

# **BIOCIMENTAÇÃO COMO TÉCNICA PARA SELAGEM DE FISSURAS EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA EM BETÃO**

**Lucca Scholler Ferreira Bonetti**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadoras:

Professora Maria Rafaela Pinheiro Cardoso

Professora Dília Isabel Cameira Covas

### **Júri**

Presidente: Prof.<sup>o</sup> Vitor Faria e Sousa

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Maria Rafaela Pinheiro Cardoso

Vogal: Prof.<sup>a</sup> Inês Dos Santos Flores Barbosa Colen

**Julho de 2022**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao Centro de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para Sustentabilidade (CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal) por me receberem e me acolherem como investigador internacional, sob orientação da querida Professora Doutora responsável pelo Departamento de Geotecnia, Rafaela Cardoso, a qual me forneceu um acompanhamento extremamente próximo, me auxiliando ao longo do semestre de investigação e no desenvolvimento da Tese de Mestrado.

Deixo também meu muito obrigado à Professora Doutora Dídia Covas por me auxiliar durante o período de elaboração da Tese, colocando-se sempre à disposição quando necessário e a Sofia Duarte e Mariana Pinto por me ajudarem com a produção das bactérias, essenciais para este trabalho.

Ao Professor Sérgio Ângulo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, também deixo meu agradecimento por ter se proposto a ajudar com comentários importantes e *insights* adicionais sobre as possibilidades de análises e estudos sobre o tema.

Um agradecimento a toda equipe de apoio, nomeadamente aos técnicos de laboratório Pedro Costa e Francisco Almeida, pelo oferecimento de suporte com o manuseio dos equipamentos de laboratório no decorrer das atividades.

Não poderia deixar de agradecer à Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento (IDB/04625/2020) disponibilizado, o qual foi essencial para manter o bom andamento e evolução da pesquisa durante o período de setembro de 2021 a fevereiro de 2022, servindo como insumo para a minha Tese de Mestrado. Agradeço também à FCT I.P, pelo financiamento através do projecto CALCITE (ref. PTDC/ECI-EGC/1086/2021).

Por fim, um muito obrigado a minha família, sobretudo aos meus pais Ewerton Bonetti e Rita Bonetti por todo o respaldo que proporcionaram desde minha infância, sempre suportando e apoiando minhas causas, e dando todo o suporte que um filho poderia sonhar em ter. E ao meu irmão Yuri Scholler e a minha namorada Júlia Fontão, que sempre me incentivaram a seguir em frente.



## RESUMO

A fendilhação e abertura de fissuras em elementos de betão são um tipo de anomalia patológica bastante comum. São causadas por uma série de fatores, desde erros de projeto, até erros de execução e manutenção deficiente, que comprometem a resistência e durabilidade das estruturas por aumentar a penetração de agentes agressivos e reduzir a estanqueidade das peças de betão. No caso particular de reservatórios de água, as fissuras podem afetar principalmente a estanqueidade da estrutura, criando significativas perdas de água e afetando negativamente o comportamento destas estruturas.

A biocimentação é uma técnica alternativa às técnicas convencionais, “verde”, com baixa emissão de gases do Efeito Estufa, e inovadora para o tratamento e reparação das fissuras em betão por meio da utilização de bactérias não patogénicas do tipo *Bacillus pasteurii* que promovem reações químicas de precipitação de carbonato de cálcio com a ajuda da enzima urease. Esta realiza a hidrólise da ureia, proporcionando as condições ideais para o desenvolvimento do processo químico.

O corrente trabalho tem como objetivo o estudo da aplicação da técnica de biocimentação na reparação de fissuras em estruturas de betão em reservatórios de água no estado limite último inserido no contexto de perda da capacidade de reter e armazenar água. Assim, foram realizados ensaios experimentais em laboratório para a selagem de fissuras criadas artificialmente em placas de betão quadradas com 40 mm de espessura e 200 mm de comprimento, com aberturas de 0,1, 1 e 10 mm. No caso das amostras com 10 mm de abertura, houve adição de areia, escolhida por ser um elemento barato e de fácil compactação, para enchimento dos vazios com posterior tratamento por biocimentação.

Realizaram-se ensaios de porosidade, análise mineralógica, tração por flexão, ensaio de estanqueidade com coluna de água sob pressão de 10 kPa, termografia, propagação de ondas ultrassónicas, imagens microscópicas e modelação 3D.

Os resultados dos ensaios mostraram que a biocimentação é uma técnica de tratamento de fissuras bastante promissora e com boas perspetivas de selagem das fissuras em estruturas de betão com melhorias da ordem de 90 % em termos de estanqueidade se comparado com a situação de pré-tratamento. Esses são indícios de precipitação de biocimento e eficácia da técnica de biocimentação para tratamento de fissuras em reservatórios de água em betão.

Palavras-chave: Biocimentação, fissuras, bactérias, materiais de construção, reparação, reabilitação, reservatórios.



## ABSTRACT

Cracking in concrete structures is a very common pathology. It is developed due to several factors, from design errors to execution problems and poor maintenance, deviating the components' performance mechanisms in use. For the particular case of water storage tanks, the cracks reduce the capacity of the structure to retain water, which compromises its utilization.

In this case, biocimentation emerged as an alternative to the conventional methods, "green", by reducing the gases emissions, and innovative technique for the treatment and rehabilitation of the cracks using non-pathogenic bacteria *Bacillus pasteurii* that precipitates calcium carbonate with the help of enzyme urease that performs the hydrolysis of urea provided ideal conditions for the development of the chemical process.

The main objective of the current thesis is to study the technique of biocementation as an alternative for the treatment of cracks in water storage tanks in the context of ultimate limit state marked by several water loss due to failure to retain and storage water. Thus, the treatment was applied in artificial cracks made in concrete plates with 40 mm thickness and 200 mm length, with crack openings of 0.1, 1 and 10 mm to simulate the real scenario. In the case of samples of 10 mm opening, there was an addition of sand, chosen because it was a cheap material that can be easily compacted, to fill the voids with subsequent treatment by biocementation.

For this purpose, porosity tests, mineralogical analysis, bending tests, watertightness tests with water column under 10 kPa pressure, thermographic camera, ultrasonic waves propagation, microscopic images and 3D modeling were carried out.

The results of the tests were very satisfactory and showed good perspectives for sealing the cracks with improvements of 90 % or more when compared to the pre-treatment situation. It indicates the precipitation of biocement and the potential of the treatment for this purpose.

Keywords: Biocementation, cracks, bacteria, construction materials, repair, retrofit, water storage tanks.





# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO .....	1
1.2	OBJECTIVOS E METODOLOGIA .....	1
1.3	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2</b>	<b>REPARAÇÃO DE FISSURAS.....</b>	<b>3</b>
2.1	NOTA INTRODUTÓRIA.....	3
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE FISSURAS EM CONSTRUÇÕES .....	3
2.3	TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DE FISSURAS .....	4
2.4	FISSURAS EM RESERVATÓRIOS .....	6
2.5	TÉCNICAS DE REPARAÇÃO DE FISSURAS .....	9
2.5.1	<i>Tipos de técnicas de tratamento de fissuras .....</i>	<i>9</i>
2.5.2	<i>Injeção de resina epóxida, acrílica ou poliuretânica .....</i>	<i>11</i>
2.5.3	<i>Injeção de grouts cimentícios .....</i>	<i>13</i>
2.5.4	<i>Colmatação com argamassas ou mástique.....</i>	<i>14</i>
2.5.5	<i>Grampeamento ou costura de fissuras .....</i>	<i>14</i>
2.5.6	<i>Considerações complementares.....</i>	<i>15</i>
2.6	BIOCIMENTAÇÃO.....	15
2.6.1	<i>Descrição da técnica.....</i>	<i>15</i>
2.6.2	<i>Casos de estudo.....</i>	<i>17</i>
2.7	MOTIVAÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1	NOTA INTRODUTÓRIA.....	21
3.2	MATERIAIS.....	21
3.2.1	<i>Betão .....</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Areia .....</i>	<i>21</i>
3.2.3	<i>Bactérias.....</i>	<i>22</i>
3.2.4	<i>Solução de alimento .....</i>	<i>22</i>
3.3	CONSTRUÇÃO DAS FISSURAS ARTIFICIAIS A TRATAR .....	23
3.3.1	<i>Placas/lajetas de betão .....</i>	<i>23</i>
3.3.2	<i>Execução das fissuras artificiais .....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>Numeração das amostras .....</i>	<i>26</i>
3.4	TRATAMENTO POR BIOCIMENTAÇÃO .....	26
3.4.1	<i>Impermeabilização e enchimento .....</i>	<i>26</i>
3.4.2	<i>Preparação das bactérias .....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Aplicação das bactérias.....</i>	<i>30</i>
3.5	ENSAIOS REALIZADOS .....	32

3.5.1	<i>Ensaio para caracterização do betão</i>	34
3.5.2	<i>Ensaio para caracterização das fissuras e de sua selagem</i>	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>43</b>
4.1	NOTA INTRODUTÓRIA	43
4.2	RESULTADOS ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	43
4.2.1	<i>Porosidade</i>	43
4.2.2	<i>Ensaio para determinação da densidade das partículas</i>	44
4.2.3	<i>Análise mineralógica</i>	44
4.2.4	<i>Ensaio de tração por flexão</i>	45
4.3	RESULTADOS ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE SELAGEM DAS FISSURAS	45
4.3.1	<i>Análise mineralógica</i>	45
4.3.2	<i>Microscopia óptica e visualização do material de enchimento</i>	49
4.4	RESULTADOS ENSAIOS DE ESTANQUEIDADE PARA AVALIAÇÃO DA SELAGEM	50
4.4.1	<i>Nota introdutória</i>	50
4.4.2	<i>Situação de referência – amostras antes do tratamento</i>	51
4.4.3	<i>Situação ao longo dos ciclos – amostras durante o tratamento</i>	54
4.4.4	<i>Comparação da evolução dos resultados antes e após o tratamento</i>	62
4.5	ENSAIOS COMPLEMENTARES DE VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA SELAGEM	63
4.5.1	<i>Termografia</i>	63
4.5.2	<i>Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas</i>	65
4.5.3	<i>Modelação 3D</i>	67
4.6	ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS	69
4.6.1	<i>Amostras com fissura de abertura 0,1 mm</i>	69
4.6.2	<i>Amostras com fissura de abertura 1 mm</i>	69
4.6.3	<i>Amostras com fissuras de abertura 10 mm</i>	70
4.6.4	<i>Os melhores e os piores resultados</i>	71
4.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRATAMENTO DE BIOCIMENTAÇÃO PARA SELAGEM DE FISSURAS EM RESERVATÓRIOS	74
4.8	RECOMENDAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM CASOS REAIS	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>77</b>
5.1	CONCLUSÕES	77
5.2	ESTUDOS FUTUROS	78
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>I</b>
	ANEXO A – CATÁLOGO BACTÉRIA <i>BACILLUS PASTEURII</i>	I
	ANEXO B – FICHA TÉCNICA DA AREIA APAS30	II
	ANEXO C – ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE RELATIVA DAS PARTÍCULAS DO BETÃO	III
	ANEXO D - DEPOSIÇÃO DE BIOCIMENTO AO LONGO DO TEMPO	IV

