Inicialmente, posicionou-se uma proveta graduada com capacidade de 100 mL e precisão de 1 mL (Figura 13), em superfície horizontal e firme. Em seguida, suas paredes foram umidificadas e verteu-se 97 mL de calda em seu interior. Por fim, sua extremidade superior foi lacrada com filme plástico para que o fluxo de gases fosse impedido [56].

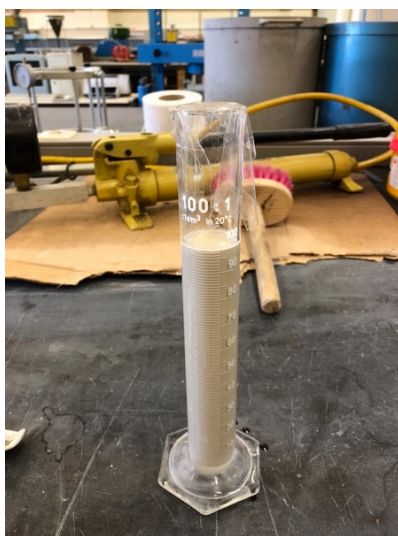


Figura 13 – Execução do teste para determinação da exsudação.

As medições foram feitas através de leituras dos volumes totais e de água exsudada em intervalos de 60 minutos durante as 3 horas de duração do ensaio. Em seguida, os resultados foram aplicados na Equação 10 e na Equação 11, onde:

V_f é o volume total da calda mais a água exsudada, expresso em cm^3 ;

V_s é o de sólidos, expresso em cm^3 ;

V_i é o volume inicial de calda introduzida na proveta, expresso em cm^3 ;

E_{sd} é o índice de exsudação, expresso em percentagem e

E_{xp} é o índice de expansão, expresso em percentagem.

$$\frac{V_f - V_s}{V_i} * 100\% = E_{sd} \quad \text{Equação 10}$$

$$\frac{V_f - V_i}{V_i} * 100\% = E_{xp} \quad \text{Equação 11}$$

É importante destacar que a norma referida anteriormente exige que o ensaio seja feito dentro de um intervalo de 10 minutos a partir do primeiro contato do aglomerante com a água da amassadura. Visto que o procedimento aqui adotado compreende 10 minutos apenas para o tempo de amassadura, foi considerado que a calda devesse ser vertida na proveta em até 10 minutos depois do final da mistura.

3.4.1.3. Determinação da injetabilidade

Pretende-se com este ensaio comparar a injetabilidade das caldas perante a infiltração em um meio granular composto de xisto ou granito amarelo. Para isto, foram utilizados cilindros compostos pelos dois tipos de pedra em umidade e granulometria controladas. Em seguida, injetou-se a calda sobre pressão constante. Por fim, os tempos foram comparados entre as combinações de materiais.

Para a confecção dos corpos de prova a serem submetidos aos testes de injetabilidade, foram utilizados tubos com altura de 30 cm e diâmetro de 15 cm dotados de tampa e fundo removíveis e um sistema de vedação composto por quatro barras roscadas e guarnições elásticas. Esses moldes foram fabricados em acrílico transparente para que se pudesse acompanhar o avanço da injeção durante o ensaio. As tampas possuem cinco orifícios: quatro com diâmetros de 6 mm e um com diâmetro de 10 mm. Nas bases existe apenas um orifício de 10 mm para que a calda possa ser injetada.

Inicialmente os cilindros foram lubrificados com uma fina camada óleo desmoldante, em seguida, as pedras graduadas conforme a Tabela 4 e umidificadas por 7 dias em câmara úmida foram inseridas no molde e compactadas de acordo com o descrito no item 3.2. Posteriormente o cilindro foi fechado posicionando um fino tecido entre a tampa e o agregado com a finalidade de permitir o fluxo de calda apenas através do orifício central da tampa.

As caldas foram preparadas conforme o item 3.3 e vertidas dentro de uma panela de injeção. Esse equipamento permite que a pressão com que a calda é injetada seja constante, neste caso, o aparelho foi configurado para 1,5 bar e controlada através de um manômetro (Figura 14a). Por fim, a panela foi conectada aos orifícios inferiores dos cilindros conforme a Figura 14b e o fluxo foi iniciado.

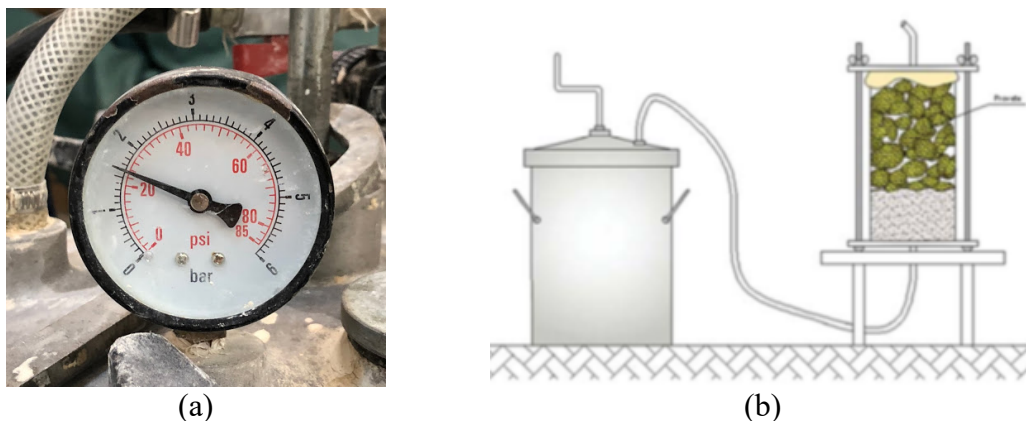


Figura 14 – Injeção dos cilindros: (a) aspecto da forma antes do enchimento; (b) aspecto da forma logo após ao enchimento. Fontes: (a) o autor e (b) Luso [28].

Foi registrado o tempo de enchimento referente às frações de 25%, 50%, 75% e 100% do cilindro. O ensaio foi realizado duas vezes para cada combinação de calda e pedra, resultando em 12 corpos de prova. Após 48 horas os cilindros foram movidos para a câmara úmida, no prazo de sete dias foram desmoldados e retornados para a câmara úmida, onde ficaram até o tempo de cura de 28 dias. Posteriormente, foram destinados aos ensaios de compressão uniaxial e diametral, conforme descrito nos capítulos 4.3.3.2 e 4.3.3.3, respectivamente.

3.4.2. Execução dos corpos de prova prismáticos

Os corpos de prova prismáticos foram executados de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015) [57] de maneira adaptada, visto que, esta norma refere-se ao procedimento quando o material é concreto, que tem comportamento muito mais sólido do que as caldas aqui estudadas. Foram utilizadas formas metálicas, de dimensões (160x40x40) mm, limpas e lubrificadas com uma fina camada de óleo desmoldante.

O preenchimento das mesmas foi realizado em apenas uma fase, visto que os materiais são bastante fluidos e se adensaram sem a necessidade de interferência externa. Tomou-se o cuidado de manter as fôrmas niveladas e de realizar o preenchimento até que

fosse observada a formação de ângulos de contato em todo o perímetro, em decorrência da interação entre a superfície da forma e a calda. Alguns corpos de prova ainda nos moldes são mostrados na Figura 15.



Figura 15 – Execução dos corpos de prova para o ensaio de flexão e compressão.

Após 48 horas da amassadura, os corpos de prova foram desmoldados, referenciados e tiveram suas dimensões medidas três vezes em cada dimensão, bem como suas massas. Para isto, utilizou-se um paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetro e uma balança de precisão da marca Precisa, modelo 4000C, com precisão de 0,01 grama. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida em conformidade com a ABNT NBR 9479 (2006) [58], ou seja com umidade relativa de pelo menos 95% e temperatura entre 21°C e 25°C. Aos 7, 28 e 90 dias de cura os sólidos foram novamente submetidos a ensaios de flexão e compressão.

3.4.3. Execução dos corpos de prova para os ensaios de aderência

Utilizando lâminas de acetato, foram confeccionadas tiras de aproximadamente 20 centímetros de largura por 2 centímetros de altura. Com uma caneta permanente, foi marcada a altura de 1,5 centímetros a partir da base da fita, em seguida, a mesma foi circundada no perímetro de um molde metálico de diâmetro igual a 50 milímetros. Utilizou-se fita adesiva para efetuar a fixação das pontas.

Os suportes pétreos foram confeccionados em xisto e granito amarelo. No caso da primeira pedra, não houve nenhum tratamento em sua superfície, visto que a natureza estratificada do material permite a formação de superfícies aproximadamente planas. Em alguns casos, devido a falta de paralelismo das superfícies superiores e inferiores, foi

executado um sustentáculo em argamassa para garantir a horizontalidade da peça. Já o granito teve de ser cortado com serra circular, o que resultou em superfícies bastante planas, ortogonais e polidas. Para que fosse criada alguma rugosidade, de forma semelhante ao que é observado naturalmente, as peças foram submetidas ao jateamento de areia.

Posteriormente, os moldes foram colados nos suportes pétreos, que ainda estavam secos ao ar, utilizando cola termofundível. O resultado pode ser observado na Figura 16a. Em seguida, os conjuntos foram movidos para uma câmara úmida já descrita na seção 3.4.2, onde ficaram por 7 dias para que absorvessem de forma uniforme a umidade. Por fim, colocou-se a calda até o nível demarcado em 1,5 cm como pode ser visto na Figura 16b.

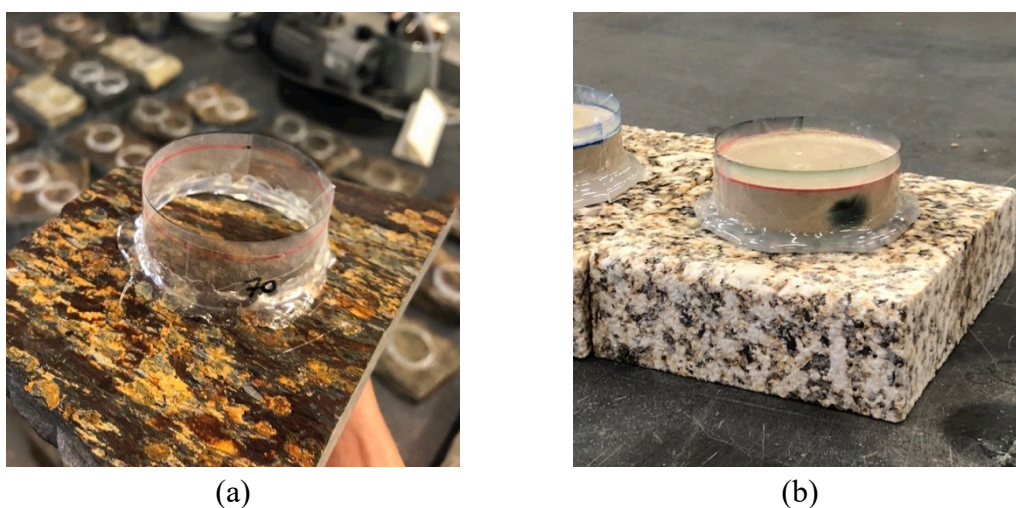


Figura 16 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos: (a) aspecto da forma antes do enchimento; (b) aspecto da forma logo após ao enchimento.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram inseridos na mesma câmara úmida, de onde só foram retirados nos prazos de 7, 28 e 90 dias após a amassadura para a realização dos ensaios.

3.4.4. Ensaios em estado endurecido

3.4.4.1. Determinação da resistência mecânica à flexão

Com o objetivo de determinar a resistência mecânica à flexão, os corpos de prova descritos em 3.4.2 foram submetidos ao ensaio descrito em NP EN 12390-5 (2009) [59]. Para isto, utilizou-se o equipamento de tração nomeado de AGS-X, fabricado pela

empresa Shimadzu, que encontra-se no Instituto Politécnico de Bragança (IPB). A fim de verificar a evolução da resistência dos materiais, o procedimento foi repetido aos 7, 28 e 90 dias após o período de moldagem.

Inicialmente, os apoios cilíndricos do equipamento foram posicionados com espaçamento de 120 milímetros, visando garantir a proporcionalidade ilustrada na Figura 17. Verificou-se a ausência de quaisquer irregularidades nos corpos de prova, que em seguida foram posicionados na máquina, alinhando o centro da peça com o rolete de aplicação de carga, o qual ficou disposto perpendicularmente ao eixo longitudinal do objeto.

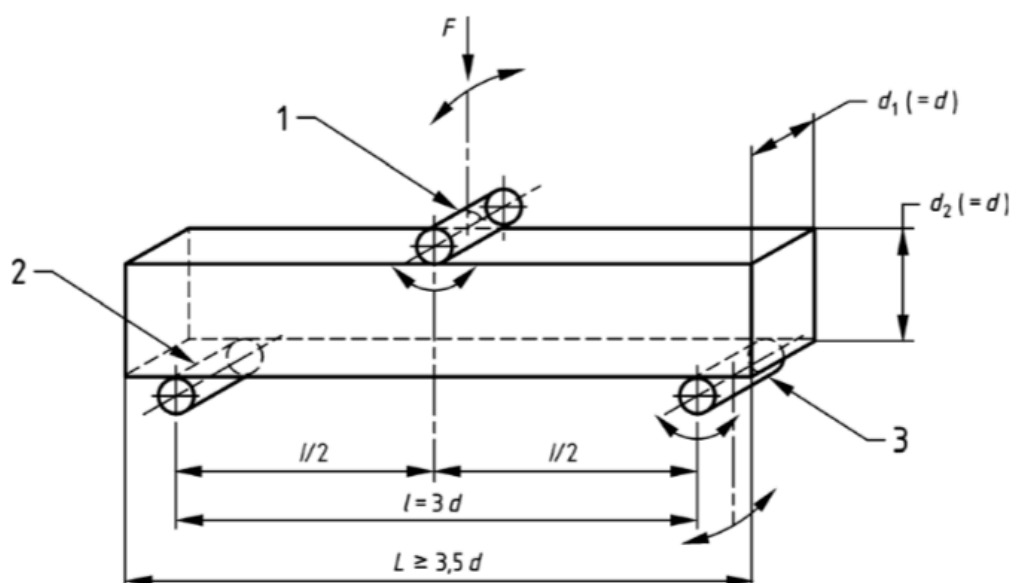


Figura 17 – Dimensões do corpo de prova e posicionamento dos cilindros. Fonte: NP EN 12390-5 [59].

