

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AOS SAIS DE CALDAS PARA INJEÇÃO DE ALVENARIA ANTIGA

Fernanda Satiko Nakamura

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

Julho 2020

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AOS SAIS DE CALDAS PARA INJEÇÃO DE ALVENARIA ANTIGA

Fernanda Satiko Nakamura

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. Dra. Eduarda Cristina Pires Luso

Orientador: Prof. Dr. Arthur Medeiros

Este documento inclui os comentários do Júri

Julho 2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Angela e Julio, pelo amor, força e apoio incondicional. Seu exemplo, conselhos e ensinamentos foram essenciais em minha formação. Ao meu irmão, Erick, pela companhia, risadas e conversas. A vocês, devo tudo.

Aos meus avós e minha família, pelo carinho e pela preocupação.

À professora Eduarda Cristina Pires Luso, pelo conhecimento compartilhado e pela disponibilidade, opiniões e dedicação.

Ao professor Arthur Medeiros, pela parceria e pelos ensinamentos transmitidos ao longo de todo o curso.

Aos técnicos de laboratório, Hermínia, Luísa, João e Otávio, pelo auxílio no desenvolvimento prático do trabalho.

Aos meus amigos dos mais diversos cantos do mundo, especialmente ao Eric, Gisele, Igor, Maria, Sergio, Isabela, Matheus, Clara, Janaína, Bruno, Luca, Anna e Priscila, pelo companheirismo, apoio e pelos momentos de consolo, de alegria e descontração.

À Bela, à Mila e ao Shiva, pelo amor, carinho e conforto de sua companhia.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança, pelas oportunidades e pelo auxílio no desenvolvimento desta tese.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A injeção de caldas é um dos procedimentos de intervenção mais utilizados para reforço e reabilitação das estruturas antigas. O objetivo principal desta prática é reestabelecer a integridade estrutural, aumentando a durabilidade, continuidade e a resistência mecânica de alvenarias de pedra, tijolo ou adobe. O bom funcionamento do processo depende da escolha dos materiais utilizados para a composição da calda, da boa aderência e da compatibilidade física, mecânica e química entre calda e substrato. Além disso, como alvenarias antigas podem apresentar quantidades significativas de sais solúveis em seu interior, é importante que as caldas apresentem boa resistência química aos sais.

Este trabalho teve como objetivo principal contribuir para o conhecimento referente às caldas de injeção compostas de diversos materiais e verificar o comportamento das caldas quando em contato com cloretos e sulfatos. Para isto, foram estudadas uma calda comercial pré-dosada e duas caldas à base de cal realizadas em laboratório, previamente caracterizadas em suas propriedades mecânicas e reológicas. A pesquisa consistiu no teste de diversas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade destas caldas e sua interação com granito.

Foi efetuada uma campanha experimental envolvendo ensaios de resistência à flexão, à compressão, de capilaridade e de durabilidade com ciclos de cloretos e sulfatos em provetes compostos apenas por calda. Os ensaios de resistência aos sais foram monitorizados através de inspeções visuais, variação de massa e resistência à compressão em diferentes períodos de ensaio. Em provetes contendo calda e granito, após ensaio com ciclos de sais, foram realizados ensaios de compressão uniaxial e de aderência, além de inspeção visual e variação de massa.

Todas as caldas avaliadas no presente estudo apresentaram resultados adequados em situações normais, para ensaios de resistência à flexão, à compressão e de capilaridade. A deterioração acelerada causada pelos sais cloreto e sulfato também não inviabiliza as caldas de serem utilizadas. Mesmo após os ensaios mais danosos, as caldas apresentavam resultados relativamente satisfatórios para a resistência à compressão, dentro dos limites estabelecidos, ainda que com alta variância entre elas.

Ademais, verificou-se que a calda CCM demonstrava bom comportamento para resistência à compressão de cilindros e aderência entre material e pedra. As propriedades apresentavam melhor comportamento perante os sais do que quando eram analisadas isoladamente. Conclui-se que é viável a utilização de caldas a base de cal *in situ* ou caldas comerciais, com boa durabilidade, podendo ser utilizadas na reabilitação de edificações antigas.

Palavras chave: caldas de injeção, durabilidade, resistência aos sais, restauro.

ABSTRACT

The injection of grouts is one of the most used techniques of intervention for the reinforcement and rehabilitation of old structures. The main purpose of this technique is to reestablish the integrity of the structure, increasing the durability, continuity and the mechanical resistance of stone, brick or adobe masonry. The success of the intervention depends on the choice of materials used for the composition of the grout, the good adherence and the physical, mechanical and chemical compatibility between grout and substrate. In addition, as old masonry can contain significant amounts of soluble salts in its interior, it is important that the grouts also have good chemical resistance to the salts.

The present work had as main objective to contribute to the knowledge regarding the injection grouts composed of different materials and to verify the behavior of the grouts when in contact with chlorides and sulfates. For this, a pre-dosed commercial grout and two lime-based grouts made in laboratory, previously characterized in their mechanical and rheological properties, were studied. The research consisted of testing physical, mechanical and durability properties of these grouts and their interaction with granite.

An experimental campaign was carried out involving tests of flexural resistance, compression resistance, capillarity and durability after cycles of chlorides and sulfates, in specimens composed only by grouts. The salt resistance tests were monitored through visual inspections, mass variation and compressive strength in different periods of the test. In specimens containing grout and granite, after cycles of salts, uniaxial compression and adhesion tests were carried out, in addition to visual inspection and mass variation.

All grouts evaluated in the present study showed adequate results in normal situations, for flexural resistance, compression resistance and capillarity tests. The accelerated deterioration caused by the chloride and sulfate salts also does not preclude the grouts from being used. Even after the most damaging tests, the grouts presented relatively satisfactory results for compression resistance tests, within the preestablished limits, even with the high amplitude of results.

Furthermore, it was found that the CCM grout showed good behavior for compression resistance of cylinders and adhesion between material and stone. The properties performed better in its interaction with granite, after cycles of salt, than when analyzed by itself. It can be concluded that it is feasible to use lime-based grouts made *in situ* or commercial grouts, presenting good durability, with its use being viable in the rehabilitation of old buildings.

Key words: injection grouts, durability, salt resistance, restoration.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivos gerais.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Conteúdo e estrutura da tese.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. A conservação de edificações antigas.....	6
2.2. A utilização de caldas na consolidação e reforço de edificações antigas.....	8
2.3. Propriedades físicas e mecânicas das caldas de injeção.....	12
2.4. Durabilidade das caldas de injeção.....	14
2.4.1. Ação específica dos cloretos.....	20
2.4.2. Ação específica dos sulfatos.....	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1. Materiais utilizados nas caldas executadas em laboratório.....	27
3.1.1. Cal hidráulica.....	27
3.1.2. Cal hidratada.....	28
3.1.3. Cimento Portland branco.....	29
3.1.4. Metacaulim.....	30
3.1.5. Superplastificantes.....	31
3.1.6. Caldas comerciais.....	32
3.1.7. Rochas.....	33
3.2. Formulação e principais características das caldas.....	33
3.3. Execução das caldas.....	35
3.4. Procedimento e preparação do trabalho.....	37
3.4.1. Execução dos provetes prismáticos compostos por calda.....	37
3.4.2. Fase 1: Provetes prismáticos compostos por calda.....	38
3.4.3. Execução dos provetes cilíndricos de injeção.....	40
3.4.4. Fase 2: Provetes cilíndricos de injeção.....	42

3.4.5. Execução dos provetes para o ensaio de aderência	43
3.4.6. Fase 3: Provetes para o ensaio de aderência	44
3.5. Ensaaios em estado endurecido	45
3.5.1. Ensaio de resistência mecânica à flexão	45
3.5.2. Ensaio de resistência mecânica à compressão.....	46
3.5.3. Ensaio de capilaridade.....	47
3.5.4. Ensaio de resistência à ação dos cloretos	48
3.5.5. Ensaio de resistência à ação dos sulfatos	50
3.5.6. Ensaio de resistência mecânica à compressão em cilindros de injeção	52
3.5.7. Determinação da aderência em suporte pétreo.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Formulação das caldas.....	56
4.2. Caracterização das caldas	56
4.3. Ensaaios em provetes prismáticos.....	58
4.3.1. Massa específica.....	58
4.3.2. Ensaio de resistência mecânica à flexão	59
4.3.3. Ensaio de resistência mecânica à compressão.....	62
4.3.4. Ensaio de capilaridade.....	66
4.3.5. Ensaio de resistência aos cloretos	68
4.3.6. Ensaio de resistência aos sulfatos.....	73
4.4. Ensaaios em provetes compostos por calda e granito	78
4.4.1. Ensaio de resistência mecânica à compressão em cilindros de injeção	78
4.4.2. Determinação da aderência ao suporte pétreo.....	81
4.5. Considerações finais	84
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
5.1. Conclusões.....	87
5.2. Trabalhos futuros.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estado de conhecimento em estudos relacionados à ação dos sais.	17
Tabela 2 – Composição das caldas estudadas.	34
Tabela 3 – Comparação dos resultados apresentados pelas caldas em estudo.	35
Tabela 4 – Provetes prismáticos e resultantes meio provetes.	38
Tabela 5 – Destinação dos meio provetes.	39
Tabela 6 – Quantidade de provetes prismáticos ensaiados à compressão ao fim de n ciclos. .	39
Tabela 7 – Proporções utilizadas para a mistura de britas final	41
Tabela 8 – Quantidade de provetes cilíndricos ensaiados à compressão ao fim de n ciclos. ...	42
Tabela 9 – Quantidade de provetes ensaiados à compressão ao fim de n ciclos.	44
Tabela 10 – Tempo de enchimento de cada quarto dos provetes cilíndricos (s).	57
Tabela 11 - Volume, peso e massa específica média dos provetes prismáticos.	59
Tabela 12 – Valores médios de tensão de ruptura à flexão e desvios padrão	60
Tabela 13 – Resistência à flexão aos 28 dias em estudos realizados anteriormente	61
Tabela 14 – Resistência à compressão das caldas para 28, 90 e 120 dias.	62
Tabela 15 – Resistência à compressão aos 28 dias em estudos realizados anteriormente	64
Tabela 16 – Resultados do ensaio de capilaridade.	67
Tabela 17 – Percentagem de cloretos retidos no provete.	68
Tabela 18 – Peso dos provetes no início e durante o ensaio de cloretos.	69
Tabela 19 – Resistência à compressão de FB após os ensaios de cloretos e água destilada. ...	70
Tabela 20 - Resistência à compressão de CC após os ensaios de cloretos e água destilada. ...	71
Tabela 21 - Resistência à compressão de CCM após os ensaios de cloretos e água destilada. 71	
Tabela 22 – Peso dos provetes no início e durante o ensaio de sulfato.	73
Tabela 23 – Resistência à compressão de FB após os ensaios de sulfatos e água destilada. ...	75
Tabela 24 - Resistência à compressão de CC após os ensaios de sulfatos e água destilada	75
Tabela 25 - Resistência à compressão de CCM após os ensaios de sulfatos e água destilada. 76	
Tabela 26 – Dimensões, pesos, massas volúmicas e variação percentual dos provetes cilíndricos.	78
Tabela 27 – Tensões de ruptura dos provetes cilíndricos.	79
Tabela 28 – Valores médios da tensão de ruptura à tração dos provetes cilíndricos.	83
Tabela 29 – Valores médios das propriedades estudadas para todas as caldas.	84
Tabela 30 – Valores médios das propriedades estudadas para a calda CCM e granito.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Preparação da parede de cantaria; (b) Processo de injeção sob pressão.	10
Figura 2 - Representação esquemática do ataque de sulfatos. Fonte: adaptado CEB, 1992	25
Figura 3 – (a) misturador de argamassas elétrico; (b) processo de homogeneização da calda	36
Figura 4 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos	38
Figura 5 – Destinação dos provetes após a cura de 90 dias	40
Figura 6 – (a) Esquema do processo de enchimento dos cilindros de injeção. Fonte: LUSO (2012); (b) Processo de moldagem do provete; (c) molde preenchido.	42
Figura 7 – Destinação dos provetes cilíndricos.....	43
Figura 8 – Provetes com base retangular: (a) visão lateral; (b) moldes preenchidos.....	43
Figura 9 – Destinação dos provetes com base retangular	44
Figura 10 – Realização do ensaio para determinação da resistência à flexão.....	45
Figura 11 - Realização do ensaio para determinação da resistência à compressão.....	46
Figura 12 – Realização do ensaio de capilaridade.	48
Figura 13 – (a) Preparação dos provetes prismáticos para o ensaio; (b) Imersão dos provetes compostos pela calda FB; (c) Imersão dos provetes com base retangular.	49
Figura 14 – Esquema do procedimento de ensaios perante os cloretos	50
Figura 15 – Esquema do procedimento de ensaios perante os sulfatos	51
Figura 16 – (a) Imersão dos provetes prismáticos da calda FB; (b) Imersão dos provetes com base retangular e cilíndricos da calda CCM.....	52
Figura 17 - Ensaio de compressão uniaxial do provete composto por calda CCM e granito amarelo.....	53
Figura 18 – Ensaio de aderência.	54
Figura 19 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração. Fonte: ABNT NBR 13528 (2010).	55
Figura 20 – (a) Meio provetes das caldas FB, CC e CCM; (b) Face superior do provete prismático da calda CCM; (c) Provete prismático da calda CC.....	57
Figura 21 – Após a realização do ensaio de resistência à flexão.	59
Figura 22 – Tensões médias de ruptura por flexão.	61
Figura 23 – Tensões médias de ruptura por compressão.	63
Figura 24 – Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.	67

Figura 25 – Análise visual dos provetes após 30 ciclos: (a) CCM; (b) FB (superior, provetes 5 a 10) e CC (inferior, provetes 1 a 5).....	70
Figura 26 – Tensões médias de ruptura por compressão após ensaios de cloretos.....	71
Figura 27 – (a) provetes da calda FB após 10 ciclos; (b) provetes da calda CC após 30 ciclos; (c) provetes da calda CCM após 30 ciclos; (d) provetes da calda FB após 30 ciclos.	75
Figura 28 – Tensões médias de ruptura por compressão após ensaios de sulfatos.	76
Figura 29 – (a) ensaio de resistência aos sulfatos; (b) eflorescências após 30 ciclos.	79
Figura 30 – (a) Descolamento durante o ensaio de sulfatos; (b) Eflorescências após 30 ciclos do ensaio de sulfatos; (c) Provede após 30 ciclos do ensaio de cloretos.	81
Figura 31 – (a) Ruptura na argamassa; (b) Ruptura na interface argamassa/substrato.	82

1. INTRODUÇÃO

Uma das técnicas possíveis de intervenção para reforço e consolidação de estruturas de alvenaria antiga é a injeção de caldas com base de cal ou cimento, pois preserva a funcionalidade das edificações, assim como garante a estabilidade e segurança da estrutura. As caldas podem ser pré-dosadas ou misturadas *in situ*. As misturadas *in situ* são compostas por um ligante reativo e água, podendo ser introduzidos aditivos ou plastificantes. Caldas com base de cal, além de geralmente serem compatíveis quimicamente com alvenarias antigas, atendem as necessidades físicas e mecânicas da estrutura e, portanto, seu uso é viável para utilização em situações de restauro e conservação, garantindo a melhoria da continuidade, coesão e resistência da estrutura danificada.

Esta técnica é um processo irreversível, por isso, a escolha da calda e o método de aplicação em estruturas devem atender certos requerimentos, incluindo compatibilidade com o substrato, injetabilidade, boas características mecânicas e durabilidade. Durante o restante da vida útil da estrutura na qual a calda foi utilizada, esta deve atender as condições de projeto e resistir a agressões proveniente do meio e dos componentes químicos presentes na estrutura. É necessário que a calda apresente compatibilidade física, química e mecânica com o substrato onde esta será inserida, para garantir que não serão introduzidos constituintes que possam agravar o desenvolvimento de degradações.

A escolha de uma composição adequada de acordo com a alvenaria e com as condições às quais a estrutura ficará exposta é muito importante para prevenir possíveis danos. Para isto, deve-se estudar e analisar as principais exigências e características (físicas, químicas e mecânicas) que as caldas devem apresentar, assim como a composição e o estado no qual o substrato se encontra, para garantir um bom funcionamento da estrutura como um todo. Suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, não devem ser excessivamente superiores a da estrutura ao qual será aplicada.

Outro fator de grande importância é a durabilidade, as caldas devem apresentar resistência às ações externas com o mínimo de dano possível. Os fatores que podem causar degradação são fatores biológicos, ações climáticas, poluição atmosférica, ação de sais solúveis, entre outros. São inúmeras as fontes em que podem existir concentrações de sais que cause danos à estrutura. Os sais solúveis podem penetrar na alvenaria por capilaridade ou por exposição direta, provenientes de resíduos agrícolas, efluentes industriais, ambientes marítimos, entre outros. A contaminação pode ocorrer quando as estruturas estão situadas em ambientes desfavoráveis, quando estão em contato direto com soluções que contenham sais ou

mesmo através da utilização de materiais contaminados durante a execução do projeto. Os danos podem ser físicos ou químicos na estrutura, causando degradação nos aspectos mecânicos e/ou estéticos.

Para avaliar o impacto causado por estes agentes agressivos podem ser realizados testes de envelhecimento artificial. Na literatura, registram-se diversos métodos para a introdução dos sais à estrutura, podendo estes serem incorporados na mistura fresca ou expostos à estrutura posteriormente à cura. A variação no método de ensaio pode influenciar nos resultados, no mecanismo de transporte e no teor crítico de sais. O método mais comum aplicado na pasta endurecida atualmente é através da realização de ensaios de ciclos de imersão e secagem em soluções salinas, no qual predomina o mecanismo de absorção nas camadas superficiais e difusão nas camadas mais internas¹.

Atualmente, existem poucas normas que estabelecem valores de referência às caldas de injeção, sendo ainda mais escassas no quesito durabilidade. É necessário, portanto, aprofundar o conhecimento disponível referente às suas características físicas, mecânicas e químicas, a compatibilidade, a longevidade e a interação com os mais diversos substratos, como o granito amarelo, rocha comumente encontrada em construções históricas de Portugal. A falta de normatização de caldas impõe a necessidade de adaptação de normas existentes e a comparação com estudos realizados anteriormente.

1.1. Objetivos

A melhoria nas técnicas de preservação, conservação e restauro de construções antigas e com grande valor histórico é de grande importância. Há de se ter muita cautela e conhecimento para que a interferência apresente os melhores resultados, com a melhor compatibilidade entre os materiais. Assim, para aprofundar os conhecimentos com relação as caldas de injeção e sua interação com um tipo de alvenaria comum em Portugal – pedra de granito, foram estabelecidos os seguintes objetivos gerais e específicos para serem atingidos ao longo da realização desta pesquisa.

1.1.1. Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência aos sais que três caldas de injeção distintas apresentam, através de ensaios de imersão e secagem em soluções contendo agentes químicos agressivos ao material, particularmente cloretos e sulfatos.

Pretende-se também complementar e contribuir para a compreensão do comportamento e das características que as caldas apresentam, tanto isoladamente quanto no conjunto granito+caldas, especialmente no quesito durabilidade.

1.1.2. Objetivos específicos

- Aprofundar o conhecimento já existente de caldas de injeção tanto pré-dosadas quanto executadas em laboratório, analisando-as isoladamente e sua interação com o granito como suporte pétreo;
- Avaliar nos quesitos durabilidade e resistência química caldas já anteriormente caracterizadas, submetendo-as a ensaios de resistência aos sais, tanto isoladamente quanto na interação com o granito;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas significativas que as caldas apresentam, em estado normal e após testes de envelhecimento acelerado, contribuindo para o estabelecimento de valores de referências;
- Comparar os resultados obtidos com os resultados e requisitos descritos na literatura e verificar se as composições das caldas estudadas podem ser satisfatoriamente empregadas no restauro de alvenarias antigas de pedra;
- Comparar os resultados apresentados por uma calda de injeção pré-dosada com caldas executadas em laboratório e verificar a viabilidade de substituir as caldas comerciais por caldas executadas *in loco*.

1.2. Justificativa

As propriedades e as características das caldas de injeção devem ser bem conhecidas para que a intervenção apresente o melhor resultado possível para o substrato no qual será inserida, necessidade agravada devido à impossibilidade de correção ou remoção da calda após o fim da aplicação da técnica. Deve-se levar em consideração a composição das caldas e sua interação com os materiais já presentes no substrato, assim como as propriedades mecânicas que estas poderão adquirir com o tempo.

Há poucos estudos que caracterizam o comportamento físico e mecânico do produto Legante per Iniezioni 790, da empresa Fassa Bortolo. Não se sabe de nenhuma pesquisa que tenha caracterizado seu desempenho após ensaios acelerados de durabilidade com sais.

Ademais, as caldas realizadas *in situ* podem apresentar os mais diversos materiais e proporções em sua composição, fato que dificulta sua caracterização mais aprofundada. Outra questão a considerar é que as caldas podem interagir de diferentes maneiras com o substrato, sendo ideal verificar o desempenho considerando ambos os materiais e sua interação.

Alvenarias antigas podem apresentar certas quantidades de sais permeados em seu interior, provenientes do ambiente no qual está inserido. Estes sais podem causar grandes danos a estrutura, que podem ser magnificados caso a alvenaria e a calda de injeção apresentem comportamento muito diferentes entre si. Dois dos sais mais comuns são os sulfatos e os cloretos. Ambos podem causar na estrutura uma série de reações químicas complexas e movimentações físicas que podem levar a deterioração, porém seus mecanismos de ataque ainda não são completamente conhecidos.

Até o presente momento, não há muitos estudos significativos que definem exatamente o mecanismo de ataque dos sais e quantificam os danos causados pela introdução de sais no material. Além da dificuldade devido à alta variação nas composições das caldas, existem diversos métodos de ensaio, que podem alterar o modo como a degradação ocorre, a quantidade de sais inserida e a intensidade do ataque na estrutura. Estes testes podem ser realizados através da adição dos sais na massa fresca ou após o endurecimento da calda, nomeadamente por ciclos de imersão e secagem, por simulação em solução ou ainda por migração iônica.

Com o intuito de aprofundar o conhecimento de como ocorre o ataque de sais e os fatores agravantes de sua intensidade foram realizados testes de ataques químicos acelerados, de forma a entender melhor os processos pelos quais a degradação ocorre e, assim, tentar evitar ou minimizar a degradação causada. Estes testes envolveram a introdução excessiva de sais na estrutura e o monitoramento das consequências nas caldas. O método mais utilizado atualmente, e usado na presente tese, é através de ciclos de imersão e secagem em soluções salinas, particularmente o cloreto de sódio e o sulfato de sódio. Para acompanhar o ensaio, geralmente são medidas a variação do peso dos provetes e a perda de resistência à compressão.

1.3. Conteúdo e estrutura da tese

A presente tese foi dividida em 5 capítulos. Na introdução, apresentou-se o enquadramento da tese, com objetivos, justificativa e a organização do texto.

O capítulo 2 abordou o estado de conhecimento atual da técnica de injeção de caldas, particularmente referente às suas principais características e durabilidade. Foram abordados

métodos de conservação de edificações antigas, a utilização de caldas na consolidação e reforço de alvenarias deterioradas, as propriedades físicas e mecânicas, a questão da durabilidade das caldas de injeção, assim como os efeitos da deterioração especificamente causadas pelos sais sulfatos e cloretos.

No capítulo 3, foi descrita a campanha experimental realizada no decorrer dessa pesquisa, focando nas características dos materiais, nas composições das caldas e na caracterização física, mecânica e de durabilidade realizada. O programa foi dividido em três fases, para que se pudesse estudar variadas formas de provetes, tanto apenas a calda quanto a interação entre calda e substrato. Foram estudados provetes prismáticos composto apenas por calda, provetes cilíndricos de injeção e provetes com base retangular, ambos compostos por calda e granito amarelo.

O capítulo 4 foi dedicado à análise de resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo três, particularmente relacionado à durabilidade da calda. Foram realizadas comparações entre os resultados de provetes de controle e após o ensaio de durabilidade em soluções salinas. Os resultados também foram comparados com normas e com resultados de estudos anteriores.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros para aprofundar e consolidar os conhecimentos obtidos nesta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, foi abordado o estado da arte da técnica de injeção de caldas em alvenarias antigas, especialmente suas propriedades e durabilidade, que são objeto de estudo nesta pesquisa. Focou-se também na ação e mecanismo de ataque que os sais cloretos e sulfatos causam na estrutura.

2.1. A conservação de edificações antigas

A reabilitação de estruturas antigas é um grande debate multidisciplinar, envolvendo noções arquitetônicas, históricas, geográficas, econômicas, sociais e culturais para manter sua funcionalidade, qualidade artística, aspectos sociais e históricos. Para que a intervenção seja adequada, é necessário investigar ações (de manutenção, restauro ou afins) aplicadas à estrutura anteriormente, inspecionar o estado atual do edifício, identificar as anomalias e realizar pesquisas em laboratório e *in situ*, com o objetivo de determinar a melhor técnica e materiais a serem utilizados, adequados ao diagnóstico e causas da deterioração².

No processo de reabilitação, devido à falta de conhecimento técnico ou por questões econômicas, muitas vezes substituem-se os materiais antigos por materiais modernos, perdendo um testemunho das técnicas que ali foram utilizadas, da composição do material original e da aparência estética da edificação. Ademais, o material pode, com o tempo, mostrar-se incompatível com a estrutura original, alterando as características e o funcionamento da parede. Os novos materiais introduzidos podem envelhecer mais rapidamente que a parede e, conseqüentemente, acelerar a degradação da alvenaria³.

As intervenções devem levar em consideração a compatibilidade mecânica, física, química e estética da edificação antiga, devendo também apresentar alta durabilidade. Alguns fatores que influenciam na degradação são as condições climáticas do local onde será aplicada, assim como condições extremas como altas variações de temperatura e umidade, ciclos de gelo e degelo, e a ação de sais solúveis⁴.

Os danos causados a alvenaria podem apresentar diversas proveniências. Estas podem ser divididas em três categorias principais: mecanismos físicos e/ou físico-químicos, mecanismos biológicos ou danos mecânicos. Os mecanismos biológicos na estrutura se manifestam pelo crescimento de raízes e musgo, formação de algas ou bactérias que produzem nitratos e sulfatos. Os danos mecânicos podem ser derivados de erros de cálculo ou ainda devido

a mudanças de função da edificação com a aplicação de cargas muito superiores às cargas para a qual a edificação foi calculada⁵.

A presença de água é vital para que ocorram os mecanismos físicos ou físico-químicos no interior da estrutura, podendo se apresentar tanto em forma líquida quanto em forma de vapor. A presença de água e umidade depende da localização e das condições ambientais em que a estrutura se localiza. Seu transporte no interior da estrutura varia de acordo, entre outros fatores, com a quantidade e tamanho dos poros da alvenaria. A movimentação da água no interior da alvenaria pode causar lixiviação da parede, desintegração dos núcleos internos, expansão quando em presença de argila e barro, ciclos de gelo e degelo ou ainda aumentar a quantidade de sais solúveis danosos para a estrutura em seu interior^{5,6}. A presença de água pode transportar um componente em direção ao outro, garantindo um contato físico sem o qual a reação química não aconteceria. Alvenarias mantidas sempre secas não apresentam degradação química, mesmo que elementos potencialmente danosos estejam presentes⁶.

É necessário inicialmente realizar uma avaliação mais completa possível para definir a melhor intervenção a ser aplicada na estrutura, respeitando suas características e funcionalidade originais. O indicado é, além de uma inspeção visual rigorosa, o uso de técnicas não destrutivas para avaliar com maior precisão o interior das paredes, como por exemplo ensaios termográficos e ensaios de velocidade de propagação de ultrassons. Caso não seja possível ou suficiente na obtenção de informações, deve-se utilizar métodos moderadamente destrutivos para caracterização da alvenaria, como o arranque de varões chumbados à alvenaria ou ensaios de endoscopia com fibras óticas, que permite obter informações relativas à constituição da alvenaria. Quando viável, podem ser utilizadas várias técnicas para uma avaliação mais completa. Em casos mais extremos, pode ser necessário o uso de métodos destrutivos⁷.

Existe atualmente uma grande quantidade de técnicas de reforço, podendo estas serem tradicionais (com uso exclusivo de materiais e processos idênticos aos originais) ou modernos (adequando o uso de materiais e equipamentos modernos). Algumas das técnicas de reforço estrutural são: a substituição pontual de elementos degradados, o uso de caldas de injeção, o refechamento das juntas com argamassas, o encamisamento da estrutura com o auxílio de uma malha metálica e a utilização de rebocos armados⁸.

2.2. A utilização de caldas na consolidação e reforço de edificações antigas

Uma das técnicas usadas para a reparação e reforço de paredes antigas de alvenaria, principalmente quando esta foi submetida a danos físicos ou físico-químicos, é através da injeção de uma calda fluida, que, quando utilizada adequadamente, consolida e restaura a uniformidade e homogeneidade da resistência das paredes. As caldas são injetadas através de tubos colocados em furos abertos nas juntas dos paramentos da parede de alvenaria. O objetivo principal é o preenchimento de pequenos ou grandes vazios e fissuras existentes no interior da alvenaria, unindo os elementos soltos e melhorando sua continuidade, resistência e rigidez⁹.

Ao ser introduzida, a calda sofre um processo de cura, adere ao material e melhora a coesão interna, o comportamento monolítico e a capacidade de carga da estrutura. Como a calda é inserida no interior das paredes, não prejudica a aparência estética da edificação, porém deve ser realizada sempre tomando o cuidado de não adulterar negativamente características físicas, químicas ou mecânicas da estrutura, além de não prejudicar afrescos ou mosaicos que possam estar em sua fachada. A intervenção é irreversível, por isto deve ser amplamente estudada antes de sua aplicação, mas é uma técnica aceitável, de acordo com a Carta de Veneza, quando os materiais utilizados na calda estão de acordo com os materiais originais⁵. A eficácia pode ser especialmente vista quando aplicada em alvenarias de vários panos, uma vez que consolida as ligações verticais entre blocos, melhorando a resistência à flexão sem criar rigidez excessiva¹⁰.

Para que o sistema calda e substrato possa funcionar em conjunto, é necessário saber a morfologia da parede, assim como os materiais que a constituem. Ainda, é importante investigar o estado de degradação da edificação e a função arquitetônica, histórica e artística⁹. O ideal é que a calda apresente características como resistência à compressão, à flexão, de rigidez e deformabilidade similares aos materiais originais ou apenas levemente superior, adequadas ao substrato em que serão inseridas. A aderência deve ser alta e adequada ao suporte. Para que haja compatibilidade química, as caldas devem apresentar características estáveis no tempo, com a formação de ligações irreversíveis. O teor de álcalis deve ser baixo e a resistência aos sais solúveis, em especial os sulfatos, deve ser alta, para evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências¹¹.

A eficácia da técnica já foi comprovada em modelos de pequena escala e em estruturas reais. As caldas podem ser compostas de diversos materiais, podendo ser caldas comerciais pré-doseadas ou formuladas *in situ*. Diversos estudos buscam encontrar uma formulação à base de cal, que cumpre os requisitos químicos e mecânicos, de fácil preparação em obra. A escolha varia de acordo com a disponibilidade de recursos, do conhecimento da injetabilidade da

alvenaria, da compatibilidade com o substrato e ainda do grau de controle que se pretende obter sobre os requisitos.