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Sistematização da natureza e tipo de anomalia observadas em reservatórios e suas principais causas e soluções (Covas e Alegre, 2010). .....	7
Tabela 2.2 Tipos de intervenção para reparação de fissuras (Ab = abertura, Pf = Profundidade) (Estrela, 2018).....	10
Tabela 2.3 Análise comparativa das técnicas de reparação aplicáveis aos reservatórios. ....	11
Tabela 3.1 Caracterização da areia APAS30 usada para enchimento das fissuras com 10 mm. ....	22
Tabela 3.2 Concentrações dos produtos utilizados para a confecção da solução de alimento. ....	23
Tabela 3.3 Areia colocada em cada fissura com 10 mm de abertura.....	27
Tabela 3.4 Volume de vazios e fator de empacotamento em cada fissura com 10 mm de abertura... ..	28
Tabela 3.5 Proporções dos componentes da solução para a produção das bactérias em balões de 5, 25 e 300 ml. ....	29
Tabela 3.6 Quantidades de água adicionadas às amostras para saturação da superfície a ser tratada antes do início do tratamento. ....	31
Tabela 3.7 Caracterização de um ciclo de tratamento.....	31
Tabela 3.8 Volumes de inoculação de bactérias e solução de alimento por ciclo de tratamento. ....	31
Tabela 3.9 Calendarização da 1º ciclo de tratamento.....	31
Tabela 3.10 Calendarização da 2º ciclo de tratamento. ....	31
Tabela 3.11 Calendarização da 3º ciclo de tratamento. ....	31
Tabela 3.12 Classificação dos ensaios realizados. ....	32
Tabela 3.13 Ensaios realizados. ....	33
Tabela 4.1 Resultados porosidade total.....	43
Tabela 4.2 Resultados porosidade aberta. ....	43
Tabela 4.3 Resultados ensaio de resistência mecânica das amostras antes e após tratamento. ....	45
Tabela 4.4 Análise da melhoria da estanqueidade entre os diferentes ciclos de tratamento.....	63
Tabela 4.5 Resultados de referência para o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas. ....	66
Tabela 4.6 Análise da evolução dos resultados do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas ao longo dos ciclos de tratamento.....	66
Tabela 4.7 Ensaios de propagação de ondas ultrassônicas indicando melhores (rectângulo a azul) e piores (rectângulo a vermelho) amostras.....	74
Tabela 0.1 Calibração e valores de referência para o ensaio de caracterização da densidade das partículas do betão .....	iii
Tabela 0.2 Resultado ensaio para caracterização da densidade das partículas do betão .....	iii



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classes de fissuras de acordo com a abertura (Gaspar <i>et al.</i> , 2006). .....	3
Figura 2.2 Níveis de severidade de fissuração em função da abertura (Gaspar <i>et al.</i> , 2006). .....	3
Figura 2.3 Lupa medidora de fissura escala 0,10 mm (Mercado Livre, 2022). .....	5
Figura 2.4 Representação de um fissurómetro (Brito, 2021). .....	5
Figura 2.5 Medição da profundidade de fissuras em uma laje de betão (Oz Diagnóstico.pt). .....	5
Figura 2.6 Equipamento de tomografia para inspeção de betão (Ultra Lab Engenharia Diagnóstica, 2022). .....	6
Figura 2.7 Fissuras por assentamentos diferenciais (Silveira, 2006). .....	8
Figura 2.8 Reservatório fissurado do município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (SAAE, 2019). .....	8
Figura 2.9 Fissuras em reservatórios cilíndrico (Instituto Militar de Engenharia, 2006). .....	9
Figura 2.10 Fissuras na cobertura de um reservatório, antes e após a reparação com argamassa (Covas e Alegre, 2010). .....	9
Figura 2.12 Injeção de resinas epóxicas (Thomaz <i>et al.</i> , 2003). .....	13
Figura 2.13 Vedação de fissuras de grande abertura com mástique (Souza e Ripper, 1998). .....	14
Figura 2.14 Grampeamento como técnica de intervenção de fissuras (Souza e Ripper, 1998). .....	15
Figura 2.15 Bactéria ao longo do processo de biocimentação, com o início da reacção (à esquerda), aparecimento do precipitado (ao centro) e em fase de latência (à direita) (Verstraete <i>et al.</i> , 2008). .....	17
Figura 2.16 Amostra de pedra natural rugosa (Cardoso <i>et al.</i> , 2021). .....	18
Figura 2.17 Aplicação do fluido de tratamento com o auxílio de um reservatório plástico (Cardoso <i>et al.</i> , 2018). .....	18
Figura 2.18 Caso de estudo do parque de estacionamento e ensaio de permeabilidade <i>in-situ</i> (Wiktor e Jonkers, 2015). .....	19
Figura 2.19 Acompanhamento do ensaio de permeabilidade em fissuras tratadas e de controlo (Wiktor e Jonkers, 2015). .....	19
Figura 2.20 (b) Remediação de fissuras superficiais usando partículas de enchimento, (c) remediação de fissuras superficiais usando pasta com partículas de enchimento e (d) remediação de fissuras com grãos de pedra deteriorada (Minto <i>et al.</i> , 2018). .....	20
Figura 3.1 Areia APAS30 usada para enchimento das fissuras com 10 mm ( $D_{50} = 0,250$ mm, $G_s = 2,66$ ). .....	22
Figura 3.2 Lajetas de betão adquiridas da Leroy Merlin (Leroy Merlin, 2022). .....	23
Figura 3.3 Cortes das lajetas de betão com serra em disco fino de aço. .....	24
Figura 3.4 Peça da lajeta após corte. .....	24
Figura 3.5 Prensa para rotura das lajetas de betão por meio da flexão. .....	24

Figura 3.6 Lajetas de betão após cortes e rotura por flexão.....	25
Figura 3.7 Espaçadores utilizados para controlo da abertura das fissuras. ....	25
Figura 3.8 Vista geral das amostras após pressão imposta pelos grampos fixadores.....	26
Figura 3.9 Lajetas com as fissuras artificiais após fixação com grampos (aberturas 0,1, 1 e 10 mm).26	
Figura 3.10 Aplicação de película plástica impermeabilizante nas amostras como fase de preparação para o tratamento (à esquerda a fissura tem 10 mm e está preenchida com areia; à direita a fissura tem 1 mm e não tem qualquer preenchimento). ....	27
Figura 3.11 Passagem de parafina sobre as amostras com película impermeabilizante.....	28
Figura 3.12 Amostra após aplicação de fita-cola de alta resistência sobre a região fissurada. ....	28
Figura 3.13 Recipiente utilizado para armazenamento da solução de bactérias produzidas na câmara de circulação de ar. ....	29
Figura 3.14 Detalhe do aparato para inoculação das soluções de alimento e bactéria nas fissuras tratadas.....	30
Figura 3.15 Amostra 2 representativa das amostras de abertura de 0,1 mm tratada no sentido horizontal. ....	30
Figura 3.16 Picnómetros utilizados no ensaio para caracterização da densidade das partículas. ....	35
Figura 3.17 Equipamento de Raio-X utilizado nos ensaios de análise mineralógica. ....	35
Figura 3.18 Prensa utilizada para ensaios de tração por flexão. ....	36
Figura 3.19 Abertura da parafina coincidente com a região da fissura para realização de testes com coluna de água.....	37
Figura 3.20 Colunas de acrílico posicionadas e fixadas com silicone nas respetivas amostras.....	37
Figura 3.21 Detalhe da aplicação de silicone para vedação de espaço entre a coluna e a superfície em betão.....	37
Figura 3.22 Posicionamento da fita métrica na coluna utilizada nos ensaios de estanqueidade.....	38
Figura 3.23 Aparato experimental para teste com coluna de água. ....	38
Figura 3.24 Testes com coluna de água sendo realizados.....	38
Figura 3.25 Testes com coluna de água ocorrendo com recipientes de coleta.....	39
Figura 3.26 Representação da utilização da câmara termográfica. ....	40
Figura 3.27 Utilização do equipamento PUNDIT nas amostras de betão. ....	40
Figura 3.28 Lâminas para visualização ao microscópio ótico de resquícios de areia com biocimento (à esquerda), biocimento das amostras de 1 mm (centro) e biocimento das amostras de 0,1 mm (à direita). ....	41
Figura 3.29 Microscópio ótico <i>AmScope</i> com ampliação de 1600x. ....	42
Figura 3.30 Visão da plataforma <i>EyesCloud3D</i> . ....	42

Figura 4.1 Amostra de betão submetida à análise mineralógica. ....	44
Figura 4.2 Análise mineralógica do betão. ....	44
Figura 4.3 Arranjos do carbonato de cálcio em calcite e vaterite (A (diâmetro médio), B (fase cristalina), C (sistema cristalino)) (Saraya e Rokbaa, 2016). ....	46
Figura 4.4 Análise mineralógica das amostras 1 a 6 de biocimento (sem adição de areia). ....	46
Figura 4.5 Biocimento da superfície das fissuras das amostras 1, 2 e 3 enviado para análise mineralógica. ....	47
Figura 4.6 Coletas das amostras 7, 8 e 9 com adição de areia. ....	47
Figura 4.7 Análise mineralógica amostras 7, 8 e 9 (com adição de areia). ....	48
Figura 4.8 Produção de precipitado branco na superfície lateral das amostras. ....	48
Figura 4.9 Material precipitado coletado e destinada à análise mineralógica. ....	48
Figura 4.10 Análise mineralógica do produto precipitado branco. ....	49
Figura 4.11 Imagens geradas pelo microscópio ótico com ampliação de 1600x. ....	49
Figura 4.12 Imagem microscópica da deposição do biocimento em proximidade das paredes de grão de areia utilizado como enchimento nas amostras 7, 8 e 9. ....	50
Figura 4.13 Ensaio de estanqueidade antes do tratamento – para a situação de referência (Amostras 1, 2 e 3 com fissura de 0,1 mm): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	52
Figura 4.14 Ensaio de estanqueidade antes do tratamento – para a situação de referência (Amostras 4, 5 e 6 com fissura de 1 mm): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	53
Figura 4.15 Ensaio de estanqueidade após o 1º ciclo de tratamento (Amostras 1, 2 e 3): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	55
Figura 4.16 Ensaio de estanqueidade após o 2º ciclo de tratamento (Amostras 1, 2 e 3): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	56
Figura 4.17 Indicação do defeito pontual na Amostra 2. ....	57
Figura 4.18 Ensaio de estanqueidade após o 1º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	58
Figura 4.19 Ensaio de estanqueidade após o 2º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	59
Figura 4.20 Ensaio de estanqueidade após o 3º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	60
Figura 4.21 Ensaio de estanqueidade após o 3º ciclo de tratamento (Amostras 7, 8 e 9): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal. ....	62
Figura 4.22 Resultados ensaio com câmara termográfica. ....	65
Figura 4.23 Modelação após tratamento das amostras 7, 8 e 9. ....	67