Devido a impossibilidade de 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. Por fim, aplicou-se a carga e registrou-se a força de ruptura para os corpos de prova em questão.

Posteriormente, a fim de determinar a resistência à flexão das peças, foi utilizada a Equação 12.

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot I}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

f_{cf} é a resistência à flexão, expressa em MPa;

F é a carga máxima, expressa em N;

I é a distância entre os roletes inferiores de apoio, expressa em mm;

d_1 e d_2 são as dimensões laterais do corpo de prova, expressas em mm.

Para fins comparativos, observa-se que os resultados obtidos por meio desta metodologia, onde ocorre a aplicação de força apenas no centro do vão, são geralmente mais elevados quando confrontados com resultados advindos da aplicação de força em dois pontos do corpo de prova. No caso de concretos, a norma específica informa que esta diferença fica em torno dos 13% [59].

3.4.4.2. Determinação da resistência mecânica à compressão

A resistência mecânica à compressão foi realizada através de procedimento baseado na norma NP EN 12390-3 (2011) [60], porém, utilizando os corpos de prova resultantes do ensaio descrito em 3.4.4.1, visto que suas extremidades não sofreram danos e se aproximam do formato cúbico descrito na normativa.

Os corpos de prova em questão foram posicionados na prensa hidráulica, fabricada pela Matest (Figura 18) e disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção do IPB, onde foram submetidos a esforços de compressão uniaxial com carregamento controlado até que fosse observado o rompimento. Os valores máximos de força foram anotados, em seguida utilizou-se a Equação 13 para determinar a tensão de ruptura dos materiais:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, expressa em MPa;

F é a força de ruptura, expressa em N;

A é a área do corpo de prova, expressa em mm².



Figura 18 – Realização do ensaio para determinação da resistência à compressão.

O ensaio foi realizado nos tempos de 7, 28 e 90 dias após a amassadura das caldas com o propósito de verificar a evolução da resistência dos materiais.

3.4.4.3. Determinação da aderência em suporte pétreo

De acordo com a ABNT NBR 13528 (2010) [61], define-se a aderência como a propriedade de um revestimento de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato. A mesma norma ainda descreve que esta característica não trata-se de uma propriedade do substrato nem do material colante, mas sim, da interação entre as camadas constituintes do sistema de revestimento [61].

Devido à ausência da normas que tratem da determinação da aderência entre caldas e suportes pétreos, foi utilizada a norma ASTM C1072 (2013) [62], realizando as adaptações necessárias, visto que este documento refere-se à caracterização desta mesma propriedade, porém, quando os materiais são argamassas.

Os corpos de prova descritos na seção 3.4.3 foram retirados da câmara úmida e desmoldados. Em seguida, utilizou-se uma lixa para a regularização de sua face superior, visto que alguns deles não apresentavam paralelismo com o plano horizontal. Posteriormente, realizou-se a colagem (Figura 19), utilizando adesivo bicomponente à base de resina epóxi, de uma pastilha metálica de diâmetro igual a 50 milímetros e altura igual a 20 milímetros, dotada de rosca centralizada na face superior.



Figura 19 – Aplicação da cola bicomponente na pastilha metálica.

Observou-se que durante as operações descritas anteriormente alguns corpos de prova constituídos da calda CHL romperam-se (Figura 20) ou descolaram-se do suporte. Estes corpos de prova não foram submetidos a nenhum ensaio. Após a secagem da cola, os corpos de prova restantes foram submetidos ao ensaio de tração através do equipamento AGS-X, fabricado pela Shimadzu, disponível no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB.



Figura 20 – Corpo de prova que se rompeu durante a operação de desmoldagem.

Os corpos de prova foram encaixados em uma base metálica horizontal e presos com o auxílio de grampos. A pastilha foi encaixada na garra superior do equipamento através de uma ligação rotulada, de forma com que os esforços de momento fossem anulados antes de chegarem à peça (Figura 21).



Figura 21 – Execução do ensaio de aderência.

O dispositivo foi configurado de forma com que tivesse velocidade de 1 mm/min até que a resistência encontrada fosse igual ou superior a 10 N (pré-carga), posteriormente, a velocidade foi diminuída para 0,12 mm/min e mantida constante até o rompimento. O ensaio foi realizado três vezes: após 7, 28 e 90 dias da moldagem dos corpos de prova.

Em todas as ocasiões, os valores de força, tempo e deslocamento foram registrados em intervalos de 0,01 s. Foi utilizada a Equação 14 a fim de determinar a resistência de aderência à tração a partir dos valores de força obtidos na ruptura dos corpos de prova.

$$Ra = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Ra é a resistência de aderência à tração, expressa em MPa;

F é a força de ruptura, expressa em N;

A é a área do corpo de prova, expressa em mm².

3.4.4.3.1. Avaliação dos planos de ruptura

De acordo com a ASTM C1583 (2013) [63], a ruptura no ensaio de *pull-off* pode ser caracterizada em 5 situações:

- Falha coesiva no substrato, indicando que a força adesiva foi superior à resistência à tração do substrato. Observa-se que a metodologia utilizada neste estudo não inclui a diminuição da seção transversal do material

pétreo através de corte com serra copo, portanto, presume-se que haja menor ocorrência deste tipo de falha.

- Falha adesiva na interface entre a calda e a pedra, indicando deficiência na ligação entre os dois materiais.
- Falha coesiva na calda, indicando que a força adesiva foi superior à resistência à tração da calda.
- Falha adesiva 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 pela pedra são superiores à cola.
- Falha adesiva na interface entre a cola e a pastilha, indicando insucesso com as mesmas consequências da situação anterior.

Estas situações estão ilustradas na Figura 22.

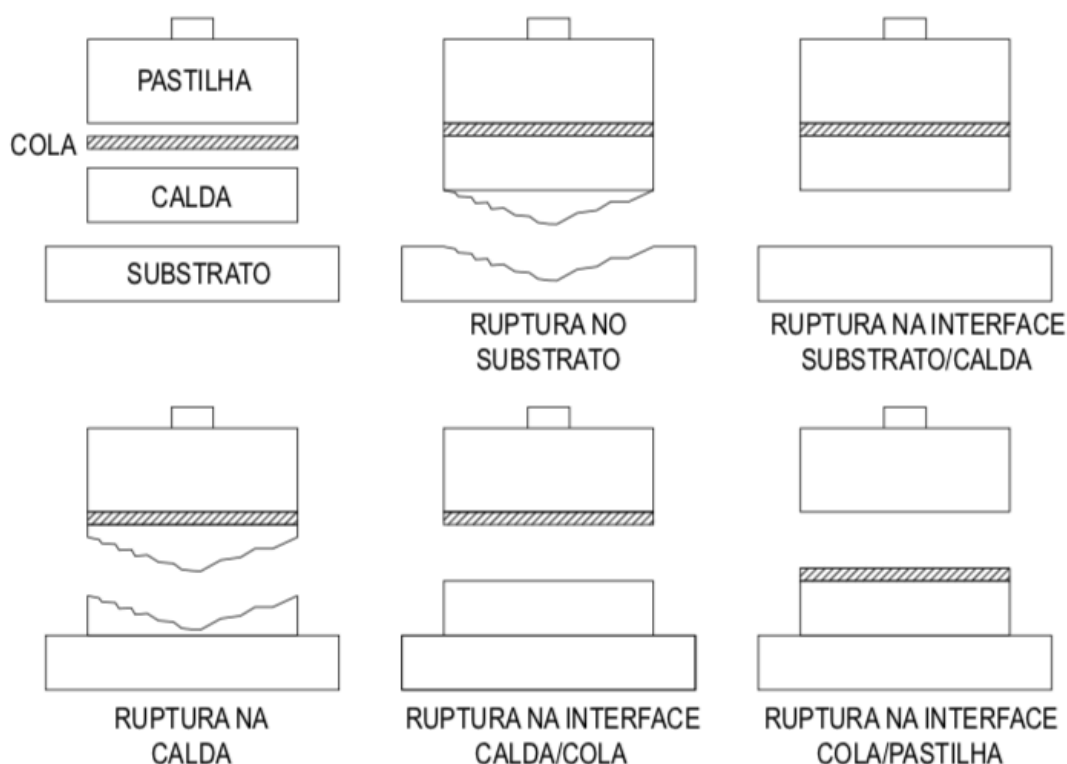


Figura 22 – Modos de ruptura quando o corpo de prova é submetido à tração. Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13558 (2010) [64].

3.4.5. Caracterização dos cilindros injetados

O ensaio de injetabilidade, descrito em 3.4.1.3 resultou em doze cilindros compostos pelos dois tipos de pedra e pelas três formulações de calda. Dada a impossibilidade prática de confeccionar mais corpos de prova semelhantes, decidiu-se que seria coerente sacrificar parcialmente a validade estatística dos resultados para proporcionar o estudo de mais uma propriedade destes materiais.

Sendo assim, seis cilindros foram destinados ao ensaio de compressão uniaxial e outros seis ao ensaio de compressão diametral, resultando em um corpo de prova para cada combinação de calda, pedra e ensaio. Optou-se também por realizar os testes apenas com o tempo de cura de 28 dias.

3.4.5.1. Determinação da resistência mecânica à compressão

O procedimento para determinação da resistência à compressão dos corpos de prova resultantes dos ensaios de injetabilidade foi baseado na NP EN 12390-3 (2009) [60]. De forma geral, a metodologia é muito semelhante com o que já foi descrito em 3.4.4.2, com exceção do formato dos corpos de prova, anteriormente prismáticos e agora cilíndricos.

Inicialmente, os corpos de prova foram limpos e tiveram suas medidas de altura, diâmetro e peso determinadas através de paquímetro e balança digitais. Observou-se ainda que os topos dos cilindros apresentavam certa irregularidade, em função das falhas no processo de injeção. Dado que estas seriam prejudiciais ao andamento do ensaio, foi realizada a retificação das superfícies.



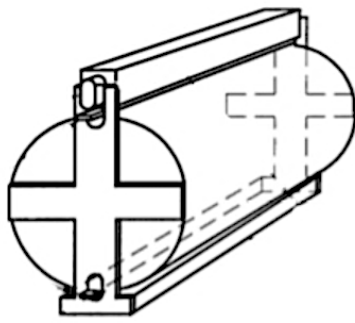
Figura 23 – Ensaio de compressão uniaxial realizado em corpo de prova composto por pedra e calda.

Os corpos de prova foram posicionados na prensa da marca Matest, disponibilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção do IPB (Figura 23). Em seguida, realizou-se a aplicação de carga de forma uniforme até o rompimento do material. Em seguida, os valores máximos de força foram anotados e aplicados na Equação 13 a fim de determinar as tensões de ruptura.

3.4.5.2. Determinação da resistência mecânica à tração

O ensaio de compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, é regulamentado pela NP EN 12390-6 (2011) [65], que descreve o procedimento de submeter um corpo de prova cilíndrico a esforços de compressão com o objetivo de determinar sua resistência à tração.

Para realização do ensaio, posiciona-se o corpo de prova com duas geratrizes diametralmente opostas apoiadas entre os pratos de uma máquina de compressão (Figura 24a). Entre o material e a máquina, deixam-se duas tiras de chapa dura de fibra de madeira ou material similar (Figura 24b). Em seguida, aplica-se uma pequena carga com o intuito de manter o conjunto em posição. O ensaio se inicia com a aplicação de uma carga contínua, com crescimento constante e a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s e se encerra no rompimento do corpo de prova.



(a)



(b)

Figura 24 – Determinação da resistência à tração: (a) esquema representativo do ensaio; (b) posicionamento do corpo de prova no equipamento.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 15.

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$f_{t,D}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F é a carga máxima obtida no ensaio, em N;

d é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

L é a altura do corpo de prova, em mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Formulação das caldas

A ficha técnica do produto Legante per Iniezioni indica que para o preparo do produto deve ser preparado adicionando a dosagem de água equivalente ao intervalo de 35% a 37% do peso da fração sólida da calda. Sendo assim, as caldas produzidas utilizando os dois extremos deste intervalo foram testadas através do ensaio de Cone de Marsh. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempos de escoamento de Marsh das caldas produzidas com Legante per Iniezioni.

Porcentagem de água	Tempo para escoamento de um litro (s)	Tempo para escoamento total (s)
35,00%	32,8	71,2
37,00%	31,0	70,5

Visto que a segunda calda se aproximava mais do valor de escoamento especificado na ficha técnica do produto, correspondente a 30 segundos, adotou-se esta como parâmetro para dimensionamento das caldas seguintes.

O dimensionamento da dosagem de superplastificante da calda CHL foi feito em quatro tentativas: a primeira continha superplastificante equivalente a 0,4% da massa de aglomerante, o que resultou em uma calda com fluidez insuficiente, levando aproximadamente 45 segundos para que um litro escoasse pelo Cone de Marsh. Foram feitos incrementos sucessivos de superplastificante até que fosse obtida uma calda com tempo de escoamento de 31,3 segundos, menos de meio segundo acima do estipulado inicialmente. Os dados obtidos neste ensaio estão apresentados na Tabela 6. Em suma, definiu-se que CHL teria 1% de aditivo superplastificante em sua composição.