Quando formuladas *in situ* podem conter diferentes materiais em diferentes proporções, sendo necessária uma análise do substrato onde será inserida para definir a composição mais adequada. No quesito composição, as pastas podem ser à base de cal ou de cimento, aos quais pode ser adicionados aditivos, pozolanas ou argila. As mais compatíveis com alvenarias antigas, devido a semelhança de materiais, são as com base em cal, geralmente acompanhadas de superplastificante e cimento para melhora de suas propriedades¹². Nas caldas pré-doseadas, são encontrados os constituintes já indicados em várias proporções somados, em alguns casos, à misturas orgânicas espessantes, como éter de celulose ou gomas de amido¹³. A realização de caldas compostas por cal hidratada ou cal hidráulica, cimento e pozolanas misturadas em obra têm sido uma das soluções compatíveis química e mecanicamente para o projeto, além de mais econômicas que as caldas comerciais¹⁴.

Para garantir uma boa eficácia da técnica é necessário inicialmente um estudo da seção transversal da parede, determinando a tipologia da construção, analisando a caracterização física e química dos materiais presentes, assim como mapeando a quantidade, tamanho e distribuição dos vazios em seu interior. Caso existam materiais soltos no interior da parede, o ideal é que sua granulometria e quantidade sejam avaliados. Ao se determinar os materiais que serão utilizados na calda, deve-se estudar as composições de argamassa, levando em consideração a compatibilidade química entre a calda e o substrato¹⁵.

Para inserção na alvenaria, o processo de injeção pode ser realizado por gravidade, por vácuo ou sob pressão. A injeção por gravidade é geralmente usada em paredes já altamente degradadas, através de tubos ou seringas hipodérmicas sobre tubos previamente dispostos na parede. Por vácuo, provoca-se uma força aspiratória em tubos superiores, enquanto simultaneamente injetam-se os tubos inferiores com a calda. Quando realizada desta maneira, não é recomendada para uso em grandes elementos arquitetônicos ou removíveis, como estátuas, devido à necessidade do uso de uma grande força que pode danificar ainda mais a parte interna da estrutura ou soltar elementos removíveis. Além disso, as caldas devem ser muito fluidas¹⁶.

A injeção sob pressão (Figura 1b), mais comumente utilizada, consiste na inserção de caldas através de tubos de injeção sob pressão controlada por um equipamento, de maneira ascensional, das bordas para o centro, para evitar aumentar a instabilidade da alvenaria fragilizada. As alvenarias devem suportar a pressão de injeção¹⁶. Para a preparação da técnica (Figura 1a), no local onde será a injeção, é necessário definir a quantidade e a distribuição de

furos a serem perfurados na parede e o valor da pressão a ser adotado. Quando injetada sob pressão, esta deve ser o suficiente para que se consiga preencher a maior quantidade de vazios possível sem causar maiores danos a estrutura¹².



(a) (b)
Figura 1 – (a) Preparação da parede de cantaria; (b) Processo de injeção sob pressão.

A experiência indica que a utilização de materiais com alta quantidade de cimento é danosa, devido ao excesso de resistência mecânica introduzida e ao fato de o cimento ser fonte de íons, como de Ca^{2+} , Na^+ e SO_4^{2+} . Por outro lado, o uso de cal aérea, apesar de apresentar boa compatibilidade com alvenarias antigas, por vezes tem sua aplicação dificultada devido a seu tempo de presa lento, uma vez que depende da carbonatação do hidróxido de cálcio e a quantidade de ar no interior da alvenaria é reduzido. Além disso, caldas com apenas cal geralmente não apresentam boa durabilidade. Algumas das soluções seriam a realização de caldas contendo ambos materiais ou a utilização de materiais pozolânicos¹⁷.

O uso de caldas à base de cal com limitada quantidade de cimento podem ser benéficas na proteção de revestimentos, mosaicos e demais elementos decorativos presentes, garantindo uma maior compatibilidade físico-química¹⁰. Além disso, caldas com adequadas proporções de cimento e cal se mostram eficientes na melhoria da estrutura na qual é injetada. Na proporção adequada, os materiais garantem um aumento da capacidade resistente, sem afetar a ductilidade da estrutura. Testes mecânicos realizados em estudos anteriores confirmaram que não existe necessidade de utilização de altas quantidades de cimento, visto que foi provado que o aumento na resistência causado na estrutura não é proporcional ao aumento na resistência à compressão da calda^{10,18}.

Após a análise inicial e realizados os testes não destrutivos ou semi-destrutivos, obtém-se uma melhor definição da largura dos vazios e fissuras no interior da parede, podendo então ser definidos o espaçamento e a quantidade de furos para injeção, realizados com uma furadeira

elétrica. Nos furos, encaixam-se tubos de plástico ou alumínio para a inserção da calda. Caso a argamassa esteja fissurada, a região deve ser limpa, sendo os materiais soltos retirados. Para a injeção, são perfurados furos que permitam a injeção e o controle do fluxo da calda, de forma a garantir o preenchimento de modo mais homogêneo possível. Os furos devem ter entre 6 a 12 milímetros de diâmetro e, se possível, devem ser posicionados em locais onde a fissura intercepte a junta de argamassa¹⁹.

A injeção é precedida por uma selagem superficial das fissuras e aberturas na parede com produto adequado, que deve aguentar a pressão da injeção para evitar a fuga da calda. Após a secagem do selante, a parede é molhada para retirada de poeira, desobstrução da intercomunicação entre os vazios, melhoria da injetabilidade e saturação da alvenaria. O ideal para a injeção é que a parede esteja saturada com a superfície seca, reduzindo a absorção da água pelo meio a injetar. Em seguida, pode-se introduzir a calda, tomando cuidado de evitar grandes valores de pressão interna. Quando injetado sob pressão, geralmente inicia-se no furo mais baixo, tampando os furos superiores com rolhas de madeira após a calda escoar por estes¹⁹.

As injeções de caldas podem apresentar resultados inadequados caso alguns cuidados não sejam tomados. É necessário levar em consideração o estado de degradação que os materiais e a estrutura apresentam, assim como a função que a edificação desempenha e sua configuração arquitetônica e histórica.

Uma das principais dificuldades no uso desta técnica é a dificuldade de obtenção de conhecimento com relação ao tamanho e a distribuição dos vazios no interior da parede. A presença simultânea de poros de grande e pequeno diâmetro dificulta a escolha da granulometria da calda. Caso exista uma alta presença de materiais soltos no interior dos poros, também pode acarretar numa maior dificuldade de penetração da calda. Ainda, pode haver segregação ou retração da própria calda devido à uma alta taxa de absorção de água dos materiais a serem consolidados, ou mesmo uma reação química entre a calda e o substrato. A penetrabilidade da calda também pode ser comprometida caso: (i) a mistura não apresente fluidez necessária, (ii) as fissuras e aberturas apresentem dimensão inferior a 2-3 mm ou (iii) a pressão de injeção não seja o suficiente. A má penetração da calda pode resultar em resistência e dureza desigual na parede a se restaurar⁹.

A técnica de injeção de caldas aumenta a confiabilidade das edificações, tendo como principais consequências a redução da variabilidade da resistência ao longo da estrutura e o aperfeiçoamento das características mecânicas em geral. A irreversibilidade do processo faz com que seja vital a escolha da calda mais adequada para atingir a máxima performance possível^{11,20}. Outros fatores a se levar em consideração na escolha da calda são as condições da

estrutura e o grau de deterioração²¹. Para isto, além da resistência e propriedades reológicas da calda e da compatibilidade ao substrato, princípios como a ductilidade e durabilidade da estrutura devem ser levados em consideração, uma vez que uma escolha incorreta pode comprometer sua performance num geral⁵.

2.3. Propriedades físicas e mecânicas das caldas de injeção

Para que a intervenção seja satisfatória, as caldas devem satisfazer simultaneamente duas condições principais: (a) apresentar correspondência física e química com os materiais já presentes e (b) apresentar qualidades mecânicas em sintonia com o resto da estrutura²². De acordo com ICOMOS (2004)²³, as características dos materiais em estado fresco e em estado endurecido, assim como sua congruência com os materiais já existentes no local, devem ser plenamente estudadas e conhecidas para se realizar trabalhos de conservação, restauro e reforço estrutural. O conhecimento não deve limitar-se ao primeiro momento, mas também deve englobar efeitos a longo prazo da aplicação da técnica e de durabilidade dos materiais²³. Ainda existem poucas normas que limitem as principais propriedades das caldas, sendo a principal a norma ABNT NBR 7681 (2013)²⁴, referente à caldas de cimento para injeção. Neste estudo, foram adaptadas normas de materiais semelhantes, como de argamassas ou pastas de cimento.

Estudos experimentais sugerem que o sucesso do processo depende principalmente das propriedades da interação entre a calda e os materiais já presentes na obra. Além de apresentar boa injetabilidade e penetrabilidade, os materiais devem garantir o alcance das propriedades mecânicas num período de tempo determinado, assim como garantir a durabilidade ao longo prazo²⁵. Trata-se de um assunto importante, porém que apresenta um número limitado de estudos experimentais disponíveis.

As principais características reológicas que as caldas devem apresentar enquanto material a ser injetado são alta fluidez durante tempo suficiente, alta estabilidade, facilidade de injeção, alta capacidade de penetração em fendas e fissuras de forma uniforme, exsudação mínima e ausência de segregações^{11,26}. Estas propriedades estão entre si relacionadas. A estabilidade, que pode ser definida como a capacidade de permanecer homogênea, depende principalmente do início da segregação e da exsudação (migração de água para a superfície). Estas, que estão fortemente relacionadas com a quantidade de água utilizada na mistura e com a forma, dimensão e densidade das partículas, interferem por fim na fluidez, na viscosidade e na injetabilidade da calda, visto que alteram a homogeneidade da mistura²⁷.

Os requisitos químicos envolvem, entre outros fatores, a dificuldade de ocorrer reações perante agentes agressivos, como a resistência aos agentes climáticos e aos sais solúveis, evitando a formação de produtos expansivos e eflorescências²⁷. É vital que as caldas apresentem alta resistência a expansão, para suportar as pressões que podem ser causadas, por exemplo, pela formação de produtos expansivos, como a etringita. Uma alta estabilidade química também é desejável, uma vez que podem ocorrer reações entre os materiais *in situ* e os injetados e a formação de novos componentes²⁶. A resistência aos sulfatos deve ser alta, para evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências na estrutura e simultaneamente deve ter um teor mínimo de álcalis¹¹.

O tempo de presa deve ser satisfatoriamente longo para permitir a fluidez e injetabilidade da calda durante todo o período de aplicação. Esta característica é influenciada pela temperatura durante a amassadura e aplicação, pela quantidade de calda e pela forma do substrato²⁷. Os principais requisitos físicos são, além de um tempo de início de presa suficiente, baixa retração, insolubilidade em água e estabilidade volumétrica em presença de umidade. O ideal também é que a calda apresente baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que afetem a aderência ao suporte²⁶.

No estado endurecido, as principais propriedades das caldas são as resistências mecânicas à compressão, à flexão e à tração, a rigidez, a variação de volume e a aderência ao substrato. A calda pode, ao endurecer, retrair ou expandir comparado com seu volume original, podendo ter como resultado o acúmulo de tensões no material, levando a formação de fissuras. A variação de volume pode ocorrer pela diferença de volume dos produtos das reações, que pode ser de hidratação, autógena ou por secagem^{27,28}.

As resistências mecânicas expressam a capacidade que o material apresenta de suportar a aplicação de esforços externos de compressão, flexão ou cisalhamento, sem manifestar deformações plásticas. As caldas não devem apresentar resistências mecânicas excessivamente maiores que as da alvenaria original, visto que as dissemelhanças resultam em tensões internas ao material, sendo recomendado que apresentem um módulo de elasticidade semelhante ao da alvenaria a consolidar e que não sejam excessivamente rígidas e sim mais deformáveis²⁸.

A aderência dos materiais ao suporte é uma propriedade determinante no desempenho das caldas de injeção, sendo relacionada com a capacidade para suportar deslocamentos por tração e cisalhamento na superfície de interface com o suporte, sem danos ao material. Para isto, deve garantir uma distribuição homogênea de tensões para minimizar a tendência para a fendilhação. É importante que esta propriedade não seja excessivamente superior à resistência de tração do suporte, pois tal fato pode agravar a degradação da estrutura¹⁴.

A ligação calda/suporte é considerada, do ponto de vista mecânico, o local mais propenso a sofrer ruptura, afetando demasiadamente a resistência e durabilidade da edificação. Testes realizados em provetes comprovaram que as propriedades de aderência não são necessariamente proporcionais à resistência à compressão ou à flexão da calda, devendo ser analisada separadamente. Vintzileou (2006)²⁶ demonstrou que, para a melhoria do desempenho do comportamento da estrutura, a ligação calda/suporte é a propriedade mais importante.

2.4. Durabilidade das caldas de injeção

Durante muito tempo, apenas as questões de desempenho mecânico e/ou econômico eram consideradas na realização de projetos²⁹. Porém, atualmente sabe-se que a durabilidade é de vital importância para questões econômicas, de segurança, estéticas (pois nem sempre é possível recuperar o estado original da estrutura) e ambientais (implicando menos consumos de recursos para a manutenção). A ocorrência de manifestações patológicas pode comprometer a qualidade e capacidade mecânica, estética e funcional do material ou produto³⁰.

A durabilidade é definida como a capacidade de um material ou produto para desempenhar as funções para as quais foi concebida ao longo de toda sua vida útil, mantendo sua capacidade de resistência e sua integridade estrutural, mesmo quando sujeito a fenômenos de degradação físicos, químicos ou mecânicos, sem necessidade imprevista de manutenção ou reparação¹⁴. Esta qualidade é função de diversos aspectos, tanto externos, como a ação do tempo, as condições de exposição e condições ambientais, quanto internos, referente ao tipo e qualidade dos materiais utilizados, a interação entre os componentes e certas propriedades da calda de injeção, como a permeabilidade e a porosidade no estado endurecido³¹.

A durabilidade é uma das características de grande importância para as caldas, pois estas devem desempenhar sua função satisfatoriamente durante a vida útil da estrutura na qual foi aplicada. Sabe-se que o uso de certos materiais assegura melhores características das caldas de injeção, como materiais pozolânicos e cimentos. Os materiais pozolânicos diminuem a quantidade de poros da calda em estado endurecido e conseqüentemente aumentam sua resistência. A resistência química das caldas também pode ser aumentada com a utilização de aceleradores de presa e cimentos com maior resistência aos sulfatos. Não existem normas para se dimensionar a durabilidade de caldas, sendo necessário a comparação de resultados com a literatura²⁵.

Esta qualidade, que envolve diversos outros fatores, é de extrema importância ao se lidar com a aplicação de materiais para reabilitação e reforço de construções. Visto que as caldas de

injeção não são materiais facilmente substituíveis, estas devem apresentar uma resistência à degradação compatível com a alvenaria onde será inserida. Pode-se considerar que a durabilidade é função da estabilidade físico-química e da resistência aos agentes climáticos, aos efeitos da poluição atmosférica, aos agentes químicos, ao desgaste e à erosão pela ação da água e aos movimentos repetidos. A calda também deve necessariamente conferir uma boa aderência ao suporte em condições normais e condições ambientais severas²⁷.

Para se realizar a análise de um projeto de reabilitação de alvenarias antigas, é também necessário levar em consideração o ambiente em que a estrutura será inserida, para que se possam adaptar as características do material a ser utilizado e, assim, otimizar sua eficiência e estabilidade como sistema. A permeabilidade do material é uma das propriedades de maior influência na durabilidade, uma vez que o ataque químico ocorre principalmente através da penetração dos agentes agressivos como íons cloretos, sulfatos e dióxido de carbono³².

Silva Filho (1994)²⁹ destaca a importância da água ao se falar de problemas em estruturas, sendo este um dos principais elementos tanto na formação quanto na deterioração do material. O elemento pode ser proveniente da chuva, da umidade do ar, das fundações, entre outros. Durante o processo de cura e secagem, a água também é fundamental para as reações a ocorrer. Ainda, tem influência sobre a porosidade, permeabilidade, resistência à compressão e durabilidade das caldas no estado endurecido. Quando se trata de ataques químicos com agentes agressivos, a intensidade do ataque é determinada, em especial nos primeiros momentos, do ingresso da água contaminada com os íons sulfato, nitrato ou cloreto²⁹.

O ataque pode ser minimizado, de certa forma, caso o ingresso da água seja dificultado ou eliminado²⁹. Apenas na presença de água as estruturas sofrem uma degradação significativa⁶. Porém, deve-se ter extrema cautela ao se utilizar de técnicas que bloqueiam ou impedem a movimentação da água. Pesquisas apontam que a utilização de hidrófugos de superfície nas paredes laterais da alvenaria podem ter o efeito oposto, causando maior degradação no material. Caso os sais penetrem na estrutura através de capilaridade, pela água no solo, os hidrófugos permitem a saída de água no estado gasoso e podem causar a acumulação dos sais no interior da estrutura, causando maiores fissurações e descolamento da alvenaria³³.

Uma propriedade importante referente à penetração de água na estrutura é a capilaridade. A capilaridade representa a capacidade que o material apresenta de saturar-se em água apenas por forças de sucção. A absorção pode ser medida pela quantidade de água que pode preencher os espaços vazios na estrutura de um material, sob ação de pressão atmosférica normal, apenas por capilaridade²⁹. A absorção capilar também é influenciada pelo grau de saturação do material, pois não há absorção em estruturas saturadas. Um dos fatores mais

importantes é a intercomunicabilidade dos capilares, segundo Helene (1993)³⁴, que concluiu que materiais com baixa relação a/c apresentam capilares de menor diâmetro e menos intercomunicáveis e como consequência, mais impermeáveis.

Dentre as condições ambientais e climáticas severas que danificam e deterioram os edifícios se destacam os ciclos de gelo-degelo e a presença de sais solúveis na alvenaria. Fundamentalmente, a deterioração por ação dos sais solúveis e o ciclo gelo-degelo apresentam mecanismos de ação similares como manifestações patológicas na estrutura, uma vez que ambas expandem em volume ou mudam de forma no interior da alvenaria, introduzindo tensões nos poros dos materiais de construção. No caso de edificações antigas, a cristalização dos sais, devido à dissolução e secagem na água, é um poderoso agente de deterioração, especialmente quando combinada com a ação do gelo. Os ciclos de cristalização e dissolução em água levam a fadiga dos materiais, com consequente desagregação³⁵. O longo período de existência das estruturas contribui para a acumulação de sais, por transporte ou por capilaridade, e umidade com origens diversas, além destas serem geralmente constituídas de paredes com grande espessura, composta por materiais porosos e hidrófilos, facilitando a ascensão de água por capilaridade³³.

Como a resistência aos sais que as caldas de injeção apresentam ainda não tem normas ou dados de referência, as consequências da exposição aos sais devem ser cuidadosamente investigadas antes da aplicação da técnica em estruturas³⁶. As principais consequências da ação dos sais na estrutura são variação do peso da alvenaria, alteração no tamanho dos grãos, alteração no tamanho dos poros e visível deterioração superficial. Estes ciclos de cristalização e dissolução acabam causando a fadiga da estrutura e levando a desagregação dos materiais³⁷. A avaliação dos efeitos dos sais nas estruturas, em laboratório, são geralmente realizadas através da análise da perda de peso das amostras e a alteração na resistência à compressão ou à flexão das amostras²⁷.

Os sais podem apresentar diversas proveniências, como do ambiente atmosférico (em ambientes marítimos), do terreno (carregados pela água que ascende ao interior da estrutura por capilaridade a partir do solo), da poluição atmosférica (podendo ser transportado pela chuva que molha as alvenarias) ou mesmo dos materiais de construção que constituem a alvenaria (argamassas, pedras, cerâmicos, etc.). Os tipos mais comuns são cloretos, sulfatos e nitratos²⁷. Sulfatos estão geralmente presentes em pastas de cimento e tijolos, enquanto cloretos são geralmente provenientes de areias de praias não lavadas. Em alvenarias os sais solúveis mais comuns são o cloreto de sódio e o sulfato de sódio⁴.

A deterioração por ação de sais é um procedimento intrincado envolvendo diversos processos e mecanismos, dificultando a análise de quais os processos que se destacam ou controlam a degradação. Quando as tensões internas superam a resistência à tração do material, ocorre a ruptura da estrutura. A cristalização ocorre até que a tensão alcance certa magnitude, diretamente proporcional ao grau de saturação e inversamente proporcional à solubilidade do sal. O processo é cíclico, sendo necessário geralmente diversos ciclos de cristalização e dissolução para o aparecimento de manifestações patológicas³⁸.

Testes de envelhecimento acelerado são o modo mais rápido e comum de estudar a durabilidade de um material de construção, permitindo o estudo das variáveis que afetam a deterioração da estrutura. A introdução do sal na estrutura pode ser realizada de diversas maneiras, podendo ser por capilaridade, migração iônica, difusão ou ainda inseridos na pasta ainda fresca¹. Estudos indicam que o uso de técnicas de molhagem e secagem são mais eficientes que a imersão contínua dos provetes em soluções de sal³⁹.

Como mencionado anteriormente, são diversas as técnicas, as dimensões de provetes e as composições de caldas pesquisadas. As soluções nas quais os sais foram ensaiados podem apresentar composições em diferentes concentrações. Aqui, destacam-se os sais mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – sulfato de sódio decahidratado), ternardite (Na_2SO_4 – sulfato de sódio) e cloreto de sódio (NaCl). Na Tabela 1, apresentam-se os variados procedimentos e técnicas apresentados em diversos estudos, onde RAS representa resistência aos sais.

Tabela 1 – Estado de conhecimento em estudos relacionados à ação dos sais.

Autores	Provete		Solução	Tipo de ensaio	Ciclos / tempo	Resultados
	Composição	Dimensão (mm)				
Schiavini (2018) ⁴¹	Arg. de cimento	ϕ 50 x 100	Sulfatos	Completamente imersos em solução de sulfato de sódio, cálcio e magnésio	6 meses	Sulfato de magnésio foi o mais danoso
Álvarez <i>et al</i> (2016) ⁴²	Arg. de cimento	Prov. cilíndricos; 40 x 40 x 160	Sulfatos	Completamente imersos em solução de sulfato de sódio anidro	Até 120 dias	Desgaste dos poros, alteração física
Hartshorn <i>et al</i> (2001) ⁴³	Arg. de cimento	40 x 40 x 160	Sulfatos	Imersos em solução de sulfato de magnésio	Até 1 ano	Composição afeta o dano pelos sais
Gaze e Crammond (2000) ⁴⁴	Arg. de cimento, cal e areia	10 x 28 x 34	Sulfatos		Até 197 dias	Alta deterioração
Hartshorn <i>et al</i> (2002) ⁴⁵	Arg. de cimento, cálcario	40 x 40 x 160			365 dias	Dano na principal na superfície

Autores	Proвете		Solução	Tipo de ensaio	Ciclos / tempo	Resultados
	Composição	Dimensão (mm)				
Justnes (2003) ⁴⁶	Arg. com filler calcário	40 x 40 x 160	Sulfatos	Imersos em solução de sulfato de sódio	10 meses	Perda de massa e resistência
Khatib e Wild (1998) ⁴⁷	Arg. de metacaulim	25 x 25 x 285			520 dias	Maior resistência quanto mais metacaulim
Chen <i>et al</i> (2008) ⁴⁸	Arg. de cimento	150 x 150 x 150			425 dias	Importante: relação a/c e concentração da solução
Wijffels e Lubelli (2006) ³⁹	Argamassa e tijolo	50 x 50 x 50	Cloretos	Imersão contínua do provete em cloreto de sódio	-	Eflorescência, fissuras e expansão
Oliveira <i>et al</i> (2007) ¹⁷	Arg. e elementos de alvenaria antiga	40 x 40 x 80	Cloretos	Imersas (24 h). Então, ciclos de 12 h a 90% Hr e 12 h a 60% Hr	Até 50 ciclos	Arg. com baixa adição de cimento pode adquirir maior RAS
			Sulfatos	Imersas (2 horas); secas em estufa a 70°C durante 22 horas	Até 50 ciclos	
Cerulli <i>et al</i> (2003) ⁴⁹	Argamassas e tijolo	100 x 100 x 300	Cloretos	Ciclos de imersão em solução de cloreto de sódio (24 horas) e secagem (48 h) (23°C e 50% Hr)	28 dias	Importante: Absorção de água e concentração do carbonato de cálcio
Lubelli <i>et al</i> (2010) ⁵⁰	Argamassa de cal e cimento	50 x 50 x 20	Cloretos	Imersão em solução; Ciclos T=35°C Hr=20% (16 h) e T=20°C Hr=65% (8 h)	12 semanas	Ferrocianeto de sódio melhorou a RAS
Rodrigues <i>et al</i> (2005); Almeida <i>et al</i> (2007) ^{51,52}	Argamassas de cal aérea e areia	40 x 40 x 80	Cloretos	Imersão em cloreto de sódio (24 h). Ciclos 90% Hr (12 h) e 40% Hr (12 h)	50 ciclos	Melhores resistências mecânicas ou adições adequadas aumentam a RAS
			Sulfatos	Imersão em sulfato de sódio (2 horas); estufa (22 horas)	5 ciclos	
Luso (2012) ²⁷	Caldas	40 x 40 x 80	Cloretos	Imersão em solução de cloreto de sódio (24 h). Então, ciclos de 90% Hr (12 h) e 40% Hr (12 h)	30 ciclos	Aderência mantida praticamente constante, não houve alteração física dos provetes
Luso (2012) ²⁷ ; Kalagri <i>et al</i> (2010) ³⁶	Caldas	40 x 40 x 80 (Luso); 20 x 20 x 20 (Kalagri)	Sulfatos	Ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (6 h) e estufa (18 h)	Até 180 dias	
Akin e Özsan (2010) ⁵³	Rochas	50 x 50 x 50	Sulfatos	Imersos em solução de sulfato (2 h); Secagem T=105°C (24 h)	25 ciclos	Pressão de cristalização foi o mais destrutivo

Autores	Provete		Solução	Tipo de ensaio	Ciclos / tempo	Resultados
	Composição	Dimensão (mm)				
Angeli <i>et al</i> (2007) ⁵⁴	Rochas	40 x 40 x 40	Sulfatos	Imersão (2 h); Secagem a T=105°C (15 h)	30 ciclos	Maior resistência inicial não indica maior RAS
		φ 25 x 45		Imersão (2 h); Secagem a T=105°C (15 h)	15 ciclos	
Tsui <i>et al</i> (2003) ⁵⁵		25 x 25 x 25		Imersos em soluções saturadas de mirabilite 50°C (6 h); secagem T=105°C (24 h)	6 ciclos	Dano maior causado na precipitação de mirabilite

Mais comumente, as pesquisas mencionadas monitoram o dano causado pela ação dos sais através da análise visual dos provetes, da variação de massa ao longo do período de ensaio e a variação de resistência mecânica ao fim de certo número de dias. A inspeção visual e o controle da variação de massa envolvem a verificação da formação de eflorescências, mudanças nas dimensões dos provetes e degradações físicas aparentes. Em alguns casos, o monitoramento foi realizado através da difração de raios-x ou com o microscópio eletrônico de varredura, que consiste no uso de um feixe de elétron para obtenção de uma imagem. Certas pesquisas utilizam também o cálculo da percentagem de cloretos retidos nos provetes, modelos estatísticos ou diferentes análises morfológicas e químicas.

Ao se realizar os ensaios de durabilidade, é necessário levar em consideração que a degradação, quando ocorre naturalmente, está sujeita a ação de diversos outros fatores, como a temperatura ambiente, radiação solar, poluentes do ambiente, umidade relativa, entre outros. Estes fatores não são possíveis de reproduzir facilmente em laboratório. Ademais, a calda aplicada na alvenaria apresenta forma e volume diferente da estudada em provetes de laboratório, podendo alterar o modo, a forma e a velocidade como a degradação ocorre⁴⁰.

A pouca quantidade de normas referentes a ação de sais solúveis especificamente nas caldas de injeção faz com que seja necessário a adaptação de normas existentes para outros materiais, como pedras e argamassas de revestimento. Estes ensaios devem atender um mínimo de requerimentos, incluindo ter um período de realização de ensaios viável e razoável, obter dados tão próximos da realidade quanto seja possível e resultar em dados indicativos sobre a durabilidade do material²⁷.

O dano causado depende do teor de sais, da quantidade de água, do tempo de secagem entre ciclos, das condições de acesso (como a permeabilidade dos materiais) e das condições para seu desenvolvimento. Quando na estrutura, os sais podem precipitar como eflorescência ou criptoflorescências. As eflorescências referem-se à cristalização dos sais na superfície dos

elementos, sendo estas geralmente benignas, podendo ser retiradas por escovagem ou lavagem da alvenaria. Já as criptoflorescências referem-se à cristalização no interior dos poros dos materiais de construção. Estas são muito mais danosas a alvenaria devido ao aumento de volume ou no processo de hidratação, pela mudança de forma dos cristais e aumento de volume de matéria sólida³³.

Uma das maneiras de tratar os materiais contaminados por sais é através da desanilização, que pode ser efetuado através de polpa de papel ou argilas absorventes saturadas de água desionizada, porém este tratamento pode causar diversos danos à alvenaria devido à alta quantidade de água que esta irá absorver. Tal tratamento não garante a eliminação dos sais, uma vez que alguns são relativamente insolúveis em água⁵⁶.

A cristalização dos sais na estrutura pode causar uma perda de coerência entre os materiais, causando perda de massa, mudança no tamanho das partículas, fissurações e deterioração externa visível³⁵. Cada sal tem suas particularidades e diferenças químicas. Os cloretos têm ação patológica basicamente mecânica, por aumento de volume dos sais, ao longo de sua cristalização e dissolução. Para que o comportamento face aos cloretos seja eficaz, é interessante que a estrutura apresente alta resistência mecânica ou uma elevada porometria, para que haja espaço suficiente para a cristalização dos sais. Já os sulfatos apresentam maior interferência química, com reações que formam produtos expansivos, levando à desagregação, perda de capacidade de carga e resistência e consequente ruptura da estrutura³⁷.

2.4.1. Ação específica dos cloretos

Os íons cloreto podem estar presentes na atmosfera do ambiente que envolve uma estrutura ou podem ser inseridos na calda de injeção através dos materiais utilizados na mistura (como materiais de baixa qualidade de regiões litorâneas), da composição química de certos aditivos ou do uso de água contaminada com sais. Também podem ser provenientes dos sais de degelo espalhados nas ruas para remoção de neve. Em ambientes litorâneos agressivos, névoas salinas acabam expondo e permeando grandes quantidades de cloretos sobre a estrutura e os íons então penetram para o interior do material⁵⁷.

A presença de cloretos é muito frequente especialmente em alvenarias antigas situadas em ambientes marítimos, devido à presença de cloreto de sódio, sal extremamente solúvel, com alta capacidade de absorver água do ambiente e com alta mobilidade. Quando em solução, o sal apresenta alta mobilidade, com grande capacidade de penetração em alguns dos materiais. O

sal é particularmente danoso pelos ciclos de umedecimento e secagem, com a consequente variação de volume dos sais²⁷.

Calçada (2004)⁵⁸ divide em quatro regiões para o acesso dos cloretos em locais de atmosfera marinha, sendo estas:

- Região submersa, em que a estrutura está totalmente em contato com a água do mar e, portanto, está saturada. Aqui, acontecem reações de troca iônica entre as substâncias presentes na água e a estrutura;
- Região de flutuação de maré, em que a estrutura se encontra entre o nível mínimo e máximo de água e assim é submetida a ciclos de imersão e secagem pela água do mar;
- Região de respingo, onde a estrutura é atingida diretamente pelos respingos e que também é submetida a ciclos de molhagem e secagem, sendo esta em geral a mais danosa das regiões no quesito cloretos;
- Região de maresia, representando as regiões afetadas pelos sais dissolvidos e suspensos na atmosfera próxima ao mar, arrastadas pelo vento e que acabam por se depositar na estrutura⁵⁸.