Figura 4.24 Mapa topográfico gerado através de nuvem de pontos da superfície da fissura indicando a rugosidade antes e após tratamento (amostras 7, 8 e 9) .....	68
Figura 4.25 Ensaio de estanqueidade indicando as melhores (à esquerda) e piores (à direita) resultados do tratamento .....	72
Figura 4.26 Indicação das melhores (rectângulo a azul) e piores (rectângulo a vermelho) amostras após tratamento pelas imagens da câmara termográfica (vistas inferiores). .....	73
Figura 4.27 Pressão hidrostática em um reservatório rectangular (Evandro, 2021). .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

DO Densidade ótica

UV Ultravioleta

rpm Rotações por minuto

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Grandeza
$Ca^{2+}$	Iões de cálcio
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
$CO(NH_2)_2$	Ureia
$(HOCH_2)CNH_2$	TRIS
$NaHCO_2$	Bicarbonato de sódio
$NH_4^+$	Amónio
$NH_4Cl$	Cloreto de amónio
$NH_4SO_4$	Sulfato de amónio
pH	Potencial de hidrogénio

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Nos países desenvolvidos da Europa e da América do Norte, praticamente todos os sistemas de abastecimento de água foram construídos algumas décadas atrás, e, atualmente, as entidades gestoras dos serviços de água são confrontadas com o desafio de os manter, operar e gerir eficazmente por forma a garantir o abastecimento de água em quantidade suficiente e qualidade adequada às populações servidas. O envelhecimento das infraestruturas de abastecimento de água e dos respetivos equipamentos (desde a captação até ao consumidor) é um processo natural e inevitável. À medida que os diferentes componentes do sistema se aproximam do fim da sua vida útil, o volume de perdas (físicas) de água tende a aumentar, a ocorrência de roturas e de interrupções de abastecimento torna-se mais frequente, e os custos de manutenção/reparação dos sistemas aumentam. Os ativos destes sistemas têm componentes significativas de construção civil (e.g., condutas, reservatórios de água e os edifícios das estações elevatórias) cuja degradação se reflete na ocorrência de orifícios e fissuras que levam a perdas de água.

De facto, o surgimento de anomalias em estruturas de construção civil é recorrente e, entre elas, um dos tipos mais comuns são as fissuras. Sabe-se que quando essas surgem em estruturas voltadas para abastecimento de água, como é o caso de reservatórios de betão, a perda de água decorrente de vazamentos é significativa, chegando a índices de aproximadamente 40 % da distribuição de água tratada para a população em países como o Brasil (Velasco, 2018). Nesse sentido, e diante desse cenário de excessivas perdas de água, surgem técnicas de reparação desse tipo de anomalia com o intuito de evitar o desperdício nas redes de distribuição e no armazenamento de água. Entre as opções, encontra-se a técnica da biocimentação, tecnologia relativamente recente e com menor pegada de carbono, que utiliza bactérias não patogénicas do tipo *Bacillus pasteurii* (Anexo A – Catálogo bactéria *Bacillus pasteurii*) para produção de carbonato de cálcio.

Este trabalho de mestrado incide num estudo relativo à aplicação desta técnica em reservatórios de água construídos em betão.

## 1.2 Objectivos e metodologia

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo experimental da utilização da biocimentação como técnica de selagem de fissuras em estruturas de betão aplicadas a reservatórios de água. O combate às perdas de água se faz como uma atividade essencial na atualidade, e muito disso ocorre por vazamentos existentes em reservatórios, sejam estes de água tratada ou não. Neste contexto, este trabalho estuda a diferença na eficácia nos tratamentos de diferentes aberturas de fissuras em betão aplicados em reservatórios de água com a utilização de bactérias *Bacillus pasteurii* quando inoculadas juntamente com a solução de alimento adequada.

Os objetivos específicos deste estudo são:

1. a análise da biocimentação como técnica nova de selagem de fissuras em reservatórios e avaliação de como pode ser aplicada na prática;
2. a avaliação da eficiência desta forma de tratamento na selagem de fissuras em betão de pequena a média dimensão (i.e., abertura entre 0,1 e 10 mm);
3. a avaliação da resposta do tratamento sob condições nas quais a superfície selada deve ficar em ambiente submerso, como é o caso dos reservatórios de água.

A metodologia adotada consiste na realização de testes experimentais em laboratório de várias amostras de betão com fissuras de pequena e média dimensão preenchidas com o biocimento e areia. Estes testes incluem ensaios de porosidade, análise mineralógica, tração por flexão, ensaio de estanqueidade com coluna de água, termografia, propagação de ondas ultrassónicas, imagens microscópicas e modelação 3D. A aplicação desta técnica em reservatórios de água tem vários desafios. O primeiro é as fissuras poderem ser em estruturas verticais, ou seja, nas paredes laterais de reservatórios de água, e de se ter que estudar, portanto, uma opção alternativa de tratamento nestas circunstâncias. O segundo é a aplicação do tratamento num substrato que estará em contacto direto com a água, armazenada com determinada pressão na superfície interior e em contacto com os agentes climáticos e à pressão atmosférica na superfície exterior. Neste sentido, a promoção da estanqueidade do sistema neste trabalho é um fator determinante para a avaliação da viabilidade e eficácia do tratamento, algo que não havia sido analisado em estudos anteriores.

### **1.3 Estrutura e organização do relatório**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução onde se enquadra o tema e se apresentam os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 faz-se um enquadramento teórico da caracterização de fissuras e a introdução do contexto de surgimento de fissuras em reservatórios, além de discorrer acerca das técnicas de diagnóstico, reparação e selagem de fissuras de betão mais usadas atualmente. Conclui-se o capítulo com a biocimentação e seu estado de arte, apresentando alguns exemplos práticos de aplicação da biocimentação como técnica alternativa de tratamento de fissuras. No Capítulo 3 apresentam-se os materiais utilizados na montagem das amostras-teste para a realização dos ensaios, assim como o método de tratamento utilizado neste trabalho. Para tal, discorre-se acerca da metodologia de criação das fissuras artificiais e da aplicação da solução de bactérias e alimento, assim como sua produção. Por fim, abordam-se os ensaios realizados para caracterização do betão e dos materiais produzidos para selagem das fissuras.

O Capítulo 4 descreve e discute os resultados experimentais detalhados de cada um dos ensaios realizados. É efetuada uma análise conjunta dos resultados e tecidas considerações sobre a utilização do tratamento de biocimentação para a selagem de fissuras em reservatórios. O Capítulo 5 sintetiza as conclusões finais do trabalho e apresenta um conjunto de estudos futuros a serem realizados. O documento inclui ainda quatro anexos que complementam as abordagens realizadas no decorrer do trabalho com o catálogo de caracterização das bactérias utilizadas na biocimentação (*Bacillus pasteurii*), o catálogo da areia APAS30, os resultados para o ensaio da densidade relativa das partículas de betão e imagens da deposição de biocimento nas amostras ao longo do tratamento.

## 2 REPARAÇÃO DE FISSURAS

### 2.1 Nota introdutória

Este capítulo tem como objetivo o levantamento do estado de arte no domínio da biocimentação aplicada à reparação de fissuras de estruturas de betão. Inicia-se com a caracterização de fissuras de acordo com os seus parâmetros. Apresentam-se as principais técnicas existentes de reparação e selagem de fissuras em betão, salientando-se aspetos mais relevantes de cada uma destas técnicas, assim como as suas vantagens e inconvenientes. É dado um especial enfoque em técnicas utilizadas na selagem de estruturas de betão em contacto com a água sob pressão, como os reservatórios de água em betão. Finalmente, realiza-se o enquadramento da técnica de biocimentação para reparação e selagem de fissuras em reservatórios de água, fazendo uma introdução mais detalhada da técnica em si, do porquê de ser alternativa, assim como a evolução da sua utilização na construção. Discute-se, também, suas vantagens e inconvenientes e a apresentam-se alguns casos de estudo conhecidos.

### 2.2 Caracterização de fissuras em construções

As fissuras podem ser caracterizadas de acordo com vários parâmetros, nomeadamente a abertura, a extensão, a profundidade, a orientação e a localização (Bonshor *et al.*, 2001). De acordo com CIB (1993) e Bonshor (2001), esta classificação decorre de um estudo macroestrutural das consequências da fissuração, enquanto nos trabalhos de Veiga (1998), Shohet (2004) e Gaspar *et al.* (2006), a classificação tem em consideração a perda da estanqueidade dos revestimentos com impacto sobre a durabilidade dos paramentos.

Atendendo ao aspeto da abertura das fissuras, as fissuras têm diversas classificações conforme apresentado na Figura 2.1 e na Figura 2.2.

	Abertura da fissura em mm												
	0	0,1	0,2	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	15	25	
CSTB / Veiga	Microfissuras / microfendas		Fissuras / fendas médias					Fendas / fracturas					
Shohet	Fiss. Capilar		N.1	N.2	Nível 3				Nível 4				
CIB	Desprezável	Finas (0,1 a 1 mm)			Moderada (1 a 5 mm)				Largas				
BRE	Capilar	Nível 1			Nível 2				N.3	N.4			
Bidwell	Finas					Médias (até 10mm)				Largas			
Kaminetzky	---				Ligeiras				Moderadas		Pronunciadas		

Figura 2.1 Classes de fissuras de acordo com a abertura (Gaspar *et al.*, 2006).

0	1	2	3	4
≤ 0,1mm	0,1 a 0,25 mm	0,25 a 1,0 mm	1,0 a 2,0 mm	≥ 2 mm
Fio de cabelo	Limiar da visibilidade	Visível, localizada. Não visível em fotografias (excepto em detalhes de pormenor)	Bem definida. Tenuamente visível em fotografia a 3 m da fachada. Pode estar acompanhada de mais anomalias	Efeitos estruturais. Facilmente visível em fotografia

Figura 2.2 Níveis de severidade de fissuração em função da abertura (Gaspar *et al.*, 2006).

Sendo o objetivo do presente trabalho o estudo de reparação de fissuras de níveis 0, 1, 2 e 3 da classificação de Gaspar (2006), o enfoque maior será destinado aos efeitos dessas fissuras nas estruturas em betão, em particular em reservatórios de água.