Tabela 6 – Tempos de fluidez obtidos para dimensionamento da calda CHL.

Tentativa	Porcentagem de superplastificante	Tempo para escoamento de um litro (s)	Tempo para escoamento total (s)
1	0,40%	45,00	113,7
2	0,60%	39,5	110,2
3	0,80%	37,4	105,1
4	1,00%	31,3	71,9

Posteriormente, 30% da massa de Cal Hidráulica foi substituída por cimento branco, o que propiciou um grande acréscimo de fluidez ao material e a possibilidade de se diminuir a quantidade de superplastificante. Para o primeiro ensaio prévio foi utilizada a dosagem equivalente a 0,6% da massa de aglomerante, neste caso, correspondente à soma de Cal Hidráulica e cimento branco. A calda resultante apresentou fluidez excessiva, levando cerca de 22 segundos para finalizar o escoamento de um litro no Cone de Marsh.

Foram executadas mais três caldas com reduções de 0,2% de superplastificante até que fosse encontrado o valor de 33,6 segundos, relativamente próximo à meta de 31 segundos, porém, ainda com possibilidade de melhoria. Por fim, adicionou-se 0,1% de superplastificante e obteve-se o tempo de 29,8 segundos, desta vez, suficientemente próximo do objetivo. Estes resultados e os demais estão dispostos na Tabela 7. Por fim, definiu-se que a calda CHLCP teria 0,3% de aditivo superplastificante em sua composição.

Tabela 7 – Tempos de fluidez obtidos para dimensionamento da calda CHLCP.

Tentativa	Porcentagem de superplastificante	Tempo para escoamento de um litro (s)	Tempo para escoamento total (s)
1	0,60%	21,6	48,5
2	0,40%	23,6	56,4
4	0,30%	29,8	73,0
3	0,20%	33,6	89,1

4.2. Caracterização das pedras

Os resultados obtidos na caracterização das duas pedras estudadas estão apresentados na Tabela 8: as quatro primeiras linhas referem-se às características dos materiais propriamente ditos, que não dependem de sua forma ou granulometria. Já as últimas três linhas apresentam os resultados de ensaios realizados com a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 4.

Tabela 8 – Resultados obtidos para caracterização das pedras.

Propriedade	Pedra	
	Granito	Xisto
Massa específica em condição seca (Kg/m ³)	2634,63	2732,91
Massa específica em condição saturado superfície seca (Kg/m ³)	2568,74	2673,45
Massa específica aparente seca (Kg/m ³)	2528,44	2639,14
Absorção de água após 24 horas (%)	1,6%	1,3%
Massa unitária em condição seca (Kg/m ³)	1306,59	1301,09
Massa unitária em condição saturado superfície seca (Kg/m ³)	1327,42	1321,83
Índice de volume de vazios (%)	50,3%	52,3%

Observa-se que as massas específicas nas três condições são por volta de 4% superiores no xisto em relação ao granito. Em contrapartida, o granito apresenta absorção de água 18% superior, o que se deve ao seu maior número de vazios permeáveis.

As massas unitárias apresentaram valores muito próximos nas duas pedras. O mesmo acontece com o índice de volume de vazios, o que, de certa forma, valida a igualdade de condições nos ensaios de injetabilidade, dado que foram usados os mesmos materiais e a mesma distribuição granulométrica para confecção dos corpos de prova cilíndricos.

4.3. Caracterização das caldas

4.3.1. Ensaios em estado fresco

4.3.1.1. Fluides

Os resultados, as médias e os desvios padrão obtidos para os nove escoamentos, três para cada calda, podem ser visualizados na Tabela 9. Todos os materiais tiveram

comportamentos muito próximos, aproximando-se dos 30 segundos para escoamento de um litro e dos 72 segundos para escoamento total. Sendo assim, foi cumprido o objetivo de padronizar a fluidez das três caldas com o ajuste das proporções de cimento branco e aditivo superplastificante.

Tabela 9 – Tempos obtidos no ensaio de Cone de Marsh.

Calda	Tempo para escoamento de 1 litro (s)					Tempo para escoamento total (s)				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
CHL	32,9	30,7	30,2	31,3	1,5	75,4	71,0	69,3	71,9	3,1
CHLCP	32,0	29,4	28,2	29,8	1,9	81,3	70,2	67,4	73,0	7,4
CCOM	32,5	30,7	29,9	31,0	1,3	72,4	71,8	67,3	70,5	2,8

Conclui-se ainda que, referindo-se exclusivamente às caldas CHL e CHLCP, o acréscimo de 30% Cimento Portland Branco foi equivalente ao incremento de 0,3% para 1% de superplastificante para que as propriedades de fluidez se mantivessem constantes. Destaca-se também que a ficha técnica do produto CCOM preconizava um tempo de 30 segundos para este ensaio, apenas 1 segundo a menos do que foi identificado.

4.3.1.2. Exsudação e expansão

Verificou-se que aparentemente não houve expansão em nenhuma das caldas, visto que os volumes iniciais e finais mantiveram-se os mesmos. Ou seja, assume-se que as três caldas têm valores de índices de expansão próximos aos 0%. Ainda, observou-se que todas as composições permaneceram homogêneas em suas fases sólidas. Por outro lado, o fenômeno de exsudação foi nítido. Os volumes de sólidos nos quatro momentos de observação estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Volumes de sólidos observados para cada uma das caldas (em mL).

Calda	Inicialmente	Após 1 hora	Após 2 horas	Após 3 horas
CHL	97	96	95	95
CHLCP	97	96	96	96
CCOM	97	96	95	95

Aplicando os valores da Tabela 10 na Equação 11, são obtidos os índices de exsudação para as três horas de ensaio (Tabela 11). Conclui-se que as caldas CCOM e

CHL superaram ligeiramente o limite máximo de 2% de exsudação indicado pela NP EN 447 (2008) [26], por outro lado, ainda estão dentro do valor estabelecido por Vintzileou [25] de 5%.

Tabela 11 – Porcentagens de exsudação.

Calda	Após 1 hora	Após 2 horas	Após 3 horas
CHL	1,03%	2,06%	2,06%
CHLCP	1,03%	1,03%	1,03%
CCOM	1,03%	2,06%	2,06%

4.3.1.3. Injetabilidade

Os resultados encontrados nos ensaios de injetabilidade estão expostos na Tabela 12, as duas primeiras colunas indicam o tipo de pedra e a calda utilizadas, respectivamente, as últimas quatro indicam o tempo de enchimento de cada quarto do cilindro, conforme mostra a Figura 25. Os mesmos dados foram compilados na Figura 26 para uma melhor compreensão do avanço do processo de injeção.

Tabela 12 – Resultados obtidos para tempo de enchimento dos corpos de prova cilíndricos (s).

Agregado	Calda	Altura (cm)			
		7,5	15	22,5	30
Granito	CHL	Entupiu durante a injeção			
Granito	CHL	16,9	37,03	57,86	84,58
Xisto	CHL	22,28	46,82	92,62	143,74
Xisto	CHL	Entupiu durante a injeção			
Granito	CHLCP	22,16	54,05	94,85	136,56
Granito	CHLCP	33,03	69,34	114,54	170,93
Xisto	CHLCP	29,3	80,07	123,42	179,8
Xisto	CHLCP	22,46	55,43	94,32	172,03
Granito	CCOM	18,7	48,7	74	97,5
Granito	CCOM	17,6	33,56	50,68	65,86
Xisto	CCOM	22,7	53,2	80,25	106,71
Xisto	CCOM	Entupiu durante a injeção			

Visto que os tempos obtidos em xisto foram pelo menos 14% superiores ao que foi observado no granito, conclui-se que essa última pedra apresenta menos resistência ao

fluxo de calda. Apesar de todos os corpos de prova terem índices de volume de vazios próximos, esse resultado deve-se ao formato bastante lamelar das britas de xisto, por consequência da morfologia estratificada destas pedras. O granito compensa sua rugosidade superior com o formato mais uniforme de seus grãos.



Figura 25 – Ensaio de injetabilidade da calda CCOM em corpo de prova preenchido com granito.

Ainda que CHLCP tenha sido a única calda a não apresentar problemas de entupimento, ficou evidente que seu desempenho foi bastante inferior às demais, tanto nas injeções feitas em xisto quanto em granito. Este resultado sugere que, relativamente às propriedades de injeção, a adição de superplastificante numa calda de Cal Hidráulica tem resultados superiores à adição de cimento, mesmo que ambos os traços resultem em tempos de fluidez semelhantes.

Comparando as caldas CHL e CCOM, percebe-se que o desempenho de CCOM foi superior ao de CHL quando injetado em xisto, todavia, nas injeções em granito as duas tiveram comportamento bastante similar. Em ambas as caldas foram verificados problemas de entupimento: duas vezes para CHL e uma vez para CCOM. O problema ocorreu em todas as vezes devido à obstrução do orifício inferior do cilindro por algum agregado de menor dimensão, o que ocasionou a interrupção do ensaio para desobstrução do canal e posterior prosseguimento. Estes casos foram considerados como ensaios falhos e tiveram seus resultados ignorados.

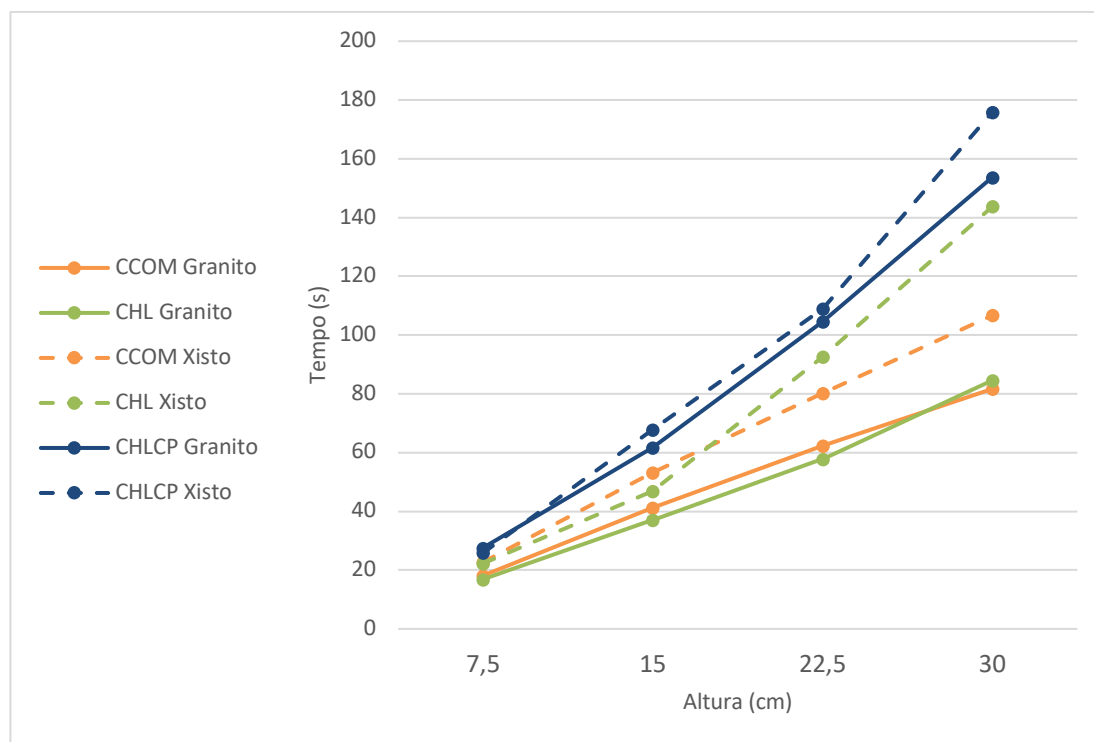


Figura 26 – Tempo médio de enchimento dos corpos de prova preenchidos com pedra.

Todas estas diferenças indicam que apesar de o teste de Cone de Marsh ser bastante simples e difundido, quando interpretado sozinho, não é suficientemente efetivo para indicar o desempenho de uma calda perante a injeção. Existem outros fatores presentes nestes materiais e no ambiente que podem conduzir o sucesso ou fracasso de uma operação de restauro. Em contrapartida, a dificuldade em manter a pressão constante e a segregação de sólidos no fundo da panela também possibilita a ocorrência de erros no teste de injetabilidade.

De modo geral, observou-se que devem ser utilizadas caldas com maiores valores de fluidez para a recuperação de alvenarias de xisto em comparação com paredes similares executadas em granito.

4.3.2. Ensaio em estado endurecido

Nesta seção, estão apresentados os resultados encontrados para os ensaios de flexão, compressão e aderência, bem como as massas específicas de cada calda.

4.3.2.1. Massa específica

Anteriormente ao processo de determinação de resistência mecânica à flexão, onde foram rompidos os corpos de prova prismáticos mencionados na seção 3.4.2, três exemplares de cada calda tiveram suas dimensões e peso mensurados. A partir da divisão das médias dos últimos valores pelos primeiros, foi possível determinar suas massas específicas. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Volumes, pesos e massas específicas médias dos corpos de prova prismáticos.

Calda	Volume (cm ³)	Peso (g)	Massa específica (g/cm ³)
CHL	249,59	396,01	1,59
CHLCP	263,22	405,31	1,54
CCOM	260,52	447,63	1,72

Notou-se que as massas específicas das caldas executadas *in loco* foram bastante semelhantes, apresentando apenas 0,05 g/cm³ de diferença. Por outro lado, CCOM apresentou um valor aproximadamente 10% superior, o que caracteriza um material relativamente mais denso.