Os mecanismos de transporte de íons agressivos e fluidos para o interior da estrutura são a permeabilidade, a sucção capilar, a difusão e a migração, que podem atuar em conjunto ou em sequência durante longos períodos de tempo⁵⁸. Guimarães (2000)⁵⁹ afirma que os íons cloreto só conseguem penetrar na estrutura quando há a presença de água nos poros da alvenaria. Quando a água presente está estanque, a movimentação dos íons se dá por difusão. Em ciclos de molhagem e secagem, os íons se deslocam com a ajuda da força capilar da água.

São diversos os fatores que influenciam na penetração de cloretos na parede, entre estes o tipo de cimento e adições utilizadas, a relação água/cimento, o modo de cura e a idade da estrutura, condições climáticas, maresia, as propriedades da alvenaria (como porosidade) e possíveis fissuras presentes na edificação⁵⁷. Isaia (1995)⁶⁰ concluiu que as adições pozolânicas adicionadas à mistura aumentam a resistência à penetração dos cloretos e sua durabilidade. Isso se deve pelo maior refinamento e tortuosidade dos poros. Hoffmann (2001)⁶¹ afirma que com o decréscimo da relação água/aglomerante a difusão de cloretos diminui em até 70% e, com o aumento do teor de sílica ativa, a difusão diminui em 60%.

O mecanismo que causa danos à alvenaria, provocados pela presença de sais, ainda não foi inequivocamente explicado, principalmente devido à pouca quantidade de pesquisas na área. Os estudos disponíveis sugerem que o cloreto de sódio se deposita em torno das paredes dos

poros, causando pressão e dilatação dos materiais através da expansão ao cristalizar, combinado com a aderência aos poros, causando expansão e fissuração da alvenaria⁶².

Portanto, a teoria mais aceita atualmente é que o efeito danoso dos cloretos é essencialmente mecânico, ainda que ocorram reações químicas, dando-se por aumento de volume dos sais e preenchimento dos poros da estrutura no decorrer dos ciclos de cristalização e dissolução. Uma das maneiras de minimizar o efeito dos cloretos seria através de caldas com boa resistência mecânica ou com dimensões de poros suficientemente grandes para que a variação de volume não cause danos³⁷.

Devido à falta de normatização para a ação dos sais nas caldas, é necessário comparar com resultados na literatura. Tal comparação é dificultada uma vez que as condições de molhagem e secagem, os componentes das caldas e os procedimentos de ensaio variam de estudo para estudo, como visto na Tabela 1.

2.4.2. Ação específica dos sulfatos

O sulfato de sódio é, segundo diversos autores, o sal mais danoso para as alvenarias. Isto se deve, por via de regra, pelo fato de o sal ser menos solúvel e ter menos capacidade de deslocamento que outros sais e, além disso, produzir grande expansão quando hidratado³⁷. A hidratação dos íons sulfato nas estruturas resulta em produtos que causam uma expansão nos poros, que, conseqüentemente, pode acarretar a fissuração da matriz, o lascamento das camadas anteriores ou a perda progressiva de rigidez, resistência e massa. Essas anomalias podem ocorrer simultaneamente. Os sulfatos são espécies químicas encontrados em larga escala na natureza, estando presentes na água do mar, nos esgotos provenientes de indústrias e nas águas subterrâneas. Os maiores acúmulos destes sais são em áreas relativamente planas, onde por vezes, quando há uma alta concentração, pode-se perceber uma camada esbranquiçada na superfície²⁹.

A maior parte dos íons sulfato tem origem a partir da decomposição por hidrólise de sais presentes no ambiente. Os sais podem estar presentes nos solos (alcalinos ou selenitosos) e na água, tanto marítima quanto subterrânea. Quando dissolvidos em água, os sulfatos apresentam grande facilidade de penetração nas estruturas, por dissolução ou por capilaridade. Os locais onde ocorre variação no nível de água contaminada, com conseqüente molhagem e secagem da alvenaria, representam as zonas que geralmente causam maior degradação à estrutura. As mudanças nas condições de saturação podem causar a cristalização cíclica dos sais nos poros, com conseqüente variação de volume²⁹.

A contaminação também pode ser por via aérea. As emissões de dióxido de enxofre por diversas fontes, como combustões (carvão, óleos, etc.), atividades vulcânicas e emissões de usinas e afins, fazem deste um dos poluentes mais comuns presentes na atmosfera. Dependendo do ambiente em que a edificação está inserida, como por exemplo em locais próximos a indústrias, a água da chuva pode carregar quantidades significativas de SO_4^{-2} , NH_4^+ , Ca^{++} , Na^+ , entre outros poluentes⁶³. Ao se combinar com a água presente na atmosfera, os poluentes podem se precipitar sob a forma de chuva ácida sendo então transportado para as fachadas das construções, onde são depositados, podendo provocar a desagregação da estrutura⁶⁴.

Os principais fatores que influenciam a degradação são as condições de exposição, a permeabilidade da parede, o tipo de cimento e a quantidade de água livre disponível. Portanto, é importante considerar tanto os fatores de produção, a qualidade dos materiais utilizados e os fatores ambientais, como a concentração e a temperatura da solução salina⁶⁵. Como mencionado, não há unanimidade entre pesquisadores na razão pela qual a ação dos sulfatos é excessivamente danosa. As principais hipóteses do método de ação dos sulfatos são a partir: i) da mudança de volume e pressão pela expansão e retração causada pelos cristais de etringita, ii) das reações químicas que podem afetar outras substâncias e influenciar o comportamento da estrutura ou ainda pela pressão de hidratação e cristalização causadas pela dissolução dos sais. Destaca-se que o surgimento de etringita não explica completamente todas as manifestações físicas que por vezes ocorrem com o ataque de sulfatos⁶⁶.

Dois dos possíveis mecanismos principais de degradação são a pressão de hidratação e a pressão de cristalização (considerada mais danosa), sendo importante diferenciar qual fenômeno foi o responsável pelo dano observado. Em condições ambientes, o sulfato de sódio apresenta duas fases estáveis, a ternardite, fase anidra, e a mirabilite, forma deca-hidratada. A pressão de hidratação envolve a hidratação da ternardite, com conseqüente formação de mirabilite, causando alta expansão no interior dos poros do material (cerca de 314% em volume)^{55,67}. A hidratação pode causar alterações na forma dos cristais e aumento da matéria sólida²⁷.

A precipitação da mirabilite resulta na pressão de cristalização, que cria tensões de tração e provoca a ruptura dos materiais, devido à mudança de estado, do líquido ao sólido, que tem como conseqüência um aumento do volume sólido. Estas tensões são consideravelmente maiores que as tensões de tração para a maioria dos materiais, o que causa ruptura. A deterioração causada pela pressão de cristalização depende da porosidade da estrutura, do grau de supersaturação que é possível de ser atingido e da resistência à tração que os materiais

apresentam⁵⁵. A pressão de cristalização é baixa em estruturas com poros largos, mas pode ser consideravelmente alta em poros pequenos e completamente saturados⁶⁸.

Diversos estudos concluíram que o principal motivo do sulfato de sódio ser tão danoso é a diferença de solubilidade entre ternadite e mirabilite em temperatura ambiente, pois a maior dissolução de ternadite pode gerar soluções com alta supersaturação de mirabilite. A concentração de mirabilite é suficientemente alta para gerar tensão em excesso, superando a resistência à tração da estrutura. A degradação aumenta rapidamente assim que a quantidade de sal presente é suficiente para prevenir a precipitação desenfreada de mirabilite nos poros⁶⁷.

O ataque por sulfatos é, basicamente, um conjunto de processos químicos e físicos, com a formação de produtos expansivos, que conduzem ultimamente à rotura e desagregação da estrutura³⁷. Alguns estudos apontam que a deterioração causada pelos sulfatos se deve, em grande parte, a formação de etringita e taumasita após o endurecimento da mistura. A reação de sulfatos com aluminatos de cálcio (podendo estes serem derivados de produtos cimentícios), quando em presença de água, forma etringita, composto químico com propriedades expansivas, devido a sua alta capacidade de absorção de água, podendo provocar rotura e fendilhação da construção⁴⁴.

A etringita se mostra danosa a estrutura quando em presença de cal. A taumasita é produto da reação de sulfatos com silicatos de cálcio, na presença de água, processo análogo ao da etringite³⁷. Apesar dos efeitos dos sais nas estruturas ainda não serem completamente conhecidos, diversos autores afirmam que o aluminato de cálcio é o principal responsável pelo desgaste. Assim, a utilização de cimentos com baixos teores em aluminatos (C₃A) é um potencial minimizador das reações degradantes às misturas⁶⁹.

No quesito ataque químico, segundo o boletim 183 do CEB (1992)⁶⁵, o sulfato reage apenas com certos componentes do cimento. O ataque é caracterizado pela reação química entre os íons sulfato e os componentes aluminatos, formando principalmente um mineral denominado etringita e em menor quantidade, gipsita. As reações químicas, com formação de produtos expansivos, que acontecem acabam causando uma expansão na estrutura, conforme demonstrado na Figura 2. Tais ataques podem ser minimizados escolhendo um tipo de cimento impenetrável ao ataque de sulfatos ou impermeabilizando a estrutura⁶⁵.

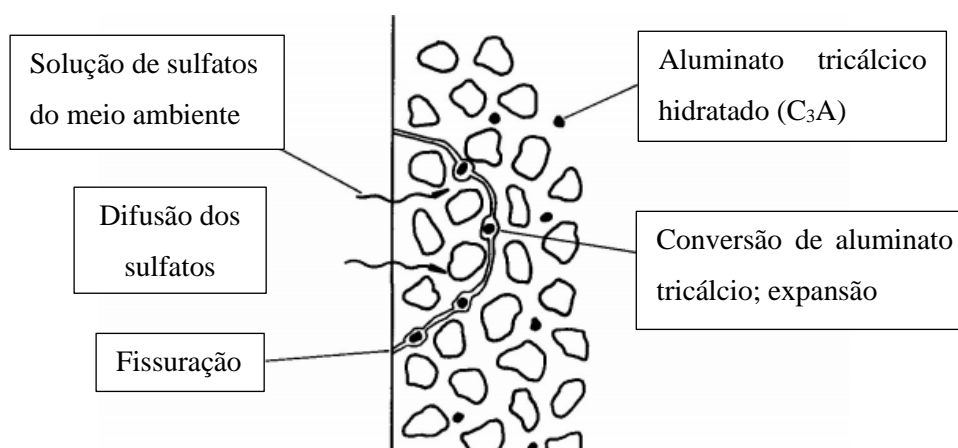


Figura 2 - Representação esquemática do ataque de sulfatos. Fonte: adaptado CEB, 1992

Em particular, argamassas e caldas com base em cimento ou cal (hidráulica ou aérea) e materiais pozolânicos tendem a apresentar com mais intensidade as reações que formam os produtos danosos à estrutura. Uma das alternativas para minimizar o ataque, porém que é de difícil implantação, é a intervenção de modo evitar a penetração da água nas paredes, visto que não é possível a formação de etringita e taumasita sem a presença de água³⁷. Baixas temperaturas favorecem a ocorrência de ambas as reações, em particular de etringita, sendo as condições ótimas quando a umidade relativa é de 90% e a temperatura está entre 0 e 5 °C⁶.

A formação de etringita provoca expansão e fendilhação da estrutura, porém o material mantém-se resistente e coeso, enquanto a formação da taumasita não provoca expansão significativa, porém após seu desenvolvimento, especialmente em presença de água, torna a argamassa ou calda incoerente e sem resistência. Como a etringita forma-se mais rapidamente que a taumasita, a presença de taumasita é em muitos casos precedida pela presença de etringita. No caso de caldas de injeção de cimento, o aumento de volume seguido da formação de etringita pode causar, dependendo da quantidade formada e da resistência à tração da alvenaria, a quase que imediata quebra da construção. Já a formação de taumasita após a consolidação da calda de injeção faz com que a estrutura perca sua resistência devagar e progressivamente, eventualmente resultando no colapso da estrutura⁶.

Mehta (1983)⁷⁰ afirmou que existem diversos tipos de cristais de etringita, com estruturas internas semelhantes, porém que causam diferentes conseqüências no quesito expansão. Para este aspecto, pode-se distinguir entre o tipo 1 e o tipo 2. O tipo 1 consiste em cristais de forma alongada e estreita, que se depositam sem expansão, podendo até ocasionar um aumento da resistência da estrutura. Já o tipo 2 consiste em cristais pequenos e desordenados, comumente encontrado em estruturas altamente deterioradas, possivelmente devido à expansão após a adsorção de água causada pelo estado de microcristalização. O autor

sugere que inicialmente quando há grande disponibilidade de aluminatos provenientes da hidratação do cimento, forma-se a etringita tipo 2. Ao diminuir a quantidade de aluminatos, dá-se a formação de gesso, que por sua vez consome o hidróxido. Com a desestabilização da solução, o pH é alterado e ocorre a expansão, seja pela adsorção de água a etringita 2 ou ao se transformar em etringita 1⁷⁰.

Os métodos de ensaios relacionados à agressividade dos sulfatos apresentam grande variância na literatura. As principais maneiras para introduzir os sais na estrutura são: durante o processo de mistura da argamassa ou calda, através de um contato permanente com a solução salina em sua base (em ambiente com baixa umidade, forçando a ocorrência de capilaridade) ou por ciclos de imersão e secagem do provete em uma solução contaminada por sais de sulfato¹. A concentração dos sais em solução varia de estudo para estudo, por exemplo a norma ASTM C1012 (2013)⁷¹ para argamassas de cimento sugere uma solução de 5% de sulfato de sódio para imersão contínua e a norma NP EN 12370 (2001)⁷² para pedras naturais indica uma concentração de 14% de sulfato de sódio decahidratado.

Existem algumas formas de minimizar ou eliminar o ataque dos sulfatos. Uma opção, que geralmente se mostra inviável, é através da redução da agressividade do meio ambiente, com a diminuição da concentração de íons sulfato. Ainda, pode-se dificultar a entrada dos sais na estrutura, com a utilização de impermeabilizantes, como pinturas ou hidrofugantes, ou isolando-o do ambiente agressivo. A utilização de adições adequadas à calda fresca, para que se consiga menores relações água/cimento e menor porosidade da estrutura, ou a utilização de cimento com baixos teores de aluminato de cálcio também podem ser opções para que a alvenaria seja menos susceptível aos sulfatos²⁹.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada na realização deste trabalho, foi elaborada com o propósito de determinar propriedades de interesse das caldas estudadas, possibilitando uma comparação com normas adaptadas de argamassa e resultados existentes na literatura. Os ensaios realizados foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.

Para o desenvolvimento do trabalho, inicialmente, foram escolhidos três tipos diferentes de calda já caracterizadas reológica, mecânica e fisicamente. As caldas escolhidas foram a calda comercial Fassa Bortolo e as caldas realizadas em laboratório estudadas por Klosowski (2019)⁷³, composta por cal hidráulica e cimento, e Luso (2012)²⁷, composta por cal hidratada, cimento e metacaulim. As formulações e composição detalhada de cada calda estão expostas no tópico 3.2.

3.1. Materiais utilizados nas caldas executadas em laboratório

Nesta seção, serão abordadas as características mais importantes em relação aos materiais utilizados nas caldas executadas em laboratório. Para cada edificação em específico, é necessário que existam objetivos de desempenhos claros e bem delineados, para que a calda possa ser escolhida adequadamente. Estes objetivos são traduzidos em critérios definidos que, no caso das caldas de injeção, ainda são objeto de muito debate e pesquisa. As caldas realizadas em laboratório continham diferentes proporções de cal hidráulica, cal hidratada, cimento Portland, metacaulin, superplastificantes e água. Também foram utilizadas caldas comerciais e rochas de granito amarelo.

3.1.1. Cal hidráulica

A cal hidráulica é um ligante constituído por silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$), aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) e óxido de cálcio (CaO). O material é obtido através do tratamento térmico (na ordem dos 1200°C) da pedra calcária (CaCO_3) com alguma quantidade de argila (de 8 a 20%). Ao ser retirada do forno, uma quantidade certa de água deve ser adicionada a cal, processo denominado de extinção da cal, para eliminar a cal viva e pulverizar a cal hidráulica.

Durante este processo, deve-se tomar cuidado para não adicionar água em quantidade suficiente para provocar a hidratação dos silicatos e aluminatos⁷⁴.

A cal hidráulica é o único ligante que endurece tanto com a presa hidráulica quanto com a presa aérea⁷⁵, característica importante para caldas de injeção, uma vez que devem endurecer no interior da alvenaria, com pouco contato com o ar. O endurecimento da cal hidráulica compreende duas reações. Parte do processo de endurecimento é realizado através da hidratação (fase hidráulica) e parte por carbonatação (fase aérea). A fase hidráulica consiste na hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, podendo ocorrer na água ou no ar. Os silicatos e aluminatos de cálcio oferecem um aumento da resistência final da cal e diminuem o tempo de presa. Conjuntamente, tem-se fase aérea que consiste na recarbonatação da cal, que se dá ao ar e sempre na presença de dióxido de carbono⁷⁴.

Argamassas e caldas de cal hidráulica são muito utilizadas na reabilitação e manutenção de edifícios devido a compatibilidade química e mecânica com substratos antigos, especialmente devido ao fato de apresentarem materiais mais semelhantes aos utilizados anteriormente. Podem ser utilizadas para substituição de rebocos que já não desempenham completamente a função para o qual foram projetados ou para o tratamento de juntas e falhas no interior da estrutura de uma parede, na forma de calda de injeção⁷⁶.

Como as argamassas utilizadas tradicionalmente eram compostas principalmente por cal e areia, verificava-se uma incompatibilidade ao realizar a reabilitação estrutural com argamassas ou caldas de cimento, devido ao fato das argamassas ou caldas de cimento apresentarem maior dureza e rigidez que as de cal e, portanto, menor compatibilidade. Além disso, a Carta de Veneza recomenda o uso de materiais que já foram utilizados na construção original⁷⁷.

3.1.2. Cal hidratada

A cal hidratada, semelhantemente à cal hidráulica, é produto do tratamento térmico do calcário (CaCO_3), que dá origem ao óxido de cálcio (CaO). Este material é estabilizado a partir da adição de água, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), produto denominado cal hidratada. A grande diferença entre a cal hidráulica e a cal hidratada é que a última não apresenta porcentagens significativas de argila, e portanto, apenas adquire presa quando em contato com o CO_2 presente na atmosfera, necessariamente, uma vez que a reação de hidratação não ocorre⁷⁸.

A cal propicia diferentes vantagens quando utilizada em pastas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, percebe-se uma melhor trabalhabilidade nas

pastas com cal, assim como uma maior retenção de água. Já no estado endurecido, apresenta algumas vantagens como uma alta capacidade de absorver deformações, um baixo módulo de deformação e baixa retração, o que geralmente as fazem mais compatíveis com estruturas antigas que pastas de cimento. Apresenta também maior compatibilidade devido ao fato de a cal ter sido um material já muito utilizado em construções antigas⁷⁹.

A presa faz-se em duas etapas. Inicialmente, tem-se a evaporação da umidade em excesso, que endurece a cal, porém ainda a mantém relativamente maleável. A segunda fase é a recarbonatação, reação química lenta que ocorre quando em contato com o ar e na presença de dióxido de carbono. Especialmente nas injeções para reabilitação de obras, a falta de dióxido de carbono no interior das paredes dificulta ainda mais a presa da calda, fazendo com que o endurecimento ocorra de forma extremamente lenta⁷⁴.

3.1.3. Cimento Portland branco

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 12989 (1993)⁸⁰, os cimentos Portland brancos são aglomerantes hidráulicos, constituídos de clínquer Portland branco, sulfato de cálcio e certas adições para que estes atinjam as especificações desejadas, como materiais pozolânicos, carbonato de cálcio e magnésio. Dividido em cimento Portland branco estrutural e não-estrutural, o cimento deve atingir certas classes de resistência, de determinações químicas e de brancura⁸⁰.

O cimento branco apresenta baixos teores de óxido de ferro (menos de 3% em massa), assim como baixos teores de elementos que possam afetar a cor final da mistura, como manganês, cromo e titânio. Outro fator de grande influência na pasta é a finura do cimento⁸¹. O cimento Portland branco apresenta maior finura e conseqüentemente maior área superficial, o que acaba influenciando na resistência inicial, na velocidade de hidratação, na trabalhabilidade da pasta e na redução da exsudação⁵⁷.

Algumas etapas no processo de fabrico do cimento branco são realizadas com um cuidado maior do que no fabrico do cimento Portland normal, para garantir que a cor se mantenha de acordo com o desejado. As matérias primas a serem utilizadas, como argila e gesso, devem conter menor teor de impurezas, para garantir que a concentração de óxidos de ferro e manganês seja baixa no produto. No moinho de cru, ao invés de bolas de aço são utilizadas bolas de níquel e molibdênio e os moinhos são revestidos com pedra ou cerâmica. Outro cuidado é evitar o uso de carvão durante o processo de cozimento e queima, dando preferência a óleos e gases⁸².

O endurecimento do cimento se dá principalmente pelo silicato de cálcio tricálcico (C_3S). A reação do C_3S com a água libera hidróxido de cálcio, que em partes fica em solução e em partes cristaliza, dando origem ao bisilicato tricálcico hidratado. Outro componente presente é o silicato bicálcico (C_2S), que reage com a água também liberando hidróxido de cálcio e transformando-se em um silicato hidratado com maior estabilidade. Também é importante considerar o aluminato tricálcico (C_3A), que influencia no comportamento reológico nas horas iniciais de hidratação do cimento⁸³.

Com relação as suas características mecânicas, atualmente as argamassas e caldas realizadas com cimento branco apresentam um desempenho semelhante aos cimentos convencionais. Por exemplo, em testes realizados por Hamad (1995)⁸⁴, foi comprovado que quando foi utilizado cimento branco, os provetes apresentavam valores de resistência à compressão e à tração superiores aos com cimento comum. Rizzon (2006)⁵⁷ verificou que os valores de resistência à compressão utilizando cimento Portland branco foram superiores a cimentos pozolânicos e inferiores a cimentos de alta resistência inicial.

Quanto as características físicas, o cimento Portland branco apresenta duas diferenças básicas com os cimentos convencionais: a finura e o tempo de pega. A brancura do cimento está relacionada com uma maior superfície específica, portanto, os cimentos brancos são mais finos que os convencionais, e conseqüentemente, tornam-se mais reativos com a água⁸⁵. A finura tem grande influência no aumento da resistência a baixas idades, da impermeabilidade e coesão da estrutura e na diminuição da exsudação e trabalhabilidade⁸⁶.

A maior vantagem da utilização do cimento Portland branco estrutural está relacionada à estética, facilitando especialmente para manter a constância da cor das paredes já construídas, em casos de reabilitação das paredes⁸¹. Sabe-se, porém, que o uso de apenas caldas de cimento não é totalmente compatível com os materiais originais. Isto deve-se ao fato de caldas de cimento apresentarem maior dureza que as misturas de cal originalmente utilizadas. Também é importante notar que, utilizando apenas cimento, as caldas apresentam uma menor fluidez e, portanto, maior dificuldade no momento da injeção. É preferível utilizar misturas de cal e cimento, que maximizem as qualidades que cada um destes materiais apresentam⁵.

3.1.4. Metacaulim

São considerados materiais pozolânicos todos os materiais aluminatos ou siliciosos que, em presença de água, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio produzidos durante a hidratação do cimento e formam produtos com características cimentícias. As pozolanas são

adições que podem influenciar na durabilidade, na resistência das pastas, no tempo de presa e no aumento da temperatura durante o processo químico. Altos teores de hidróxido de cálcio nas pastas são associados a baixa durabilidade da construção, apresentando grande influência também na resistência aos sais, em particular aos sulfatos⁸⁷.

O metacaulim é um material pozolânico com alta superfície específica, utilizado na construção civil como adição em argamassas e caldas. Em teoria, o caulim apresenta uma composição de SiO_2 , Al_2O_3 e H_2O , cujas proporções são dependentes das características mineralógicas da jazida e de sua pureza⁸⁸. O material não possui normas que o classifiquem por tipo ou classe, portanto suas propriedades variam muito de acordo com o fornecedor, processo de fabrico e origem. Apesar disso, traz vantagens com relação à compatibilidade física e química das caldas²⁷.

A produção do metacaulim consiste em 5 etapas: prospecção de argila caulínica, beneficiamento e eliminação de impurezas, secagem, calcinação e moagem com seleção granulométrica. Para garantir a alta qualidade do produto, todos os processos devem ser devidamente controlados, em especial a calcinação, que, se realizada de maneira incorreta, pode levar à perda de reatividade do produto final⁸⁸.

É importante considerar que a elevada área superficial do metacaulim reduz também a trabalhabilidade das pastas, sendo talvez necessário um aumento da quantidade de água necessária ou o uso de superplastificantes. Uma das vantagens da adição do metacaulim é uma melhoria na performance das pastas ao ser exposta a água do mar e soluções ácidas, com menor taxa de difusão de íons cloreto no interior. Alguns estudos afirmam que a substituição de 30% do cimento por metacaulim resulta na melhor performance, onde todo o hidróxido de cálcio é consumido⁸⁹. Em argamassas, Khatib e Wild (1998)⁴⁷ encontraram que a resistência aos sulfatos aumenta com a substituição de cimento por metacaulim, até 25% de substituição.

3.1.5. Superplastificantes

Os superplastificantes são aditivos químicos utilizados em concretos, argamassas e caldas com o objetivo de aumentar a plasticidade e consequentemente a trabalhabilidade da pasta mantendo constante a razão A/C ou então reduzir a quantidade de água adicionada a mistura mantendo a trabalhabilidade constante. Seu funcionamento é através da dispersão das partículas de cimento durante o amassamento e sua eficiência é altamente influenciada pela composição química dos cimentos e suas adições. Existem várias classificações para os superplastificantes. Estes podem ser classificados de acordo com o respectivo composto

químico base, sendo as principais hoje de polímeros de naftaleno sulfonado, de sulfonato de melamina e formaldeído, os copolímeros vinílicos e de carboxilatos modificados⁹⁰.

Uma mistura adequada deve apresentar uma boa trabalhabilidade, especialmente no caso de caldas de injeção, sem excesso de segregação ou exsudação. O uso adequado do superplastificante garante efeitos positivos tanto no material em estado fresco quanto endurecido. No estado fresco, percebe-se, além do aumento da fluidez, injetabilidade e trabalhabilidade, uma redução da retração, da impermeabilidade e da exsudação devido à menor relação água/cimento. Os aditivos também podem acelerar ou reduzir o tempo de presa e a progressão do endurecimento. Já no estado endurecido, garante maior resistência à compressão e durabilidade⁹¹. A durabilidade aumenta uma vez que a incorporação de adições reduz a permeabilidade em idades avançadas e pode aumentar a resistência aos ataques químicos⁹².

Convém sublinhar que, apesar de os aditivos nem sempre apresentarem preços baixos, seus benefícios econômicos podem ser superiores aos custos. Esses benefícios podem ser vistos imediatamente, como por exemplo na menor quantidade de cimento a ser utilizada, no menor custo de mão de obra especializada para realizar a calda adequadamente e ao longo prazo, nos menores gastos com manutenção e reparo³². O aditivo utilizado nesta investigação é um superplastificante de terceira geração, ou seja, baseado em polímeros acrílicos.

3.1.6. Caldas comerciais

As caldas comerciais são produtos prontos para mistura, que têm como vantagens principais a facilidade de preparação, o melhor controle de qualidade, a maior uniformidade nas propriedades e um melhor controle de fluxo de calda. Além do mais, devido ao fato de as caldas comerciais serem formuladas especificamente com o propósito de serem utilizadas na reparação e reforço de alvenarias antigas, é uma das maneiras de superar as dificuldades que precedem a formulação de caldas em laboratório. A preparação das caldas implica apenas a adição de água, seguida de homogeneização com o auxílio de um equipamento de mistura. Sua composição pode variar e as especificações técnicas são por vezes limitadas, necessitando de ensaios realizados em laboratório⁹³.

Uma das desvantagens desta calda é o preço elevado e a dificuldade de ajuste de suas propriedades, uma vez que as caldas comerciais são pré-dosadas²⁷. Além disso, na ficha técnica estão dispostas informações diferenciadas, dificultando a comparação direta entre caldas. A escolha da calda se baseia na experiência prévia, na facilidade e disponibilidade de aquisição

dos produtos e em questões econômicas. A resistência à compressão das caldas comerciais geralmente apresenta valores entre 10 MPa e 15 MPa⁹⁴.

3.1.7. Rochas

Caracterizadas pela boa durabilidade e resistência à agressão do meio, as rochas tendem a aumentar o valor das obras em que são aplicadas. O estudo aprofundado dos materiais tanto em termos mecânicos quanto em termos químicos é de vital importância para entender o comportamento futuro da construção, assim como sua interação com os componentes que o envolvem. Neste trabalho, serão consideradas as interações entre calda e a rocha granito.

Os granitos são comercialmente rochas ígneas, formadas após a solidificação do magma vulcânico. São rochas poliminerálicas compostas por dois ou mais minerais. Essencialmente, o granito é composto por quartzo ou sílica, feldspato alcalino e plagioclásio, em diferentes proporções, por vezes com a hornblenda ou biotita presentes⁹⁵. Sua resistência ao desgaste é proporcional à dureza dos minerais que as compõe, portanto, quanto maior a quantidade de quartzo presente, menor o seu desgaste⁹⁶.

No Norte de Portugal, o granito é comumente encontrado e, assim, foi muito utilizado em habitações e monumentos históricos, sendo nesta região a maioria das construções antigas em alvenaria de rocha granito. Tipicamente, eram construídas alvenarias de três panos com juntas argamassadas, que, com o passar do tempo, podem acabar se deteriorando e fragilizando a integridade da estrutura, com a perda de aderência, de resistência mecânica e da interação entre panos. A técnica de injeção de caldas é conhecidamente eficaz para este tipo de alvenaria⁸.

3.2. Formulação e principais características das caldas

Como um dos objetivos principais desta investigação é a avaliação do comportamento das caldas perante ensaios de resistência aos sais, inicialmente, foi necessário selecionar caldas já previamente caracterizadas com relação ao seu comportamento reológico, mecânico e físico em situações normais. Nas composições das caldas em laboratório, priorizou-se a escolha de caldas que tem como material de base a cal, para se assegurar a compatibilidade com o meio a injetar.

Pretende-se, com esta pesquisa, realizar também uma comparação direta entre as caldas elaboradas em laboratório e a calda comercial. Para isso, uma das caldas escolhidas foi a calda comercial “Legante Per Iniezioni 790”, produto da Fassa Bortolo. O modo de preparo para a

calda foi realizado de acordo com a especificação do fabricante. A ficha técnica especifica o preparo do produto adicionando a dosagem de água entre o intervalo de 35% a 37% do peso da parte sólida da calda.

Com relação as caldas executadas em laboratório, foram escolhidas as caldas de melhor desempenho conforme estudadas por Luso (2012)²⁷ e Klosowski (2019)⁷³. A calda estudada por Luso (2012)²⁷ é composta por 35% de cal hidratada branca tipo CL80-S, 30% de cimento Portland branco de calcário tipo CEMII 32,5R e 35% de metacaulino branco da marca Optipozz-sc. Sobre o peso total destes compostos sólidos, adiciona-se 3,33% de superplastificante Dynamon SR1 e 60% de água. A formulação foi encontrada por um processo empírico, sendo realizadas diversas caldas para comparação e teste.

Para Klosowski (2019)⁷³, a calda com melhor desempenho era composta por 70% de cal hidráulica do tipo HL5 e 30% de cimento Portland branco de calcário tipo CEMII 32,5R. Sobre o peso total dos compostos sólidos, adiciona-se 0,3% de superplastificante Dynamon SR1 e 50% de água, valor frequentemente encontrado na literatura como o mínimo para se obter um produto injetável.