Além disso, as fissuras também apresentam classificações decorrentes de sua atividade, com existência ou não de movimento relativo. De acordo com a literatura de Von Fay (2015), a atividade da fissura é de suma importância para a classificação de seu tipo e, conseqüentemente, das causas que as originaram. Nesse sentido, as fissuras podem ser classificadas em:

1. *Fissuras ativas* quando demonstram variações na sua abertura ao longo do tempo. Normalmente são de difícil estabilização e a identificação das causas de sua ocorrência. Como exemplo, refiram-se as fissuras advindas de assentamentos em curso e gradientes de temperatura.
2. *Fissuras passivas* quando não demonstram variações na abertura no decorrer do tempo. As fissuras desse tipo estão estabilizadas, pelo que as suas causas, frequentemente, já deixaram de existir. Como exemplo, refiram-se as fissuras por retração após estabilização.
3. *Fissuras latentes* quando as fissuras podem transitar do estado passivo para o ativo após sua intervenção. Casos típicos que se enquadram nesta classificação são estruturas que depois de reparadas passam a não ter mais juntas de dilatação.

Em face desta classificação, o objeto de estudo do presente trabalho são as fissuras passivas que não apresentam atividade.

### **2.3 Técnicas de diagnóstico de fissuras**

Quando surgem fissuras em componentes de betão, é necessário que se proceda a sua reparação a fim de que a estrutura não tenha o seu comportamento comprometido. Para esse efeito, procede-se à análise e inspeção preliminar das fissuras para estabelecer o diagnóstico das suas causas (Flores-Colen e Brito, 2005). Compreende-se, assim, as anomalias associadas, identificando se as fissuras estão estabilizadas ou não, quais são as aberturas e se se trata de esmagamento ou desagregação do material. Para tal, com a finalidade de se analisar as fissuras encontradas, pode-se recorrer a algumas técnicas alternativas e ferramentas de suporte ao seu diagnóstico.

Como primeira alternativa encontra-se a técnica mais económica: a inspeção visual. Isso se deve ao fato de ser realizada a olho nu ou com o uso de instrumentos fáceis de serem manuseados, sejam lupas, máquinas fotográficas, escalas, fitas métricas e pequenos dispositivos óticos tais como medidores (Abreu, 2013). Estes últimos apresentam um sistema graduado e ampliado facilitando a visualização, como ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 Lupa medidora de fissura escala 0,10 mm (Mercado Livre, 2022).

A inspeção visual é uma técnica bastante variável no sentido de diagnóstico, sendo totalmente dependente da subjetividade do profissional que está avaliando. Desta forma, requer técnicos altamente especializados.

Podem ser utilizados também outros métodos de avaliação de fissuras, como o fissurómetro (Figura 2.4), a régua de fissuras ou o comparador de fissuras, que são relativamente fáceis de utilizar e económicos (Machado, 2014).

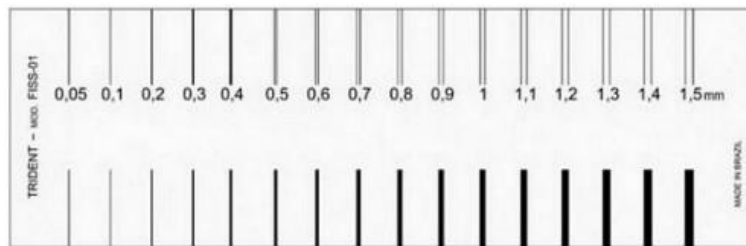


Figura 2.4 Representação de um fissurómetro (Brito, 2021).

O método impacto-eco indicado na Figura 2.5 também se configura como uma alternativa não-destrutiva (Andrade, 2006) e realizada *in-situ* para a aferição da propagação das fissuras em um elemento estrutural de betão. Com o uso de um martelo diferenciado emite-se um impacto mecânico na superfície, conforme Figura 2.5, de modo a sondar a zona e averigua-se se o som emitido apresenta eco por reflexão das ondas emitidas (Rocha e Giacheti, 2019). Nesse sentido, os impulsos podem ser refletidos em fissuras internas, sendo detetados por um recetor sonoro posicionado na mesma superfície do elemento ensaiado. Isso acaba por ser um indício de que ainda há vazios no interior do betão.



Figura 2.5 Medição da profundidade de fissuras em uma laje de betão (Oz Diagnóstico.pt).

A extração de carotes da estrutura (Cóias, 2006) é outra técnica comumente utilizada para análise em laboratório das fissuras, mas com certa limitação de espaço, custo e necessidade de reparação futura do componente estrutural. Nesse caso, extraem-se carotes do elemento fissurado com o objetivo de avaliar a fissura pela perspectiva interna, possibilitando a realização de testagens com controle mais assíduo em ambiente controlado.

Por fim, uma técnica não destrutiva que é usada com frequência na inspeção de fissurações em betão é o método dos ultrassons (PUNDIT) que leva em consideração a velocidade ou tempo de propagação das ondas (Galvão, 2009) pelo material estrutural. Desse modo, quanto mais rápida a propagação, menor é a quantidade de vazios observados no interior da estrutura, reflexo do fechamento das fissuras e das discontinuidades (Silva *et al.*, 2019).

Há também métodos mais modernos que utilizam a tomografia com geração instantânea de imagens do betão (Ultra Lab Engenharia Diagnóstica, 2022), inovação que otimizou a inspeção de anomalias *in-situ*, conforme indicado na Figura 2.6.



Figura 2.6 Equipamento de tomografia para inspeção de betão (Ultra Lab Engenharia Diagnóstica, 2022).

Dessa forma, com o auxílio desses métodos em conjunto com a inspeção visual – a qual permite a quantificação instantânea da extensão, largura, direção e profundidade das fissuras – e com os equipamentos mencionados, é possível classificar as fissuras quanto a sua atividade se se fizer observações ao longo do tempo. A monitorização da variação das fissuras é importante para detetar movimentos relativos da estrutura, sendo possível assim, ter uma perspectiva da tendência do movimento e perceber se esta é uma situação que irá se agravar e afetar a capacidade resistente da estrutura.

Uma vez caracterizada a fissura, procede-se à escolha do tipo de intervenção a ser realizada para a sua reparação, sendo abordadas na secção 2.5 as técnicas mais recorrentes de reparação de fissuras.

## 2.4 Fissuras em reservatórios

Os reservatórios de água são estruturas fundamentais para a sociedade pois permitem o armazenamento de água potável para consumo humano ou água de rega (Votruba e Broža, 1989), e muitas vezes são suscetíveis à ocorrência de algumas anomalias patológicas como as mostradas na Tabela 2.1.



Tabela 2.1 Sistematização da natureza e tipo de anomalia observadas em reservatórios e suas principais causas e soluções (Covas e Alegre, 2010).

Natureza da anomalia	Tipo de anomalia	Principais causas	Soluções
<b>Estrutural</b>	Perda de resistência estrutural	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorreções de projecto</li> <li>- Construção deficiente</li> <li>- Assentamentos diferenciais</li> <li>- Intervenções no subsolo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrução ou reforço de partes</li> <li>- Substituição total</li> </ul>
	Falta de estanqueidade (fissuras e orifícios)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Danos provocados por terceiros</li> <li>- Corrosão/lixiviação dos materiais</li> <li>- Deslizamento de taludes</li> <li>- Sismos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impermeabilização</li> <li>- Pintura interior e exterior</li> </ul>
<b>Hidráulica</b>	Insuficiente capacidade de armazenamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorreções de planeamento e projecto</li> <li>- Alteração das condições de exploração</li> <li>- Alteração das solicitações</li> <li>- Desactivação de outros reservatórios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção de células adicionais incorporando ou não as existentes (expansão do sistema)</li> </ul>
<b>Qualidade da água</b>	Deficiente condição de funcionamento (existência de zonas de estagnação)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorreções no planeamento e projecto (deficiente configuração interna e de circuitos hidráulicos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção de ceptos no interior das células</li> <li>- Instalação de novos circuitos hidráulicos</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteração da origem ou das características físico-químicas da água</li> <li>- Alteração das condições de exploração</li> <li>- Alteração das solicitações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalação de novos circuitos hidráulicos</li> <li>- Alteração das práticas de O&amp;M (e.g., adição de cloro ou limpeza mais frequente)</li> </ul>
<b>Operação e manutenção</b>	Dificuldades de O&M (dificuldade de limpeza, garantindo o abastecimento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadequado número de células ou inexistência de circuito de <i>by-pass</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção de células adicionais</li> <li>- Construção de circuito de bypass</li> </ul>

Dentro da natureza da anomalia estrutural, o foco maior deste trabalho é o estudo da reparação de reservatórios pelo aparecimento de fissuras, orifícios ou fendilhações, principalmente em superfícies laterais ou de fundo, que promovem a perda da estanqueidade sem afetação à capacidade estrutural resistente. Visto haver muitos casos que se enquadram em tais situações, é preciso encontrar uma solução de intervenção para mitigar esses danos e reestabelecer as funcionalidades e desempenho em uso para o qual os componentes do reservatório foram dimensionados, recuperando a estanqueidade do sistema e evitando o desperdício de águas.

Alguns casos de estudo relacionados a tal enquadramento são bastante conhecidos e mostram as principais ocorrências e padrões de aparecimento de fissuras em reservatórios. Estes dão suporte para o entendimento das causas das anomalias e posterior tratamento corretivo por meio de técnicas interventivas. Os principais tipos de fissuras em reservatórios de betão, segundo Silveira (2006), são:

1. fissuras verticais nas partes superiores das paredes devido a gradientes térmicos na laje de cobertura (em casos nos quais os reservatórios não são enterrados);

2. fissuras verticais nas paredes na parte inferior, próximo às fundações, por conta da retração das paredes finas ser mais acelerada (alto teor de cimento) do que a da fundação, que também é impedida de se deformar pela parede de fundo do reservatório;
3. fissuras verticais ocasionadas pela retração hidráulica do betão;
4. fissuras seguindo as geratrizes de reservatórios por conta de cofragens mal feitas, principalmente as deslizantes, bastante recorrente em reservatórios cilíndricos;
5. fissuras aparecendo por conta de assentamentos naturais do terreno em situações nas quais um trecho do reservatório está assente em uma área de escavação e o outro no aterro. Assim, sob a ação do peso da água, o aterro passa por um assentamento diferencial, em que o terreno natural escavado pouco se altera, enquanto a maior deformação tende a acontecer apenas na parte assente sobre o aterro. Ocorre, pois, fissuração da parede provocada por movimentos de rotação da sua fundação como indicado na Figura 2.7.