4.3.2.2. Resistência mecânica à flexão

As forças médias de ruptura à compressão e os desvios padrão dos ensaios realizados aos 7, 28 e 90 dias estão dispostos na Tabela 14. Percebeu-se que CHLCP foi o material que teve maior aumento de resistência entre os 7 e 28 dias de cura, sendo a média de crescimento próxima a 0,8 MPa enquanto CCOM e CHL tiveram incrementos médios próximos a 0,5 MPa. Por outro lado, o inverso ocorreu no período compreendido entre os 28 e 90 dias: COM e CHL tiveram desenvolvimento de resistência próximos a 1 MPa, aproximadamente o dobro do observado na outra calda.

Tabela 14 – Desvios padrão e valores médios de tensão de ruptura à flexão.

Calda	7 dias		28 dias		90 dias	
	f_{cf} (MPa)	S (MPa)	f_{cf} (MPa)	S (MPa)	f_{cf} (MPa)	S (MPa)
CHL	0,965	0,075	1,510	0,789	2,456	0,543
CHLCP	1,845	0,173	2,635	0,487	3,085	0,937
CCOM	2,959	0,012	3,511	0,416	4,631	0,571

Notas:

f_{cf} – Tensão de ruptura média

S – Desvio padrão amostral

A Figura 27 apresenta as tensões médias de ruptura por flexão aos 7, 28 e 90 dias de cura. Todas as caldas apresentaram queda de crescimento diário no segundo período, porém, o fenômeno foi muito mais evidente na calda CHLCP, que teve incrementos diários médios inferiores a 20% do aferido no primeiro período. No caso das caldas CCOM e CHL, que aparentemente tem mais influência do processo de carbonatação, foram encontrados valores da ordem de 69% e 58%, respectivamente.

Comparativamente com os resultados obtidos por Luso [28] na caracterização de caldas comerciais, observou-se uma similaridade de resultados de CHLCP e CCOM com duas caldas produzidas pela Basf e pela Tecnochem. Por outro lado, Luso obteve resultados bastante superiores para uma terceira calda comercial produzida pela Mapei. O *grout* CHL distanciou-se destas resistências, porém, ainda foi superior à uma quarta calda produzida pela Tradibau [28].

Em relação às caldas à base de cal aérea estudadas por Abrantes [21], onde verificou-se resistência máxima de 0,62 MPa aos 28 dias em materiais com adição de metacaulino, verificou-se grande superioridade das caldas aqui estudadas, o que demonstra o maior potencial da Cal Hidráulica em ganhar resistência.

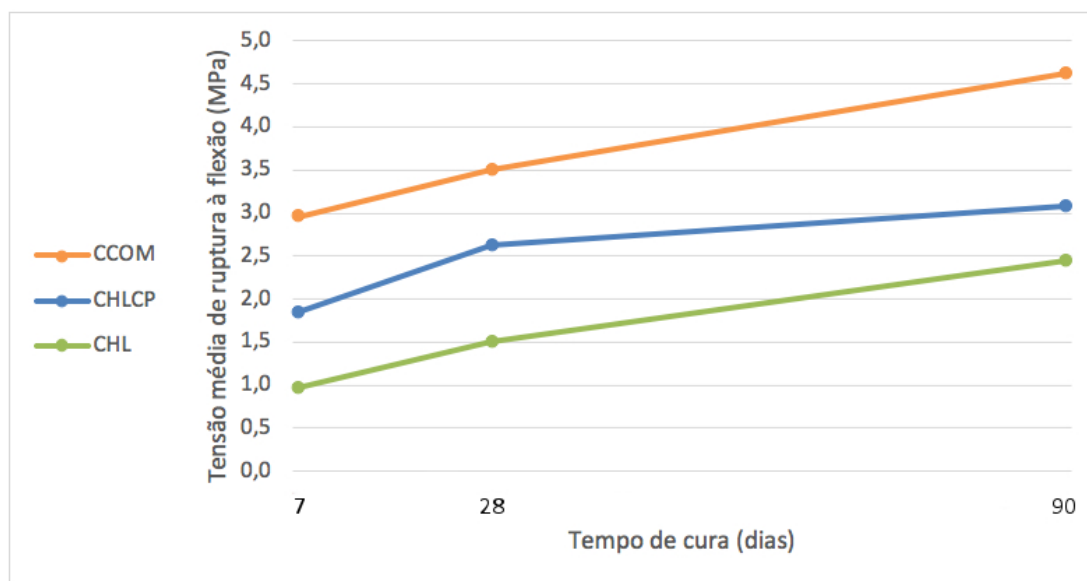


Figura 27 – Tensões médias de ruptura por flexão.

Verificou-se que as rupturas aconteceram todas dentro do terço médio das peças e com fratura bastante vertical, de maneira similar à Figura 28. O ocorrido indica a boa distribuição de tensões em decorrência da homogeneidade do material e o sucesso dos ensaios, visto que o centro da peça concentra os maiores esforços de flexão.

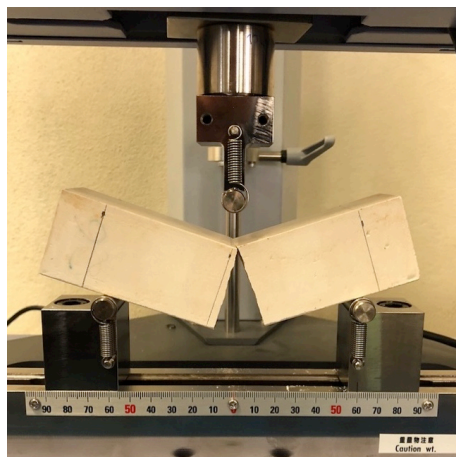


Figura 28 – Rompimento dos corpos de prova quando submetidos à esforços de flexão.

4.3.2.3. Resistência mecânica à compressão

Na Tabela 15 estão dispostas as tensões médias de ruptura à compressão observadas aos 7, 28 e 90 dias. Quanto a esta propriedade, novamente as caldas CHLCP e CCOM apresentaram grande superioridade sobre CHL, obtendo resistências pelo menos 3 vezes maiores aos 7 dias e 2 vezes maiores aos 28 dias. As duas primeiras apresentaram resultados bastante semelhantes, principalmente aos 90 dias, quando a diferença de resistência ficou inferior a 6%, o equivalente a menos de 1 MPa.

Tabela 15 – Desvios padrão e valores médios de tensão de ruptura à compressão.

Calda	7 dias		28 dias		90 dias	
	σ (MPa)	S (MPa)	σ (MPa)	S (MPa)	σ (MPa)	S (MPa)
CHL	2,48	0,18	5,35	0,39	8,40	0,60
CHLCP	7,74	0,28	11,37	0,82	16,11	0,48
CCOM	9,12	0,70	13,19	1,21	17,07	0,57

Em todas as caldas a taxa diária de incremento de resistência à compressão também foi inferior no segundo período de estudo, compreendido entre os 28 e 90 dias de cura. Contudo, na comparação entre os três materiais, observou-se que CHLCP manteve a maior taxa no segundo período: da ordem de 22% acima de CHL e 37% acima de CCOM. Indicando a tendência de aproximação de CCOM e CHLCP em prazos mais longos. Estes resultados estão apresentados na Figura 29.

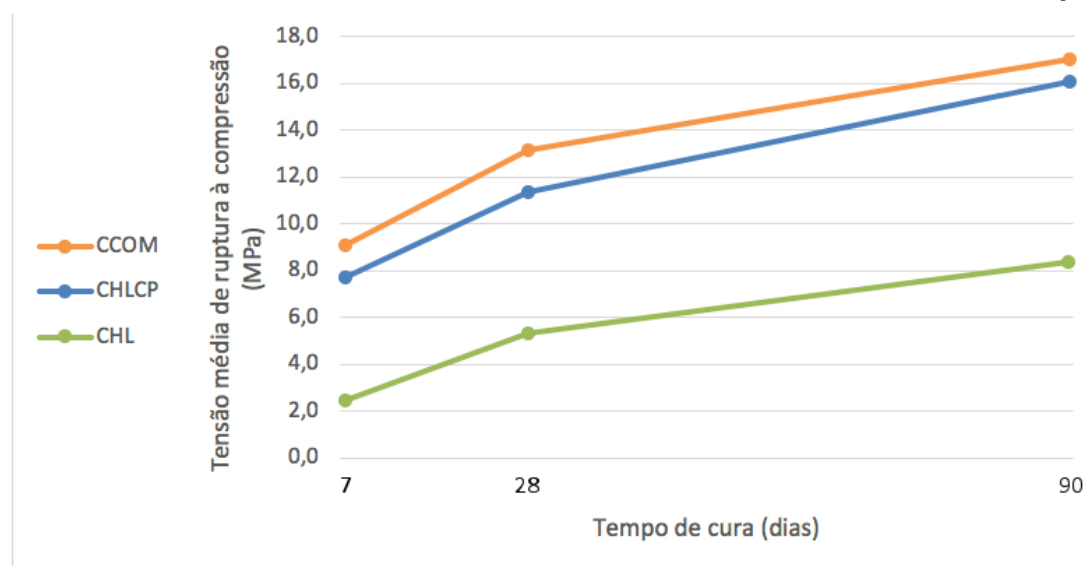


Figura 29 – Tensões médias de ruptura por compressão.

Este fenômeno é ambíguo, dado que era esperado que as caldas com maior ocorrência de carbonatação, especificamente CHL e possivelmente CCOM, apresentassem maiores incrementos após os 28 dias, como foi observado nos testes de resistência à flexão.

Comparando os resultados de CCOM obtidos com a sua ficha técnica fornecida pelo fabricante, que previa resistências superiores a 7 MPa e 15 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, percebe-se que o produto foi melhor do que o esperado no menor prazo, porém, teve resultados inferiores no maior.

Kalagri et al. [2] ensaiou uma formulação de calda similar à CHL, porém utilizando Cal Hidráulica natural do tipo NHL5 e relação água/aglomerante de 0,8. Foram observadas resistências de 2,8 MPa aos 28 dias, aproximadamente 50% do que foi encontrado neste trabalho. Por outro lado, Valluzzi [52], que utilizou Cal Hidráulica HL5 e 1/4 do superplastificante empregado em CHL encontrou 5,1 MPa no mesmo prazo, ou seja, quase a mesma resistência de CHL. Portanto, justificam-se os resultados inferiores do primeiro autor com o incremento de água ou então pela taxa superior com que HL5 adquire resistência.

Em comparação com a cal aérea nota-se mais diferença: Abrantes [21] encontrou valores máximos de 0,87 MPa em caldas compostas por este aglomerante e metacaulino. Desempenho bastante inferior até em comparação com CHL, o que demonstra a maior capacidade da Cal Hidráulica adquirir resistências significativas.

A forma de ruptura da maioria dos corpos de prova se aproximou do formato cônico, porém, apresentando algum grau de cisalhamento, como é mostrado na Figura 30. Este padrão indica que os materiais foram bem homogeneizados no processo de mistura e que se mantiveram estáveis durante o tempo de cura. Como consequência, distribuíram satisfatoriamente bem as tensões às quais foram submetidos.

Analisa-se ainda que todas as caldas respeitaram o limite máximo proposto por Tavares et al. [4] de apresentar um máximo de resistência à compressão de 60% do que é observado nas pedras constituintes da estrutura. Visto que o granito amarelo e o xisto apresentam resistências de aproximadamente 35 e 90 MPa, respectivamente, entende-se que o limite máximo das caldas é de 18 MPa, valor que não foi observado em nenhum *grout*.

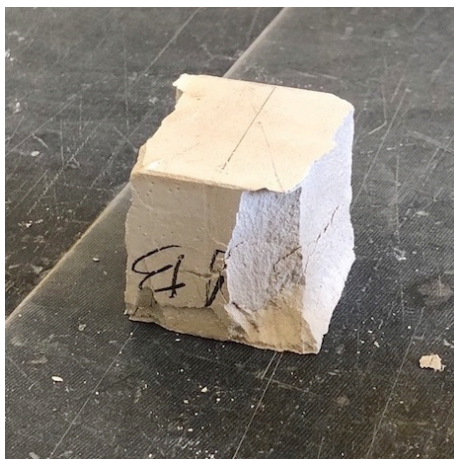


Figura 30 – Corpo de prova rompido por compressão uniaxial.

Em suma, verificou-se a superioridade das caldas CCOM e CHLCP sobre CHL. Conjuntamente, foi observada a tendência de melhora desses atributos no longo prazo, isto é, após os primeiros 28 dias de cura.

Esse comportamento é bastante típico de aglomerantes aéreos, como é o caso da cal hidratada, diferentemente do que ocorre com aglomerantes hidráulicos, como o cimento. Apesar de a Cal Hidráulica, aglomerante base de todas as caldas, solidificar-se primariamente por hidratação, sabe-se que o fenômeno de carbonatação também ocorre, sendo esse mais lento, porém também mais duradouro.

4.3.2.4. Aderência ao suporte pétreo

Dada a ausência de normativas que regulamentem este tipo de ensaio para caldas de injeção, foram vivenciados alguns problemas relacionados com a sua realização: um deles foi a escolha da cola a ser utilizada para fixação da pastilha na calda.

Inicialmente, foi utilizada a cola Sikadur 32EF, que se trata de um adesivo bicomponente, à base de resinas epóxi e indicado para união de elementos de concreto, pedra e metais. Segundo seu catálogo, apresenta resistência à tração de pelo menos 3 MPa após três dias de cura entre superfícies metálicas e concreto. No entanto, estas características não foram observadas na aderência entre as caldas e a pastilha. O rompimento desta interface foi obtido com cargas inferiores a 0,1 MPa em grande parte das amostras.