Neste trabalho, a calda comercial Fassa Bortolo foi denominada como FB, a calda estudada por Klosowski (2019)⁷³ contendo cal hidráulica e cimento como CC e a última, estudada por Luso (2012)²⁷ contendo cal hidratada, cimento e metacaulino de CCM. As composições estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição das caldas estudadas.

Material	Porcentagem presente nas composições (%)		
	FB	CCM	CC
Cal hidráulica (HL5)	-	-	70
Cimento Portland branco (CEM II/B-L 32,5R)	-	30	30
Cal hidratada	-	35	-
Metacaulino	-	35	-
Superplastificante (Dynamon SR1)	-	3,33	0,3
Legante Per Iniezioni 790	100	-	-
Água/aglomerante	37	60	50

Em ambos estudos, as caldas apresentaram bons resultados relativamente às suas características em estado fresco, estado endurecido e na interação junto ao substrato granito. As características estudadas no estado endurecido e na interação com o substrato foram as mesmas desta pesquisa. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos resultados apresentados pelas caldas em estudo.

	Luso (2012) ²⁷	Klosowski (2019) ⁷³	
	CCM	CC	FB
Características em estado fresco			
Fluidez 20°C (s)	45 (t = 60 min)	29,84	31,00
Exsudação (3 horas) (%)	0,5	1,03	2,06
Características em estado endurecido			
Varição de volume (3 horas) (%)	-0,5	0	0
Resistência à flexão 90 dias (MPa)	± 4,8	3,09	4,63
Resistência à compressão 90 dias (MPa)	± 27	16,11	17,07
Características vinculadas à interação pedra e calda			
Tempo de injetabilidade (s)	109	153,75	81,68
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	13,9	8,2	9,2
Aderência 90 dias (MPa)	0,87	0,50	0,66
Tipo de ruptura	Pedra	Interface	Interface

As caldas apresentaram resultados relativamente similares. A fluidez da calda CCM foi testada após 60 minutos da amassadura, apresentando resultado ligeiramente acima das caldas estudadas por Klosowski (2019)⁷³. A exsudação e a variação de volume após 3 horas da moldagem foram extremamente baixas, representando caldas com boas características reológicas. A injetabilidade em cilindros sob pressão apresentou resultados variados, com a calda FB apresentando menores tempos de injeção e a calda CC com maiores tempos e possivelmente menor fluidez.

A resistência à flexão apresentou valores da mesma ordem de grandeza para todas as caldas, entre 3 e 5 MPa. Já os resultados da resistência à compressão foram os que apresentaram maior amplitude entre si, tanto envolvendo apenas a calda quanto na interação com o substrato. Os valores da calda CCM se mostram muito superiores as demais, para ambos os resultados. Nos provetes prismáticos, a calda CCM apresentou 10 MPa acima das outras, enquanto na interação com o granito o aumento foi de quase 5 MPa. No quesito aderência, os resultados da calda CCM também foram relativamente superiores, quase 0,3 MPa acima das demais.

3.3. Execução das caldas

O modo e o tempo de mistura, a ordem de introdução dos materiais, o tipo de misturadora (capacidade e velocidade de rotação), a temperatura, a umidade no local de preparação influenciam o resultado e as propriedades da calda mesmo em nível reológico e endurecido. Para evitar possíveis interferências devido à variação de temperatura ambiente e, conseqüentemente da água, utilizou-se o equipamento Matest B052-01 para manter a água a ser

utilizada na mistura na temperatura de 20 °C, sendo esta confirmada com o auxílio de um termômetro de precisão de 0,1 °C.

Com o objetivo de manter as homogeneizações das diversas caldas o mais semelhante possível, foi definido um processo. Inicialmente, todos os recipientes e os equipamentos a serem utilizados na homogeneização foram umedecidos, para assim evitar a perda de água durante a mistura. Os materiais a serem utilizados foram separados e pesados com o auxílio de uma balança com precisão de 0,1 g, modelo 30000D SCS da marca Precisa. Em seguida, adicionou-se o superplastificante à água em uma proveta a parte, para todas as caldas a exceção da calda comercial, que não necessitava nenhuma adição.

Em caldas à base de cal, para facilitar o início da amassadura e garantir maior homogeneidade das caldas, o ideal é adicionar parte da solução aquosa antes dos materiais sólidos²⁷. Num recipiente plástico, adicionou-se, na seguinte ordem, metade da solução água+superplastificante, seguido dos aglomerantes e aditivos sólidos. Então o restante da solução foi adicionado. As caldas foram misturadas em um recipiente com capacidade de 10 L.

As misturas foram homogeneizadas com o auxílio de um misturador de argamassas elétrico modelo Rubimix 10 da marca Rubi, com potência de 950 Watts, ao qual foi acoplada uma vareta misturadora da mesma marca (Figura 3a). A homogeneização foi realizada durante 10 minutos, sendo que, durante os 2 minutos iniciais, foi mantida apenas metade da velocidade total para evitar perda de material e garantir uma mistura mais eficiente (Figura 3b).

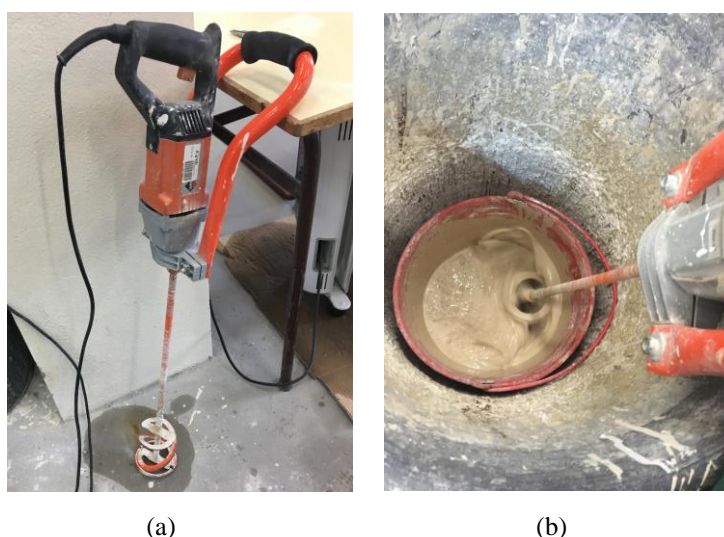


Figura 3 – (a) misturador de argamassas elétrico; (b) processo de homogeneização da calda

Passados 2 minutos de mistura, com o auxílio de uma espátula, a lateral e o fundo do recipiente foram raspados de modo a eliminar possíveis depósitos de material. Nos 8 minutos

restantes, foi utilizada a velocidade máxima do equipamento, sendo esta equivalente a 700 rotações por minuto. Durante todo este processo, o misturador foi movimentado circularmente em sentido horário, garantindo uma mistura mais homogênea. Por fim, a calda restante foi passada por uma peneira de abertura de 2 milímetros para garantir uma calda homogênea e separar possíveis materiais de maiores dimensões.

3.4. Procedimento e preparação do trabalho

Para facilitar o entendimento desta pesquisa, os ensaios foram divididos em 3 principais fases, baseados principalmente no tipo de provete a ser ensaiado. Em todas as fases, foram realizados ensaios de certas propriedades mecânicas e de durabilidade. Na primeira fase, foram realizados ensaios em provetes prismáticos para todas as caldas. Na segunda fase, foram realizados provetes cilíndricos de injeção e na terceira fase foram realizados provetes para o ensaio de aderência, ambos compostos pela calda CCM e granito amarelo. Os provetes realizados para o ensaio de aderência foram denominados nesta pesquisa como provetes com base retangular, de modo a facilitar sua referência.

3.4.1. Execução dos provetes prismáticos compostos por calda

A moldagem dos provetes prismáticos foi realizada seguindo procedimentos adaptados da norma ABNT NBR 5738 (2015)⁹⁷, referente aos procedimentos adequados para moldagem e cura de corpos de prova prismáticos de concreto e NP EN 196-1 (2017)⁹⁸, referente a métodos de teste para argamassas. A adaptação é necessária devido ao fato de as caldas apresentarem uma viscosidade menor que o concreto e argamassas e, portanto, maior fluidez. Na prática, percebeu-se que não havia necessidade de realizar o processo de adensamento, uma vez que a fluidez da calda permitia que esta se adensasse naturalmente.

Foram utilizadas formas metálicas com dimensões 40 x 40 x 160 milímetros, previamente limpas e untadas com uma fina camada de óleo desmoldante. Estas foram apoiadas em uma superfície lisa, horizontal e distante de possíveis perturbações que pudessem alterar as propriedades ou forma das caldas durante a moldagem. Garantiu-se que o preenchimento fosse realizado em apenas uma camada e até que formassem ângulos de contato com a forma. A moldagem está representada na Figura 4.

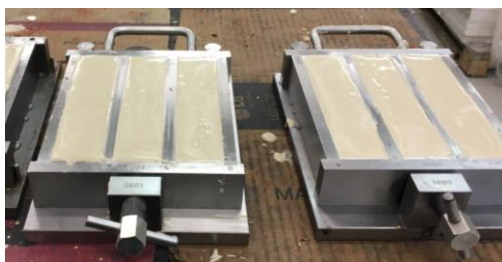


Figura 4 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos

O desmolde foi realizado após 48 horas do início do processo. Os provetes foram então separados, numerados e pesados, tendo em seguida suas dimensões tomadas com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetro. Todas as medições foram realizadas três vezes, sendo utilizada a média entre estas. Para a determinação da massa dos provetes, foi utilizada uma balança de precisão de 0,01 g. Em seguida, os provetes foram armazenados em câmara úmida, seguindo a norma ABNT NBR 9479 (2006)⁹⁹, a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%, até a realização dos ensaios.

3.4.2. Fase 1: Provetes prismáticos compostos por calda

Na primeira fase, o objetivo principal foi selecionar três diferentes caldas e analisar suas propriedades e o comportamento tanto em situações normais quanto perante a ação de sais, comparando-as entre si e com os resultados presentes na literatura.

Para cada calda, foram moldados 60 provetes prismáticos compostos apenas de calda, com dimensão $40 \times 40 \times 160$ mm³. Quinze provetes foram separados para ensaios de resistência à flexão aos 28 e aos 120 dias e os 30 restantes foram ensaiados aos 90 dias. Foi ensaiado um maior número de provetes aos 90 dias, pois a estes em seguida foram realizados os ensaios de durabilidade. Após o tempo de cura determinado, os provetes foram ensaiados para obter sua resistência mecânica à flexão, resultando em meio provetes, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Provetes prismáticos e resultantes meio provetes.

Aos 28 dias		Aos 90 dias		Aos 120 dias	
Resist. flexão	15	Resist. flexão	30	Resist. flexão	15
Meio provetes	30	Meio provetes	60	Meio provetes	30

Os meio provetes então foram submetidos a ensaios mecânicos e de durabilidade. Às amostras de 28 e 120 dias, foi apenas realizado ensaio de resistência à compressão a 16 provetes, para a caracterização das caldas, sendo os restantes descartados. Dos meio provetes resultantes após o período de cura de 90 dias, 17 foram destinados ao ensaio de resistência aos cloretos, 17

ao ensaio de resistência aos sulfatos, 10 ao ensaio de capilaridade e 16 ao ensaio de resistência mecânica à compressão (aos 90 dias). Essa distribuição está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Destinação dos meio provetes.

Aos 28 dias		Aos 90 dias		Aos 120 dias	
Resist. cloretos	-	Resist. cloretos	17	Resist. cloretos	-
Resist. sulfatos	-	Resist. sulfatos	17	Resist. sulfatos	-
Resist. comp.	16	Resist. comp.	16	Resist. comp.	16
Capilaridade	-	Capilaridade	10	Capilaridade	-
Total	16	Total	60	Total	16

Os ensaios de durabilidade aos sais têm duração total de 30 dias, período após o qual as amostras foram ensaiadas com relação a resistência à compressão. Ademais, para melhor compreender os efeitos dos sais, um grupo de provetes, usados previamente no ensaio de capilaridade, sofreram procedimentos semelhantes aos do ensaio de sulfatos, porém utilizando apenas água destilada. Estes, moldados no mesmo dia dos demais e com a mesma amassadura, curados em câmara úmida, foram ensaiados junto aos de resistências aos sais, porém em menor quantidade. Com o objetivo de avaliar a degradação das propriedades mecânicas das caldas em diferentes períodos do ensaio, foram escolhidos o 10º, 20º e 30º ciclos para a realização do ensaio de compressão (Tabela 6).

Tabela 6 – Quantidade de provetes prismáticos ensaiados à compressão ao fim de n ciclos.

Ciclos	Provetes para ensaio a compressão		
	Cloretos	Sulfatos	Água destilada
Após 10 ciclos	5	5	3
Após 20 ciclos	6	6	3
Após 30 ciclos	6	6	4

As amostras foram secas e tiveram suas dimensões e peso mensurado antes da determinação do valor médio de tensão de ruptura. O esquema do procedimento para os provetes após 90 dias de cura está representado na Figura 5.

Após a análise dos resultados desta primeira fase para as três caldas, foi escolhida a calda de pior desempenho com relação à durabilidade, representando a pior situação possível, para a realização das próximas fases.

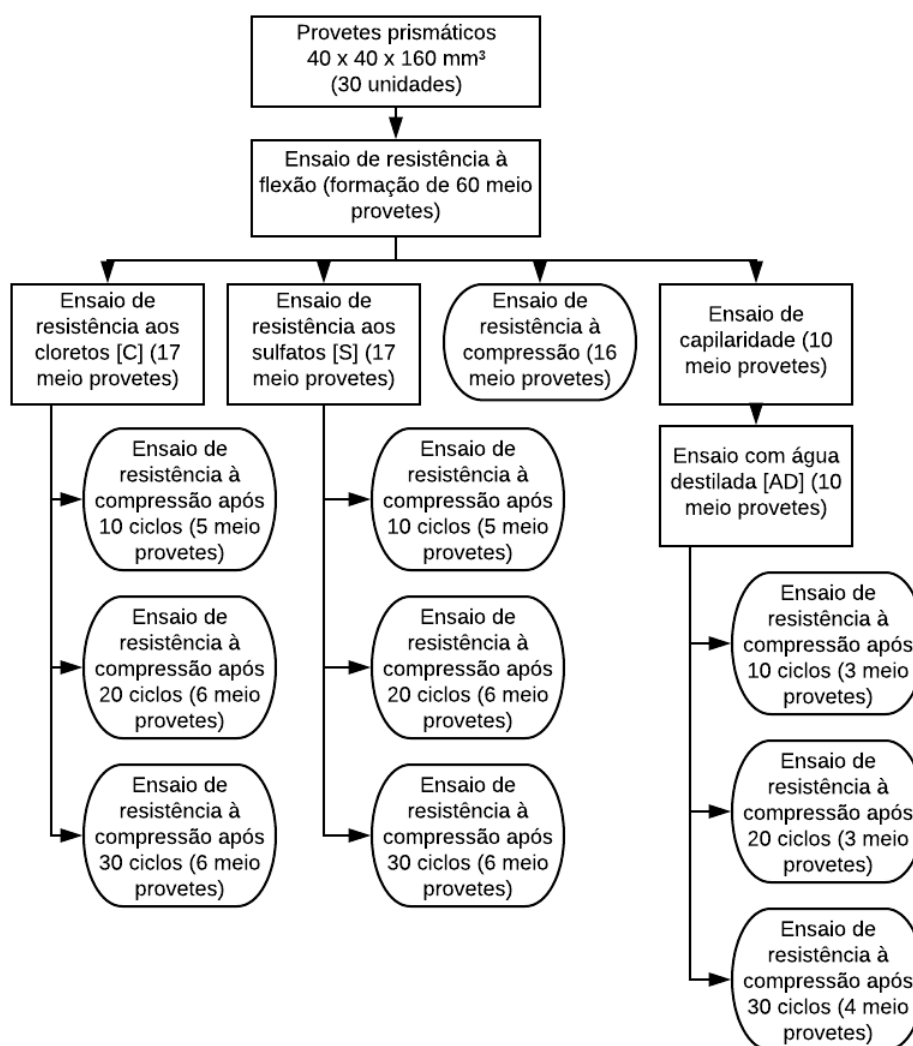


Figura 5 – Destinação dos provetes após a cura de 90 dias

3.4.3. Execução dos provetes cilíndricos de injeção

Com o objetivo de observar o comportamento das caldas junto ao substrato e verificar a capacidade de melhoria das características mecânicas da estrutura que as caldas apresentam, utilizou-se britas de granito amarelo, um tipo de rocha comumente encontrado em construções antigas em Portugal. Inicialmente, as pedras foram britadas com o auxílio de um britador de mandíbulas mecânico e peneiradas utilizando malhas de abertura 4,5 mm, 8 mm, 10 mm, 16 mm e 20 mm. Para a mistura atingir um índice de volume de vazios de aproximadamente 50,3%, misturou-se conforme as proporções apresentadas na Tabela 7.

Após a mistura, o agregado foi homogeneizado, lavado e separado em bandejas através de quarteadores, que dividem as amostras em duas partes de maneira uniforme. Tal amostra foi imersa em água para sua saturação até momentos antes da moldagem. Imediatamente antes da

moldagem, as britas foram secas com um pano para atingir o estado saturado com superfície seca.

Tabela 7 – Proporções utilizadas para a mistura de britas final

Granulometria inicial (mm)	Granulometria final (mm)	Proporção utilizada
4,5	8	22,58%
8	10	12,90%
10	16	38,71%
16	20	25,81%

Os moldes dos provetes cilíndricos de injeção eram compostos por cilindros com altura de 300 milímetros e diâmetro de 150 milímetros, cada um com duas tampas móveis e quatro varetas metálicas com guarnições elásticas para assegurar a estanqueidade do sistema. As tampas superiores dos moldes apresentavam cinco orifícios, um localizado no centro com 10 mm de diâmetro e quatro simetricamente espalhados com diâmetro 6 mm, de modo a facilitar a saída de ar durante o preenchimento dos cilindros. As tampas inferiores apresentavam apenas um orifício ao centro de 10 mm de diâmetro por onde a calda é injetada.

Para a moldagem, os cilindros foram inicialmente lubrificados com uma camada de óleo desmoldante e preenchidos com as britas graduadas e saturadas. Tomou-se o cuidado de posicionar algumas britas de granito no orifício de entrada da calda protegendo-o, para evitar um possível entupimento na injeção. Estas foram então compactadas conforme a norma ABNT NBR 45 (2006)¹⁰⁰, tomando o cuidado de não entupir ou bloquear o orifício de entrada da calda. Antes do fechamento do cilindro, foi posicionado um tecido perfurado entre a tampa superior e a brita de modo a dificultar a passagem da calda pelos orifícios.

Após sua preparação conforme o item 3.3, a calda foi despejada no interior de uma panela de injeção com a pressão configurada para 1,5 atmosfera, controlada com o auxílio de um manômetro acoplado na panela de injeção. Para dar início a injeção, o equipamento foi conectado ao orifício inferior dos cilindros como auxílio de uma mangueira, conforme a Figura 6a e a injeção foi iniciada. O processo de moldagem do provete é mostrado na Figura 6b e o cilindro logo após a injeção está representado na Figura 6c.

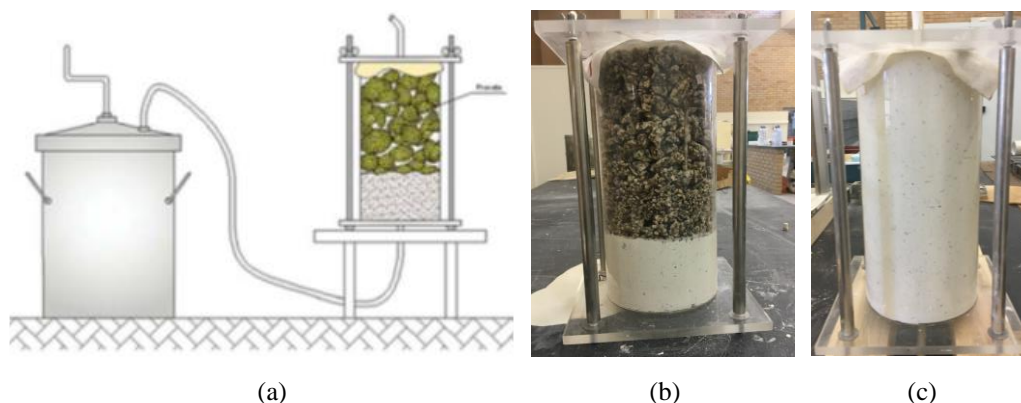


Figura 6 – (a) Esquema do processo de enchimento dos cilindros de injeção. Fonte: LUSO (2012); (b) Processo de moldagem do provete; (c) molde preenchido.

Durante o processo, foi registrado o tempo referente ao enchimento de 25%, 50%, 75% e 100% do cilindro. O procedimento foi realizado quatro vezes com corpos de prova compostos pela calda CCM e granito amarelo. Os resultados foram analisados e comparados ao tempo encontrado na literatura. Dadas 48 horas a partir da moldagem, as tampas foram retiradas e os cilindros mantidos em câmara úmida. Passados 7 dias, estes foram desmoldados e retornados à câmara úmida onde permaneceram durante o tempo de cura de 90 dias, até a realização dos ensaios de durabilidade.

3.4.4. Fase 2: Provetes cilíndricos de injeção

Na segunda fase, foram moldados provetes cilíndricos de injeção apenas para a calda de pior desempenho com relação à durabilidade, devido à limitação de materiais e tempo. Foi selecionada a calda de pior desempenho para testar e verificar os efeitos mais danosos que os sais podem causar nas caldas e, de certo modo, analisar o pior cenário possível.

Foram realizados 4 cilindros para análise, mantidos em câmara úmida por um período de cura de 90 dias. Após a cura, 2 provetes foram ensaiados em ciclos de imersão e secagem em solução de sulfatos e os 2 restantes sofreram processos idênticos, porém apenas em água destilada. Todos os provetes foram ensaiados para resistência à compressão após o 30º ciclo, conforme a Tabela 8 e na Figura 7.

Tabela 8 – Quantidade de provetes cilíndricos ensaiados à compressão ao fim de n ciclos.

Proвете	Ao 30º ciclo
Após ensaios em água destilada	2
Após ensaios em cloretos	2

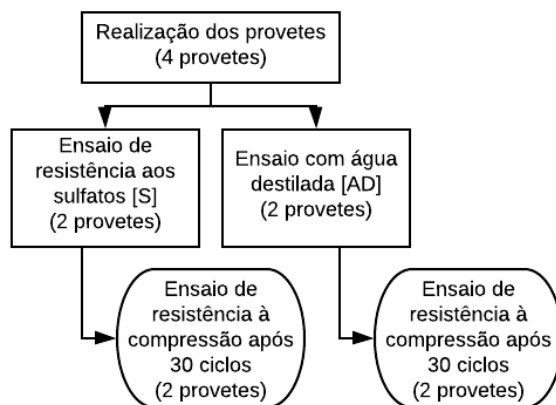


Figura 7 – Destinação dos provetes cilíndricos

3.4.5. Execução dos provetes para o ensaio de aderência

Para garantir o sucesso da aplicação da técnica de injeção de caldas, a obtenção de boas propriedades mecânicas pela calda por si só não é suficiente. É necessário analisar o funcionamento da estrutura como um todo, sendo uma das propriedades mais importantes a aderência entre calda e substrato. Com este objetivo, são realizados ensaios de resistência de aderência à tração.

Para a execução dos provetes para o ensaio de aderência, foram inicialmente elaboradas tiras de lâminas de acetato de dimensões aproximadamente 20 centímetros de largura por 2 centímetros de altura. Para o preenchimento correto dos moldes, foi demarcada a altura de 1,5 centímetro na tira de acetato, antes de circundá-las ao redor de um molde com 50 milímetros de diâmetro, prendendo-as com fita adesiva para manter seu formato. Os provetes foram denominados nesta pesquisa como “provetes com base retangular”, para melhor compreensão.

O substrato era composto de pedras retangulares de granito amarelo, cuja rugosidade da superfície se encontrava em estado bruto, sendo o único tratamento dado às peças uma lavagem superficial. A tira de acetato foi então fixada sobre o granito amarelo, com auxílio de cola quente. Em seguida, as peças foram cortadas para as dimensões apropriadas à realização dos ensaios. A moldagem está representada nas Figuras 8a e 8b.



Figura 8 – Provetes com base retangular: (a) visão lateral; (b) moldes preenchidos.

A seguir, pode-se preencher o molde com a calda até o nível de 1,5 cm. Passadas 24 horas da moldagem, os provetes foram inseridos na câmara úmida de acordo com a norma ABNT NBR 9479 (2006)⁹⁹, permanecendo em câmara durante 90 dias, imediatamente antes da realização dos ensaios. A fita de acetato foi retirada cuidadosamente após 2 semanas da execução dos provetes. Durante este processo, alguns moldes se soltaram do substrato.

3.4.6. Fase 3: Provetes para o ensaio de aderência

Na terceira fase, com a calda de pior desempenho foram moldados 18 provetes para o ensaio de aderência, pelos mesmos motivos citados na fase 2, item 3.4.4. Inicialmente, estes foram mantidos durante 90 dias em câmara úmida. Destes, 6 foram ensaiados com relação a sua resistência aos sulfatos e 6 foram ensaiados com relação a resistência aos cloretos. As 6 amostras restantes sofreram processos idênticos aos de sulfatos, porém apenas em água destilada.

O ensaio de aderência foi realizado, para cada grupo, em 3 amostras após o 15º ciclo dos ensaios de resistência aos sais e em 3 amostras após o 30º ciclo dos ensaios de resistência. Ensaios idênticos foram realizados para os provetes de ensaiados em água destilada. A distribuição de provetes está representada na Tabela 9 e na Figura 9.

Tabela 9 – Quantidade de provetes ensaiados à compressão ao fim de n ciclos.

Provete	Ao 15º ciclo	Ao 30º ciclo
Após ensaios em água destilada	3	3
Após ensaios em sulfatos	3	3
Após ensaios em cloretos	3	3

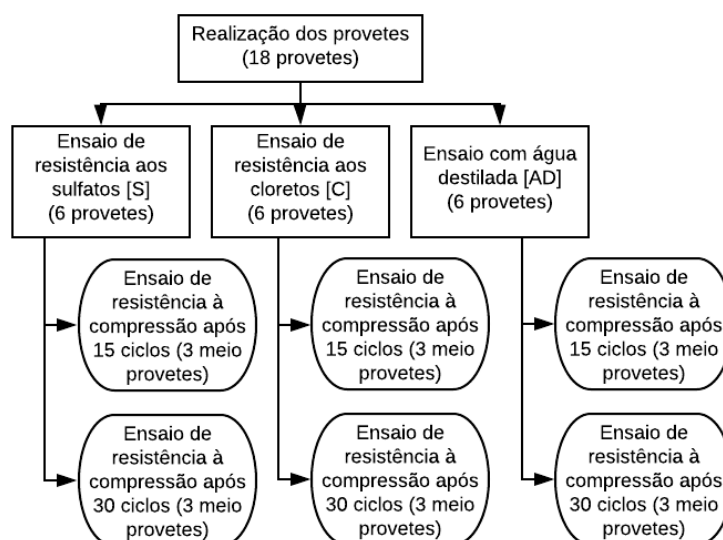


Figura 9 – Destinação dos provetes com base retangular

3.5. Ensaios em estado endurecido

Para que fosse possível caracterizar a resistência mecânica das caldas, assim como compará-las entre si e com resultados presentes na literatura, foram realizados ensaios em estado endurecido nos provetes obtidos.

3.5.1. Ensaio de resistência mecânica à flexão

Para determinar a resistência mecânica à flexão, os provetes prismáticos foram submetidos ao ensaio de acordo com o estipulado na norma NP EN 196-1 (2017)⁹⁸, levemente adaptada por se tratar de uma norma para argamassa de cimento. Os ensaios foram realizados aos 28, 90 e 120 dias, com os provetes mantidos em câmara úmida até o dia do ensaio. A quantidade de provetes ensaiados está disposta no tópico 3.4.2.

Previamente ao ensaio, todos os provetes foram pesados e tiveram suas medidas tomadas com o auxílio de um paquímetro digital, para comparação com os valores iniciais dos moldes prismáticos. Foi utilizado o equipamento de tração denominado AGS-X com capacidade máxima de 10 kN, fabricado pela empresa Shimadzu e disponibilizado pelo Instituto Politécnico de Bragança. Os provetes foram centralizados entre dois cilindros inferiores de apoio da máquina, com o eixo longitudinal perpendicular aos apoios (Figura 10). O espaçamento entre ambos deve ser de 100 milímetros, de acordo com a norma. A carga foi aplicada através de um terceiro cilindro equidistante dos outros dois cilindros de apoio.



Figura 10 – Realização do ensaio para determinação da resistência à flexão.

A velocidade de aplicação da força deve ser de 50 ± 10 N/s. Para determinar a tensão de ruptura à flexão de cada provete (R_f), em megapascal, foi utilizada a Equação 1.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde F_f representa a carga aplicada ao provete (em Newton), l a distância entre os apoios (em milímetro) e d_1 e d_2 as dimensões da seção transversal do prisma (em milímetro). Os meios provetes resultantes deste ensaio foram conservados para a realização do ensaio de compressão e de durabilidade.

3.5.2. Ensaio de resistência mecânica à compressão

Para determinar a resistência mecânica à compressão, os meio provetes prismáticos provenientes do ensaio de flexão foram submetidos ao ensaio de acordo com o estipulado na norma NP EN 196-1 (2017)⁹⁸. Este procedimento foi realizado tanto para provetes em situação normal quanto para aqueles que passaram pelo ensaio de durabilidade ou com água destilada, de modo a permitir sua comparação. Para os provetes de água destilada, os ensaios foram realizados aos 28, 90 e 120 dias de cura, mantidos em câmara úmida até o dia do ensaio. Para os provetes que passaram pelo ensaio de durabilidade, tanto de resistência aos cloretos quanto aos sulfatos, os ensaios foram realizados após 10, 20 e 30 ciclos do ensaio. A quantidade e distribuição dos provetes estão expostas no tópico 3.4.2.

Os provetes foram centralizados na prensa hidráulica, fabricada pela empresa Matest e disponibilizada pelo Instituto Politécnico de Bragança, sendo submetidos à esforços de compressão uniaxial com carregamento monitorado até sua ruptura (Figura 11). A velocidade de aplicação da força foi de 2400 ± 200 N/s, de acordo com a norma.



Figura 11 - Realização do ensaio para determinação da resistência à compressão.

Anotou-se então os valores máximos de força em Newton. Para se determinar a resistência à compressão dos materiais (R_c), aplicou-se a Equação 2, onde F representa a força de ruptura em Newton e A a área da seção transversal do provete em mm².

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

A resistência é o resultado da média aritmética de no mínimo seis ensaios, sendo que cada resultado individual não poderia diferir mais de 10% da média, de acordo com a NP EN 196-1 (2017)⁹⁸. Caso um ou mais resultados ultrapassem este intervalo, o resultado mais distante da média foi desconsiderado para os cálculos. Tal critério apenas não foi possível de cumprir nos provetes após 10 ciclos de ensaios de sais e aqueles que passaram por ensaios em água destilada, devido à limitação de provetes.

3.5.3. Ensaio de capilaridade

Como os ensaios de durabilidade envolvem a imersão dos provetes em soluções aquosas e como os agentes agressivos percolam-se pela estrutura de poros, considerou-se pertinente a análise e comparação entre as diferentes caldas com relação à sua absorção de água por capilaridade.