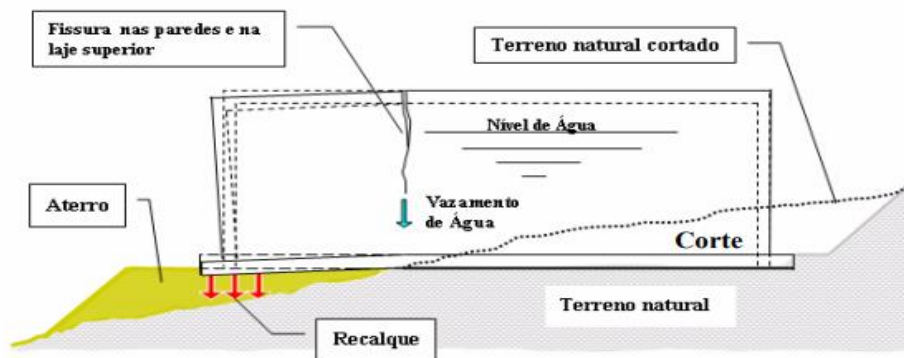


Figura 2.7 Fissuras por assentamentos diferenciais (Silveira, 2006).

Diante das descrições das principais ocorrências e suas respectivas causas, alguns casos de estudo são abordados de modo sucinto com o intuito de ilustrar os tipos de fissuras mais frequentes em reservatórios. A Figura 2.8 ilustra fissuras verticais e horizontais nas paredes laterais de um reservatório retangular da Freguesia João Brás, no Município de Viçosa no estado de Minas Gerais, Brasil. As fissuras foram tratadas por meio da injeção de poliuretano de modo a selar os vazios, procurando garantir a estanqueidade e mitigar as perdas de água tratada (SAAE, 2019).



Figura 2.8 Reservatório fissurado do município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (SAAE, 2019).

Na Figura Figura 2.9, pode-se observar um reservatório cilíndrico com fissuras horizontais e verticais decorrentes da incorreta descofragem da estrutura de betão. A estrutura localiza-se no estado do Ceará, no Brasil, e recebeu bastante atenção da comunicação social e dos órgãos públicos locais, por ser um reservatório estratégico para o abastecimento de água da região (Intituto Militar de Engenharia, 2006).

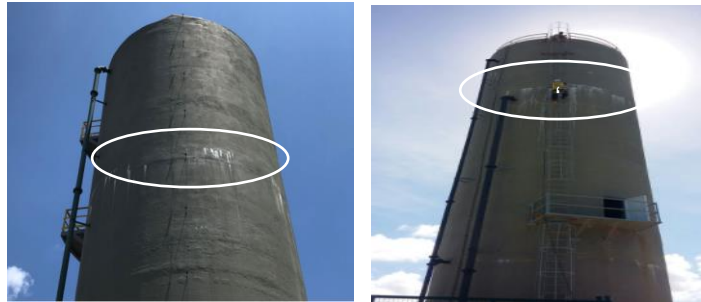


Figura 2.9 Fissuras em reservatórios cilíndrico (Instituto Militar de Engenharia, 2006).

Por fim, para concluir alguns casos de estudo acerca de fissurações e fendilhações de reservatórios de água, pode-se citar um reservatório presente em Portugal, o qual apresentou fissuras em sua laje de cobertura, tendo, portanto, que passar por um processo de reparação (Covas e Alegre, 2010) conforme ilustrado na Figura 2.10.



Figura 2.10 Fissuras na cobertura de um reservatório, antes e após a reparação com argamassa (Covas e Alegre, 2010).

Pode-se dizer que todas estas infraestruturas necessitaram de procedimentos de reparação por forma a recuperar suas capacidades de desempenho em uso, pontos que serão discutidos na secção 2.5.

## 2.5 Técnicas de reparação de fissuras

### 2.5.1 Tipos de técnicas de tratamento de fissuras

As principais técnicas de intervenção para reparação de fissuras em estruturas de betão atualmente utilizadas na construção civil de reabilitação estão apresentadas na Tabela 2.2 (Estrela, 2018) e se subdividem em intervenções distintas segundo o tipo de fissura (estabilizada ou não, conforme visto na secção 2.2) e dimensão (abertura e profundidade).

Tabela 2.2 Tipos de intervenção para reparação de fissuras (Ab = abertura, Pf = Profundidade) (Estrela, 2018).

<b>Injeção de produtos à base de ligantes orgânicos</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Resinas epóxicas	Estabilizadas	Ab. (0,2 a 5) mm Pf. > 25 mm
Resinas acrílicas	Não estabilizadas	
<b>Injeção de produtos à base de cal</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Cal hidráulica	Estabilizadas	Ab. (0,5 a 5) mm Pf. (15 a 100) mm
<b>Argamassa de preenchimento</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Argamassa de cimento com fibras sintéticas	Estabilizadas	Ab. > 5 mm Pf. > 5 mm
Argamassa de cimento modificada com polímeros	Estabilizadas	
Argamassa isenta de cimento com fibras sintéticas	Estabilizadas	Ab. > 20 mm Pf. > 20 mm
<b>Selagem com mástique e preenchimento com argamassa armada</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Mástique acrílico e argamassa armada	Estabilizadas	Ab. (15 a 20) mm Pf. > 5-10 mm
Mástique de poliuretano e argamassa armada	Estabilizadas	Ab. (15 a 25) mm Pf. > 5-10 mm
<b>Selagem flexível</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Criação de juntas de movimentação de fissuras - mástique de poliuretano ou mástique de polímeros especiais	Não estabilizadas	Ab. (5 a 25) mm Pf. 5-10 mm
Dessolidarização local do revestimento	Não estabilizadas	
Banda elástica e impermeável	Não estabilizadas	Ab. > 5 mm Pf. > qualquer
<b>Revestimentos</b>	<b>Tipo de fissura</b>	<b>Dimensões</b>
Revestimento de impermeabilização à base de ligantes sintéticos não armado	Estabilizadas ou com pequenos movimentos	Ab. < 1 mm Pf. < 1 mm
Revestimento de impermeabilização à base de ligantes sintéticos armados com redes ou fibras resistentes à ação dos alcális	Não estabilizadas	Ab. < 1 mm Pf. < 1 mm
Revestimento de impermeabilização à base de ligantes mistos (hidráulicos e sintéticos), não armado	Estabilizadas	Ab. < 1 mm Pf. < 1 mm
Revestimento de impermeabilização à base de ligantes sintéticos mistos (hidráulicos e sintéticos) armado com redes ou fibras resistentes à ação dos alcális	Não estabilizadas	Ab. < 1 mm Pf. < 1 mm
Revestimento de ocultação da fissura, constituído por elementos descontínuos, com fixação independente do suporte	Estabilizadas e não estabilizadas	Ab. qualquer Pf. qualquer
Revestimento delgado armado sobre isolante térmico	Estabilizadas e não estabilizadas	Ab. qualquer Pf. qualquer

*Nota: Estabilizadas são fissuras sem movimentos relativos, inativas ou com pouco movimento controlado. Não estabilizadas são as fissuras com movimento relativo e/ou não controlado.*

Das técnicas apresentadas na Tabela 2.2, são poucas as que se podem aplicar na reabilitação de paramentos de betão que se encontram em contato direto com a água, como é o caso dos reservatórios, sendo estas:

1. injeção de resina epóxida, acrílica ou poliuretânica;
2. injeção de *grouts* cimentícios;

3. colmatação com argamassas, tintas sintéticas ou mástique;
4. grampeamento ou costura de fissuras.

A análise comparativa dos tipos de tratamento é sintetizada na Tabela 2.3. As principais técnicas utilizadas são descritas nas secções seguintes.

Tabela 2.3 Análise comparativa das técnicas de reparação aplicáveis aos reservatórios.

<b>Técnica de reparação</b>	<b>Dimensão das fissuras</b>	<b>Atividade das fissuras</b>	<b>Selagem</b>	<b>Observações</b>
<b>Injeção de resina epóxida, acrílica ou poliuretânica</b>	Pequena	Inativa ou baixa atividade	Promove a estanqueidade	Aplicável a fissuras com relativo comprometimento estrutural
<b>Injeção de <i>grouts</i> cimentícios</b>	Média e grande	Baixa atividade	Promove a estanqueidade	Aplicável a fissuras sem comprometimento estrutural
<b>Colmatação com argamassas ou mástique</b>	Média e grande	Alta atividade	Promove a estanqueidade	Aplicável a fissuras com relativo comprometimento estrutural
<b>Grampeamento</b>	Média e grande	Alta atividade	Não promove a estanqueidade isoladamente	Aplicável a fissuras com comprometimento estrutural

### **2.5.2 Injeção de resina epóxida, acrílica ou poliuretânica**

A técnica de injeção de resinas epóxidas e poliuretânicas (Thomaz, 2003) é utilizada com o intuito de efetuar a ligação rígida e resistente aos diversos esforços mecânicos.

A resina poliuretânica, ou o poliuretano (PU), é utilizada para fechamento elástico e vedação de fissuras sob ação ou não de raios ultra violeta (UV), sejam estas fissuras secas, húmidas ou em contacto com a água; na situação em que a água esteja sob pressão, deve ser utilizada uma espuma de PU de pega rápida (Von Fay, 2015). As resinas epóxidas são adequadas para situações com menor incidência de raios UV e sob menores pressões de água, visto ser uma resina de menor estabilidade e maior permeabilidade, adequando-se a reservatórios enterrados de baixa pressão.

Destacam-se, como as principais vantagens deste método, a boa trabalhabilidade do material, a estabilidade químico-física, a boa resistência e impermeabilidade, além da boa aderência ao betão, o que permitem que seja uma opção para o tratamento de fissuras de menor dimensão e baixa incidência de movimentos relativos.

A sua aplicação é efetuada de acordo com as etapas enunciadas por Souza e Ripper (1998) que levam em consideração a injeção sob pressão reduzida com o intuito de reestabelecer a estanqueidade do sistema e o monolitismo dos elementos em causa, que são as principais indicações para uso desta técnica. As fases são:

1. proceder à furação da superfície ao longo da extensão da fissura em intervalos pouco espaçados, em torno de 5 cm, utilizando um berbequim com broca de diâmetro condizente;
2. limpar o pó e detritos da fissura e dos furos com ar comprimido e aspirar partículas soltas;
3. colocar bicos de injeção em forma de tubos metálicos/plásticos e aplicar a mangueira de injeção nos furos previamente executados, sendo a fixação dada pela própria seladora do intervalo entre dois furos consecutivos;
4. selar entre 1 mm a 5 mm de profundidade da superfície longitudinal da fissura utilizando cola epóxida bicomponente, aplicada com espátula ou colher de pedreiro principalmente em maior quantidade na proximidade dos bicos, dando um intervalo de 24 h para o material de selagem atingir a resistência e aderência necessárias;
5. verificar eventuais obstruções entre 2 tubos e também da efetividade da selagem utilizando ar comprimido e avaliar se é necessário efetuar furos adicionais para melhorar o fluxo da injeção;
6. preparar a superfície de contato saturando o substrato interior da fissura;
7. proceder à injeção do material de reparação por um furo central e prosseguindo alternadamente nos furos contíguos;
8. selar os furos com o próprio material de injeção e realizar a restauração do acabamento da superfície do elemento;
9. verificar a eficiência da injeção por meio do ensaio de ultra-sons para confirmar se a penetração da calda atingiu cerca de 90% da profundidade e extensão da fissura.