Realizou-se a substituição dessa cola pelo produto PL600, fabricado pela Pattex, o qual também é indicado para união de metais com peças porosas e fornece resistência de 6 MPa após 24 horas de secagem. Foi possível conduzir os ensaios de sete dias com este produto, entretanto foi verificado que havia deformação excessiva do material durante a tração.

Posteriormente, foram realizados diversos testes de cola até que o produto Araldite Rapid fosse selecionado para a continuação dos ensaios. Este material, assim como o primeiro, também é composto por resinas epóxis, porém, sem qualquer tipo de material granular, como foi encontrado em um dos componentes do Sikadur 32EF. Ainda, apresentou resistência à tração suficiente na maioria dos casos e deformações bastante inferiores ao produto da Pattex.

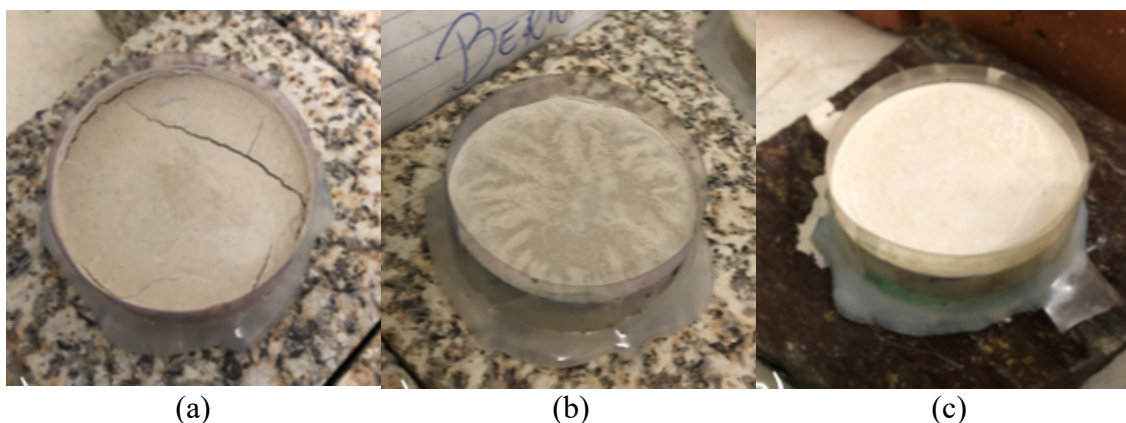


Figura 31 – Corpos de prova após 7 dias de cura: (a) calda CHL; (b) calda CHLCP; (c) calda CCOM.

Como ilustra a Figura 31, logo nos primeiros dias de cura já se notava a presença de fissuras nos corpos de prova compostos pela calda CHL. Conforme já foi mencionado, o estado do material comprometeu o procedimento de regularização das superfícies, visto que se desintegrava com o esforço aplicado em sua superfície. Em contrapartida, as caldas CHLCP e CCOM apresentavam apenas algumas manchas esbranquiçadas em suas superfícies, porém, ainda sem fissurações.

Aos 28 dias de cura a calda CHLCP também passou a apresentar fissuras, todavia, em intensidade bem inferior ao que apresentava CHL, que nesta altura já estava bastante comprometida. Aos 90 dias a situação permaneceu a mesma, sendo que calda CCOM ainda não apresentava nenhuma anomalia deste tipo.

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios encontrados para resistência à tração nas 18 situações estudadas: a combinação dos dois suportes pétreos com três caldas e em três prazos diferentes. Em conjunto, estão os desvios padrão e o número de amostras.

Tabela 16 – Desvios padrão, números de amostra e valores médios de tensão de ruptura à tração.

Suporte	Calda	7 dias			28 dias			90 dias		
		σ (MPa)	S (MPa)	n	σ (MPa)	S (MPa)	n	σ (MPa)	S (MPa)	n
Granito Xisto	CHL	0,164	0,079	5	0,110	0,018	2	0,101	0,029	5
		0,069	0,031	2	0,098	0,026	4	0,106	0,096	6
Granito Xisto	CHLCP	0,355	0,066	6	0,317	0,076	5	0,500	0,211	6
		0,152	0,015	5	0,144	0,069	2	0,406	0,103	6
Granito Xisto	CCOM	0,378	0,212	5	0,515	0,235	6	0,660	0,297	6
		0,253	0,128	5	0,284	0,087	6	0,353	0,063	6

Notas:

σ – Tensão de ruptura média

S – Desvio padrão amostral

n – Número de amostras

Mesmo que tenham sido confeccionados corpos de prova reserva, prevendo a possibilidade de ocorrerem problemas executivos ou de outra natureza, devido ao grande número de amostras perdidas nos rompimentos na interface cola/calda ou cola/pastilha, algumas situações tiveram número de amostras reduzidas. Como consequência, a confiabilidade do ensaio foi prejudicada.

Posto isto, pôde-se analisar que a aderência dos corpos de prova executados em xisto apresentou-se sempre inferior àqueles executados em granito, o que se deve a duas

causas principais: a natureza estratificada inerente a este tipo de pedra e a sua menor rugosidade, que prejudica o processo de aderência mecânica.

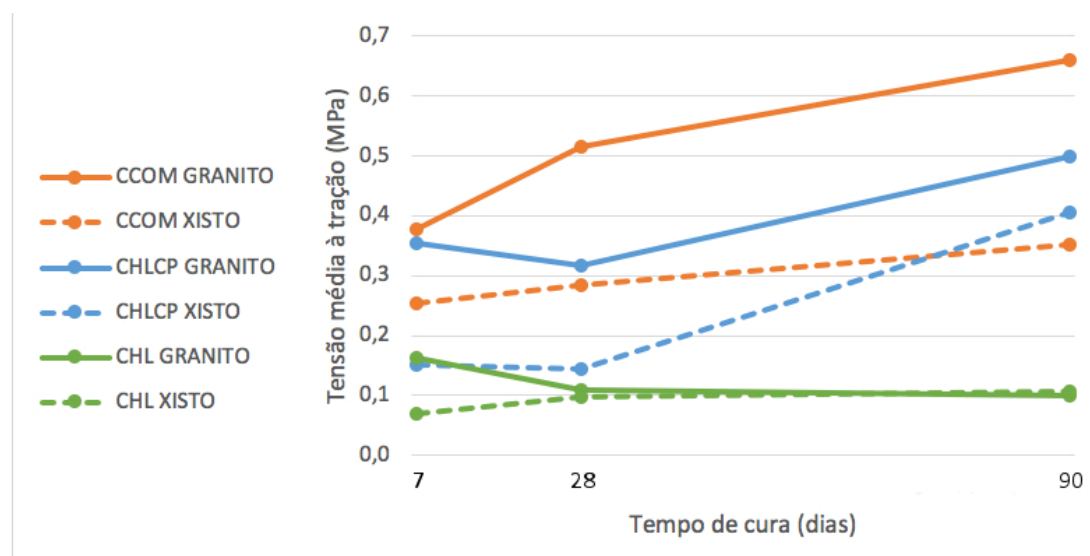


Figura 32 – Tensões médias de ruptura por tração.

Observando a Figura 32, que apresenta em forma gráfica os resultados obtidos, percebe-se que as curvas nomeadas CHLCP Granito e CHL Granito apresentaram comportamento incomum: nestas duas, houve queda de resistência entre os 7 e 28 dias de cura, o que é contra intuitivo visto que todas as outras propriedades observadas apresentaram tendência de crescimento. Na segunda curva citada ainda houve ligeira queda no período compreendido entre os 28 e 90 dias.

Não pode-se estabelecer com certeza a causa deste comportamento curioso, porém, pressupõe-se três hipóteses: algum tipo de inibição de aderência em decorrência de variações de temperatura e umidade que foram capazes de adentrar a câmara úmida; a reação química de algum dos constituintes das caldas com a superfície do granito ou então, o baixo número amostral que não pode mitigar as heterogeneidades apresentadas pelas caldas.

Por conseguinte, verificou-se que de maneira geral a calda CCOM apresentou novamente os melhores resultados em comparação com as demais, no entanto, as tensões de ruptura observadas em CHLCP também foram muito satisfatórias. Comparando a média de resultados aos 90 dias, esta calda teve desempenho apenas 10% inferior à calda comercial.

Já a calda CHL apresentou os piores resultados para ruptura por tração, principalmente nos prazos de 28 e 90 dias. Aparentemente este material tem sua aderência limitada em valores da ordem de 0,1 MPa, visto que nos três tempos ensaio as resistências se aproximaram deste valor.

Em comparação com os resultados obtidos por Luso [28], observa-se que as aderências das caldas CHLCP e CCOM foram bastante satisfatórias, superando os resultados apresentados pelas caldas comerciais em boa parte dos ensaios. O melhor resultado obtido em granito pela autora em ensaio semelhante foi de 0,23 MPa e 0,67 MPa para 28 e 90 dias, respectivamente, em uma calda comercial produzida pela Mapei. Resistência bastante inferior ao que foi encontrado para CCOM aos 28 dias e similar aos 90 dias. A superioridade de CHLCP também foi verificada aos 28 dias, porém, não ocorreu o mesmo aos 90.

4.3.2.4.1. Avaliação das superfícies de ruptura

Houve um grande número de amostras em que ocorreu a ruptura nas interfaces entre pastilha e cola ou cola e calda durante os ensaios no tempo de cura de sete dias. Como é referido na seção 3.4.4.3.1, este comportamento caracteriza uma falha do ensaio dado que indica apenas que a resistência da calda foi superior à da cola. Sendo assim, estes resultados foram descartados.

Nos testes realizados com a calda CCOM (Figura 33a) e CHLCP (Figura 33b) em xisto, observou-se o destacamento de algumas frações dos estratos superficiais da pedra, o que de certa forma caracteriza uma falha mista entre a pedra e a aderência da calda. No caso do granito, o fenômeno ainda foi visível, porém em intensidade bastante inferior, o que se deve à ausência de estratos neste tipo de pedra. Em alguns ensaios com a calda CHL (Figura 33c) houve o desprendimento de pequenas frações de calda que ficaram aderidas à superfície da pedra, porém, isto associa-se à alta fissuração de material e não à aderência. Devido aos baixos valores desta propriedade, pouca ou nenhuma fração de pedra ficou aderida na calda.

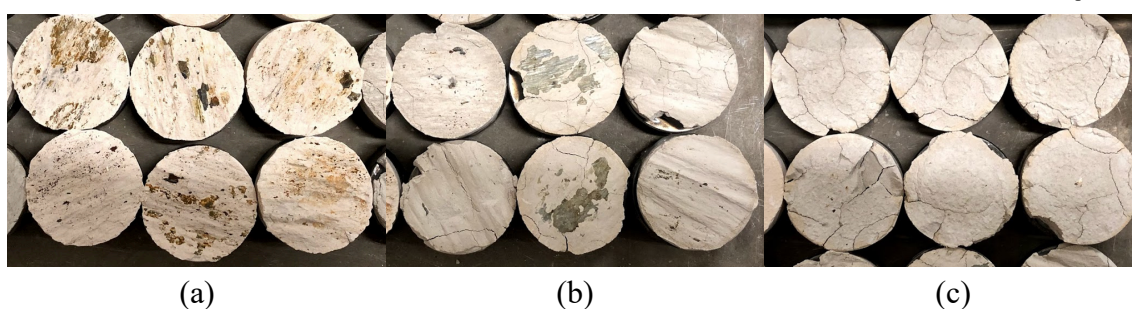


Figura 33 – Superfícies de ruptura com tempo de cura de 90 dias: (a) calda CCOM; (b) calda CHLCP; (c) calda CHL.

A ausência de fraturas ocorrendo na região da pedra pode ser explicada pela sua maior seção transversal quando comparada com a calda. Esta situação propicia a transferência de esforços para uma maior área do substrato, atenuando a tensão aplicada. Em trabalhos futuros, recomenda-se a equalização destas áreas com a realização de um corte circular, possivelmente realizado com uma “serra copo”, de profundidade padronizada e de diâmetro compatível com a calda e a pastilha.

Já a ruptura da calda não foi observada em nenhum ensaio, o que caracteriza que a resistência à tração do material é bastante superior à força de aderência entre as duas superfícies.

4.3.3. Caracterização dos cilindros injetados

4.3.3.1. Dimensões, massa e massa específica

Após 28 dias de cura os cilindros injetados foram pesados e tiveram suas alturas e diâmetros determinados com o auxílio de um paquímetro digital. Foi observado que houve variação de quase 1 centímetro na altura dos corpos de prova, o que é fruto do processo de retífica de suas superfícies para execução do teste de compressão uniaxial. Por fim, as massas foram divididas pelos volumes a fim de determinar as massas específicas.

Tabela 17 – Características físicas dos corpos de prova cilíndricos compostos por pedra e calda.

Agregado	Calda	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (l)	Massa (Kg)	Massa volumétrica (Kg/m ³)
Granito	CHL	143,68	297,07	4,82	10,21	2120,39
		143,95	292,98	4,77	10,15	2129,06
Xisto		142,22	297,01	4,72	10,00	2120,36
143,48		290,50	4,70	10,13	2157,02	
Granito	CHLCP	143,77	298,85	4,85	10,45	2154,74
		143,52	296,82	4,80	10,46	2177,35
Xisto		143,59	289,68	4,69	10,35	2206,57
143,22		293,27	4,72	10,46	2213,65	
Granito	CCOM	143,27	293,27	4,73	10,35	2189,30
		143,43	295,18	4,77	10,51	2204,65
Xisto		143,65	296,29	4,80	10,63	2212,99
143,43		291,82	4,72	10,52	2230,55	

Através das relações entre o volume dos cilindros e a massa unitária em condição saturado superfície seca foi possível estimar a massa de pedra que estava presente no cilindro antes da injeção. Deduzindo este valor da massa total do cilindro, foi obtido o volume de calda injetada durante o procedimento. Por fim, dividiu-se o volume injetado pelo volume total do cilindro para obter o volume relativo de calda injetada. As médias dos resultados encontrados estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores médios encontrados na análise dos corpos de prova injetados.