Para a determinação do coeficiente de capilaridade dos provetes foi utilizada a norma europeia EN 15801 (2010)¹⁰¹ e a norma brasileira ABNT NBR 15259 (2005)¹⁰². Foram utilizados provetes prismáticos aos 90 dias, com dimensão 40 x 40 x 80 mm³, lixados e nivelados após o ensaio de flexão. O objetivo principal deste ensaio é estudar o comportamento das caldas perante a água no estado líquido.

As amostras foram inicialmente mantidas em uma estufa ventilada a 60 °C até ser atingida massa constante. Determinou-se então a massa inicial, denominada m_0 , de cada provete. Dentro de um recipiente fechado para evitar a evaporação da água, os provetes foram imersos em água com nível constante a (5 ± 1) mm em contato com as amostras, com a face quadrada voltada para baixo, posicionados sobre apoios para que a superfície inferior das amostras tenha contato com a água, conforme a Figura 12.



Figura 12 – Realização do ensaio de capilaridade.

Para medir a absorção de água, as espécies foram retiradas da água, secas com um pano e pesadas. As massas foram determinadas aos 10, 30, 60 e 90 minutos, assim como às 2, 3, 4, 5, 6, 20 e 24 horas, seguindo conforme foi necessário, com pesagem a cada 24 horas, para a obtenção do valor assintótico, ou seja, quando a diferença entre dois valores sucessivos for menor que 1%. A pesagem foi realizada cuidadosamente para evitar a queda de gotas de água sobre outros provetes. Imediatamente após a pesagem, as amostras foram devolvidas ao ensaio.

Para cada uma dessas pesagens (m_2), e utilizando a área da face inferior em contato com a água (S) e a massa inicial (m_0), calculou-se o valor da quantidade de água absorvida (m) através da Equação 3, dada em kg/m^2 .

$$m = \frac{m_2 - m_0}{S} \quad \text{Equação 3}$$

Com os dados recolhidos traçou-se um gráfico relacionando a raiz quadrada do tempo à quantidade de água absorvida para análise. Calculou-se o coeficiente angular da reta dada pelo gráfico, obtendo o coeficiente de absorção por capilaridade (em $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$)¹⁰¹. Além disto, foi determinada a altura da franja líquida no provete com o auxílio de uma régua.

3.5.4. Ensaio de resistência à ação dos cloretos

O procedimento feito para a determinação da ação dos cloretos foi realizado de acordo com os procedimentos definidos na ficha de ensaio Fe 12 UNL/DEC (1999)¹⁰³, adaptada às caldas de injeção. O ensaio foi realizado após o tempo de cura de 90 dias para os provetes prismáticos (Figura 13a) e para os provetes com base retangular (Figura 13c). Primeiramente, as amostras foram secas em estufa a 50 °C até massa constante. Em seguida, estas tiveram suas massas determinadas e foram completamente imersas em uma solução saturada de cloreto de sódio durante 24 horas, conforme a Figura 13b. Foi deixado um espaçamento não inferior a

20 mm entre provetes e não inferior a 30 mm entre provetes e as paredes do recipiente. Utilizou-se 17 provetes prismáticos de cada calda e 6 provetes com base retangular.

Passadas as 24 horas, os provetes foram secos durante uma hora ao ar e em seguida secos em estufa a 50 °C até massa constante. A temperatura determinada foi de 50 °C uma vez que Kalagri *et al.* (2010)³⁶, para caldas de injeção, e Zhang e Scherer (2011)¹⁰⁴, para pastas de cimento, verificaram que o uso de temperaturas de 105 °C eram muito danosas aos provetes. Esta temperatura afeta o fenômeno da hidratação e afeta a microestrutura dos materiais com ligantes hidráulicos e cimento.

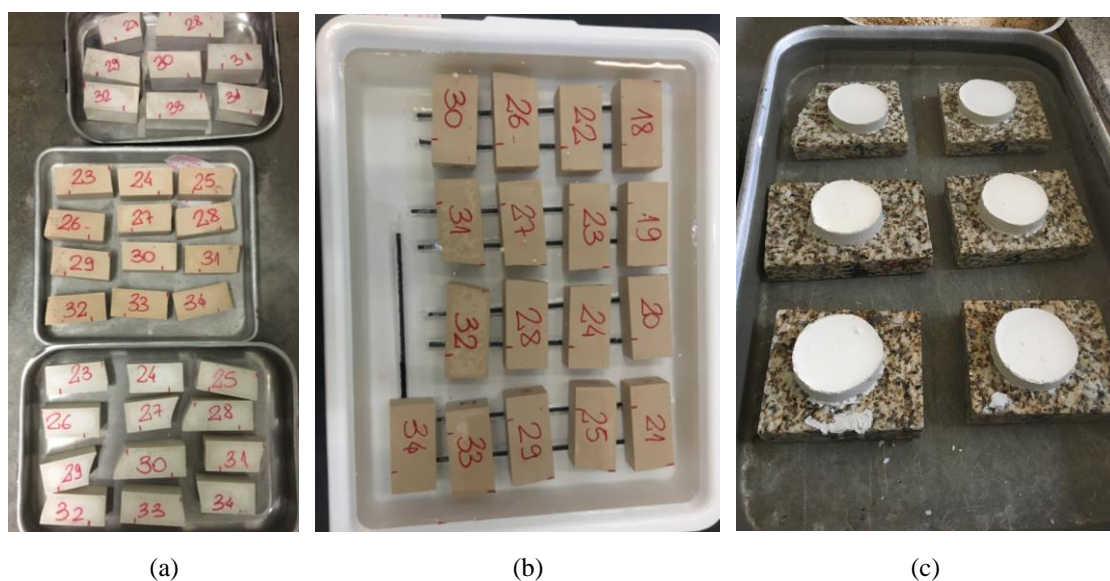


Figura 13 – (a) Preparação dos provetes prismáticos para o ensaio; (b) Imersão dos provetes compostos pela calda FB; (c) Imersão dos provetes com base retangular.

Através da diferença entre as massas secas dos provetes antes e depois da imersão na solução, determinou-se a quantidade de cloretos retidos, em termos de percentagem em relação à massa seca inicial.

Após este processo, os provetes foram expostos a ciclos de 12 horas em ambiente seco, com umidade relativa de 40%, e 12 horas em um ambiente úmido, com umidade relativa de 90% (mantendo a temperatura constante de 20 °C). Após cada ciclo seco, cada provete passava por uma inspeção visual e era determinada sua massa, em uma balança com precisão 0,001 g. Aos provetes, nenhum processo de limpeza ou retirada de possíveis eflorescências eram realizados. Ao total, foram realizados 30 ciclos. O esquema de ensaios está representado na Figura 14.

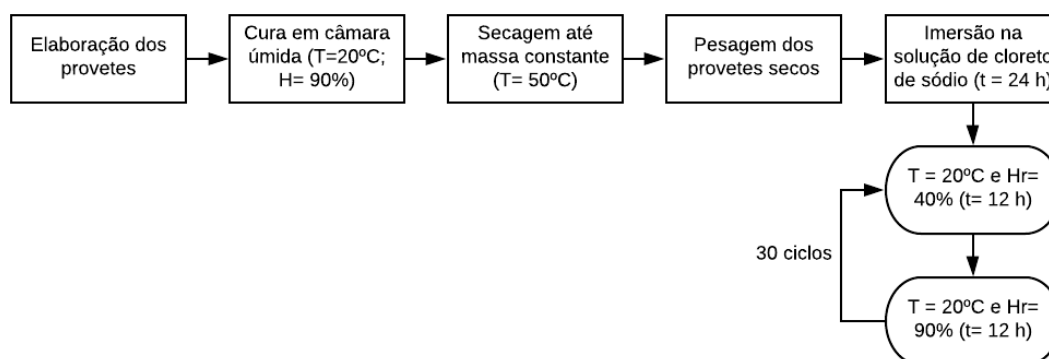


Figura 14 – Esquema do procedimento de ensaios perante os cloretos

Além da inspeção visual, o parâmetro utilizado para mensurar a durabilidade foi a resistência à compressão dos provetes. Foram realizados ensaios de resistência à compressão em amostras ao fim de 10, 20 e 30 ciclos completos. Com estes dados, foi montado um gráfico analisando a relação entre a quantidade de ciclos e de resistência.

3.5.5. Ensaio de resistência à ação dos sulfatos

Para determinação da resistência aos sulfatos, estudos anteriores como Rodrigues (2004)³⁷ e Luso (2012)²⁷ concluíram que o procedimento especificado pela ficha de ensaio Fe 11 UNL/DEC (1996)¹⁰⁵ é excessivamente agressivo para argamassas e caldas, respectivamente, uma vez que os provetes estudados apresentavam perda total de massa antes do término dos ensaios.

Neste trabalho, foi utilizado o procedimento realizado por Tsui *et al.* (2003)⁵⁵ para calcário, Kalagri *et al.* (2010)³⁶ e Luso (2012)²⁷, ambos para calda de injeção. Conforme Luso (2012)²⁷, os provetes em que foram realizados os ensaios a 50 °C apresentaram menos danos que aqueles submetidos ao ensaio a 20 °C. Devido a isso e à limitação de provetes, optou-se por realizar apenas o ensaio a 20 °C, uma vez que este representa o pior caso possível e uma maior semelhança com a realidade.

Foram utilizados 17 provetes prismáticos resultantes do ensaio de flexão para todas as caldas em estudo, 2 provetes cilíndricos compostos por granito amarelo e calda CCM e 6 provetes para ensaios de aderência compostos pela calda CCM e granito amarelo. Os provetes cilíndricos foram ensaiados perante os sulfatos levando em consideração que estudos recentes indicam que a análise da perda de massa em concretos por ataque de sulfatos deve ser feita em carotes ao invés da imersão de pequenos provetes em solução¹⁰⁶. Os provetes foram mantidos em câmara úmida (T= 20 °C e Hr= 95%) durante 90 dias.

Após esse tempo, as amostras foram expostas a uma solução de mirabilite (sulfato de sódio decahidratado – $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) durante 6 horas e secos em estufa a 20°C por 18 horas, marcando assim um ciclo completo, que se repete até o término dos ensaios. Os provetes prismáticos e os provetes para ensaios de aderência foram colocados em imersão total na solução. Os provetes cilíndricos antes do início do ensaio de resistência aos sulfatos foram impermeabilizados em sua face lateral com duas demãos de hidrófugo numa altura de aproximadamente 10 cm. Após a secagem do produto, os provetes expostos em contato direto com a solução, para que pudesse ocorrer a absorção capilar e consequente penetração de sais. O esquema do procedimento está representado na Figura 15.

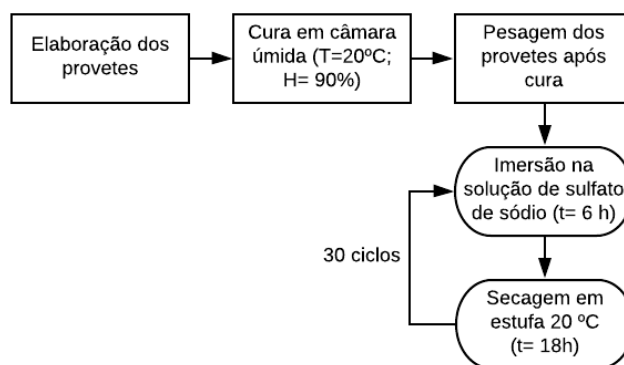


Figura 15 – Esquema do procedimento de ensaios perante os sulfatos

A solução de sulfato de sódio utilizada apresentava concentração de 14% em peso. A concentração foi mantida relativamente constante durante todo o ensaio. Foi deixado um espaçamento não inferior a 20 mm entre provetes e não inferior a 30 mm entre provetes e as paredes do recipiente.

Ao total, foram realizados 30 ciclos. Para evitar possível contaminação entre materiais e composições químicas, cada calda foi ensaiada separadamente, em tabuleiros diferentes. As soluções foram mantidas as mesmas durante todo o período de ensaio, preservadas em ambiente fechado para evitar a evaporação da água e com reposição da solução conforme necessário. Ao serem retirados da solução, os provetes eram espaçados em uma forma e inseridos em estufa, não sendo realizado limpeza ou secagem prévia com um pano.

Ao fim de cada ciclo, todos os provetes passavam por uma inspeção visual e tinham suas massas determinadas com precisão de 0,001 g. O processo de imersão na solução de sulfatos está representado na Figura 16a para provetes prismáticos e na Figura 16b para provetes com base retangular e provetes cilíndricos. Os provetes foram ensaiados em diferentes períodos de ensaio, para que se pudesse então obter uma comparação entre os provetes entre si e com resultados encontrados na literatura.

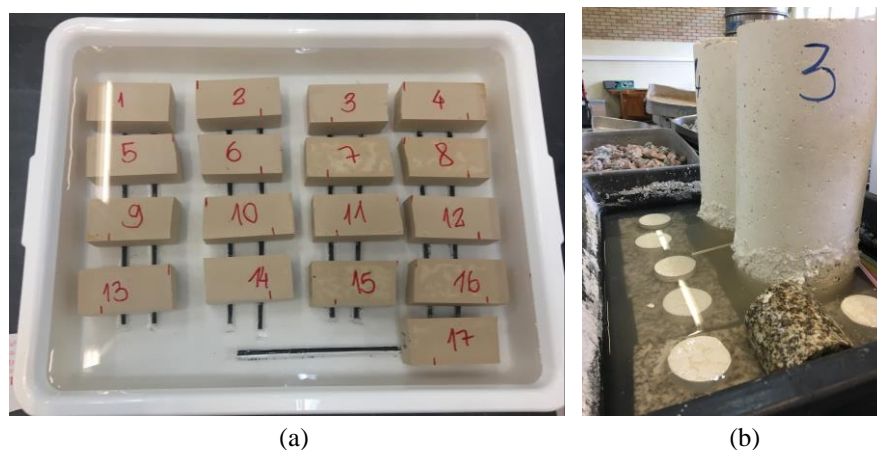


Figura 16 – (a) Imersão dos provetes prismáticos da calda FB; (b) Imersão dos provetes com base retangular e cilíndricos da calda CCM.

Para o controle da agressão causada pela ação dos sulfatos, analisam-se dois parâmetros, sendo estes as variações na resistência à compressão do provete e as variações de peso com o passar do ensaio. As inspeções visuais também são vitais na análise, para se verificar o surgimento de eflorescências decorrentes da expansão dos agentes agressivos e possíveis fissurações e deterioração nos provetes.

Adicionalmente, para melhor comparação, os provetes prismáticos que passaram pelo ensaio de capilaridade, assim como metade dos provetes cilíndricos e com base retangular, foram utilizados com o objetivo de verificar o dano que apenas a água destilada pode causar aos provetes. As amostras passaram por ensaios semelhantes aos de sulfato, porém, ao invés da imersão na solução de sulfato de sódio, estas foram imersas apenas em água destilada.

Foi escolhido apenas reproduzir o ensaio de sulfatos devido à limitada quantidade de provetes. Os provetes foram ensaiados no mesmo dia dos demais, para garantir melhor semelhança dos procedimentos de ensaios. Devido à limitação na quantidade de provetes, optou-se por realizar o ensaio semelhante ao de resistência aos sulfatos, uma vez que este é geralmente considerado mais danoso aos materiais que os cloretos.

3.5.6. Ensaio de resistência mecânica à compressão em cilindros de injeção

Foi utilizada a norma NP EN 12390-3 (2009)¹⁰⁷ para a definição do procedimento para determinação da resistência à compressão dos provetes provenientes dos ensaios de injetabilidade. Deve-se levar em consideração que esta norma se refere a concretos. Os provetes eram compostos pela calda CCM e granito amarelo. Optou-se pelo desenvolvimento do trabalho

apenas com a calda CCM, por esta ter apresentado piores resultados com relação à durabilidade na fase 1, podendo então verificar a deterioração mais acentuadamente nas amostras.

Os cilindros apresentavam certa irregularidade na face superior, devido a falhas no processo de injeção, portanto foi necessário realizar uma retificação da superfície superior. As amostras foram então limpas e tiveram suas dimensões e peso devidamente determinados com auxílio de um paquímetro e uma balança digital. Em seguida, os provetes foram centralizados na prensa da marca Matest, disponibilizado pelo Instituto Politécnico de Bragança (Figura 17).

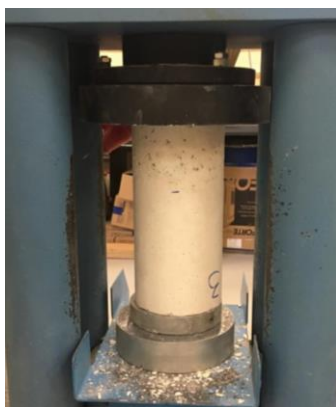


Figura 17 - Ensaio de compressão uniaxial do provete composto por calda CCM e granito amarelo.

A carga foi aplicada uniformemente até a ruptura do material. Obtiveram-se então os valores máximos de força, tornando possível calcular as tensões de ruptura, através da Equação 2, semelhante ao cálculo para provetes prismáticos. Foram ensaiados 4 provetes no total, sendo que 2 provetes foram submetidos ao ensaio de durabilidade perante uma solução de sulfatos e 2 foram submetidos à um processo igual, porém apenas imersos em água destilada.

3.5.7. Determinação da aderência em suporte pétreo

Com a composição de pior desempenho nos ensaios anteriores, pelos motivos mencionados em 3.5.6, foram preparados provetes com a finalidade de determinar a capacidade de aderência que a composição apresenta com relação ao granito amarelo. A aderência é um fator determinante no sucesso da intervenção, uma vez que a melhoria da estrutura como um todo após a aplicação de caldas só é possível caso o sistema funcione unificadamente. Esta propriedade não é inerente nem à calda nem ao substrato, sendo proveniente da interação entre ambos os materiais. Com o objetivo de verificar os efeitos danosos que os sais podem causar na interação calda/substrato, parte destes provetes também foram utilizados para os ensaios de

durabilidade à ação de sulfatos e cloretos, seguidos do ensaio de aderência caso o provete ainda mantivesse boa integridade.

Foram preparados 18 provetes de acordo com o descrito no item 3.4.5, mantidos em câmara úmida para cura durante 90 dias até o momento dos ensaios. Destes, os ensaios de resistência a sulfatos foram realizados em 6 provetes, os ensaios de resistência a cloretos em 6 provetes e 6 provetes foram ensaiados apenas em água destilada, conforme descrito em 3.4.6. Para melhor comparação, definiu-se que três provetes seriam ensaiados à compressão após o 15º ciclo e os restantes ao fim do 30º ciclo.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C1072 (2013)¹⁰⁸, levemente adaptada, uma vez que a norma se refere às propriedades de argamassas. Os provetes foram inicialmente nivelados com uma lixa em sua face superior para que pudesse ser realizada a colagem de uma pastilha metálica sobre a calda para a realização do ensaio. A pastilha metálica apresenta 50 milímetros de diâmetro e 20 milímetros de altura, com uma rosca para encaixe a máquina de ensaio. A colagem foi realizada com um adesivo bicomponente a base de resina epóxi, aproximadamente 24 horas antes da realização do ensaio.

Alguns dos provetes romperam-se ou descolaram do substrato durante o processo de moldagem e alguns durante o ensaio de sulfatos. Estes provetes foram descartados, não sendo realizado nenhum ensaio sobre estes. Após a secagem da cola, os provetes foram encaixados no equipamento AGS-X, fabricado pela empresa Shimadzu, disponibilizado pelo Instituto Politécnico de Bragança. Apoia-se o provete sobre uma base metálica e, com auxílio de grampos, este é imobilizado. A pastilha metálica foi encaixada na garra superior da máquina através de uma ligação rotulada, para que os esforços de momento fossem anulados antes de chegarem à peça. O eixo de aplicação de carga deve ser mantido ortogonal ao plano de revestimento (Figura 18).



Figura 18 – Ensaio de aderência.

O equipamento foi configurado para que, até que a força encontrada fosse igual ou superior a 10 N, fosse mantido uma velocidade de 1 mm/min. Após essa força, a velocidade foi diminuída para 0,12 mm/min até a ruptura total. O ensaio foi realizado para provetes de controle, que passaram por ensaios perante água destilada, e em provetes após passarem por ensaios de durabilidade com a mesma idade, para facilitar sua comparação.

Foram determinados com este ensaio os valores de força, tempo e deslocamento. Para determinar a resistência de aderência à tração (R_a), os valores de força encontrados na ruptura dos provetes foram aplicados a Equação 4.

$$R_a = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde F representa a força de ruptura em Newton e A a área do corpo de prova em mm². A forma de ruptura dos provetes pode ocorrer de 5 maneiras diferentes, de acordo com a ABNT NBR 13528 (2010)¹⁰⁹. Sua análise é essencial pois define se o ensaio foi bem sucedido e se a tensão obtida representa a tensão de aderência ou seu limite inferior. Quando a ruptura é adesiva, ou seja, ocorre na interface entre a cola e a calda ou entre a cola e a pastilha (representado pela letra D e E na Figura 19), o ensaio é definido como malsucedido, uma vez que se pode concluir somente que a resistência da calda e do substrato são superiores à da cola.

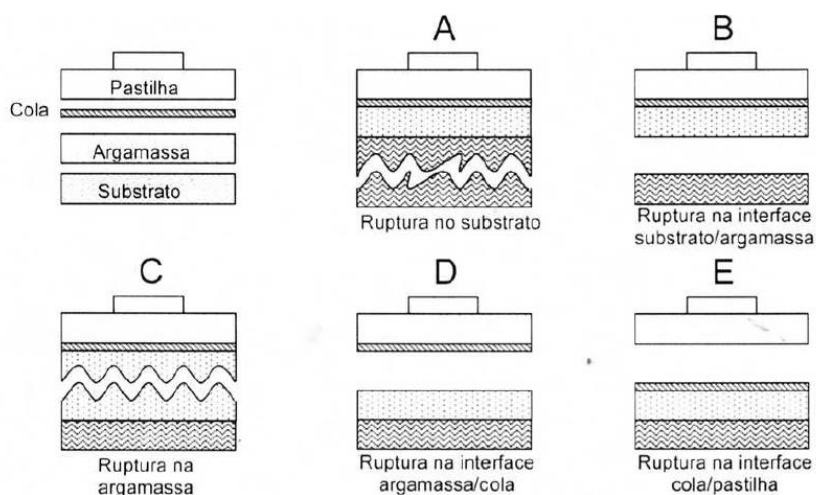


Figura 19 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração. Fonte: ABNT NBR 13528 (2010).

A falha representada pela letra A na Figura 19 representa uma ruptura no substrato, que indica que a força adesiva é superior a resistência à tração do substrato. Na letra B, vê-se a ruptura entre a interface substrato e argamassa, indicando a resistência na ligação entre os dois materiais. Também pode ocorrer a ruptura da argamassa (letra C), indicando que a aderência entre substrato e calda é superior à resistência à tração da calda.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, serão analisados e discutidos os resultados dos ensaios realizados durante a campanha experimental para as três fases principais. Os resultados foram comparados com trabalhos semelhantes, com normas e com a ficha técnica de caldas comerciais.

4.1. Formulação das caldas

Nas especificações do produto Legante per Iniezioni da Fassa Bortolo, a indicação é o uso de uma dosagem de água equivalente ao intervalo de 35% a 37% do peso da fração sólida da calda. Neste trabalho, foi utilizada a porcentagem de água de 37%, pois, de acordo com Klosowski (2019)⁷³, esta apresentava um valor de escoamento de 31,00 s, sendo mais próximo ao citado na ficha técnica, de 30 s, para o escoamento de um litro de calda.

Na calda estudada por Klosowski (2019)⁷³, a proporção de 0,3% de superplastificante foi definida em um processo empírico, de acordo com o ensaio do Cone de Marsh, em algumas tentativas. Para esta proporção de superplastificante foi encontrado um tempo de 29,84 segundos para o escoamento de um litro de calda, ficando o mais próximo possível da calda comercial estudada. A calda estudada por Luso (2012)²⁷, a proporção de superplastificante foi de 3,33%, processo também realizado empiricamente.

A grande diferença na proporção de superplastificante entre ambos os estudos pode ser explicada devido à grande quantidade de metacaulim utilizada na calda CCM, de Luso (2012)²⁷. A alta superfície específica do material reduz a trabalhabilidade da pasta em muitos casos, podendo causar a necessidade de um aumento de água ou superplastificante.

4.2. Caracterização das caldas

Ao observar os provetes em seu estado endurecido, percebeu-se que a maior diferença entre as caldas foi a cor e a textura da face superior. A calda FB, expressa na Figura 20a como F2, apresentava uma tonalidade levemente alaranjada e uma face superior mais lisa, sem a presença de furos, fissurações ou ondulações. A calda CCM, representada por M1, aparentava ser a mais esbranquiçada e apresentou maior quantidade de poros em sua superfície. A camada superior, que ficou em contato com o ar, se mostrou levemente fragilizada, com uma película fina que se desmanchava facilmente, por baixo da qual se notava vários poros (Figura 20b). Já a calda CC, representada por B1, se mostrava mais acinzentada, por vezes com danos em suas

arestas, que quebravam levemente no desmolde, com a face superior com leves ondulações e alguma fissuração visível (Figura 20c). Estas particularidades podem ser comparadas na Figura 20a.



Figura 20 – (a) Meio provetes das caldas FB, CC e CCM; (b) Face superior do provete prismático da calda CCM; (c) Provede prismático da calda CC.

A superfície porosa vista em provetes da calda CCM foi semelhante ao encontrado por Luso (2012)²⁷. A camada porosa apresentava baixa profundidade, com o restante do provete em boas condições e com menos poros, semelhante aos das demais caldas. Já a superfície da calda CC, representada na Figura 20c, pode ser explicada pela menor fluidez da calda, que manteve o formato apresentado durante a moldagem.

Durante a produção dos provetes, notou-se baixa exsudação e segregação das caldas e uma boa fluidez geral, não havendo necessidade de efetuar compactação ao realizar os provetes prismáticos. Para os provetes cilíndricos de injeção, foram marcados os tempos para que a injeção da calda sob pressão alcançasse 25%, 50%, 75% e 100% do molde. Os tempos de injetabilidade para cada provete da calda CCM, em segundos, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo de enchimento de cada quarto dos provetes cilíndricos (s).

Provede	Altura (cm)			
	7,5	15	22,5	30
1a	22,85	43,56	64,94	95,12
2a	21,16	41,85	61,77	86,61
3s	24,80	44,71	66,02	92,67
4s	23,82	44,49	65,81	90,87

Luso (2012)²⁷ obteve uma média de tempo de 109 s para calda de mesma composição da calda CCM e 309 s para uma das caldas comerciais estudadas denominada Ma, injetadas em cilindros preenchidos com granito. Klosowski (2019)⁷³ encontrou uma média de tempo de

81,68 e 153,75 segundos, para injeção das caldas de mesma composição das caldas FB e CC, respectivamente, em cilindros preenchidos com britas de granito amarelo.

Os tempos para todos os cilindros foram semelhantes, indicando uma semelhança na fluidez da calda e na disposição do granito no cilindro. A média do tempo obtido neste trabalho foi de 91,32 s, relativamente semelhante ao obtido por Luso (2012)²⁷ na calda CCM e por Klosowski (2019)⁷³ na calda FB. Com relação as demais, a média de tempo obtida foi consideravelmente menor, cerca de 3 vezes menor que a calda Ma e cerca de 1,5 vezes menor que a calda CC, indicando uma calda mais fluida.

Não houve problemas com entupimento em nenhum momento. Nesta pesquisa, os tempos obtidos para todos os provetes foram relativamente baixos, indicando uma boa fluidez da calda sob pressão, com baixa resistência da rocha ao fluxo de calda. Conclui-se que a fluidez das caldas era adequada para o granito e a injeção à pressão de 1,5 atmosfera foi satisfatória.

4.3. Ensaio em provetes prismáticos

Nesta seção, estão apresentados os resultados encontrados nos ensaios de flexão, compressão e capilaridade, assim como as massas específicas de cada calda. Ainda, serão apresentados e comparados os resultados encontrados nos ensaios de durabilidade feitos sobre os provetes, para os sais cloreto e sulfato. Aos provetes que passaram pelo ensaio de durabilidade, foram realizadas inspeções visuais e ensaios de resistência à compressão para monitorar a evolução do ensaio. Na análise, verificou-se que a calda CCM apresentou piores resultados nestes testes, apresentando maior perda percentual de resistência que as demais, sendo então escolhida para as próximas fases, da realização de provetes cilíndricos e provetes para o ensaio de aderência. Foi escolhida esta calda para verificar a máxima degradação que os sais poderiam causar as caldas, analisando então a pior situação possível.

4.3.1. Massa específica

Para a determinação da massa específica de cada calda, os provetes prismáticos tiveram todas suas dimensões tomadas e o peso mensurado, previamente ao ensaio de resistência mecânica à flexão. Para cada calda, foi calculada a média das dimensões e foi calculado o volume. Com isso, através da divisão das médias de peso pelo volume, pode-se determinar a massa específica média de cada calda. Os valores estão apresentados na Tabela 11, na qual “ σ ” representa o desvio padrão das amostras, simbologia utilizada nas Tabelas subsequentes.

Tabela 11 - Volume, peso e massa específica média dos provetes prismáticos

Calda	Volume (cm ³)	Peso (g)	Massa específica (g/cm ³)	σ (g/cm ³)
FB	250,52	439,01	1,75	0,02
CC	265,08	415,47	1,57	0,03
CCM	245,54	360,05	1,47	0,03

As caldas preparadas em laboratório apresentaram apenas 0,10 g/cm³ de diferença, representando cerca de 7% de diferença entre elas. As CC e CCM apresentaram valores de massa específica significativamente menores do que a calda comercial FB, sendo a FB 11,5% maior que a CC e 20% maior que a calda CCM, representando um material bem mais denso.

Percebe-se também que as caldas FB e CCM apresentaram uma leve retração durante a secagem e cura, enquanto a calda CC aumentou em volume. A variação percentual da calda FB foi de -2,14%, da CC de 3,55% e da calda CCM de -4,09%. Das caldas estudadas por Luso (2012)²⁷, nenhuma apresentou aumento de volume, com a variação de volume entre -0,7% e -5,1% nas caldas comerciais estudadas.

4.3.2. Ensaio de resistência mecânica à flexão

O rompimento dos provetes se mostrou, em grande parte, relativamente vertical e centralizado com relação as amostras para todas as caldas, fator importante, pois outros ensaios seriam realizados sobre estes mesmos provetes. Indica uma boa distribuição de tensões no material, com boa homogeneidade da calda. Pode-se observar também que a camada porosa que a calda CCM apresentava em sua superfície superior possuía aproximadamente 1 mm de altura, com o restante do provete expondo uma calda menos porosa e mais semelhante as demais caldas. A Figura 21 representa os provetes da calda CCM após a ruptura à flexão.

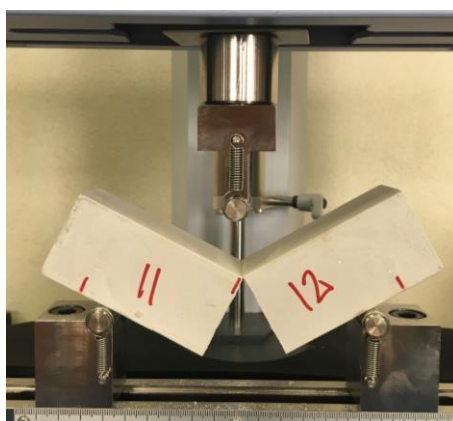


Figura 21 – Após a realização do ensaio de resistência à flexão.

Os resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão para cada período de cura estão apresentados na Tabela 12, na qual R_f representa o valor da tensão de ruptura e σ o desvio padrão apresentado pelas amostras.