As imagens dessa técnica estão indicadas na Figura 2.11. De salientar que é importante sempre monitorizar o comportamento do consumo estimado de resina para preenchimento da fissura, pois caso o consumo exceda o esperado pode ser sinal de rotura da selagem superficial ou existência de fissuras comunicantes com vazios interiores de grandes dimensões.

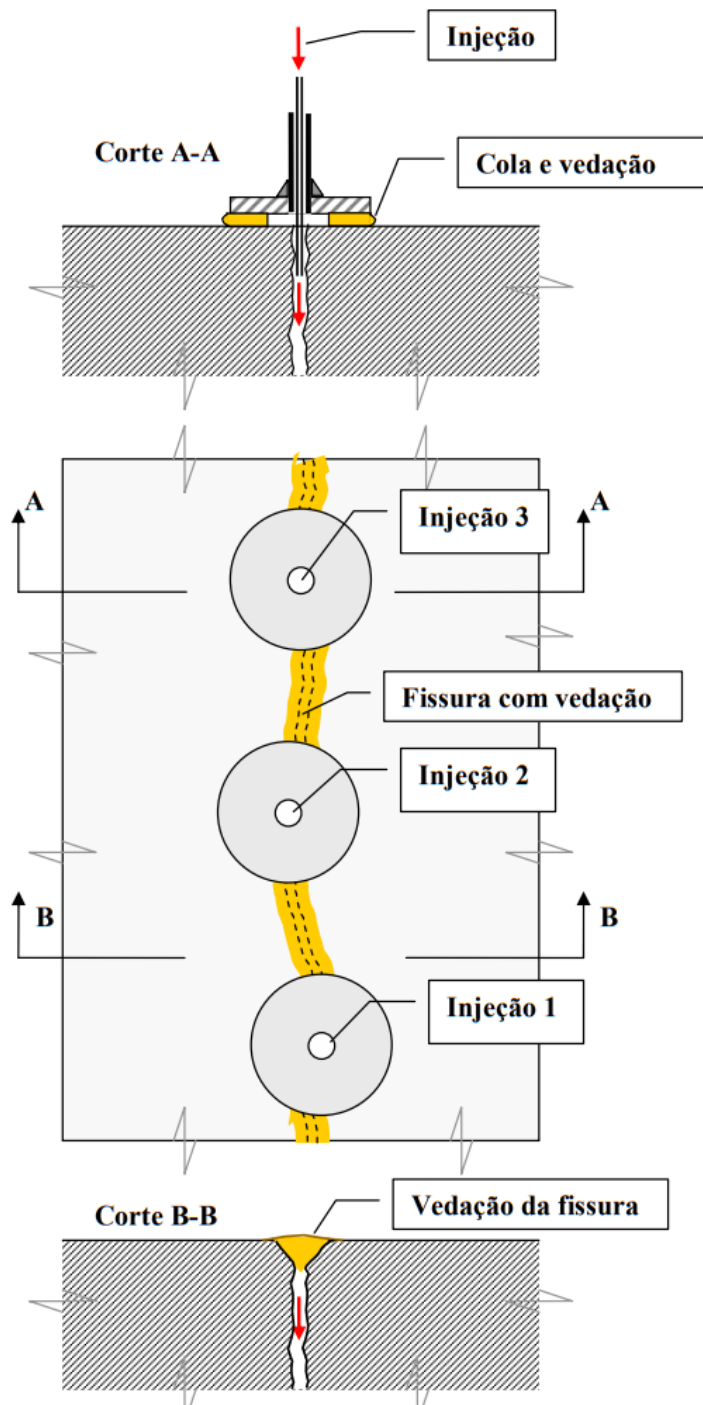


Figura 2.11 Injeção de resinas epóxicas (Thomaz *et al.*, 2003).

### 2.5.3 Injeção de grouts cimentícios

Na injeção de *grouts* cimentícios, à semelhança da técnica anterior, injetam-se caldas ligantes com *grouts* cimentícios, de modo a preencher os vazios existentes. Esta técnica pode ser aplicada por pressão, variável ou não, ou por gravidade, de acordo com o tipo de intervenção requisitada. É um procedimento indicado para reparação de fissuras de aberturas maiores e de baixa atividade pelo fato de ser um material de maior rigidez.

#### 2.5.4 Colmatação com argamassas ou mástique

Na colmatação com argamassas ou mástique, utiliza-se mástique tendo como forma de enchimento da fissura um material de módulo elástico adequado para suportar sua atividade e movimentos. Segundo Souza e Ripper (1998), quando se utiliza o mástique como elemento selador, é muito importante a aplicação de um cordão de poliestireno no fundo do entalhe como forma de preenchimento (Figura 2.12), inibindo que o mástique ocasionalmente venha a aderir no fundo da fissura e comprometa a durabilidade do sistema.

Adicionalmente, buscando a melhor aderência do material de preenchimento ao substrato, recomenda-se recorrer à pincelagem com epoxídicos, permitindo, assim, a aplicação do produto com o bico da bisnaga. Como ação final, a superfície deve passar por um processo de alisamento cauteloso com o auxílio de uma espátula que permite o fortalecimento do substrato externo dos bordos das fissuras e certifica que o reparo seja eficiente e de correta aderência.

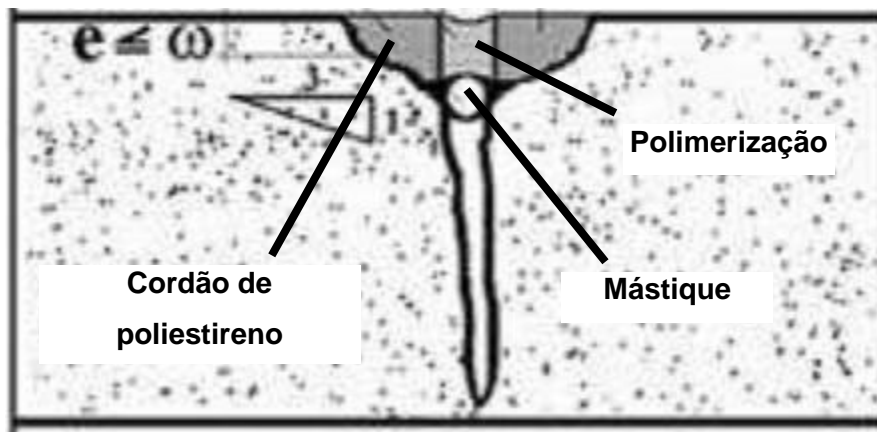


Figura 2.12 Vedação de fissuras de grande abertura com mástique (Souza e Ripper, 1998).

O impedimento da penetração da água e a absorção de potenciais movimentos relativos são boas vantagens desse procedimento, que, em contrapartida, requer mão de obra especializada e apresenta menor durabilidade em comparação com outras soluções, visto que o mástique não tem uma vida útil tão duradoura sob flutuações de temperatura, incidência de raios UV e processos de molhagem e secagem de acordo com Branco e Brito (2012).

#### 2.5.5 Grampeamento ou costura de fissuras

A técnica de grampeamento ou costura de fissuras é a mais indicada para a finalidade de reincorporação da capacidade estrutural e estabilização de fissuras em detrimento da recuperação da estanqueidade, visto utilizar reforços na estrutura como pequenas armaduras – os grampos – que simulam a costura das fissuras (Souza e Ripper, 1998).

A técnica é de contestável aplicação pois intensifica a rigidez da peça localizadamente, e se o esforço causador da fissura continuar, com certeza gerará uma nova fissura em região adjacente (Souza e Ripper, 1998). A aplicação desta técnica encontra-se ilustrada na Figura 2.13.



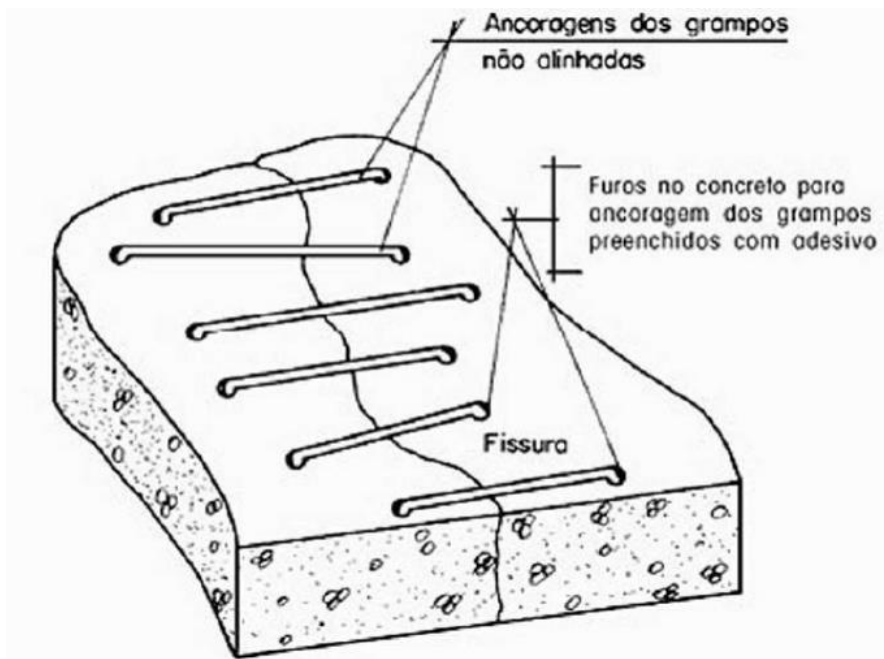


Figura 2.13 Grampeamento como técnica de intervenção de fissuras (Souza e Ripper, 1998).

Esta técnica não é eficaz quando aplicada isoladamente para a recuperação da estanqueidade do sistema de reservatórios de água, devendo ser combinada a outra, por exemplo, com aplicação de um ligante adequado.

### 2.5.6 Considerações complementares

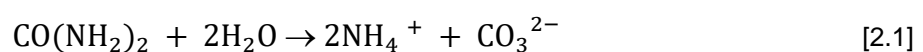
Adicionalmente, as fissuras também podem receber um tratamento mais recorrente e um pouco menos invasivo, como é o caso da cicatrização superficial com micro-argamassas aditivas (de granulometria essencialmente menor). Entretanto, no geral, a reparação depende do motivo central causador das anomalias, caso contrário estas podem aparecer novamente num curto espaço de tempo, como nos casos do tratamento superficial de fissuras ainda ativas e, portanto, com movimento relativo.