Agregado	Calda	Massa de pedra (kg)	Massa de calda (kg)	Volume total do corpo de prova (l)	Volume de vazios (l)	Volume calda injetada (l)	Porcentagem de calda injetada
Granito	CHL	6,36	3,82	4,79	2,41	2,41	50,25%
Xisto		6,22	3,85	4,71	2,46	2,42	51,48%
Granito	CHLCP	6,41	4,05	4,83	2,43	2,63	54,46%
Xisto		6,22	4,18	4,71	2,46	2,72	57,68%
Granito	CCOM	6,30	4,13	4,75	2,39	2,40	50,61%
Xisto		6,29	4,28	4,76	2,49	2,49	52,38%

Observou-se que o preenchimento dos cilindros compostos por xisto, naturalmente bastante lamelar, foi sempre superior àqueles compostos por granito, ainda que esta pedra apresentasse formato mais regular. Conclui-se que este comportamento se deve à menor rugosidade apresentada por esta pedra, que oferece menor resistência ao fluxo de calda. Constatou-se também que os valores encontrados para as caldas CHL e CCOM foram bastante semelhantes, apresentando leve vantagem para a última.

Ainda que CHLCP tenha obtido os piores tempos no processo de injeção, verificou-se que teoricamente esta foi a que teve melhor preenchimento de calda em seus vazios. Por outro lado, foi observado que este resultado é anormal já que supera os valores esperados para porcentagem de vazios, nomeadamente 50,3% para o granito e 52,3% para o xisto. O mesmo tipo de resultado ocorreu nos resultados obtidos em CCOM, porém, com menor intensidade.

Embora o item 4.3.3.4 tenha mostrado que o preenchimento das caldas CHLCP e CCOM foram realmente muito satisfatórios, pode-se atribuir às ambiguidades verificadas a quatro possíveis causas: a deficiência de energia de compactação aplicada na confecção dos cilindros; a evaporação de água que hipoteticamente deveria estar ocupando todos os vazios permeáveis, caracterizando um erro ambiental; a propagação dos erros instrumentais inerentes a todo o processo experimental ou então à dificuldade em rasar a superfície superior dos cilindros de forma eficiente para obter o encaixe da tampa.

Considera-se que todos os fatores interferiram no processo, com mais intensidade do último citado, como agravante, cita-se o baixo número de amostras, de apenas duas por situação, que certamente contribuem com o aumento do erro total. Por outro lado, as inspeções visuais realizadas no interior dos corpos de prova confirmam que estes resultados fornecem uma boa aproximação da realidade, corroborando a validade do ensaio.

4.3.3.2. Resistência mecânica à compressão

Estão dispostos na Tabela 19 as forças e tensões médias de ruptura por compressão dos corpos de prova compostos pelas duas pedras e três caldas estudadas.

Tabela 19 – Tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão uniaxial.

Agregado	Calda	F (kN)	f_c (MPa)
Granito	CHL	37,78	2,3
Xisto		38,41	2,4
Granito	CHLCP	132,53	8,2
Xisto		120,50	7,4
Granito	CCOM	147,60	9,2
Xisto		147,97	9,2

Notas:

F – Força obtida na ruptura ao carregamento uniaxial

f_c – Tensão de ruptura à compressão uniaxial aproximada para o 0,1 MPa mais próximo.

Neste teste, notou-se pouca influência das pedras sobre os resultados encontrados: na comparação entre os cilindros confeccionados com xisto e granito. Houve menos de 2% de variação nas caldas CHL e CCOM. No caso de CHLCP, notou-se uma interessante vantagem de 10% no cilindro preenchido por granito, apesar de a literatura específica indicar que normalmente este tipo de pedra apresenta menor resistência à compressão quando analisada individualmente [49, 51].

O resultado pode ser justificado pela maior rugosidade superficial e pela menor resistência à injeção, causada pelos grãos mais arredondados desta pedra. Quanto a calda CHLCP, apesar de ter tido os resultados mais pobres no teste de injetabilidade, observa-se que suas características à compressão foram bastante razoáveis, apresentando mais de 80% da resistência suprida por CCOM.

Conforme exposto na Figura 36, a calda CHL, que apresentou bons resultados de injetabilidade, principalmente para os cilindros preenchidos por granito, mostrou-se menos robusta nos testes de compressão. Verificou-se que esta calda apresenta resistência a este esforço de aproximadamente 1/3 do que é observado nos outros corpos de prova. Pode-se atribuir este resultado à menor resistência à compressão deste material, já observada no item 4.3.2.3, aliada às falhas de preenchimento, referidas em 4.3.1.3.

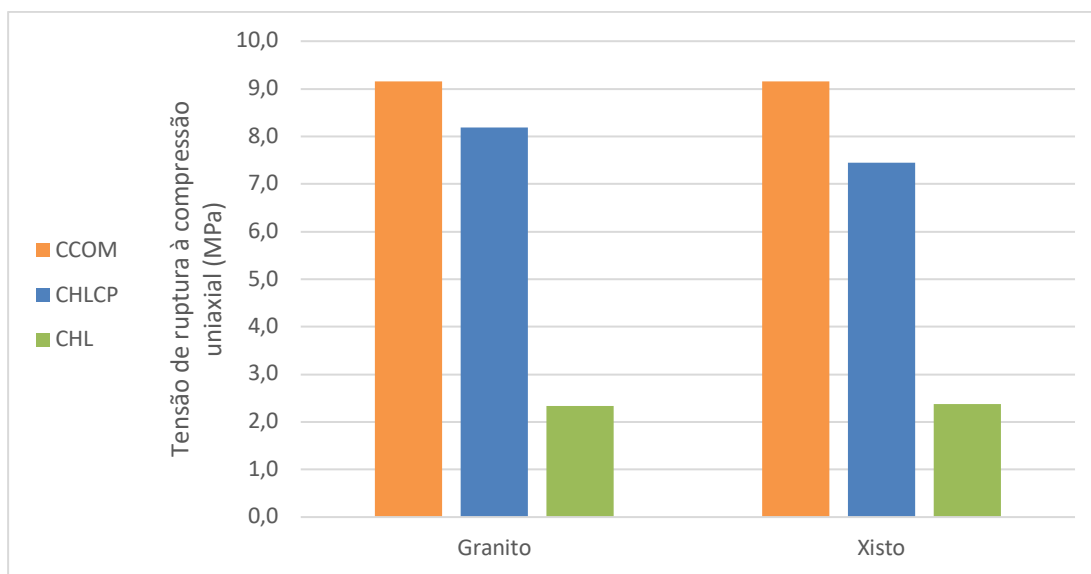


Figura 34 – Tensões médias de ruptura por compressão uniaxial.

Em comparação com os resultados encontrados por Luso [28] no estudo de outras caldas comerciais, verificou-se que alguns resultados apresentados foram bastante inferiores. A autora constatou a ocorrência de valores de resistência próximos de 15 e 22 MPa em duas caldas comerciais quando empregadas em corpos de prova de xisto e granito amarelo, respectivamente. Em comparação com a calda CCOM, isso representa quase 140% de superioridade no caso da primeira pedra e 63% no caso da segunda. Uma terceira calda comercial, apresentou valores bastante próximos ao encontrado na calda CHLCP. Contudo, corroborou-se que uma tendência de os corpos de prova compostos por granito terem resistências superiores.

Observa-se que todos os modos de ruptura foram do tipo “colunar”, com a lateral do cilindro apresentando fendas no sentido vertical e posterior destacamento com o acréscimo de carga (Figura 35). Este efeito é um indicativo da má distribuição de cargas no corpo de prova, causada pelas heterogeneidades inerentes ao processo de injeção.



Figura 35 – Fendas verticais e destacamentos observados nas faces dos corpos de prova.

4.3.3.3. Resistência mecânica à tração

Na Tabela 20 estão dispostas as dimensões físicas e os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral dos corpos de prova compostos por pedra e calda. A fim de proporcionar uma melhor visualização dos dados, os valores de tensão também estão dispostos na Figura 36.

Analisando as caldas CCOM e CHLCP, foi observado que a resistência à tração dos corpos de prova confeccionados por xisto foi aproximadamente 30% superior àqueles confeccionados com granito, apesar desta pedra ter rugosidade mais elevada. Este fato pode ser explicado observando o plano de corte dos corpos de prova, que percorreu o interior dos agregados e não as interfaces de calda e pedra. Sendo assim, a aderência inferior ao granito não foi o fator determinante da falha, mas sim a menor resistência à tração característica dessa pedra.

Tabela 20 – Tensões médias de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão diametral.

Agregado	Calda	F (kN)	$f_{t,D}$ (MPa)
Granito	CHL	27,35	0,4
Xisto		28,54	0,45
Granito	CHLCP	66,14	1
Xisto		83,56	1,25
Granito	CCOM	64,84	0,95
Xisto		86,56	1,3

Notas:

F – Força obtida na ruptura ao carregamento diametral

$f_{t,D}$ – Tensão de ruptura à compressão diametral aproximada para o 0,05MPa mais próximo

Em contrapartida, os valores foram mais próximos nos resultados obtidos na calda CHL. Neste caso, os planos de corte percorreram maioritariamente as interfaces entre a calda e a pedra, expandindo os efeitos positivos causados pela alta porosidade da superfície do granito e mitigando as consequências de suas características mecânicas inferiores.

Em suma, fica evidente que as caldas CCOM e CHLCP tiveram resultados bastante parecidos e superiores à calda CHL, tendo superado em mais de duas vezes a resistência desta em qualquer cenário.

Em comparação com o encontrado por Luso [28], verificou-se similaridade de resultados de duas caldas comerciais, produzidas pela Mapei e pela Basf, quando ensaiadas em corpos de prova com xisto. Estes materiais apresentaram resistências próximas aos 1,5 MPa, valores levemente superiores aos 1,3 e 1,25 MPa observados em CCOM e CHLCP, respectivamente. Por outro lado, a autora verificou melhores propriedades mecânicas nos corpos de prova compostos por xisto, que superaram os 2 MPa nas duas caldas mencionadas, aproximadamente o dobro do que foi verificado neste estudo.

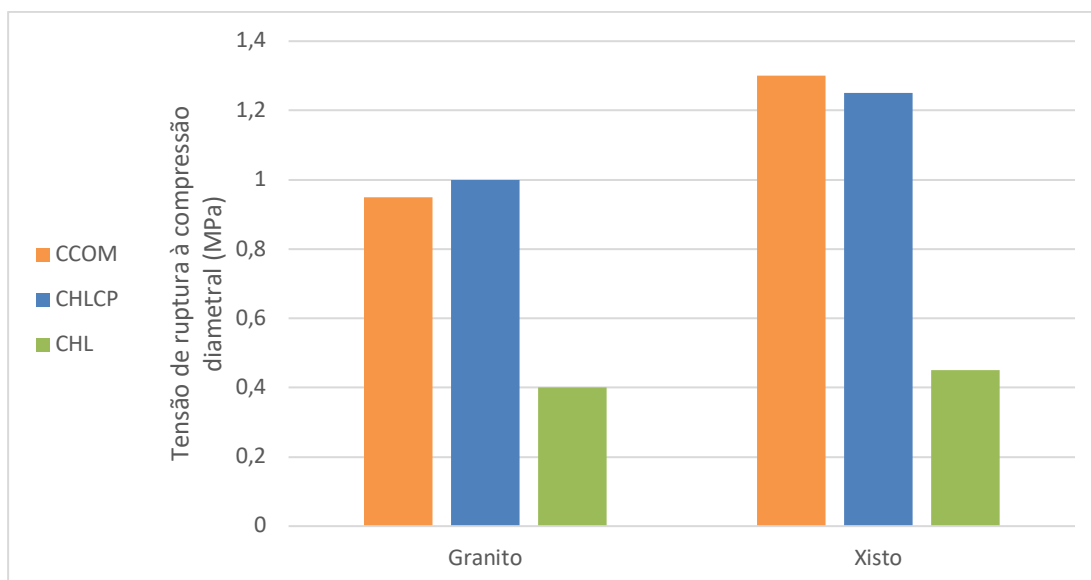


Figura 36 – Tensões médias de ruptura por compressão diametral.

4.3.3.4. Inspeção visual dos planos de ruptura

Observou-se que na maioria dos corpos de prova houve preenchimento satisfatório dos espaços vazios. A única exceção foi o cilindro constituído por xisto e CHL (Figura 39c), onde foram observadas diversas cavidades com dimensões da ordem de um centímetro (Figura 37a) e algumas poucas se aproximando de 1,5 centímetro (Figura 37b). Também foi analisado que neste mesmo corpo de prova os agregados permaneceram inteiros, indicando que a resistência à tração da pedra foi superior à da interface entre a mesma e a calda.