Tabela 12 – Valores médios de tensão de ruptura à flexão e desvios padrão

Calda	28 dias		90 dias		120 dias	
	R_f (MPa)	σ (MPa)	R_f (MPa)	σ (MPa)	R_f (MPa)	σ (MPa)
FB	4,38	0,38	4,35	0,27	4,87	0,60
CC	1,60	0,35	2,21	0,40	2,42	0,47
CCM	2,81	0,20	3,11	0,42	3,27	0,58

Analisando a Tabela 12 pode-se perceber que a calda que apresentou melhor desempenho foi a calda comercial FB, seguida da CCM e por último e calda CC. Nota-se também que a calda CC foi a que apresentou maior ganho de resistência entre os 28 e 90 dias de cura, de aproximadamente 0,60 MPa, enquanto a calda CCM apresentou uma média de crescimento próxima de 0,30 MPa e a calda FB praticamente se manteve constante.

Por outro lado, nota-se que no período entre 90 e 120 dias a calda FB apresentou um crescimento maior, com incremento próximo a 0,50 MPa, enquanto as caldas CC e CCM obtiveram um incremento de aproximadamente 0,20 MPa e 0,15 MPa, respectivamente. Durante todo o período observado, nota-se que a calda que apresentou maior crescimento total foi a calda CC, com aproximadamente 34% de variação percentual, ainda que a calda FB apresentou valores superiores a todas as outras.

A resistência à flexão é muito importante para a análise da microestrutura do material e sua evolução. A leve diminuição que ocorreu entre os 28 e 90 dias da calda FB pode ter ocorrido também devido a progressivas microfissurações durante o processo de cura. A diferença entre as regiões expostas ao ar, onde ocorre carbonatação, e as regiões longe das bordas, que sofrem o processo de hidratação, causam diferentes retrações no material e causam tensões de tração na interface que por sua vez podem causar microfissurações. No caso das caldas de injeção aplicadas a estruturas reais, este problema não é tão evidente, uma vez que as caldas não sofrem carbonatação significativa, por ter pouco contato com o ar³⁶.

Pode-se observar que a média do crescimento por dia da resistência da calda CC apresentou uma queda entre o primeiro período (28 e 90 dias) e o segundo período (90 e 120 dias), com crescimento médio por dia no 2º período de 70% do aferido no primeiro período. As outras caldas obtiveram crescimentos médios diários maiores no segundo período que no primeiro, fenômeno mais evidente na calda FB, representado na Figura 22.

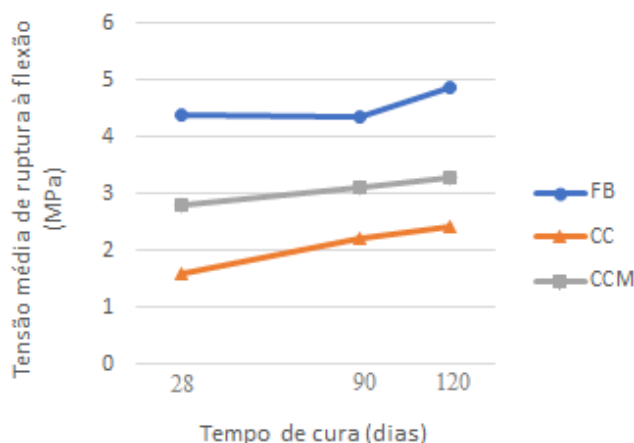


Figura 22 – Tensões médias de ruptura por flexão.

Para fins de comparação, na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos em estudos prévios para caldas de diferentes composições. Pode-se perceber uma alta variância tanto entre os materiais que compõe as caldas estudadas quanto entre as resistências mecânicas encontradas.

Tabela 13 – Resistência à flexão aos 28 dias em estudos realizados anteriormente

Autor	Composição	Razão a/l	Nome	Resistência à flexão aos 28 dias (MPa)
Klosowski (2019) ⁷³	Legante Per Iniezioni 790 (Fassa Bortolo)	0,37	FB	3,5
	Cal hidráulica, 30% Cimento Portland branco, 0,3% superplastificante	0,50	CC	2,6
	70% Cal hidráulica, 1% superplastificante	0,50	CHL	1,5
Luso (2012) ²⁷	35% cal hidratada, 30% cimento, 35% metacaulim, 3,33% superplastificante	0,60	CCM	5,4
	Mape-Antique I (Mapei)	0,40	Ma	4,1
	Albaria Iniezione (BASF)	0,38	Ab	2,7
	Calce per Consolidamento (Tradibau)	0,63	Cc	1,1
Miranda (2014) ⁹⁴	1:1 (cimento:cal), 0,2% de aditivo	0,45	-	6,5
Gonçalves (2013) ¹¹⁰	Cal hidráulica NHL 5	0,60	NHL 5	1,0
	Chaux Blanche NHL 3,5 - Z	0,75	Lafarge	0,7
	Mape-Antique I (Mapei)	0,40	MAPEI	6,9
	Albaria Iniezione (BASF)	0,38	Albaria-BASF	3,4
Kalagri <i>et al</i> (2010) ³⁶	30% Cimento, 25% cal, 45% pozolana, 1% superplastificante	0,80	G1	2,1
	NHL 5 (St Astier), 1% superplastificante	0,80	G2	1,9
	Chaux Blanche; 0,7% superplastificante	0,80	G4	1,6
	Albaria Calce Albazzana	0,70	G6	1,0
	Unilit B Fluid 0	0,70	G7	1,3

Na Tabela 13, a calda chamada FB era denominada como calda CCOM no estudo original, a calda CC denominada como CHLCP e a calda CCM denominada como 2c1. A calda comercial FB apresentou, neste estudo, cerca de 0,9 MPa acima e a calda CC cerca de 1,0 MPa abaixo do encontrado por Klosowski (2019)⁷³. A calda CCM apresentou uma resistência aproximadamente 50% menor que no ensaio realizado por Luso (2012)²⁷. A diferença entre as resistências encontradas, verificada especialmente na calda CCM, pode ser proveniente da ocorrência de diferentes microfissurações nos provetes, que podem ser devido a diferença entre as zonas superficiais externas que tem contato com o ar e a parte interna do provete.

Com relação às pesquisas apresentadas, observa-se alta variância nos resultados, estando entre 0,7 MPa e 6,9 MPa. As caldas estudadas nesta pesquisa apresentam valores medianos, dentro do intervalo analisado de outras pesquisas. A calda CC apresentou maior semelhança com a calda G4 de Kalagri *et al* (2010)³⁶ e as caldas CCM e FB apresentaram maior semelhança com as caldas Ab e Ma de Luso (2012)²⁷, respectivamente.

As fichas técnicas das caldas Mapei-Antique I (Mapei) e Albaria Iniezione (BASF) indicam que a resistência à flexão de suas caldas são de 4,0 MPa e 5,0 MPa, respectivamente. Apenas a calda FB apresentou resistência à flexão acima do especificado na ficha técnica da Mapei, enquanto as caldas CC e CCM apresentaram valores bem abaixo desta referência.

4.3.3. Ensaio de resistência mecânica à compressão

Inicialmente, serão analisadas as resistências à compressão dos provetes para cada calda em diferentes períodos de cura em câmara úmida. A resistência à compressão é uma propriedade de grande importância em estudos de cimentos, servindo como um bom indicador de sua qualidade. Está diretamente relacionada a estrutura da pasta de cimento e será analisada profundamente nesta pesquisa¹¹¹. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à compressão das caldas para 28, 90 e 120 dias.

Compressão (MPa)	28 dias		90 dias		120 dias	
	fc (MPa)	σ (MPa)	fc (MPa)	σ (MPa)	fc (MPa)	σ (MPa)
FB	18,26	2,74	17,98	2,07	20,39	1,18
CC	13,33	0,90	16,42	1,14	17,36	1,05
CCM	21,17	1,96	30,40	1,87	31,07	1,66

Curiosamente, a calda FB apresentou o mesmo comportamento tanto na resistência à flexão quanto na resistência à compressão. Entre os 28 e 90 dias, as resistências se mantiveram

praticamente constante, ainda que tenham diminuído levemente, e entre os 90 e 120 dias as resistências apresentaram um leve crescimento. A calda CC, assim como na flexão, apresentou os menores resultados quando comparado às demais caldas, porém ao fim de 120 dias, a resistência apresentou um aumento considerável, se aproximando do resultado da calda FB.

Pode-se perceber que todas as caldas apresentaram aumento de resistência quando comparado entre os 28 e os 120 dias, sendo que a calda que apresentou maior variação no valor de resistência foi a CCM, com aumento de quase 10 MPa. A calda FB apresentou crescimento de aproximadamente 2 MPa e a calda CC de 4 MPa durante todo o período estudado. A calda CCM, que continha o material pozolânico metacaulim, exibiu resultados sempre superiores às demais, com a diferença entre os valores aumentando com o passar do tempo.

Após 120 dias de cura, a resistência à compressão da calda CCM era maior em quase 10 MPa que a calda FB e aproximadamente o dobro do resultado encontrado na calda CC, evidenciando o contributo do metacaulim. O material auxilia na formação de ligações entre partículas na zona de transição através da reação da pozolana com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento para formar silicato de cálcio hidratado, que leva a aumento na resistência.

Pode-se observar que a calda FB foi a única que apresentou maior crescimento por dia da resistência no segundo período do que no primeiro período. As demais caldas obtiveram crescimentos médios diários maiores no primeiro período, conforme na Figura 23. A calda CCM em particular apresentou uma queda considerável, com o crescimento diário de 14,88 MPa/dia no primeiro período e de 2,24 MPa/dia. A calda que apresentou melhor desempenho foi a calda comercial CCM, seguida da FB e por último e calda CC.

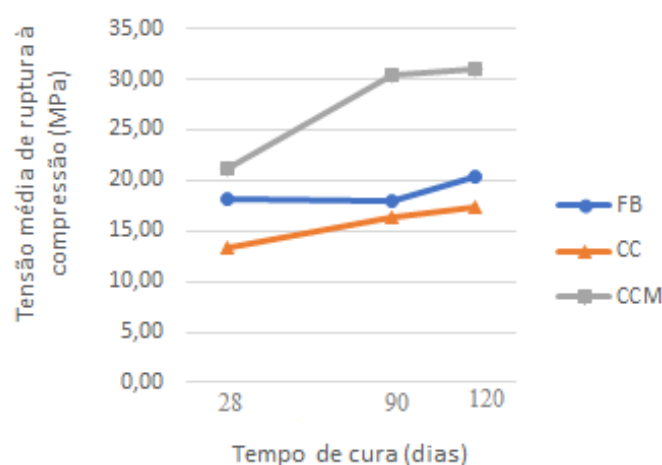


Figura 23 – Tensões médias de ruptura por compressão.

Novamente, a calda CC apresentou resultados menores que as restantes, obtendo resultados aproximadamente 65% menores aos 28 dias e quase 2 vezes menor aos 120 dias que a calda CCM, porém alcançando resultados relativamente próximos da calda FB aos 120 dias. As caldas FB e CCM obtiveram resultados próximos aos 28 dias com diferença de resistência de 15%, com a diferença aumentando significativamente aos 120 dias, com a calda FB apresentando resultados aproximadamente 66% menores.

A ficha técnica da calda FB estipula valores de a resistência à compressão como superiores a 15 MPa aos 28 dias. Nota-se, portanto, que os provetes da calda comercial apresentaram resultados próximos e ligeiramente superiores aos previstos pelo fabricante. Observa-se também, para fins de comparação, que todos os valores de resistência encontrados, à exceção da calda CC aos 28 dias, superaram o valor estipulado pela ficha técnica da calda comercial, de 15 MPa. Para idades superiores, a ficha técnica não apresenta maiores informações. Para comparação com resultados encontrados na literatura, valores obtidos em estudos anteriores estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Resistência à compressão aos 28 dias em estudos realizados anteriormente

Autor	Composição	Razão a/l	Nome	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Klosowski (2019) ⁷³	Legante Per Iniezioni 790 (Fassa Bortolo)	0,37	FB	13,2
	Cal hidráulica, 1% superplastificante	0,50	CC	11,4
	70% Cal hidráulica, 30% Cimento Portland branco, 0,3% superplastificante	0,50	CHL	5,4
Luso (2012) ²⁷	35% cal hidratada, 30% cimento, 35% metacaulim, 3,33% superplastificante	0,60	CCM	21,5
	Mape-Antique I (Mapei)	0,40	Ma	21,4
	Albaria Iniezione (BASF)	0,38	Ab	22,0
	Lime Injection (Tecnochem)	0,45	Li	12,1
	Calce per Consolidamento (Tradibau)	0,63	Cc	1,5
Valluzzi (2000) ¹⁶	Cal hidráulica HL5	0,50	FenX-A+F	5,10
Miranda (2014) ⁹⁴	1:1 (cimento:cal), 0,2% de adjuvante	0,45	-	27,1
Gonçalves (2013) ¹¹⁰	Cal hidráulica NHL 5	0,60	NHL 5	2,0
	Chaux Blanche NHL 3,5 - Z	0,75	Lafarge	1,6
	Mape-Antique I (Mapei)	0,40	MAPEI	21,0
	Albaria Iniezione (BASF)	0,38	Albaria-BASF	10,4

Autor	Composição	Razão a/l	Nome	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Shannag (2001) ¹¹¹	Cimento, 60% sílica	0,33	1	72,0
	Cimento, 60% sílica, 5% sílica de fumo	0,33	2	86,9
	Cimento, 60% sílica, 10% sílica de fumo	0,33	3	78,5
	Cimento, 60% sílica, 15% sílica de fumo	0,33	4	89,8
Kalagri <i>et al</i> (2010) ³⁶	30% Cimento, 25% cal, 45% pozolana, 1% superplastificante	0,80	G1	4,1
	NHL 5 (St Astier), 1% superplastificante	0,80	G2	2,8
	Chaux Blanche, 0,7 superplastificante	0,80	G4	3,1
	Albaria Calce Albazzana	0,70	G6	1,7
	Unilit B Fluid 0	0,70	G7	1,5

Novamente, percebe-se uma alta dispersão nos resultados das caldas estudadas. Os valores variam entre 1,5 MPa e 89,8 MPa, sendo os maiores resultados provenientes da pesquisa de Shannag (2001)¹¹¹. As caldas aqui estudadas apresentaram valores próximos daqueles encontrados nas pesquisas de Klosowski (2019)⁷³ e Luso (2012)²⁷ com composição semelhante.

Nota-se que as caldas com base em cal e sem a presença de cimento, em especial as estudadas por Valluzzi (2000)¹⁶, Kalagri *et al* (2010)³⁶ e Gonçalves (2013)¹¹⁰, apresentaram valores extremamente baixos, indicando a necessidade da utilização do cimento para que a calda apresente boas características mecânicas. O uso excessivo de cimento também pode causar um problema para as caldas, como pode-se ver nas caldas à base de cimento estudadas por Shannag (2001)¹¹¹. As resistências encontradas pelo autor são consideravelmente maiores, cerca de 4 vezes maior que as caldas analisadas nesta pesquisa, expondo a necessidade de um cuidado maior ao aplicá-las a alvenarias antigas devido à questão da compatibilidade física e mecânica.

A calda G1 estudada por Kalagri *et al* (2010)³⁶ apresenta composição semelhante à calda CCM, porém um valor de resistência à compressão consideravelmente menor, de 4,08 MPa. Uma das explicações para esta diferença pode ser a maior relação água/ligantes de Kalagri *et al* (2010)³⁶, de 0,80, que aumenta a quantidade e tamanho de poros e pode ter como consequência a perda de resistência.

Considerando apenas as caldas comerciais, que teoricamente são mais padronizadas, foi notado uma alta variação nos resultados, atingindo valores num intervalo de 1,5 MPa até 22,0 MPa. Os valores referidos nas fichas técnicas variam para cada calda e produtor, podendo atingir valores entre 10 MPa e 22 MPa, comumente. A calda comercial FB apresentou resistências relativamente altas, de aproximadamente 18 MPa aos 28 dias. Para fins de comparação, as caldas CC e CCM também se apresentaram dentro deste intervalo aos 28 dias. Para resistências em idades superiores, as fichas técnicas não apresentam especificações.

Ferragni *et al* (1984)¹¹² afirma que para haver compatibilidade mecânica com o substrato, as resistências mecânicas devem ser próximas àquelas dos substratos, para que não ocorra a criação de tensões excessivas nos materiais antigos, criando novas fissurações e causando maior deterioração. Tavares (2009)²⁸ afirma ainda que a resistência à compressão das caldas deve ser no máximo 60% da apresentada pelo substrato. As propriedades físicas e mecânicas dos granitos estão relacionados as suas características mineralógicas, como a composição e a forma dos grãos. A resistência à compressão uniaxial do granito amarelo é definida na norma ASTM C-615 (1992)¹¹³ de no mínimo 131 MPa e na norma ABNT NBR 15845-5 (2015)¹¹⁴ de no mínimo 100 MPa. Estabelece-se então como limite máximo para as caldas o valor de 60 MPa, estando então todos os resultados encontrados nesta pesquisa dentro do limite para substrato granito.

4.3.4. Ensaio de capilaridade

Pelo registro dos valores da variação de massa por unidade de superfície ao longo do tempo, são determinados dois parâmetros: o coeficiente de absorção de água por capilaridade e o valor assintótico. O valor assintótico representa a máxima variação de massa por unidade de superfície registrada e o coeficiente de capilaridade representa a velocidade com que a absorção de água ocorre nos instantes iniciais. A capilaridade é função principalmente da porosidade do material e apresenta grande influência na durabilidade que a calda apresentará. Na Figura 24 observa-se a curva de absorção capilar, com a raiz do tempo nas abcissas e a absorção capilar nas ordenadas.

Relativamente à absorção capilar, os provetes das caldas CC e CCM apresentaram resultados muito próximos, com a calda CC apresentando ligeiramente piores resultados. Todas as caldas em estudo apresentaram comportamentos semelhantes. A calda comercial FB apresentou resultados relativamente baixos, aproximadamente 10 kg/m² abaixo das demais caldas. Para caldas de injeção, o ideal é que ambos os valores, de coeficiente de absorção de

água e o valor assintótico, sejam baixos, de modo a garantir que a velocidade de absorção de água seja baixa e que a calda absorva a menor quantidade de água possível.

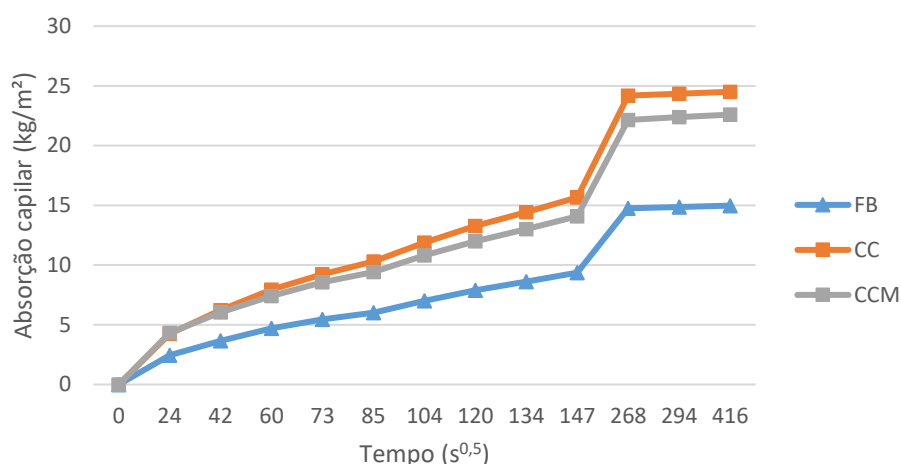


Figura 24 – Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

Observa-se que todas as caldas apresentaram uma estabilização ao fim de 20 horas, aproximadamente. Após este período, notou-se que a altura da lâmina líquida visível nas superfícies do provete (parte do provete que se encontrava molhada) alcançava e praticamente preenchia toda a superfície lateral e superior do provete. Os coeficientes de capilaridade e valores assintóticos das caldas estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de capilaridade.

Calda	Coef. capilaridade (kg/m ² .s ^{0,5})	Valor assintótico (kg/m ²)
FB	0,10	14,98
CC	0,17	24,50
CCM	0,18	22,59

As caldas aqui estudadas apresentaram bons resultados de coeficiente de capilaridade, sendo a melhor a calda FB, com valores mais baixos que as demais caldas para ambos os parâmetros. Pelo maior coeficiente de capilaridade das caldas CC e CCM, pode-se concluir que estas têm poros de maior dimensão que a calda FB, sendo estes os primeiros a serem preenchidos, resultando num maior consumo de água inicial. As caldas realizadas em laboratório também apresentaram maior consumo de água por metro quadrado de provete que a calda comercial.

Para fins de comparação, Almeida *et al* (2007)⁵² encontraram, para argamassas com base em cal aérea, coeficientes entre 0,19 e 0,36 kg/m².s^{0,5}. Rodrigues (2004)³⁷ obteve valores

entre 0,19 e 0,56 kg/m².s^{0,5} para argamassas. Gonçalves (2013)¹¹⁰ para caldas de injeção encontrou coeficientes de capilaridade de 0,03, 0,07, 0,09 e 0,38 kg/m².s^{0,5}. Nota-se que as caldas de injeção apresentam, em geral, valores de capilaridade menores que os de argamassa. Isto se deve, possivelmente, a maior fluidez e trabalhabilidade das caldas, que por isso tendem a apresentar menos poros e, conseqüentemente, o fenômeno da capilaridade ocorre com menor intensidade.

As caldas CCM e CC apresentaram valores próximos tanto no coeficiente de capilaridade quanto no valor assintótico, o que indica que estas têm estruturas de poros internas semelhantes (fator que envolve a intercomunicabilidade, distribuição e diâmetro dos poros). Em relação ao comportamento perante a água em estado líquido, conclui-se que a calda FB apresenta o melhor comportamento, não só sendo a mais lenta a absorver água por capilaridade, também finaliza o ensaio tendo absorvido a menor quantidade de água, em aproximadamente 10 kg/m² a menos.

4.3.5. Ensaio de resistência aos cloretos

A partir das massas secas antes e depois da primeira imersão na solução saturada de cloretos, obtém-se a percentagem de cloretos retidos no provete, em relação a massa seca inicial. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Percentagem de cloretos retidos no provete.

Percentagem de cloretos retidos (%)			
Provete	FB	CC	CCM
Média	11,94	11,03	11,41

Observa-se que a percentagem de cloretos retidos foi similar para todas as caldas, com valores entre 11% e 12%. Rodrigues (2004)³⁷, que utilizou o mesmo procedimento em argamassas tradicionais de cal aérea e areia, obteve valores entre 3,6% e 9,7% para as argamassas. Almeida *et al* (2007)⁵² obtiveram resultados entre 3,15% e 4,40% para argamassas com base em cal aérea. As caldas neste estudo apresentaram resultados superiores, comparativamente. Este resultado é curioso, visto que nos ensaios de capilaridade as argamassas em questão apresentaram valores de coeficiente de capilaridade superiores, indicando maior absorção de água que as caldas. Isto pode indicar que, apesar de ter um coeficiente de absorção menor, a estrutura e porosidade das caldas podem dificultar a saída dos sais que acessam os poros.

Os provetes foram analisados visualmente e pesados ao fim de cada ciclo. Na Tabela 18 estão dispostas as médias dos pesos iniciais e dos pesos ao fim dos ciclos 10, 20 e 30 do ensaio de resistência à ação dos cloretos, assim como as variações percentuais. Na Tabela, as colunas I representam as médias dos pesos dos provetes no início do ensaio (determinados após a secagem em estufa), as colunas F representam as médias dos pesos ao fim da quantidade determinada n de ciclos e VP representa a variação percentual de cada período.

Tabela 18 – Peso dos provetes no início e durante o ensaio de cloretos.

Peso	I 10 (g)	F 10 (g)	VP (%)	I 20 (g)	F 20 (g)	VP (%)	I 30 (g)	F30 (g)	VP (%)
FB	216,84	239,78	10,58	220,97	246,08	11,36	220,06	243,22	10,53
CC	208,21	228,94	9,96	199,60	220,46	10,45	214,01	236,25	10,39
CCM	189,74	209,68	10,50	181,91	198,28	9,00	180,26	196,42	8,96

Percebe-se que para todos os casos, houve um aumento no peso após o ensaio de resistência aos cloretos, sendo que as variações percentuais dos valores foram consideráveis, alcançando um máximo de 11,36%. Este aumento de massa ocorre, pois, uma vez que os provetes são inseridos na solução, os sais permeiam seus poros e se mantêm retido no interior dos provetes. Devido à alta porcentagem de cloretos retidos apresentada por todas as caldas, este aumento de massa foi maior que a degradação e desintegração que o provete pode ter sofrido com os ciclos.

Não foi observado variação de volume em nenhum dos provetes. Nota-se que a variação de massa se manteve aproximadamente constante com o passar do tempo de ensaio para todas as caldas após os cloretos retidos, permanecendo no intervalo de 8,96% e 11,36%. A calda CCM foi a única que apresentou gradual diminuição da variação percentual de massa com o decorrer do ensaio, sendo que as demais apresentaram oscilações.

Almeida *et al* (2007)⁵², estudando argamassas à base de cal, obteve variações de massa ao fim de 14 ciclos menores que 3% para a maioria das caldas, valor menor que o encontrado neste estudo. A maioria das pastas, assim como o presente estudo, apresentou aumento de massa ao fim dos ciclos. A percentagem de cloretos retidos manteve-se entre 3,15% e 4,40%. Ao fim de 35 ciclos, quase todas as caldas estudadas pelos autores exibiram variações de massa em torno de 3%, porem apresentaram maior amplitude, alcançando mínimos de 0,36%.

Rodrigues (2004)³⁷ encontrou valores relativamente altos, entre -33,4% e -67,6% de variação de perda de massa para argamassas a base de cal aérea, sendo que a maioria apresentou perda de massa. As diferentes composições químicas e microestrutura interna pode explicar a diferença entre os resultados. As argamassas, que apresentam agregados de maiores dimensões,

podem apresentar maior quantidade de vazios e assim, maior susceptibilidade de ser afetado pelo ensaio de durabilidade.

Durante todo o período de ensaio, foram realizadas análises visuais cuidadosas a todos os provetes, porém não se notou o surgimento de eflorescências na superfície das amostras nem de variações significativas na cor e forma das amostras, além de um leve escurecimento da coloração cinza na calda CC (Figura 25b). O estado dos provetes após 30 ciclos do ensaio de cloretos para a calda CCM está representado na Figura 25a.

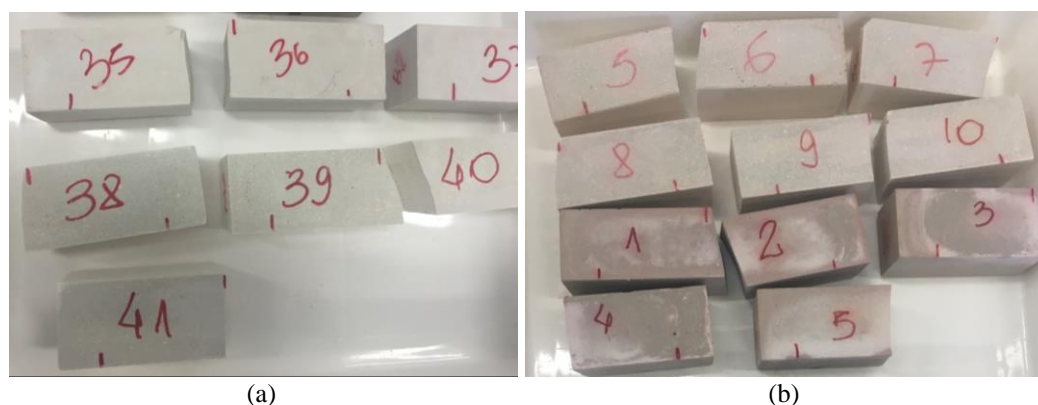


Figura 25 – Análise visual dos provetes após 30 ciclos: (a) CCM; (b) FB (superior, provetes 5 a 10) e CC (inferior, provetes 1 a 5).

Os provetes também foram ensaiados à compressão após o término de 10, 20 e 30 ciclos, ou seja, com os provetes aos 100, 110 e 120 dias de idade. O valor de resistência à compressão aos 120 dias para provetes apenas mantidos em câmara úmida, apresentado na Tabela 14, também foi exposto, denominados nas Tabelas seguintes como 120 sem ciclos “120SC” e os provetes que foram ensaiados apenas em água destilada como “AD”. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21.

Para fins de comparação e análise, as variações percentuais foram calculadas de três maneiras diferentes: comparando os valores obtidos após os ciclos de cloretos (CI) com os encontrados nos provetes de AD (VP AD-CI), comparando os valores obtidos após os ciclos de cloretos (CI) com os encontrados nos mantidos em câmara úmida (VP 120SC-CI) e comparando os valores de AD com os encontrados nos mantidos em câmara úmida (VP AD-120SC).

Tabela 19 – Resistência à compressão de FB após os ensaios de cloretos e água destilada.

120SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Cloretos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-CI (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-CI (%)	VP AD-120SC (%)
20,39	10	18,12	1,41	13,46	0,59	-25,71	-33,97	-11,12
20,39	20	16,40	0,59	13,68	0,54	-16,60	-32,88	-19,53
20,39	30	16,27	0,80	15,69	2,15	-3,61	-23,05	-20,17

Tabela 20 - Resistência à compressão de CC após os ensaios de cloretos e água destilada.

120SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Cloretos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-CI (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-CI (%)	VP AD-120SC (%)
17,36	10	17,30	0,13	15,26	1,13	-11,78	-12,10	-0,36
17,36	20	17,07	0,87	15,06	1,72	-11,73	-13,23	-1,70
17,36	30	16,93	1,92	18,83	1,30	11,22	8,43	-2,51

Tabela 21 - Resistência à compressão de CCM após os ensaios de cloretos e água destilada.

120SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Cloretos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-CI (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-CI (%)	VP AD-120SC (%)
31,07	10	28,55	1,70	21,18	1,72	-25,81	-31,83	-8,11
31,07	20	27,79	2,27	21,63	2,12	-22,17	-30,39	-10,56
31,07	30	30,28	1,54	23,17	2,15	-23,48	-25,42	-2,54

Uma comparação das resistências de todos os casos observados nas Tabelas 19, 20 e 21 está apresentada na Figura 26. Estão representados todos os valores das caldas FB, CC e CCM, respectivamente. As colunas representam a resistência média à compressão após n ciclos, tanto para provetes que passaram pelo ensaio de cloretos quanto para os que passaram por ensaio com água destilada, e a barra horizontal representa a resistência média à compressão do provete mantido em câmara úmida.

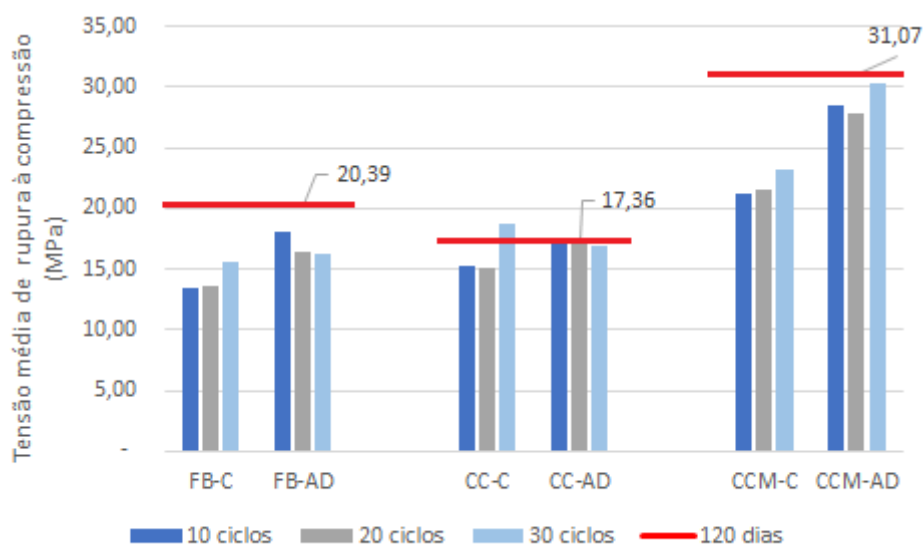


Figura 26 – Tensões médias de ruptura por compressão após ensaios de cloretos.