## 2.6 Biocimentação

### 2.6.1 Descrição da técnica

A biocimentação é uma técnica alternativa para selagem de fissuras se comparada aos métodos tradicionais apresentados na secção 2.5, destacando-se por ter uma pegada de carbono reduzida.

A biocimentação consiste no uso de bactérias ou enzimas para produzir o biocimento. Este biocimento é produzido por meio da precipitação de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) após a hidrólise da ureia ( $CO(NH_2)_2$ ) com a ajuda da enzima urease, adicionada ou presente nas bactérias. Daqui resulta o ião carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) de acordo com a Equação 2.1. (Siddique e Chahal, 2011):



A precipitação do carbonato de cálcio é favorecida pela libertação do amónio ( $\text{NH}_4^+$ ), que resulta em um aumento de pH (passando a ser alcalino). A combinação entre os iões de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) com os iões de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) provenientes da solução de alimento promovem a precipitação da calcite, conforme referido na reação da Equação 2.2.



Um fato importante é que esta reação pode vir a ocorrer sem a presença de bactérias e apenas com o princípio activo. Porém a precipitação química é extremamente lenta face à não existência da enzima urease que é responsável pela catalisação do processo reativo. A utilização apenas da enzima presente também nas bactérias é outra possibilidade, mas neste trabalho só é considerado o tratamento através do uso de bactérias com a solução de alimento.

Há diversos tipos de bactérias que detêm enzimas necessárias à precipitação de biocimento, tais como: *Myxococcus xanthus* (Rodriguez-Navarro *et al.*, 2003), *Bacillus sphaericus* (Dick *et al.*, 2006), *Bacillus cereus* (Le Metayer-Levrel *et al.*, 1999) e *Mytilus californianus* (Tiano *et al.*, 1995-2006), entretanto, neste trabalho empregou-se exclusivamente as bactérias *Bacillus pasteurii*.

A *Bacillus pasteurii* é uma bactéria não patogénica que produz calcite (forma mineral não solúvel de carbonato de cálcio) e vaterite (forma mineral solúvel de carbonato de cálcio, logo indesejável) se o meio que as circunda garantir condições satisfatórias para a ocorrência das reacções químicas, como pH igual a 9, segundo estudos de Stocks-Fischer *et al.* (2009).

Além desse fator, a temperatura também é outra variável de extrema importância, uma vez que é a 36 °C que as bactérias atingem o pico de sua performance e atividade de acordo com Jacobson e Wu (2009), escala que muitas vezes não é atingida *in-situ* em determinadas regiões geográficas.

Como terceiro ponto de atenção, o alimento e seu fornecimento são questões que necessitam de cuidado para a correta atividade das bactérias. Embora o suprimento da demanda por alimento, e por conseguinte energia, seja importante de acordo com Pedreira (2014) e Al Qabany *et al.* (2013), a produção de calcite se dá de uma melhor forma e com mais uniformidade diante do fornecimento de quantidades menores de alimento, mas a intervalos menos espaçados.

De salientar que é imprescindível garantir a dominância das bactérias do tipo *Bacillus pasteurii* no meio para que assim consigam exercer suas funções de produção de calcite, vencendo a competição com outros organismos nativos do meio inibidores da hidrólise da ureia pelas bactérias.

Diante disso, este tipo de bactéria vem sendo utilizado em métodos de tratamento chamados de “verdes” no ramo da construção civil em razão de sua menor pegada ecológica, entretanto ainda são poucos os casos de estudo existentes com tal técnica, os quais estão listados na secção 2.5.2 a seguir.

Na Figura 2.14 apresenta-se a precipitação do carbonato de cálcio em redor das bactérias *Bacillus pasteurii* ao longo do tempo. Passa-se, portanto, ao início e desencadeamento da reação com aparecimento do precipitado em sua envolvente plasmática e parede celular até entrar em fase de latência, quando a bactéria fica totalmente isolada.



Figura 2.14 Bactéria ao longo do processo de biocimentação, com o início da reacção (à esquerda), aparecimento do precipitado (ao centro) e em fase de latência (à direita) (Verstraete *et al.*, 2008).

### 2.6.2 Casos de estudo

A técnica de biocimentação foi utilizada em vários casos de estudo, a destacar:

1. conservação de monumentos coletados nas antigas pedreiras na montanha de Penteli que foram afetados por estalactites durante o período de inverno (Daskalakis *et al.*, 2006);
2. reabilitação da superfície de pedras estruturais feitas com argamassas de cimento, que mostraram 36% de aumento na resistência à compressão e uma queda de seis vezes da absorção de água das amostras pela deposição de biocimento (Achal *et al.*, 2013);
3. consolidação de pedras em calcário poroso advindas de pedreiras sem eliminação prévia de comunidades bacterianas naturais, fazendo com que o primeiro tratamento não inoculado já registrado se mostrasse eficaz para a consolidação e protecção de rochas recém-extraídas (Jimenez-Lopez *et al.*, 2008);
4. intervenção em fissuras em pedra natural recém escavadas com o estudo de previsão de melhoria de permeabilidade (Peng *et al.*, 2020; Cardoso *et al.*, 2021);
5. reparação de estruturas de betão por pulverização de solução de bactérias geneticamente modificadas com resultados positivos analisados por meio de varredura computadorizada de raios-x e testes de sorptividade (Choi *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019).

Foram também realizados outros estudos com aplicações similares ao deste trabalho, sendo apresentados de seguida com maior detalhe. O primeiro estudo foi desenvolvido por Cardoso *et al.* (2021). Refere-se à reparação de fissuras em pedra natural e sua variação de resposta e desempenho segundo a espessura e rugosidade das paredes superficiais a serem tratadas. A técnica foi aplicada em discos do tipo carote de pedra natural, dos quais metade apresentavam substratos lisos e a outra metade, substratos rugosos e mais aderentes, conforme ilustrado na Figura 2.15.



Figura 2.15 Amostra de pedra natural rugosa (Cardoso *et al.*, 2021).

O procedimento experimental desenvolvido ocorreu por meio do tratamento de amostras desse tipo com aberturas de fissura variando entre 0,4 e 1 mm, de modo que a solução de bactérias e alimento fossem inoculadas por meio da submersão de cada uma das amostras nesse meio. A avaliação da evolução do tratamento, portanto, ocorreu por meio da medição da permeabilidade à água pela fissura após cada ciclo de tratamento, de modo que no final as amostras foram submetidas a um ensaio de compressão diametral para aferição da recuperação de sua capacidade de carga. Os resultados foram razoáveis pelo que muitas amostras tiveram sua selagem quase por completo, exceto nas amostras lisas de 0,7 mm e rugosas de 1 mm. Os resultados mostraram que a biocimentação é tanto melhor quanto mais rugosa é a superfície tratada, havendo um favorecimento da adesão das bactérias aos substratos que vão produzir os precipitados de carbonato de cálcio.

O segundo estudo foi a selagem de fissuras em vigas de betão armado realizada no Instituto Superior Técnico em um estudo laboratorial por Cardoso *et al.* (2018). Nesse estudo, foram usadas bactérias *Sporosarcina pasteurii*, que foram aplicadas nas fissuras da viga anteriormente impermeabilizada com tinta estirenoacrílica F-1016S de cor amarelada (Figura 2.16) e com o auxílio de um pequeno reservatório plástico selado com silicone para promoção do contato do fluido de tratamento com os locais a serem tratados.



Figura 2.16 Aplicação do fluido de tratamento com o auxílio de um reservatório plástico (Cardoso *et al.*, 2018).

Sucintamente, foram realizadas nove inoculações de solução de bactérias mais alimento com o intuito de tratar as fendilhações. No final, foram realizadas medições de velocidades de propagação de ondas ultrassónicas pela estrutura tratada em diferentes posições, assim como a medição da taxa de infiltração de água pelas fissuras após cada rodada de inoculação. Como resultados, as velocidades de propagação aumentaram com as sucessivas fases do tratamento, assim como a taxa de infiltração diminuiu, indicando resultados correlacionados com reflexo do preenchimento dos vazios por material sólido precipitado, como o biocimento.

Outro caso extremamente popular que envolveu um tratamento por biocimentação foi a reparação e selagem de fissuras num pavimento de betão de um estacionamento subterrâneo na Holanda (Wiktor e Jonkers, 2015) como indicado na Figura 2.17 e na Figura 2.18. Acontece que por ocasião de uma série de ciclos de gelo e degelo das lajes do parque de estacionamento, o pavimento acabou por passar por algumas anomalias, como a abertura de fissuras em sua superfície, as quais passaram a incorrer em infiltrações entre um andar e outro. De maneira simplificada, o tratamento se deu pela inoculação de uma solução reparadora à base de bactérias e alimento com a ajuda de um *spray* em parte das fissuras do pavimento. Essa técnica de aplicação distinguiu-se dos demais casos visto que a ferramenta viabilizou a administração das bactérias por meio de uma solução coloidal que permeou as fissuras e seus poros. Após dois meses foram testados tanto *in-situ* quanto em laboratório – com a extração de carotes – os pontos tratados e não-tratados por meio de procedimentos de avaliação da resistência.

Para o efeito, nos testes *in-situ*, colocou-se uma espécie de moldura retangular centralizada sobre algumas fissuras que foram tratadas e outras que não, de forma a selar com silicone o vão entre a moldura e a superfície do pavimento. Feito isso, encheu-se essas molduras com cinco litros de água e averiguou-se visualmente se havia escoamento pelas aberturas até o piso inferior. Como resultados, percebeu-se que as fissuras tratadas sofreram redução no escoamento por seus vazios quase que por completo, com apenas pequenos gotejamentos, enquanto as não tratadas continuaram a verter água entre uma superfície e outra fortemente, mostrando a eficácia no tratamento. Ademais, a resistência medida dos carotes também aumentou após o tratamento, ressaltando a melhoria de desempenho dos componentes.



Figura 2.17 Caso de estudo do parque de estacionamento e ensaio de permeabilidade *in-situ* (Wiktor e Jonkers, 2015).



Figura 2.18 Acompanhamento do ensaio de permeabilidade em fissuras tratadas e de controlo (Wiktor e Jonkers, 2015).

Em um outro estudo de Minto *et al.* (2018), que analisou uma estratégia de reparação para estruturas de mármore altamente degradadas por meio da biocimentação com bactérias *S. Pasteurii*, avaliou-se diferentes tipos de enchimento para reduzir a permeabilidade nas amostras. Esta pesquisa mostrou que as fissuras em mármore degradado podem ser reparadas com biocimentação em conjunto com componentes de enchimento como os indicados na Figura 2.19. Assim, concluiu-se que a estratégia de injeção com a escolha cuidadosa da distribuição do tamanho dos grãos do componente de enchimento pode maximizar a uniformidade da vedação das estruturas em mármore após o tratamento.