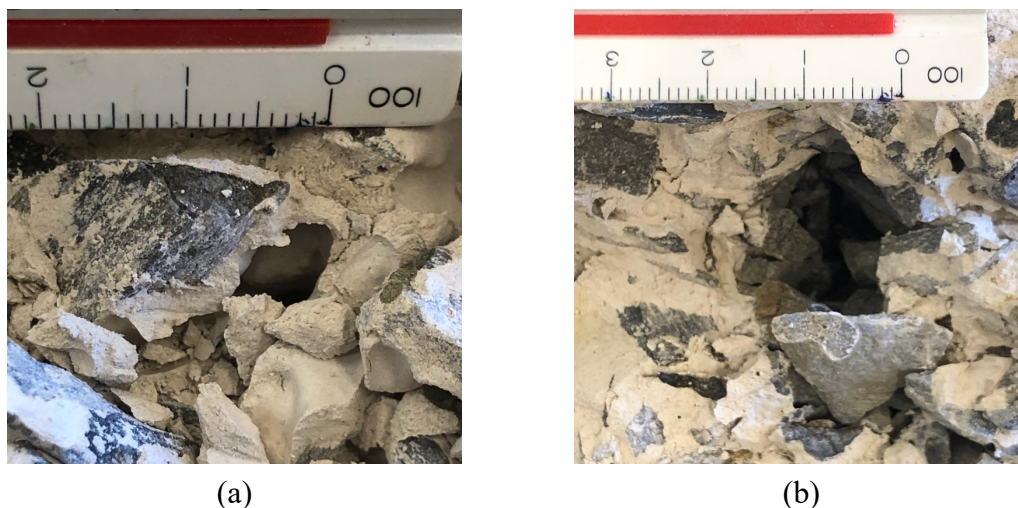


Figura 37 – Falhas de preenchimento nos corpos de prova constituídos por CHL: (a) falhas frequentes de menor dimensão; (b) falhas excepcionais de maior dimensão.

Apesar do bom preenchimento do corpo de prova constituído por granito e CHL (Figura 38c), foi observado que apenas alguns poucos agregados sofreram fratura. Isto indica que a aderência entre a calda e a pedra não superaram a resistência à tração do granito, mesmo esta sendo notadamente baixa.

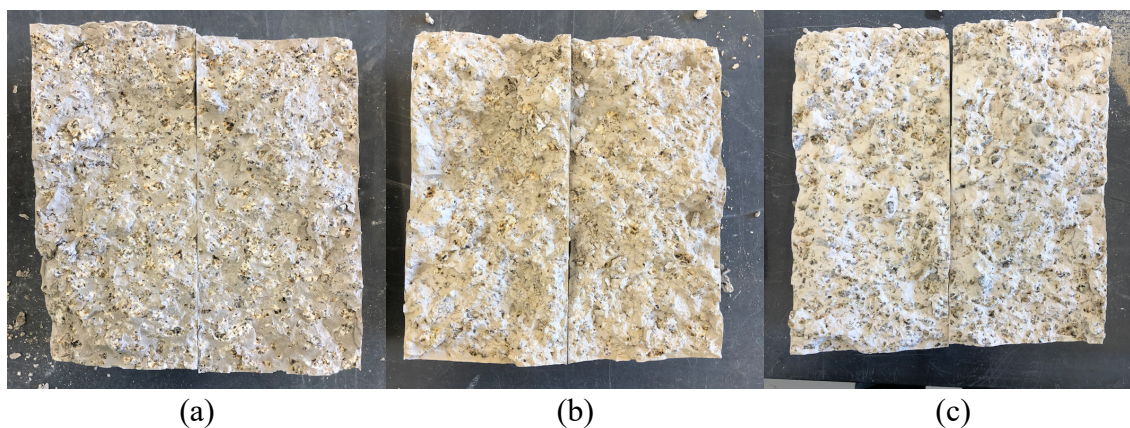


Figura 38 – Interior dos cilindros: (a) composto por granito e CCOM; (b) composto por granito e CHLCP e (c) composto por granito e CHL.

Os outros quatro corpos de prova, compostos por xisto (Figura 39a e Figura 39b) e granito (Figura 38a e Figura 38b) combinados com CCOM e CHLCP, apresentaram a maior parte da fratura ocorrendo através dos agregados. Este fenômeno ocorreu mais intensamente com a calda CCOM e com o agregado granito. Portanto comprovou-se que

as resistências à tração são superiores na calda CCOM e na pedra xisto quando comparados com CHLCP e granito.

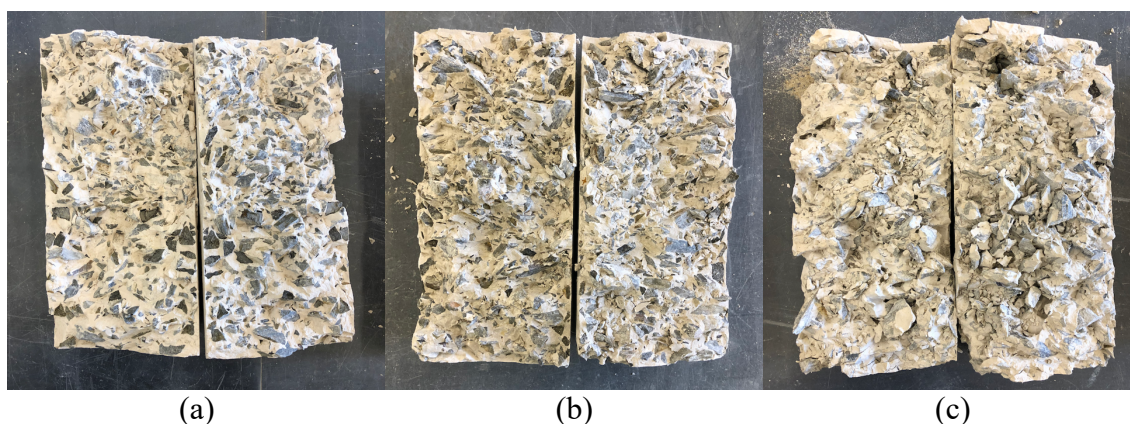


Figura 39 – Interior dos cilindros: (a) composto por xisto e CCOM; (b) composto por xisto e CHLCP e (c) composto por xisto e CHL.

4.4. Análise financeira

Segundo a Carta de Cracóvia, deve-se prestar uma particular atenção à otimização dos custos envolvidos em obras de restauro, visto que a conservação do patrimônio cultural deve constituir uma parte integrante dos processo de planejamento econômico e da gestão das comunidades [15]. Posto isto, faz-se necessário realizar uma análise financeira dos custos de cada calda em função do preço dos constituintes e suas composições.

Para realização deste estudo, entrou-se em contato com as empresas: Secil, Fassa Bortolo e Mapei, fabricantes dos materiais utilizados neste trabalho, a fim de descobrir o custo da comercialização destes materiais bem como os eventuais descontos praticados na compra de grandes quantidades. Para simplificação do processo, os custos relacionados com a mão de obra, o transporte de materiais e os impostos foram desconsiderados nesta análise.

4.4.1. Pesquisa de preços

4.4.1.1. Cal Hidráulica e Cimento Branco

A Secil, fabricante do cimento branco e da Cal Hidráulica HL 5 utilizados neste estudo, proporciona que a compra de seus produtos possa ser feita a partir de suas fábricas,

localizadas em Leiria, ou em 21 pontos de abastecimento espalhados pelo país, cujo mais próximo de Bragança está localizado em Vila Real.

O cimento branco pode ser adquirido em paletes contendo 64 sacos de 25 kg nas duas localidades anteriormente citadas, já a Cal Hidráulica pode ser obtida em paletes de 45 sacos de 25 kg ou então, caso seja comprado diretamente da fábrica, pode ser adquirido a granel em quantidades superiores à uma tonelada. Dada a popularidade destes dois aglomerantes na construção civil, também há a possibilidade de realizar a compra de pequenas quantidades em lojas comuns de materiais de construção, porém, com custos mais elevados. Os preços fornecidos pelo fabricante em dezembro de 2018 estão dispostos na Tabela 21.

Tabela 21 – Custos associados à compra dos produtos fabricados pela Secil.

Produto	Local	Preço	Quantidade a ser comprada (kg)	Embalagem	Preço/kg
Cal Hidráulica HL 5	Fábrica (Leiria)	64,00 €	1000	A granel	0,0640 €
	Ponto de distribuição (Vila Real)	94,50 €	1125	Sacos de 25 kg	0,0840 €
		109,35 €	1125	Sacos de 25 kg	0,0972 €
Cimento Branco CEMII/B-L 32,5R	Fábrica (Leiria)	247,68 €	1600	Sacos de 25 kg	0,1548 €
	Ponto de distribuição (Vila Real)	252,16 €	1600	Sacos de 25 kg	0,1576 €

Percebe-se que há uma redução de custos de 34% quando a Cal Hidráulica é comprada do fabricante em Leiria e não do entreposto de Vila Real. Parece mais razoável considerar a compra a partir da fábrica, apesar do incremento de cerca de 260 km no frete. Já no caso do cimento, verifica-se o contrário, a pequena diferença de preço, da ordem de 2%, faz com que a melhor opção seja adquiri-lo diretamente do entreposto.

4.4.1.2. Mapei Dynamon SR1

A pesquisa de preços do superplastificante produzido pela Mapei foi feita através do contato com um de seus representantes comerciais. Segundo o mesmo, o produto Dynamon SR1, utilizado na composição das caldas CHL e CHLCP, neste momento não se encontra em produção no mercado português. Entretanto, em caso de grandes encomendas ou demanda de mercado o produto pode voltar a ser produzido.

De acordo com a Mapei, atualmente o produto Dynamon SX35 é o que apresenta maiores similaridades com o aditivo usado neste trabalho, não apenas em suas propriedades físico-químicas, mas também no seu custo. Assim como o Dynamon SR1, trata-se uma solução aquosa à base de polímeros acrílicos destinados a servir como aditivo plastificante para concretos. Desta forma, dada a impossibilidade de obter valores mais precisos, foram considerados os custos referentes a este produto.

Existem apenas duas possibilidades de compra deste tipo de aditivo da Mapei: em galões de 25 quilogramas pelo valor integral ou com descontos de 33% para compras acima de 50 mil quilogramas. Essa quantidade seria suficiente para produzir mais de 4 mil metros cúbicos da calda CHLCL, claramente um volume bastante grande para aplicação em obras de restauro. À vista disso, optou-se por utilizar nos cálculos o valor referente à compra de pequenas quantidades, isto é, sem o abatimento aplicado. As condições de compra e os valores comunicados pela empresa encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 – Custos associados à compra do produto Mapei Dynamon SX35.

Condições de compra	Preço	Quantidade a ser comprada (kg)	Embalagem	Preço/kg
Recipiente unitário	33,75 €	25	Recipiente com 25 kg	1,3500 €
Consumo mínimo anual de 50 mil quilogramas	45 000,00 €	50000	Recipiente com 1080 kg	0,9000 €

4.4.1.3. Fassa Bortolo Legante per Iniezioni 790

Após contato telefônico com um representante comercial da fabricante, foi informado que o produto Legante per Iniezioni 790 pode ser comercializado de duas maneiras: em sacos individuais de 25 kg sem nenhum tipo de desconto ou então com 35% de desconto na compra de quantidades iguais ou superiores a quatro paletes de 60 sacos. Apesar de ser uma quantidade bastante grande, suficiente para a produção de 4,5 metros cúbicos de calda CCOM, adotou-se o valor com desconto na análise financeira. Os valores e condições de compra estão dispostos na Tabela 23.

Tabela 23 – Custos associados à compra do produto Fassa Bortolo Legante per Iniezioni 790.

Condições de compra	Preço	Quantidade a ser comprada (kg)	Embalagem	Preço/kg
Saco unitário	11,00 €	25	sacos de 25 kg	0,4400 €
Mínimo de 180 sacos	1 716,00 €	6000	sacos de 25 kg	0,2860 €

4.4.2. Análise do rendimento e custos totais

Comparando os traços projetados em 3.1 com os rendimentos observados em laboratório, foi possível determinar as quantidades necessárias de cada componente para a obtenção de um metro cúbico de cada calda (Tabela 24). Em seguida estes valores foram multiplicados pelos preços de cada material encontrados nas seções anteriores. Sendo assim, foi possível determinar o custo total de produção (Tabela 25).

Tabela 24 – Rendimento e massas para composição de 1 metro cúbico das três caldas estudadas.

Calda	Massa por material (kg)					Rendimento (l/kg)*
	Legante per Iniezioni 790	Cimento Portland Branco	Cal Hidráulica HL5	Dynamon SR1	Água	
CHL	-	-	1165,9	11,7	583,0	0,858
CHLCP	-	397,1	926,5	4,0	661,8	0,756
CCOM	1333,3	-	-	-	493,3	0,750

Notas:

* – Volume em litros produzido por quilograma de material sólido.

Observou-se que o rendimento das caldas CHLCP e CCOM foram muito similares: aproximadamente 12% inferior ao que foi constatado na calda CHL. Este resultado pode ser atribuído ao maior consumo de água nas reações de hidratação do cimento em comparação com a Cal Hidráulica.

Tabela 25 – Custos totais para composição de 1 metro cúbico das três caldas estudadas.

Calda	Composição por produto				Total
	Legante per Iniezioni 790	Cimento Portland Branco	Cal Hidráulica HL5	Dynamon SR1	
CHL	-	-	74,62 €	15,74 €	90,36 €
CHLCP	-	62,58 €	59,29 €	5,36 €	127,23 €
CCOM	381,33 €	-	-	-	381,33 €

Ficou evidente que as caldas produzidas em laboratório tiveram custo bastante inferior ao que foi observado na calda comercial. O custo de produção de CCOM é equivalente a aproximadamente 3 vezes o que foi observado em CHLCP ou 4 vezes em CHL.

O preparo de CCOM é bastante simples uma vez que só exige a aferição do peso ou do volume de água necessária para hidratar os 25 quilogramas de sólidos presentes em um saco. No caso das caldas CHL e CHLCP observa-se um processo razoavelmente mais complexo, onde há a necessidade de se dosar dois tipos de sólido, além da água e do superplastificante. As consequências desta diferença certamente poderão ser notadas no controle de qualidade e no tempo de execução dos produtos. Além do mais, espera-se que as desvantagens sejam ainda mais significativas no ambiente da construção, onde raramente encontram-se recipientes graduados e balanças de precisão.