Os resultados apresentados permitiram verificar que as melhores resistências mecânicas não estão diretamente relacionadas com as melhores resistências aos sais, uma vez que a calda

CCM que apresentou maiores resistências mecânicas também apresentou maior perda percentual de resistência aos sais, junto à calda FB.

À exceção da calda CC aos 30 ciclos de cloretos, nota-se que qualquer tipo de ensaio de molhagem e secagem nos provetes reduziu a resistência à compressão, sendo que a água destilada causou menor deterioração que os cloretos. No período estabelecido de ensaios desta pesquisa (30 ciclos), os cloretos causam uma maior degradação nos provetes nos primeiros 10 ciclos, após o qual não ocorrem perdas de resistência significativas, dentro da variabilidade dos resultados, havendo até leve melhora nos resultados.

A calda FB obteve quase -34% de variação percentual ao fim de 10 ciclos de cloretos, quando comparado aos provetes que foram mantidos em câmara úmida, porém, ao fim de 30 ciclos de cloretos, a resistência voltou a aumentar e a variação passou a ser próxima de -23%. Os ciclos de imersão e secagem em água destilada também causaram crescente degradação à calda quando comparado ao provete mantido em câmara úmida, alcançando perdas percentuais próximas a -20%. Notou-se uma perda de resistência crescente com o passar do tempo do ensaio.

A calda CC apresentou menor variação após os cloretos, com valores próximos de -13% ao fim de 10 e 20 ciclos, comparados aos provetes mantidos em câmara úmida. Ao fim de 30 ciclos, os provetes apresentaram aumento de resistência, com variação percentual de 8% comparados aos 120SC, alcançando valores superiores aos provetes mantidos em câmara úmida. Este aumento de resistência pode ser explicado pelo uso da cal hidráulica, que se solidifica inicialmente por hidratação e, mais lentamente, o processo de carbonatação ocorre, aumentando a resistência com o passar do tempo.

Quando comparados os provetes da calda CC mantidos em câmara úmida e os ensaiados com água destilada, nota-se que houve pouca degradação pela água, não ultrapassando variação percentual de 3%. Todos os ensaios foram menos danosos para os provetes da calda CC, porém a calda CC apresentou valores de resistência à compressão menores que as demais.

A calda CCM obteve comportamento semelhante ao da calda FB para cloretos. Os ciclos de cloretos causaram uma perda de resistência inicial de aproximadamente 32% ao fim de 10 ciclos, quando comparado aos mantidos em câmara úmida. A degradação se manteve aproximadamente constante até o 20º ciclo e, ao fim de 30 ciclos, obteve menor perda percentual de resistência. Para provetes imersos em água destilada, a variação máxima foi próxima de 11%, notando-se resultados levemente melhores ao fim de 30 ciclos.

Nota-se que, para todas as caldas, ao fim de 30 ciclos a resistência foi superior as ao fim do 10º e 20º ciclo. Uma hipótese é de que o preenchimento dos poros pelos sais cause um

aumento na resistência mecânica por ocupar os vazios ali presentes. Ainda, outra explicação viável para as caldas realizadas em laboratório é que os sais preenchem os poros da estrutura até causar pequenas fissurações em seu interior. Estas fissurações podem ter como consequência a hidratação de cimentos anidros da estrutura, que acabam adquirindo maior resistência em contato com a água da solução, sendo este ganho superior à resistência perdida pela desagregação e deterioração.

Luso (2012)²⁷ obteve perda de resistência à compressão de 8% aos 28 dias e 17% aos 90 dias, valores relativamente próximos aos obtidos ao fim dos ciclos 10 e 20 para a calda CC. Com relação as demais caldas, a perda de massa obtida por Luso (2012)²⁷ foi mais branda que as vistas nas caldas estudadas nesta pesquisa.

A eficiência dos ensaios de envelhecimento artificial perante os sais, com ciclos de imersão e secagem em soluções salinas, deve ser questionada, uma vez que ainda é incerto se as situações causadas seriam semelhantes o suficiente da realidade. Deve-se levar em consideração que o formato e a exposição ao ar das caldas de injeção aplicadas em alvenarias em situações reais são extremamente diferentes aos vistos neste estudo. Em particular para o cloreto de sódio, estudos indicam que a supersaturação causada pela evaporação da água presente na alvenaria, que pode causar microfissurações na estrutura, ocorre apenas em uma zona limitada e próxima à superfície. Estas zonas estão presentes em pouca quantidade e extensão nas estruturas reais, uma vez que a calda de injeção é inserida no interior das alvenarias.

4.3.6. Ensaio de resistência aos sulfatos

Na Tabela 22, estão apresentadas as médias dos pesos iniciais e dos pesos ao fim dos ciclos 10, 20 e 30 após o ensaio de resistência aos sulfatos, assim como as variações percentuais. As colunas I representam as médias dos pesos dos provetes no início do ensaio (após cura em câmara úmida e preparação para o ensaio), as colunas F representam as médias dos pesos após determinada quantidade de ciclos e VP representa a variação percentual de cada período.

Tabela 22 – Peso dos provetes no início e durante o ensaio de sulfato.

Peso	I 10 (g)	F 10 (g)	VP (%)	I 20 (g)	F 20 (g)	VP (%)	I 30 (g)	F30 (g)	VP (%)
FB	242,44	244,97	1,04	238,48	241,32	1,19	241,30	245,24	1,63
CC	222,34	223,95	0,73	226,06	228,66	1,15	222,25	224,14	0,85
CCM	202,80	204,26	0,72	202,89	204,77	0,92	194,85	204,37	4,88

Todas as caldas apresentaram aumento no peso após a realização dos ciclos, provavelmente significando que a perda de massa dos provetes foi inferior a quantidade de sais retida após imersões em solução. Novamente, percebe-se que para todos os casos, a variação percentual do peso foi pouco significativa, não ultrapassando 5%, com pouco dano físico às amostras. Notou-se que a calda CCM apresentou maior arredondamento das arestas que as demais caldas, mas ainda assim o dano não foi considerado muito significativo. As caldas FB e CC apresentaram uma variação de massa aproximadamente constante durante todo o período de ensaios, enquanto a calda CCM, que obteve menor variação ao fim de 10 e 20 ciclos, apresentou maior ganho de massa ao fim de 30 ciclos, sendo a única variação percentual acima de 2%.

O resultado difere do encontrado por Kalagri *et al* (2010)³⁶, que ao fim de 6 ciclos, encontrou uma variação de massa entre 13% e 33% para 5 caldas estudadas. Entre os 7 e 11 ciclos a 20 °C, a variação apresentou valores entre -6,3% e 7% para as mesmas caldas. Ao fim de 9 ciclos a 50 °C, duas das cinco caldas apresentaram perda total dos provetes e o restante variou entre -25% e 8%. Os resultados do ensaio a 50 °C foi mais danoso que aos 20 °C. A variação de massa foi superior aos encontrados nesta pesquisa.

As análises visuais eram realizadas diariamente ao fim de cada ciclo sobre os provetes durante todo o período de ensaio. Até o 10º ciclo, notou-se que a superfície dos provetes estava mais esbranquiçada em todos os provetes de todas as caldas, porém sem maiores alterações (Figura 27a). Ao fim do 20º ciclo, os provetes apresentavam poucas eflorescências e notava-se um pó fino em toda a superfície das amostras que desgrudava do provete durante o manuseio. Ao fim do 30º ciclo, houve o aparecimento de mais eflorescências, principalmente nas arestas, porém os provetes mantinham-se em maior parte inteiros e aparentemente com integridade estrutural (Figura 27b, Figura 27c e Figura 27d).

Foi observado que o local que indicava maior degradação eram as arestas das amostras, que se apresentavam mais sensíveis ao manuseio, por vezes apresentando pequenas rachaduras ou quebras. Isto se deve ao ataque que, nos vértices, é amplificado pois este ocorre nas três fases adjacentes do provete. No quesito coloração, a única calda que apresentou variação foi a calda CCM, a qual gradualmente alterou de mais esbranquiçada para mais escura, exibindo tons de marrom. Não foi verificado o aparecimento de fissurações, abrasão ou de esfarelamento nas amostras. Verifica-se que a realização deste procedimento de ensaio é relativamente branda, uma vez que nenhum dos provetes se desfez durante o período de ensaios.

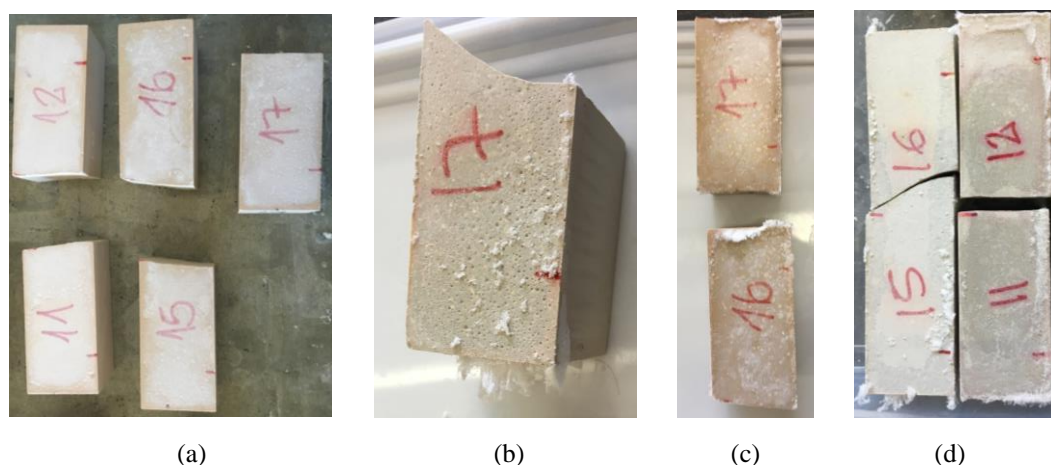


Figura 27 – (a) provetes da calda FB após 10 ciclos; (b) provetes da calda CC após 30 ciclos; (c) provetes da calda CCM após 30 ciclos; (d) provetes da calda FB após 30 ciclos.

Analogamente aos provetes submetidos ao ensaio de durabilidade aos sais cloreto, os provetes, após o ensaio de durabilidade aos sulfatos, foram ensaiados à compressão, sendo ensaiados após 10, 20 e 30 ciclos de ensaio. O valor de resistência à compressão aos 120 dias apenas mantido em câmara úmida, apresentado na Tabela 14, também foi exposto, denominado nas Tabelas seguintes como “120SC”.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 23, 24 e 25, sendo mantida a mesma nomenclatura das Tabelas de ensaios de cloretos (tópico 4.3.5), porém representando os provetes de sulfatos como S. Para fins de comparação, foram calculadas as variações percentuais das caldas, analogamente ao realizado no ensaio de resistência à ação dos cloretos, sendo a nomenclatura também mantida igual.

Tabela 23 – Resistência à compressão de FB após os ensaios de sulfatos e água destilada.

120 SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Sulfatos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-S (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-S (%)	VP AD-120SC (%)
20,39	10	18,12	1,41	14,77	0,38	-18,46	-27,53	-11,12
20,39	20	16,40	0,59	16,77	1,67	2,23	-17,74	-19,53
20,39	30	16,27	0,80	16,49	0,92	1,32	-19,12	-20,17

Tabela 24 - Resistência à compressão de CC após os ensaios de sulfatos e água destilada

120 SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Sulfatos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-S (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-S (%)	VP AD-120SC (%)
17,36	10	17,30	0,13	17,29	1,30	-0,06	-0,41	-0,36
17,36	20	17,07	0,87	16,51	1,68	-3,27	-4,91	-1,70
17,36	30	16,93	1,92	18,92	1,24	11,79	8,99	-2,51

Tabela 25 - Resistência à compressão de CCM após os ensaios de sulfatos e água destilada.

120 SC	Ciclos	AD (MPa)	σ (MPa)	Sulfatos (MPa)	σ (MPa)	VP AD-S (%)	sem ciclos	
							VP 120SC-S (%)	VP AD-120SC (%)
31,07	10	28,55	1,70	23,49	0,75	-17,72	-24,39	-8,11
31,07	20	27,79	2,27	21,03	0,78	-24,32	-32,31	-10,56
31,07	30	30,28	1,54	21,20	0,64	-29,98	-31,77	-2,54

Uma comparação das resistências de todos os casos observados nas Tabelas 23, 24 e 25 está apresentada na Figura 28. Estão representados todos os valores das caldas FB, CC e CCM, respectivamente. As colunas representam a resistência média à compressão após n ciclos, tanto para provetes que passaram pelo ensaio de sulfatos quanto para os que passaram por ensaio com água destilada, e a barra horizontal representa a resistência média à compressão do provete mantido em câmara úmida.

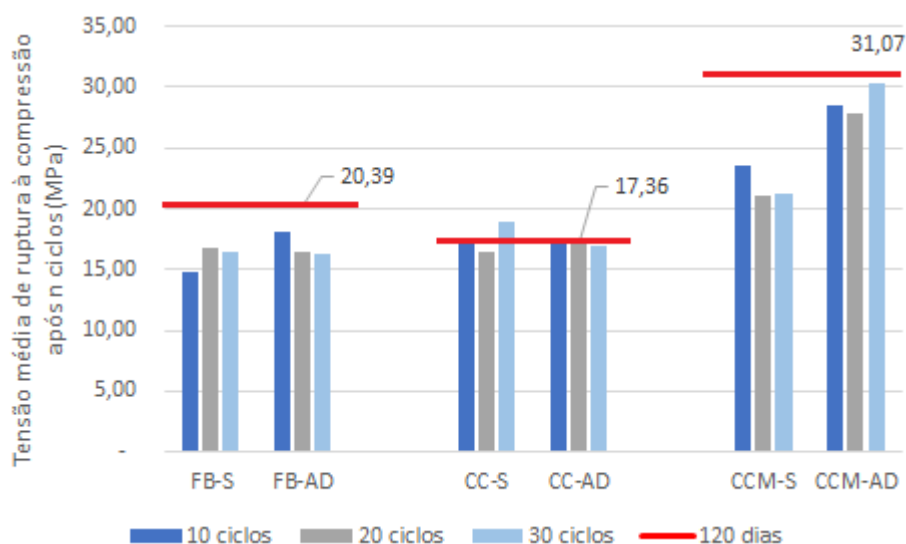


Figura 28 – Tensões médias de ruptura por compressão após ensaios de sulfatos.

A calda FB apresentou uma variação máxima ao fim de 10 ciclos de sulfatos quando comparado com os provetes 120SC, próxima de 28%, após o qual os resultados apresentaram leve melhora comparativamente, porém com deterioração ainda considerável, com perda de resistência em torno de 20%. Nota-se que a calda FB foi o único caso onde a resistência à compressão após 20 ciclos foi maior que aos 30 ciclos para imersão em soluções salinas. A degradação causada pelos sulfatos também foi superior à causada apenas por água destilada para todas as caldas.

A calda CC foi a menos afetada pelos ensaios de resistência à ação dos sulfatos. A perda de resistência máxima foi inferior a 5% (após 20 ciclos) quando comparados aos provetes mantidos em câmara úmida. Após 30 ciclos, analogamente ao verificado no ensaio de cloretos, a calda apresentou uma melhora na resistência, alcançando um valor superior a todos os demais.

Tal fato pode ser explicado, como mencionado anteriormente, pelo uso da cal hidráulica, pelo preenchimento de poros da estrutura ou pela ocorrência de microfissurações que podem causar a hidratação de cimentos anidros presentes.

Já a calda CCM, quando comparado os provetes de sulfatos aos mantidos em câmara úmida, obteve resultados próximos à 32% ao fim de 20 e 30 ciclos, com maior perda de resistência entre o 10º e o 20º ciclo. Nota-se também que este foi o único caso onde a perda de resistência aos 30 ciclos foi superior a perda aos 10 ciclos. A alta deterioração causada pelos sais na calda CCM difere do esperado, uma vez que os materiais pozolânicos tendem a aumentar a resistência aos sais, devido ao processo de refinamento dos poros, pela conversão da cal proveniente da hidratação do cimento¹¹¹.

Apesar da calda CCM ter apresentado maior perda percentual de resistência quando comparadas as demais, pode-se observar que a calda apresenta o maior valor nominal de resistência. Mesmo o pior resultado após o ensaio de sulfatos apresentou um valor nominal acima de todos os resultados das demais caldas. As caldas CC e CCM apresentavam comportamento semelhante de capilaridade, porém a calda CC apresentou menor perda de massa que as demais. A calda FB, com melhores resultados de capilaridade, sofreu deterioração semelhante a calda CCM para os cloretos e parcialmente para os sulfatos.

Shannag (2001)¹¹¹ obteve valores bem superiores, acima de 74 MPa para provetes de controle e entre 50 MPa e 94 MPa após ensaios em solução de sulfato de sódio após submersão nas soluções salinas. O autor concluiu que caldas contendo materiais pozolânicos obtiveram uma performance melhor diante da presença de sulfatos, provavelmente devido ao menor tamanho dos poros. Além do mais, a fina partícula do material preenche em partes os poros, aumentando sua resistência aos ataques dos sais¹¹¹. Como mencionado anteriormente, tal fato não ocorreu nesta pesquisa, uma vez que a calda contendo material pozolânico (calda CCM) apresentou maior perda percentual de resistência após 30 ciclos.

Luso (2012)²⁷ apresentou uma perda de resistência à compressão de em média 58% aos 28 dias e 62% aos 90 dias, para uma calda comercial. Na inspeção visual, os provetes analisados apresentavam maior deterioração e maior quantidade de eflorescências que os estudados nesta pesquisa. A maior deterioração obtida pela autora pode ser proveniente da composição química da calda, que apresenta maior susceptibilidade à ação dos sais.

A partir desta análise, pode-se tirar algumas conclusões. Nota-se que o cloreto foi mais danoso que o sulfato para as caldas FB e CC e o dano causado foi semelhante para ambos os sais para a calda CCM. Além disto, a realização de ciclos com água destilada causou maior perda de resistência à calda FB, seguida da calda CCM e causou pouco dano a calda CC.

Percebe-se também que não houve correlação entre os resultados para capilaridade e os danos causados pelos sais. A calda CC, que apresentou comportamento semelhante à calda CCM nos resultados de capilaridade, sofreu danos consideravelmente menores que as demais. Já a calda FB, com melhores resultados de capilaridade, sofreu danos semelhantes aos da calda CCM.

4.4. Ensaio em provetes compostos por calda e granito

Para provetes compostos por calda e granito amarelo, foram realizados provetes cilíndricos de injeção e provetes para o ensaio de aderência. Foi selecionada a calda com pior desempenho nos ensaios de resistência à ação dos sais, para poder verificar e avaliar a degradação mais acentuada que os sais podem causar as caldas, analisando o pior cenário possível.

4.4.1. Ensaio de resistência mecânica à compressão em cilindros de injeção

Após 90 dias de cura, os provetes cilíndricos foram pesados e tiveram suas dimensões determinadas com o auxílio de um paquímetro digital. Em seguida, foram selecionadas duas amostras nas quais seria realizado o ensaio de durabilidade perante os sulfatos, enquanto nas demais seria realizado um processo semelhante, porém imersos apenas em água destilada. O ensaio teve um período de duração de 30 dias. Os provetes foram numerados e identificados por “a” e “s”, representando provetes ensaiados em água destilada e após o ensaio de resistência aos sulfatos respectivamente, para facilitar sua identificação.

Após a realização do ensaio de durabilidade, as amostras cilíndricas foram novamente pesadas e tiveram suas dimensões determinadas. As dimensões não apresentaram variação significativa, portanto foram consideradas como iguais no início e ao fim do ensaio. Por fim, pode-se calcular a massa volúmica, a partir da divisão das massas pelos volumes. Os pesos inicial e final, as dimensões e a massa volúmica inicial e final dos provetes cilíndricos, assim como a variação percentual, estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Dimensões, pesos, massas volúmicas e variação percentual dos provetes cilíndricos.

Prov.	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (l)	Massa volúmica inicial (kg/m ³)	Massa volúmica final (kg/m ³)	VPmv (%)
1a	9844,3	9949,9	143,71	291,86	4,73	2079,44	2101,75	1,07
2a	9671,0	9773,8	143,66	286,58	4,65	2081,82	2103,95	1,06
3s	9792,5	10032,3	143,96	291,34	4,74	2065,13	2115,70	2,45
4s	9862,6	10086,6	142,49	294,05	4,69	2103,35	2151,19	2,27

Semelhantemente ao encontrado nos provetes prismáticos para a calda CCM, todos os provetes cilíndricos obtiveram um ganho de massa. Notou-se novamente pouca variação de peso das amostras, com a massa volúmica variando em média em torno de 1,07% para provetes ensaiados em água destilada e 2,36% para os ensaiados em sulfatos. Assim como visto para os provetes prismáticos, a variação no peso não foi significativa, porém foi maior nos provetes ensaiados para sulfatos do que para os de água destilada.

As análises visuais foram realizadas constantemente, durante todo o ensaio. A realização do ensaio está representada na Figura 29a. Observou-se inicialmente o surgimento de eflorescências após o 10º ciclo, que foram gradualmente aumentando até o estado visualizado na Figura 29b.

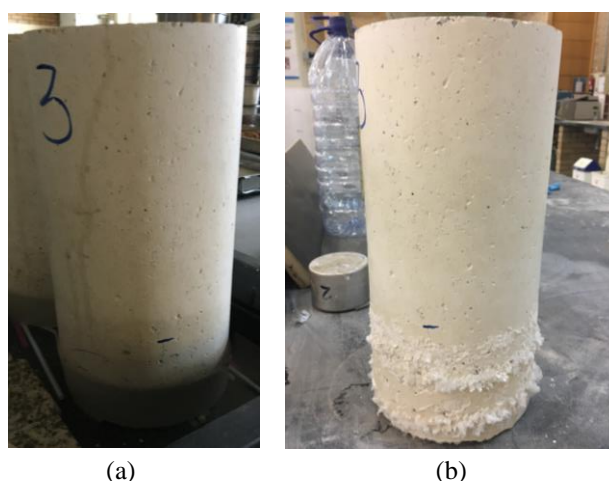


Figura 29 – (a) ensaio de resistência aos sulfatos; (b) eflorescências após 30 ciclos.

As eflorescências surgiram em duas zonas distintas, sendo mais protuberantes aproximadamente na metade da altura e na linha do nível da solução. Ainda, notou-se que havia a formação de uma camada pouco proeminente um pouco acima do nível da solução. As eflorescências foram mais aparentes que as vistas nos provetes prismáticos. Além das eflorescências, não havia vestígios de alterações ou deteriorações nos provetes. Após 30 ciclos, os provetes foram ensaiados referente à sua resistência à compressão. Na Tabela 27, estão expostos os resultados das tensões de ruptura nos provetes cilíndricos.

Tabela 27 – Tensões de ruptura dos provetes cilíndricos.

Provete	F (kN)	f_c (MPa)	Média
1c	209,14	11,83	11,95
2c	213,36	12,07	
3s	179,14	10,14	10,23
4s	182,51	10,33	

O modo de ruptura foi semelhante para ambos conjuntos de provetes. A fissuração foi majoritariamente vertical, sendo mais aparente na parte superior do cilindro. Para provetes em condições normais que não passaram por ensaios de durabilidade, Klosowski (2019)⁷³ obteve valores de 9,2 MPa e 8,2 MPa para as caldas FB e CC, respectivamente, aos 28 dias de cura. Luso (2012)²⁷, para provetes em condições normais, encontrou 13,9 MPa para a calda CCM, valor próximo, porém superior aos encontrados nesta pesquisa e a autora encontrou valores próximos de 24 MPa, 22 MPa e 7 MPa para caldas de formulação comercial estudadas, em provetes com granito amarelo. Os resultados encontrados nesta pesquisa encontram-se entre este intervalo de valores.

Os cilindros submetidos aos ciclos de sulfatos obtiveram resistência aproximadamente 14% inferior aos provetes de água destilada. Para provetes de uma calda comercial, Luso (2012)²⁷ encontrou tensões de ruptura de 13,1 MPa e 12,4 MPa, para provetes mantidos em câmara úmida e após ensaios de sulfatos, respectivamente, representando uma variação de 5%. Ambos os ensaios se demonstraram pouco danosos nestas condições e para 30 ciclos de sulfatos, com pouca perda de resistência à compressão. Este fato pode ser explicado por uma boa aderência do granito e da calda, que compensa a perda de resistência após os ensaios de durabilidade.

Gonçalves (2013)¹¹⁰ obteve, em provetes injetados que não passaram por ensaios de durabilidade, valores de 1,85 MPa e 1,75 MPa para provetes de caldas em laboratório e 6,95 MPa e 3,98 MPa para as caldas comerciais em provetes com diâmetro de 50 mm. Valluzzi (2000)¹⁶ obteve uma média de 1,46 MPa, sendo o maior resultado 2,15 MPa. Já Kalagri *et al* (2010)³⁶ obteve um máximo de 3,26 MPa em cilindros de diâmetro de 250 mm e altura de 500 mm. Os estudos não realizaram ensaios de resistência à ação dos sais, porém apresentam resultados baixos quando comparados à calda CCM. Tais resultados podem ser justificados devido à falta de cimento nas misturas ou mesmo a piores resultados no ensaio de aderência, que causariam baixos resultados na resistência à compressão. Nota-se também que, a exceção das caldas comerciais estudadas por Gonçalves (2013)¹¹⁰, todas as caldas apresentaram baixos valores de compressão em provetes prismáticos.

A resistência à compressão das caldas em provetes prismáticos alcançou uma média de 30,40 MPa para a calda CCM, porém a resistência nos provetes cilíndricos alcançou 11,95 MPa como valor máximo. Tal fato corrobora a hipótese que a resistência à compressão das caldas não é necessariamente a propriedade decisiva para a eficiência mecânica quando injetada em estruturas, conforme Vintzleou (2006)²⁶ e Binda *et al* (2006)¹⁸.

4.4.2. Determinação da aderência ao suporte pétreo

Durante o processo de desmolde, mesmo este sendo realizado cuidadosamente, 3 dos 18 provetes descolaram-se do substrato. Os restantes foram mantidos em câmara úmida durante 90 dias para o processo de cura, onde não foi observada formação de fissuras nem descolamento das amostras. Após este período, os provetes foram divididos em 3 grupos. Três provetes foram ensaiados apenas com água destilada, 6 provetes foram ensaiados em solução de sulfatos e 6 foram ensaiados em soluções de cloretos. Os ensaios foram realizados conforme 3.4.4 e 3.4.5 por um período de 30 ciclos cada.

O ensaio de resistência aos sulfatos se provou mais danoso que o ensaio de resistência aos cloretos, uma vez que três provetes, durante o ensaio, se soltaram do substrato (Figura 30a). O descolamento foi verificado em três provetes, após o 10º, 13º e 15º ciclo. As amostras foram imersas normalmente em solução, porém, ao retirá-las, notou-se seu desprendimento do granito, inutilizando as amostras para este ensaio.

Após o ensaio de resistência aos sulfatos, observou-se o aparecimento de eflorescências especialmente concentradas na circunferência superior do cilindro, porém presente em todo o provete, incluindo no substrato granito, ainda que em menor quantidade (Figura 30b). As eflorescências começaram a surgir após o 10º ciclo, gradualmente aumentando até o 30º ciclo. Os provetes, após a realização do ensaio de resistência aos cloretos, não apresentaram eflorescências ou mudanças de cor. Os provetes após 30 ciclos do ensaio de resistência à cloretos estão ilustrados na Figura 30c.

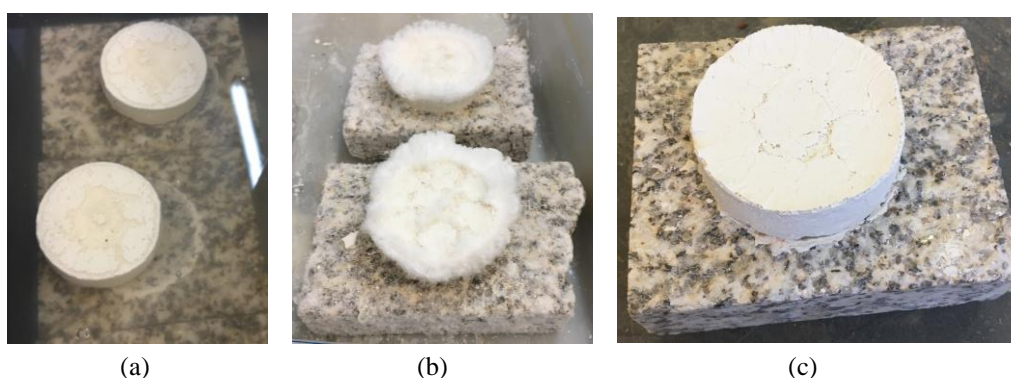


Figura 30 – (a) Descolamento durante o ensaio de sulfatos; (b) Eflorescências após 30 ciclos do ensaio de sulfatos; (c) Proвете após 30 ciclos do ensaio de cloretos.

Após os ensaios, foi realizada a regularização das superfícies dos provetes com o auxílio de uma lixa. Mesmo com o esforço aplicado durante a regularização das superfícies os provetes se mantiveram aparentemente íntegros. Nas amostras que apresentavam eflorescências, foi

cuidadosamente passado um pano úmido, para que estas não interferissem no ensaio de aderência.

Um fator de grande importância é a avaliação das superfícies de ruptura. Em nenhum dos casos a ruptura ocorreu na interface entre pastilha e cola ou entre a argamassa e cola, casos que indicariam apenas que a resistência da calda com o granito foi superior à da cola. Também não foram observadas frações de rochas aderidas à superfície da calda, possivelmente devido a maior seção transversal do granito em comparação com a da calda, que acaba atenuando a tensão sofrida pelo material. Tal situação garante que a tensão aplicada se mostre mais atenuada ao granito, uma vez que a transferência de esforços ocorre para uma maior área do substrato.

Em um dos provetes que passou pelo ensaio de resistência aos sulfatos, verificou-se que a ruptura ocorreu na calda (Figura 31a). Notou-se também uma coloração esverdeada escura no interior da amostra. Neste caso, conclui-se apenas que a resistência de aderência não pode ser determinada, porém é superior ao valor obtido no ensaio. Logo, para este provete, pode-se apenas concluir que a resistência de aderência é maior que 0,816 MPa, valor que foi desconsiderado.

Em todos os provetes restantes, a ruptura ocorreu na interface argamassa/substrato, conforme a Figura 31b. Nesta situação, segundo a norma ABNT NBR 13528 (2010)¹⁰⁹, o valor da resistência de aderência à tração é o valor obtido no ensaio. Em nenhum dos casos observou-se o destacamento de pedaços do substrato granito, porém em alguns pequenos pedaços de calda mantiveram-se presos à pedra. Tais pedaços apresentavam pequenas dimensões e não foi considerado que estes interviam no resultado do ensaio.