Espera-se que haja alguma economia relativa à mão de obra nas obras executadas com a calda comercial, por outro lado, parece difícil que uma diferença tão grande de custos possa ser compensada apenas por este fator. Considera-se ainda a possibilidade de amenizar as desvantagens das caldas executadas *in loco* com a realização das dosagens em ambiente controlado, isto é, com equipamentos precisos e aferidos, para que só posteriormente as partes sejam homogeneizadas em obra.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Considerações finais

Neste capítulo estão dispostas as conclusões provenientes da campanha experimental e da sistematização dos conhecimentos a respeito da evolução, da importância, dos materiais e das técnicas utilizadas no restauro. A fim de auxiliar a compreensão das informações a serem apresentadas, os resultados mais relevantes sobre as caldas estudadas foram dispostos na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores médios das propriedades estudadas nesta tese.

Propriedade	CHL		CHLCP			CCOM				
Características em estado fresco										
Tempo de escoamento de um litro em Cone de Marsh (s)	31,3		29,8			31				
Porcentagem de exsudação	2,06%		1,03%			2,06%				
Características em estado endurecido										
Massa específica (g/cm ³)	1,59		1,54			1,72				
Resistência à flexão aos 7, 28 e 90 dias (MPa)	0,965	1,510	2,456	1,845	2,635	3,085	2,959	3,511	4,631	
Resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias (MPa)	2,48	5,35	8,40	7,74	11,37	16,11	9,12	13,19	17,07	
Características vinculadas à interação de pedra e calda										
Tempo de injetabilidade (s)	Granito	84,58			153,75			81,68		
	Xisto	143,74			175,92			106,71		
Aderência aos 7, 28 e 90 dias (MPa)	Granito	0,164	0,110	0,101	0,355	0,317	0,500	0,378	0,515	0,660
	Xisto	0,069	0,098	0,106	0,152	0,140	0,406	0,253	0,284	0,353
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Cilindros de granito e calda	2,3			8,2			9,2		
	Cilindros de xisto e calda	2,4			7,4			9,2		
Características vinculadas à análise financeira										
Custo para produção de 1 m ³	90,36 €		127,23 €			381,33 €				

Primeiramente, considera-se que esta publicação é um contributo ao avanço da metodologia empregada na determinação da aderência entre caldas e pedras. Foram diagnosticados alguns pontos fracos nos procedimentos propostos para os ensaios de verificação de aderência e injetabilidade. Por outro lado, percebeu-se que de maneira geral houve uma boa correlação entre todos os dados, mostrando uma convergência de respostas que indicam a superioridade de CCOM e CHLCP quando comparadas com CHL.

Confrontando as duas caldas feitas *in loco*, conclui-se que um pequeno incremento de cimento branco em caldas à base de Cal Hidráulica conduz a melhoras muito significativas nas propriedades físicas, mecânicas e reológicas estudadas sem que existam grandes acréscimos de custos ou rigidez excessiva.

Observou-se ainda que, apesar de o produto Dynamon SR1 ser indicado para o uso em concretos à base de Cimento Portland, houve uma grande melhora na fluidez e injetabilidade das caldas que incorporaram este aditivo. Em suma, conclui-se que este tipo de superplastificante à base de polímeros acrílicos também é efetivo na melhora das características reológicas de caldas à base de Cal Hidráulica.

Apesar de a calda CHLCP apresentar valores inferiores ao que foi observado na calda comercial, observa-se que as diferenças foram relativamente pequenas. Quanto ao custo, ficou evidente que foi bastante inferior à calda CCOM, o que a torna uma alternativa econômica, mas que exige maior cautela na utilização em obra.

Quanto ao *grout* formado produto Ex Novo Legante Per Iniezioni, constatou-se que teve as melhores características observadas em estado fresco e endurecido, seja de maneira isolada ou na interação com as pedras. Por outro lado, seu custo foi bastante superior ao que foi encontrado nas caldas feitas *in loco*.

Observou-se que a calda CHL, apesar de ter o menor custo de produção, é menos adequada para o emprego em procedimentos de injeção típicos. O que se deve aos resultados inferiores encontrados na campanha experimental, em especial quanto às propriedades de aderência. Mesmo na única exceção encontrada, que diz respeito ao tempo de injeção mais satisfatório que o de CHLCP, observou-se um melhor preenchimento dos corpos de prova injetados com esta última.

Considerando as similaridades de desempenho quando comparadas com os resultados encontrados por outros autores, conclui-se que CCOM e CHLCP têm potencial para serem aplicadas como caldas de injeção em obras de restauro de alvenarias de pedra.

No entanto, sugere-se que sejam realizados mais testes para garantir que os resultados sejam satisfatórios.

Em virtude da singularidade de cada alvenaria antiga, indica-se que sejam realizados ensaios para verificar a compatibilidade com os materiais usados especificamente na estrutura onde pretende-se executar o restauro. Ainda recomenda-se que sejam verificados os comportamentos em tempos de cura superiores, onde haja a estabilidade das reações de carbonatação, bem como em testes de envelhecimento acelerado e de resistência a sais. Quanto a calda CHL, em virtude dos resultados insatisfatórios encontrados, conclui-se o material não possui as propriedades necessárias para ser utilizado como uma calda de injeção.

5.2. Trabalhos futuros

Sugere-se que os seguintes tópicos sejam desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Caracterizar mecanicamente e quimicamente as pedras estudadas neste trabalho, nomeadamente xisto e granito amarelo provenientes da região de Bragança, bem como, outras pedras que foram comuns na construção portuguesa de alvenarias.
- Aperfeiçoar a metodologia de determinação da aderência entre pedra e calda através da redução da seção transversal da pedra, como já foi mencionado na seção 4.3.2.4.1.
- Investigar o comportamento das caldas estudadas quanto a sua durabilidade, realizando ensaios de envelhecimento acelerado e resistência a sais.
- Caracterizar o comportamento mecânico das caldas mencionadas neste trabalho em tempos de cura superiores aos 90 dias, visto que não foi possível determinar se neste prazo as reações de carbonatação inerentes à Cal Hidráulica já haviam se estabilizado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ICOMOS. (2004). Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do patrimônio arquitetônico, *International Council on Monuments and Sites*
- [2] Kalagri, A.; Miltiadou-Fezans, A.; Vintzileou, E. (2010). Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*
- [3] Royer, B.; Assunção, R. M. N.; Fº, G. R.; Motta, L. A. C. (2005). Efeito da Aplicação do Poliestireno Sulfonado (PSSNa) como Aditivo em Argamassas e Concretos de Cimento Portland CPV32, Vol. 15
- [4] Tavares, M. L.; Veiga, M. R. (2007). A conservação de rebocos antigos. Restituir a coesão perdida através da consolidação com materiais tradicionais e sustentáveis, *VII SBTA, Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*
- [5] Veiga, M. do R. (2006). Intervenções em revestimentos antigos: conservar, substituir ou ... destruir
- [6] Menezes, M.; Tavares, M. L. (2004). The safeguard and rehabilitation of the city image for the conservation of the urban landscape. A multidisciplinary perspective, *4th International Seminar on Urban Conservation. Interfaces in Integrated Urban Conservation: Bridging between Disciplines and Cooperative Action*
- [7] Justicia, M. J. M.; Martínez, D. S.-M.; Martínez, L. S.-M. (2008). *Historia y Teoría de La Conservación y Restauración Artística* (3rd ed.), Tecnos
- [8] Costa, J. M. A. P. da. (1999). *Estudos cromáticos nas intervenções de conservação em centros históricos - bases para a sua aplicação à realidade portuguesa* Universidade de Évora
- [9] Tavares, M. L. (2009). A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos: ‘Uma metodologia de estudo e reparação’, *Preservation*
- [10] Rivera, J. (1997). Restauración arquitectónica desde los orígenes hasta nuestros días, *Teoría e Historia de La Restauración. Tomo I: Máster de Restauración e Rehabilitación Del Patrimonio.*, Madrid, 102–171
- [11] Luso, E.; Lourenço, P. B. (2004). Breve história da teoria da conservação e do restauro, *Revista Engenharia Civil Da Universidade Do Minho*
- [12] Henriques, F. (1991). *A Conservação Do Património Histórico Edificado*, LNEC, Lisboa
- [13] Jokilehto, J. (2006). Considerations on authenticity and integrity in World Heritage

context, *City & Time*

- [14] Brandi, C. (1963). *Teorial Del Restauro* (1st ed.), Ed. di storia e letteratura
- [15] De Naeyer, A.; Arroyo, S.; Blanco, J. (2000). Krakow Charter: principles for conservation and restoration of built heritage.
- [16] Tomazevic, M.; Turnsek, V. (1982). *Verification of the Seismic Resistance of Masonry Buildings, Proc. of the British Ceramic Society: Loadbearing Brickwork*
- [17] Jorne, F.; Henriques, F. M. A.; Baltazar, L. G. (2012). Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*
- [18] Vintzileou, E.; Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts, *Engineering Structures*, Vol. 30
- [19] Binda, L.; Saisi, A.; Tedeschi, C. (2006). Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications
- [20] Bras, A.; Henriques, F. M. A. (2009). The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*
- [21] Abrantes, R. N. de C. (2012). *Caldas de injeção para revestimentos com perda de aderência*
- [22] Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. P. (2013). Penetrability of hydraulic grouts, *Materials and Structures*
- [23] Miltiadou-Fezans, A. (1990). *Etude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France
- [24] Eklund, D.; Stille, H. (2008). Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*
- [25] Vintzileou, E. (2006). Grouting of three-leaf stone masonry: Types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting, Structural analysis of historical constructions
- [26] NP EN 447. (2008). Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Requisitos básicos
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR NM 65: Cimento Portland: Determinação do tempo de pega
- [28] Luso, E. (2012). Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga, *Ph.D. Thesis, Universidade Do Minho*

- [29] Silva, R. A. M. da. (2008). Caracterização Experimental de Alvenaria Antiga : Reforço e Efeitos Diferidos
- [30] Luso, E.; Lourenço, P. B.; Ferreira, R. M. (2007). Injecções para consolidação de construções em terra. Revisão do conhecimento e métodos de ensaio, *V Seminário Arquitectura de Terra Em Portugal, Aveiro*
- [31] Berbero, J. C. (1998). Técnicas de consolidación en pintura mural., *Actas Del Seminário Internacional Sobre Consolidacion de Pinturas Murales*
- [32] Vintzileou, B. E.; Tassios, T. P. (1995). Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts
- [33] Torraca, G. (2009). *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation, Chemistry*
- [34] Patrício, C. (2013). Caracterização de Caldas de Cal Hidráulica Natural com Metacaulino para Consolidação de Alvenarias Antigas, *Dissertação Para Obtenção Do Grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Almada.*
- [35] Alvarez, J.; Sequeira, C.; Costa, M. (2005). Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas, *1º Apfac*
- [36] Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2: 1ª Parte - Ligantes e Caldas*, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto
- [37] Bras, A. (2011). *Grout optimization for masonry consolidation, Ph.D. Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa*
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 16697: Cimento Portland: Requisitos
- [39] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). NBR 5732 - Cimento Portland comum
- [40] BS EN 197-1. (2011). Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, *British Standard*
- [41] Lyra, J. S. (2010). Estudo da Influência de Policarboxilato Comercial na Hidratação, Reologia e Físico-Química de Superfície do Cimento
- [42] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.), Pearson Education Limited, Edinburgh, Scotland
- [43] Gartner, E. M.; Young, J. F.; Damidot, D. A.; Jawed, I. (1983). Hydration of Portland Cement, *Structure and Performance of Cement*
- [44] Rixom, R. (1998). The economic aspects of admixture use, *Cement & Concrete Composites*

- [45] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2001). *Microstructure , Properties and Materials*
- [46] Rixom, R.; Mailvaganam, N. (2001). *Chemical Admixtures for Concrete, Quality*
- [47] Taylor, H. F. W. (1990). *Cement Chemistry* (1st ed.), Londres
- [48] Freitas, F. G. .; Blyth, M. H. de. (2005). *A Geology for Engineers, Elsevier*
- [49] Noronha, F.; Carvalho, C.; Ramos, J. F.; Moura, C.; Moura, R.; Sant’Ovaia, H.; Ramos, V. (2011). Os Xistos como Recurso . O caso de Trás-os-Montes e Alto Douro Schist as resource . The example of Trás-os-Montes and Alto Douro
- [50] Barros, R. S.; Oliveira, D. V; Varum, H. (2009). Tipologias E Principais Danos Observados em Construções de Xisto
- [51] Pinto, J.; Cunha, V.; Teixeira, T.; Ferreira, D.; Briga-Sá, A.; Varum, H. (2014). Edifícios de xisto no concelho de Peso da Régua
- [52] Valluzzi, M. R.; Binda, L.; Modena, C. (2005). Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing, *Construction and Building Materials*
- [53] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água
- [54] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios
- [55] NP EN 445. (2008). Determinação da fluidez de aldas de injeção para armaduras de pré-esforço pelo Método do Cone
- [56] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR 7681-3: Calda de cimento para injeção: Determinação dos Índices de Expansão e Exsudação
- [57] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova
- [58] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). NBR 9479: Argamassa e concreto: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova
- [59] NP EN 12390-5. (2009). Ensaio do betão endurecido: Parte 5: Resistência à flexão de provetes
- [60] NP EN 12390-3. (2009). Ensaio do Betão Endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes
- [61] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração
- [62] ASTM International. (2013). ASTM C1072-13: Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength
- [63] ASTM International. (2013). ASTM C1583: Standard Test Method for Tensile Strength

of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method), *ASTM*

- [64] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). NBR 15558: Concreto: Determinação da exsudação
- [65] NP EN 12390-6. (2011). Ensaios de betão endurecido. Parte 6: Resistência a tracção por compressão de provetes