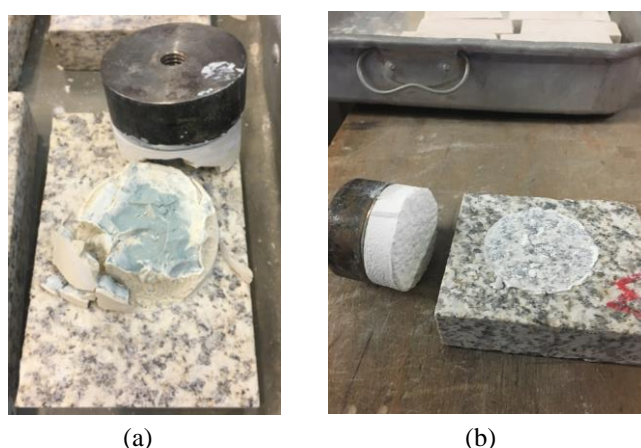


Figura 31 – (a) Ruptura na argamassa; (b) Ruptura na interface argamassa/substrato.

Os valores médios encontrados para resistência à tração e os desvios padrão nas situações estudadas, para ensaios de cloretos e sulfatos, assim como provetes de água destilada, ensaiados ao fim de 15 e 30 ciclos, estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Valores médios da tensão de ruptura à tração dos provetes cilíndricos.

Ensaio	Ciclos	Ra (MPa)	σ (MPa)
Cloretos	15	0,828	0,069
Cloretos	30	0,797	0,046
Sulfatos	15	Soltaram-se durante o período de ensaios	
Sulfatos	30	0,902	0,059
Água destilada	15	Soltaram-se na desmoldagem	
Água destilada	30	0,893	0,041

Luso (2012)²⁷ estipulou um valor de aderência razoável como no mínimo 0,7 MPa, para caldas à base de cal, valor adotado também neste trabalho. Para os provetes de água destilada, o valor de ruptura média à tração ao fim de 30 ciclos obtido foi de 0,893 MPa, extremamente próximo ao encontrado por Luso (2012)²⁷ para calda de mesma formulação, de 0,87 MPa. Em sua pesquisa, a autora obteve 0,670 MPa para uma calda comercial que não passou por nenhum ensaio de envelhecimento acelerado, portanto, pode-se observar que os valores de aderência obtidos nesta tese foram bastante satisfatórios.

Mesmo após os ensaios de durabilidade para ambos os sais, a calda CCM apresentou todos os resultados acima do estipulado como valor mínimo. O resultado após 15 ciclos do ensaio de resistência à cloretos foi quase 7% abaixo do encontrado nos provetes de água destilada. O menor resultado obtido foi após 30 ciclos do ensaio de resistência à cloretos, de 0,797 MPa, aproximadamente 4% menor que o resultado após 15 ciclos de cloretos e 11% que o resultado dos provetes de água destilada.

Curiosamente, o ensaio de sulfatos que se mostrou mais danoso durante sua realização, no qual três provetes soltaram-se espontaneamente do substrato, apresentou a maior média de tensão de ruptura dentre todos os casos estudados. O resultado foi extremamente próximo àquele encontrado nos provetes de água destilada, aproximadamente 1% maior que os de água e 13% maior que o encontrado no ensaio de cloretos, para o mesmo período.

Comparando com resultados obtidos por Klosowski (2019)⁷³, cujo resultado máximo foi de 0,660 MPa para a calda comercial Fassa Bortolo, os resultados encontrados neste estudo foram bastante satisfatórios. As caldas apresentaram bons resultados aos ensaios de resistência aos sais, num geral. O pior resultado encontrado (ao fim de 30 ciclos de cloretos) foi aproximadamente 0,1 MPa abaixo dos provetes que passaram pelo ensaio de água destilada.

Uma hipótese a se considerar é que a interface entre calda e substrato esteja, neste ensaio, protegida de certa forma pelo volume de calda e de granito que a encobre. Ainda que haja penetração dos sais pela circunferência da calda no encontro com o substrato, é possível que apenas 30 ciclos não seja suficiente para atingir a maior parte da área de superfície da interface e assim, não afeta tanto a aderência quanto inicialmente foi suposto. Uma sugestão para trabalhos futuros é a realização de ciclos por um período mais longo que o realizado nesta pesquisa, podendo verificar desta forma a veracidade desta hipótese.

4.5. Considerações finais

Para auxiliar a compreensão das informações apresentadas, os resultados mais relevantes da presente pesquisa estão dispostos nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 – Valores médios das propriedades estudadas para todas as caldas.

Propriedades	FB										CC										CCM																		
Características em ensaio endurecido																																							
Massa específica (g/cm ³)	1,75										1,57										1,47																		
Resistência à flexão aos 28, 90 e 120 dias (MPa)	4,38	4,35	4,87	1,60	2,21	2,42	2,81	3,11	3,27	4,38	4,35	4,87	1,60	2,21	2,42	2,81	3,11	3,27	4,38	4,35	4,87	1,60	2,21	2,42	2,81	3,11	3,27												
Resistência à compressão aos 28, 90 e 120 dias (MPa)	18,26	17,98	20,39	13,33	16,42	17,36	21,17	30,40	31,07	18,26	17,98	20,39	13,33	16,42	17,36	21,17	30,40	31,07	18,26	17,98	20,39	13,33	16,42	17,36	21,17	30,40	31,07												
Coef. capilaridade (kg/m ² .s ^{0,5})	0,10										0,17										0,18																		
Absorção capilar (kg/m ²)	14,98										24,50										22,59																		
Características após ensaios de imersão e secagem em solução																																							
Resistência à compressão - água destilada aos 10, 20 e 30 ciclos (MPa)	18,12	16,40	16,27	17,30	17,07	16,93	28,55	27,79	30,28	18,12	16,40	16,27	17,30	17,07	16,93	28,55	27,79	30,28	18,12	16,40	16,27	17,30	17,07	16,93	28,55	27,79	30,28												
Resistência à compressão - cloretos aos 10, 20 e 30 ciclos (MPa)	13,46	13,68	15,69	15,26	15,06	18,83	21,18	21,63	23,17	13,46	13,68	15,69	15,26	15,06	18,83	21,18	21,63	23,17	13,46	13,68	15,69	15,26	15,06	18,83	21,18	21,63	23,17												
Resistência à compressão - sulfatos aos 10, 20 e 30 ciclos (MPa)	14,77	16,77	16,49	17,29	16,51	18,92	23,49	21,03	21,20	14,77	16,77	16,49	17,29	16,51	18,92	23,49	21,03	21,20	14,77	16,77	16,49	17,29	16,51	18,92	23,49	21,03	21,20												

Tabela 30 – Valores médios das propriedades estudadas para a calda CCM e granito.

Propriedades	CCM	
Características relacionadas à interação de pedra e da calda CCM		
Tempo de injetabilidade (s)	91,32	
Resistência à compressão - água destilada (MPa)	11,95	
Resistência à compressão - sulfatos (MPa)	10,23	
Aderência - água destilada aos 15 e 30 ciclos (MPa)	Soltaram-se na desmoldagem	0,893
Aderência - cloretos aos 15 e 30 ciclos (MPa)	0,828	0,797
Aderência - sulfatos aos 15 e 30 ciclos (MPa)	Soltaram-se durante o período de ensaios	0,902

Os valores de resistência à flexão das caldas apresentaram alta dispersão nos resultados, entre 2,42 e 4,87 MPa aos 120 dias. Estes resultados condizem com os encontrados na literatura, apresentando valores medianos e dentro do intervalo de estudos já realizados, apesar de a única calda a atender ao especificado na ficha técnica da calda Fassa Bortolo foi a própria calda comercial.

Para a resistência à compressão, os valores encontrados foram satisfatórios. Todos os resultados, à exceção da calda CC aos 28 dias, ficaram acima do estipulado na ficha técnica da calda FB. Ainda, foi observado que nenhum dos resultados excediam o limite superior com relação ao substrato granito, garantindo assim uma melhor compatibilidade mecânica.

Os resultados do coeficiente de capilaridade e o valor assintótico obtidos foram relativamente baixos, indicando caldas com baixa absorção, o que diminui a probabilidade do ingresso de sais danosos à estrutura. Ainda, a menor quantidade de água no interior da estrutura diminui a deterioração causada por outros meios, como lixiviação e ciclos de gelo e degelo. Porém nota-se que o ensaio de capilaridade não necessariamente indica o comportamento das caldas perante ensaios com imersão em soluções salinas.

Para ensaios de resistência aos sais, tanto para sulfatos quanto para cloretos, todos os provetes aumentaram em peso. Os ensaiados em cloretos não apresentaram alterações físicas, seja na forma de eflorescências ou com formação de fissuras. Nos provetes ensaiados com sulfatos pode se verificar a formação de eflorescências, que mostram a existência de lixiviação de matéria dentro da calda.

Ainda que os cloretos não apresentem eflorescências, pode-se observar que ambos os sais pioram o desempenho das caldas. Seu mecanismo de degradação é diferente dos sulfatos, porém pode ser verificado em todos os ensaios realizados. Existe também a possibilidade de ocorrer um processo de lixiviação na estrutura interna dos provetes perante exposição aos cloretos, porém o sal manter-se dissolvido em solução, com baixa aderência à superfície do provete. Além da degradação devido à exposição aos sais, notou-se também que apenas o uso da água destilada em ciclos de imersão e secagem dos provetes é suficiente para causar deterioração, ainda que em menor intensidade quando comparado aos cloretos e sulfatos.

A calda CCM que apresentou maiores resistências mecânicas também apresentou maior perda de resistência percentual de resistência aos sais, resultado que diverge do esperado, uma vez que o metacaulim em geral aumenta a resistência aos sais nas caldas. É de se notar, no entanto, que apesar da maior perda percentual de resistência, os resultados da calda CCM foram superiores a todos os demais. Apesar da CC apresentar piores resultados em estado normal, ao ser ensaiada perante os sais, a calda apresentou um comportamento melhor que as outras.

Foi observado que as resistências à compressão ao fim de 30 ciclos foram, para a maioria dos provetes, superiores às aquelas ao fim de 20 ciclos. Duas hipóteses foram levantadas: (i) que o preenchimento dos poros diminui os vazios e podem aumentar a resistência à compressão e (ii) que a formação de microfissuras exponha os cimentos anidros à água, que acabam adquirindo maior resistência. Verificou-se que, mesmo após os ensaios de durabilidade, tanto para cloretos quanto para sulfatos, as caldas apresentaram resultados de resistência à compressão dentro do intervalo encontrado na literatura para o material.

Em sua interação com o substrato granito, o ensaio de resistência aos sais também não foi suficiente para inviabilizar o uso das caldas. Ambas a resistência à compressão dos cilindros injetáveis e a aderência apresentaram resultados de acordo com o apresentado na literatura e superior aos requisitos mínimos estabelecidos. De fato, nota-se que, quando analisada em conjunto com o granito, as caldas apresentaram menor perda de resistência e variação de massa, indicando a importância do estudo do conjunto substrato+caldas.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões adquiridas com este estudo. As caldas foram analisadas com relação ao seu comportamento em estado normal e em três situações, após ensaios perante a cloretos, sulfatos e água destilada. O procedimento experimental foi dividido em três fases. A primeira fase correspondeu a caracterização de caldas com ensaios no estado endurecido de provetes prismáticos, de modo a avaliar seu desempenho no que se refere às características mecânicas e a durabilidade.

A segunda fase correspondeu a análise de provetes cilíndricos compostos por calda de injeção e granito amarelo, caracterizando-a novamente em ensaios de durabilidade. A terceira fase correspondeu a realização de provetes com base retangular, propriedade fundamental para caldas de injeção, tanto em estado normal quanto perante sais.

5.1. Conclusões

A preocupação na reabilitação e reforço de alvenarias antigas compreende uma gama de conhecimento cada vez mais estudada. A injeção de caldas fluidas no interior destas alvenarias é uma das técnicas comumente utilizadas para reestabelecer a integridade e continuidade da estrutura. Como há grande variedade de materiais e composições de alvenarias antigas, o ideal é a realização de ensaios para verificar a compatibilidade para cada caso, entre a calda a ser utilizada e o substrato em que se pretende executar a técnica.

O presente trabalho teve como objetivo principal contribuir para aumentar o conhecimento de três caldas previamente caracterizadas no quesito reológico e caracterizá-las especialmente no quesito durabilidade, com relação a sua resistência química. Além do estudo das características mecânicas em situações normais, as caldas foram analisadas após ensaios cíclicos de resistência aos sais, nos quais os provetes foram expostos a soluções salinas.

A partir dos ensaios realizados neste trabalho, chegou-se as seguintes conclusões. Inicialmente, nota-se a falta de correlação entre os resultados de capilaridade e os de durabilidade aos sais. Caldas que obtiveram resultados semelhantes no ensaio de capilaridade apresentaram comportamentos extremamente diferentes perante os sais. Mesmo assim, observou-se que qualquer ciclo de molhagem e secagem tem como consequência a deterioração dos provetes, seja apenas com água destilada ou com a presença de sais.

É possível observar também que o cloreto causou maior deterioração que o sulfato para as caldas FB e CC, porém a deterioração foi semelhante para a calda CCM perante ambos os

sais. A calda CCM foi a que apresentou maior perda percentual de resistência à compressão para ambos os sais, porém todos os valores de resistência foram superiores aos das demais caldas. Curiosamente, a calda que apresentou menores perdas percentuais de resistência foi a CC, que obteve os piores resultados em situação normal. Nota-se que o uso de apenas água destilada afetou negativamente todas as caldas, sendo a calda FB apresentou maior perda de resistência, seguida da calda CCM e enfim a calda CC.

É importante levar em consideração que a eficiência destes procedimentos de ensaios de cloretos e sulfatos ainda não foi comprovada para as caldas de injeção. Neste ensaio, o formato do provete e a área efetiva que fica exposta ao ar das caldas são diferentes daquelas em uma situação real, fatores que podem influenciar no modo e intensidade de degradação. Além disso, os mecanismos de ataque dos sais ainda não são totalmente conhecidos e não há certeza da melhor técnica para avaliação dos danos causados.

Analisando as caldas isoladamente, pode-se notar que as caldas realizadas em laboratório apresentavam desempenho mecânico semelhante ou superior a calda comercial. Todas as caldas em estudo apresentaram valores de resistência à flexão, à compressão e capilaridade adequados. As boas propriedades mecânicas, somadas ao baixo custo dos materiais que compõe a calda, viabilizam a substituição de caldas comerciais pelas caldas realizadas *in situ*.

Na segunda fase desta pesquisa, foram realizados provetes cilíndricos compostos por calda e granito. Tanto os provetes ensaiados em água destilada quanto os ensaiados com sulfatos apresentaram variação da massa volúmica ao fim do ensaio. Esta variação foi mais significativa para provetes de sulfatos. Durante o período de ensaios, apareceram eflorescências concentradas majoritariamente na parte no provete em contato com a solução. No quesito resistência à compressão, ainda que o sulfato tenha causado maior deterioração quando comparado à água destilada, os provetes apresentaram pouca variação na resistência à compressão. Tal situação pode ser explicada por bons resultados de aderência entre granito e calda, que compensa a degradação e perda de resistência pelo ataque dos sulfatos.

Na terceira fase da pesquisa foram realizados provetes para o ensaio de aderência. Após serem submetidos a ensaios com sulfatos, os provetes apresentaram eflorescências em toda sua área superficial. Com relação ao ensaio de aderência, todos os provetes apresentaram resultados satisfatórios, com valores acima do limite mínimo determinado. Os ensaios de durabilidade causaram perda de resistência pouco significativa. Uma hipótese é que a realização de 30 ciclos não é suficiente para testar o efeito que os sais têm em relação à aderência, pois a camada de

calda e granito protegem a interface da chegada dos sais, sendo necessário realizar os ciclos por um período mais longo para poder verificar a deterioração causada.

Os resultados experimentais obtidos pelos ensaios mecânicos mostram que, para caldas que não foram submetidas a ensaios de durabilidade, todas as diferentes composições aqui estudadas apresentaram resultados satisfatórios para estas propriedades, apesar da alta amplitude entre os resultados de cada uma. Mesmo após a realização de ensaios de sais, as caldas apresentaram desempenho considerado satisfatório para injeção, em especial quando analisada em conjunto com o substrato.

5.2. Trabalhos futuros

O presente trabalho mostra a necessidade de estudos complementares que permitam a aplicação de caldas de injeção nas mais diversas estruturas. É vital não só caracterizar mecanicamente a calda, como também analisar no quesito durabilidade e economia. Como sugestão, propõe-se:

- Analisar caldas com composições variadas perante os ensaios realizados nesta pesquisa para melhor conhecimento da compatibilidade entre caldas e diversos substratos;
- Avaliar a porosimetria por intrusão de mercúrio para estudar a dimensão dos poros de cada calda e sua influência nos ensaios de durabilidade;
- Realizar os ensaios abordados nesta pesquisa, em particular o de aderência, por períodos mais longos de exposição das caldas aos sais, de modo a verificar as resistências química e mecânica das caldas após maior impregnação dos sais;
- Realizar ensaios de envelhecimento artificial acelerado com ciclos de temperatura e umidade em condições extremas;
- Avaliar o comportamento diferenciado nos diversos ensaios, através de uma análise química mais detalhada, tendo como objetivo futuro a adequação de procedimentos de ensaio para estes materiais em específico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ferreira, PRR; Meira, GR. *Ensaaios acelerados empregados na indução da corrosão por cloretos – Análise a partir de concretos com a incorporação de resíduos de tijolos moídos*. In book: Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: Materiais e sustentabilidade. 2016.
2. Menezes, M; Tavares, ML. *The safeguard and rehabilitation of the city image for the conservation of the urban landscape . A multidisciplinary perspective*. Superior Technical School of Architecture of the Technical University of Madrid. Madrid, 2008.
3. Veiga, MR. *Intervenções em revestimentos antigos: Conservar, substituir ou... destruir*. In 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB). Porto, 2006.
4. Velosa, AL; Veiga, MR. *Development of artificial ageing tests for renders – Application to conservation mortars*. In 7th International Brick Masonry Conference (7 IBMAC). Londres, 2006.
5. Brás, AMA. *Grout optimization for masonry consolidation*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011.
6. Collepardi, M. *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, 23, 81-102. Ancona, 1990.
7. Pinho, FFS. *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2007.
8. Martins da Silva, RA. *Caracterização experimental de alvenaria antiga: Reforço e efeitos diferidos*. Dissertação, Universidade do Minho. Minho, 2008.
9. Binda, LA; Cardani, G; Saisi, A. *A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair*. In: International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry. 2009.
10. Vintzileou E; Miltiadou-Fezans A. *Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts*. Engineering Structures, 30. 2008.
11. Luso, E; Lourenço, PB; Ferreira, RM. *Injecções para consolidação de construções em terra: revisão do conhecimento e métodos de ensaio*. In 5º Seminário de arquitetura de terra em Portugal. Aveiro, 2007.

12. Rodrigues, JMV. *Principais técnicas de consolidação e reforço de paredes de edifícios antigos*. Dissertação, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.
13. Cappellari, M; Daubresse, A; Chaouche, M. *Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention*. *Construction and Building Materials*, 38. 2013.
14. Rosário, FWM do. *Caracterização de caldas fluidas para injeção em alvenaria antiga. Estudo da aderência em tijolos e da durabilidade*. Dissertação, Instituto Politécnico de Bragança. Portugal, 2019.
15. Binda, L; Modena, C; Baronio, G; Abbaneo, S. *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. *Construction and Building Materials*, Vol 11, No 3. 1997.
16. Valluzzi, MR. *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Dissertação, Università degli studi di Trieste. Trieste, 2000.
17. Oliveira, S; Barros, O; Seabra, MP; Silva, L; Labrincha, JÁ; Ferreira, VM. *Comportamento de argamassas e elementos de alvenaria antiga sujeitos à acção de sais*. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2007.
18. Binda, L; Pina-Henriques, J; Anzani, A; Fontana, A; Lourenço, PB. *A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling*. *Engineering Structures*, 28. Portugal, 2006.
19. Schuller, MP; Atkinson, RH; Borgsmiller, JT. *Injection grouting for repair and retrofit of unreinforced masonry*. 10th IB MAC. 1994.
20. Schueremans, L; Van Gemert, D. *Reliability analysis in structural masonry engineering*. IABSE Colloquium "Saving buildings in central and eastern Europe". 1998.
21. Perret, S; Ballivy, G; Palardy, D; Laporte R. *Formulation of high-performance cement grouts for the rehabilitation of heritage masonry structures*. Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. 2003.
22. Adami, CE; Vintzileou, E. *Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts*. *Materials and Structures*, 41. 2008.
23. International Council on Monuments and Sites - ICOMOS. *Recomendações para a análise, conservação e restauro do património arquitetónico*. Lisboa, 2004.
24. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7681. *Caldas de cimento*

- para injeção*. Rio de Janeiro, 2013.
25. Toumbakari, E-E. *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Dissertação, Universidade Católica de Leuven. Bélgica, 2002.
 26. Vintzileou, E. *Grouting of three-leaf stone masonry : Types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting*. Structural analysis of historical constructions. New Dehli, 2006.
 27. Luso, E. *Análise experimental de caldas à base de cal para injeção de alvenaria antiga*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho. Minho, 2012.
 28. Tavares, ML. *A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Uma metodologia de estudo e reparação*. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.
 29. Silva Filho, LCP da. *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica*. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.
 30. Skalny, JP. *Concrete durability: An issue of national importance*. Symposium Paper. Concrete Durability, Scanlon, JM. Ed., ACI SP-1002. 1987.
 31. Carvalho, MAR de. *Ancoragens pré-esforçadas em obras geotécnicas. Construção, ensaios e análise comportamental*. Dissertação, Universidade do Porto. Porto, 2009.
 32. Neville, A; Aitcin, PC. *High performance concrete- An overview*. In Materials and Structures, 31. 1998.
 33. Gonçalves, TD. *Colocação a descoberto de alvenarias antigas originalmente revestidas e sujeitas à acção de sais solúveis. Utilização de hidrófugos de superfície*. Conference Paper, Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios, Vol 1. Lisboa, 2003.
 34. Helene, PRL. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
 35. Benavente, D; García del Cura, MA; Bernabéu, A; Ordóñez S. *Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method*. Engineering Geology, 59. 2001.
 36. Kalagri, A; Miltiadou-Fezans, A; Vintzileou, E. *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures, 43. 2010.

37. Rodrigues, MPSFF. *Argamassas de revestimento para alvenaria antiga. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2004.
38. Palomo, A; Puertas, F; Blanco, MT. *Mortars for restoration. Decay due to salt crystallization*. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. Madrid, 1996.
39. Wijffels, T; Lubelli, B. *Development of a new accelerated salt crystallization test*. Heron. 2006.
40. Arizzi, A; Viles, H; Cultrone, G. *Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings*. Construction and Building Materials, 28. 2012.
41. Schiavini, DN. *Análise da influência dos cimentos CP II - F - 32, CP IV - 32 RS e CP V - ARI na resistência ao ataque por sulfato*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.
42. Álvarez, JMO; Pérez, MDE; Escribano, RRR; Navarro, JLP; Martín, IS. *Microstructural effects of sulphate attack in sustainable grouts for micropiles*. Materials (Basel). 2016.
43. Hartshorn, SA; Swamy, RN; Sharp, JH. *Engineering properties and structural implications of Portland limestone cement mortar exposed to magnesium sulphate attack*. Advances in Cement Research, 13, University of Sheffield. 2001.
44. Gaze, ME; Crammond, NJ. *The formation of thaumasite in a cement : lime : sand mortar exposed to cold magnesium and potassium sulfate solutions*. Cement & Concrete Composites, 22, Building Research Establishment. 2000.
45. Hartshorn, SA; Sharp, JH; Swamy, RN. *The thaumasite form of sulfate attack in Portland-limestone cement mortars stored in magnesium sulfate solution*. Cement & Concrete Composites, 24. 2002.
46. Justnes, H. *Thaumasite formed by sulfate attack on mortar with limestone filler*. Cement & Concrete Composites, 25. 2003.
47. Khatib, JM; Wild, S. *Sulphate resistance of metakaolin mortar*. Cement & Concrete Research, 28. 1998.
48. Chen, JK; Jiang, MQ; Zhu, J. *Damage evolution in cement mortar due to erosion of sulphate*. Article in Corrosion Science, 50. 2008.
49. Cerulli, T; Pistolesi, C; Maltese, C; Salvioni D. *Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster*. Cement and Concrete Research,

33. 2003.
50. Lubelli, B; Nijland, TG; Hees, RPJ Van; Hacquebord, A. *Effect of mixed in crystallization inhibitor on resistance of lime–cement mortar against NaCl crystallization*. Construction and Building Materials, 24. 2010.
51. Rodrigues, PF; Henriques, FMA; Rato, VM. *Análise comparativa de argamassas pré-doseadas para aplicação em rebocos de edifícios antigos*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 2005.
52. Almeida, NG de; Faria, P; Pinto, AP. *Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para conservação do património construído*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 2007.
53. Akin, M; Özsan, A. *Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests*. Bullerin of Engineering Geology and the Environment. 2010.
54. Angeli, M; Bigas, J-P; Benavente, D; Menéndez, B; Hébert, R; David, C. *Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage*. Environmental Geology, 52. 2007.
55. Tsui, N; Flatt, RJ; Scherer, GW. *Crystallization damage by sodium sulfate*. Journal of Cultural Heritage, 4. 2003.
56. Mora, P; Mora, L; Philippot, P. *La conservazione delle pitture murali*. Bologna: Editrice Compositori, 2001.
57. Rizzon, AC. *Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco*. Dissertação, Universidade Luterana do Brasil. Canoas, 2006.
58. Calçada, LML. *Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto*. Tese de doutoramento, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2004.
59. Guimarães, AT da C. *Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos*. Tese, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
60. Isaia, GC. *Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo com vistas à corrosão da armadura*. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
61. Hoffman, AT. *Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto

- Alegre, 2001.
62. Lubelli, B; Hees, RPJ Van; Huinink, HP; Groot, CJWP. *Irreversible dilation of NaCl contaminated lime–cement mortar due to crystallization cycles*. Cement & Concrete Research, 36. 2006.
 63. Carvalho Júnior, VN de. *Deposição atmosférica e composição química da água de chuva*. Revista Tecnologia, 25. 2004.
 64. Galvão, P. *Chuva ácida: Estudo de caso no campus USP/SP*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.
 65. Comitê Euro-International du Béton - CEB. *Durable concrete structures*. CEB Design guide. 1992.
 66. Mehta, PK; Monteiro, PJM. *Microstructure, properties and materials*. 4ª edição. 2008.
 67. Flatt, RJ. *Salt damage in porous materials: How high supersaturations are generated*. Journal of Crystal Growth, 242. 2002.
 68. Benavente, D; García del Cura, MA; Fort, R; Ordóñez, S. *Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength*. Engineering Geology, 74. 2004.
 69. Centurione, SL; Kihara, Y; Battagin AF. *Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato*. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.
 70. Mehta, PK. *Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete - Another look*. Cement & Concrete Research, 13. 1983.
 71. American Society for Testing and Materials - ASTM C1012, vol 04.01. *Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*. 2013.
 72. Norma Portuguesa - NP EN 12370. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. 2001.
 73. Klosowski, B. *Caracterização de caldas de injeção a base de cal hidráulica para consolidação de alvenarias de pedra*. Dissertação, Instituto Politécnico de Bragança. Portugal, 2019.
 74. Gomes, A; Pinto, APF; Pinto, JB. *Materiais de construção: Gesso e cal de construção*. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, 2013.
 75. Sequeira, AC; Frade, D; Gonçalves, P. *Cal hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. Assoc Port dos Fabr Argamassas e ETICS. 2007.

76. Faria, P. *A cal na composição e conservação dos revestimentos*. XI Congresso Internacional de Reabilitação do Património Arquitetónico e Edificado. 2012.
77. Teixeira, MAR. *Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado*. Dissertação, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2013.
78. Matias, GML. *Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2014.
79. Rago, F; Cincotto, MA. *Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
80. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 12989. *Cimento Portland branco*. Rio de Janeiro, 1993.
81. Kirchheim, AP. *Concreto de cimento Portland branco estrutural: Avaliação da carbonatação e absorção capilar*. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
82. Neville, AM. *Propriedades do concreto*. 5ª edição. 2015.
83. Catarino, JF. *Avaliação da influência do cimento na interação cimento-superplastificante*. Dissertação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2012.
84. Hamad, BS. *Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete*. American University of Beirut. Beirut, 1995.
85. Fonseca, AA; Nunes, A. *Betão branco; fabrico características e utilização estrutural*. In: 2^{as} Jornadas de Estruturas de Betão. Lisboa, 1998.
86. Helene, PRL; Terzian, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. Projeto de Divulgação Tecnológica. 1992.
87. Souza, PSL. *Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
88. Rocha, GGN. *Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade*. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
89. Sabir, BB; Wild, S; Bai, J. *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement & Concrete Composites, 23. 2001.
90. Ferreira, RMS; Jalali, S. *Betão autocompactável - Influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes*. Universidade do Minho. 2002.

91. Yamakawa, C; Kishitani, K; Fukushi, I; Kuroha K. *Slump control and properties of concrete with a new superplasticizer*. II: High strenght in-situ concrete work at Hicariga-Oka housing project. Chapman and Hall. 1990.
92. Malhotra, VM. *Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: A review*. Concrete International, 15. 1993.
93. Luso, E; Lourenço, PB. *Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation*. Construction and Building Materials, 102. 2016.
94. Miranda, LC. *Definição e avaliação de uma calda para consolidação de alvenarias antigas. Estudo numérico da vulnerabilidade sísmica de um edifício "Placa."*. Dissertação, Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, 2014.
95. Le Maitre, RW. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences subcommission on the systematics of igneous rocks. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 1989.
96. Nogami, L. *Investigação da influência das características petrográficas e da rugosidade de placas de "granito e mármore" fixadas com argamassas*. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.
97. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5738. *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015.
98. British Standard - BS EN 196-1. *Methods of testing cement — Part 1: Determination of strength*. 1995.
99. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9479. *Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto*. Rio de Janeiro, 2006.
100. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR NM 45. *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
101. Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI EN 15801. *Conservation of cultural property. Test methods - Determination of water absorption by capillarity*. 2010.
102. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15259. *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro, 2005.
103. Universidade Nova de Lisboa - UNL / DEC - Fichas de Ensaio - Fe 12. *Pedras naturais e artificiais. Determinação da resistência à ação dos cloretos*. Caparica:

- FCT/UNL. 1999.
104. Zhang, J; Scherer, GW. *Comparison of methods for arresting hydration of cement*. Cement & Concrete Research, 41. 2011.
 105. Universidade Nova de Lisboa - UNL / DEC - Fichas de Ensaio - Fe 11. *Pedras naturais e artificiais. Determinação da resistência à ação dos sulfatos*. Caparica: FCT/UNL. 1996.
 106. Scrivener, KL. *Understanding and establishing sulfate resistance of cementitious materials*. 1st International Congress on Durability of Concrete (1st ICDC).Trondheim, Noruega. 2012.
 107. Norma Portuguesa - NP EN 12390-3. *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*. 2009.
 108. American Society for Testing and Materials - ASTM C1072. *Standard test methods for measurement of masonry flexural bond strength*. International. 2013.
 109. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 13528. *Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência a tração*. 2010.
 110. Gonçalves, NA. *Caldas de injeção pré-doseadas para alvenarias antigas. Estudo da capacidade de injeção*. Dissertação, Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, 2013.
 111. Shannag, MJ. *High-performance cementitious grouts for structural repair*. Cement and Concrete Research, 32. 2001.
 112. Ferragni, D; Forti, M; Malliet, J; Mora, P; Teutonico, JM; Torraca, G. *Injection grouting of mural paintings and mosaics*. In Adhesives and Consolidants: Preprints of the Contributions to the Paris Congress, 2-8, ed. N. S. Brommelle, 110-16. Londres, 1984.
 113. American Society for Testing and Materials - ASTM C-615. *Standard specification for granite dimension stone*. 1992.
 114. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15845-5. *Rochas para revestimento. Parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial*. Rio de Janeiro, 2015.