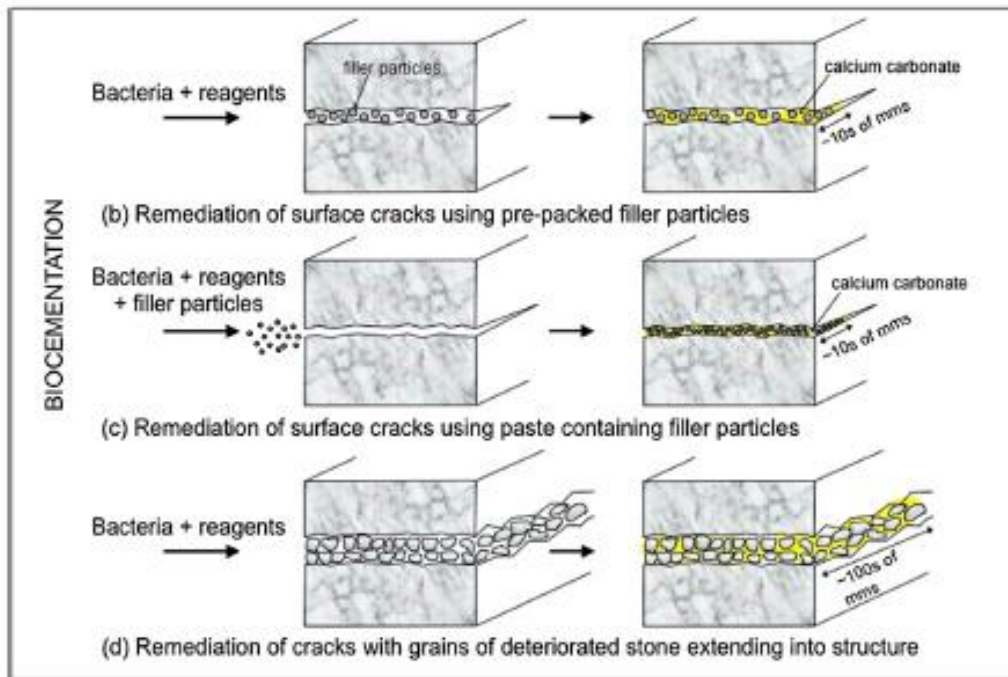


Figura 2.19 (b) Remediação de fissuras superficiais usando partículas de enchimento, (c) remediação de fissuras superficiais usando pasta com partículas de enchimento e (d) remediação de fissuras com grãos de pedra deteriorada (Minto *et al.*, 2018).

## 2.7 Motivações para a realização deste trabalho

Apesar da técnica de biocimentação ter sido aplicada a inúmeras infraestruturas como as citadas na seção 2.6.2, esta ainda não foi aplicada para o tratamento de fissuras em reservatórios de água em betão. Desconhece-se o efeito do contacto com a água permanente na durabilidade do tratamento, o efeito da pressão da água na estanqueidade das fissuras e o efeito do biocimento na qualidade da água para abastecimento público. Neste sentido, este trabalho propõe-se investigar através da realização de ensaios laboratoriais o efeito do tratamento sob ação e contacto da superfície tratada com a água.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Nota introdutória**

Para a execução das fissuras artificiais optou-se por usar lajetas pré-fabricadas de betão que foram adquiridas na Leroy Merlin. As características relevantes deste material, tais como densidade relativa das partículas e porosidade, foram determinadas no âmbito deste trabalho. Criaram-se fissuras artificiais com aberturas de 0.1 , 1 e 10 mm, que foram tratadas com biocimentação e sujeitas a diversos ensaios para avaliação do tratamento. Esses ensaios estão organizados em dois grandes grupos: ensaios para caracterização do betão e ensaios para caracterização das fissuras e de sua selagem. Foram realizados um total de 10 ensaios por amostra.

As fissuras foram criadas em placas de betão pré-fabricadas, que foram partidas ao meio e voltadas a unir com o espaçamento desejado. Adotou-se este procedimento para manter a rugosidade natural das superfícies do interior das fissuras, importante para a fixação do material selante.

Neste capítulo, procede-se à descrição dos materiais e do procedimento adotado para execução das fissuras. De seguida, descreve-se a metodologia de tratamento por biocimentação e o processo adotado para os testes de estanqueidade com coluna de água. Por fim, apresenta-se a descrição de outros ensaios realizados antes, durante e após o tratamento (e.g., ensaios de porosidade, análise mineralógica, tração por flexão, termografia, propagação de ondas ultrassónicas).

#### **3.2 Materiais**

##### **3.2.1 Betão**

O betão utilizado nas lajetas pré-fabricadas foi analisado como forma a caracterizar a sua composição mineralógica, índice de vazios e porosidade. Esta informação não consta em nenhum catálogo técnico das lajetas, tendo sido necessário realizar ensaios específicos para a sua caracterização.

##### **3.2.2 Areia**

Foi necessário utilizar um enchimento de areia para as fissuras com abertura de 10 mm. Utilizou-se areia quartzítica do tipo APAS 30, com granulometria uniforme e cujas partículas têm diâmetros entre 0,25 mm e 0,06 mm. A densidade relativa das partículas é  $G_s = 2,66$  (Anexo B – Ficha técnica da areia APAS30).

Este material de enchimento foi utilizado nas fissuras de 10 mm pelo fato de ser um volume vazio bastante elevado para ser tratado apenas com solução de bactérias e alimento.

Na Figura 3.1 pode-se ver a areia utilizada em sua embalagem de armazenamento, assim como sua caracterização na Tabela 3.1.





Figura 3.1 Areia APAS30 usada para enchimento das fissuras com 10 mm ( $D_{50} = 0,250$  mm,  $G_s = 2,66$ ).

Tabela 3.1 Caracterização da areia APAS30 usada para enchimento das fissuras com 10 mm.

Norma harmonizada	EN 13139:2002 EN 13139:2002/AC:2004			
Características	Desempenho	Granulometria típica		
Dimensão nominal - tamanho das partículas	0/1			
Massa volúmica [ $Mg/m^3$ ]	$\rho_s = 2,61 - 2,71$ $\rho_{rd} = 2,58 - 2,68$ $\rho_{ssd} = 2,59 - 2,69$	Abertura [mm]	[%]	Tolerância [%]
Absorção de água	< 0,9%			
Teor de finos	Categoria 1	2	100	100
Teor de cloretos	< 0,01%	1	100	95-100
Teor de sulfatos solúveis em ácido	$AS_{0,2}$	0,25	2	0-27
Teor de enxofre total	< 0,1%	0,063	0	0-5
Teor de húmus	Mais claro que padrão			

### 3.2.3 Bactérias

As bactérias utilizadas no tratamento são do tipo *Bacillus pasteurii* e foram produzidas em laboratório de Bioengenharia. Para cada ciclo de tratamento, foram produzidas bactérias novas que ao longo de três dias numa câmara de circulação de ar estavam aptas para serem usadas.

### 3.2.4 Solução de alimento

A produção de alimento para as bactérias que eram inoculadas se configurava como uma atividade de extrema relevância, visto que essa era a fonte de energia para as bactérias produzirem o biocimento – matéria expectável de ser produzido para o fechamento das fissuras de betão.



Nesse sentido, a fim de que se gerasse um litro de solução de alimento, as concentrações a serem diluídas nesse volume de água destilada estão indicadas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 Concentrações dos produtos utilizados para a confecção da solução de alimento.

<b>Solução de Alimento [g/L]</b>	
<b>Ureia</b>	30,03
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	73,51
<b>NaHCO<sub>3</sub></b>	2,12
<b>NH<sub>4</sub>Cl</b>	10,00
<b>Extrato de Levedura</b>	2,00
<b>Sulfato de Amônio</b>	1,00

### 3.3 Construção das fissuras artificiais a tratar

#### 3.3.1 Placas/lajetas de betão

Criaram-se fissuras artificiais com diversas aberturas juntando placas de betão. Para manter a rugosidade natural das fissuras optou-se por usar lajetas pré-fabricadas de betão que se partiram e se voltaram a juntar com o espaçamento desejado.

As peças de betão eram constituídas de um betão simples sem armadura, de coloração cinza e com dimensões de 60 cm de comprimento por 40 cm de largura, com uma espessura fixa de 4 cm, conforme ilustrado na Figura 3.2.

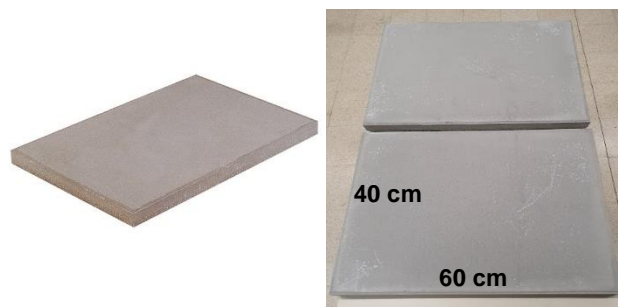


Figura 3.2 Lajetas de betão adquiridas da Leroy Merlin (Leroy Merlin, 2022).

Desta forma, para dar sequência à preparação das amostras-teste, cortou-se cada uma das duas lajetas em seis pedaços iguais, por forma a obter quadrados de 20x20x4 cm, de maneira que se obtivessem 12 amostras de dimensões iguais no final do procedimento, as quais seriam utilizadas para a aplicação do tratamento.

Após efetuadas as medições e marcações na superfície do betão das posições corretas de corte, foram efetuados os cortes da lajeta maciça com o auxílio de uma serra com disco fino de aço como ilustrado na Figura 3.3. Na Figura 3.4 apresenta-se a geometria das lajetas após esse procedimento.



Figura 3.3 Cortes das lajetas de betão com serra em disco fino de aço.

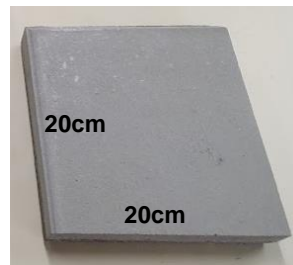


Figura 3.4 Pedaco da lajeta após corte.

### 3.3.2 Execução das fissuras artificiais

Para a execução das fissuras artificiais, procedeu-se à rotura de cada uma das 12 peças quadriculadas de betão com a utilização da prensa de tração por flexão, que permitiu induzir na superfície longitudinal das amostras fissuras quase reais ocasionadas ao longo da vida útil de componentes de betão semelhantes. Na Figura 3.5, é possível notar que as peças de 20 cm de comprimento lateral foram posicionadas e alinhadas de tal modo que seus eixos coincidissem com o eixo de rotura por flexão da prensa, que detinha um vão de 15 cm, os quais foram medidos e considerados com o intuito de facilitar o rompimento das amostras-teste em sua centralidade (Brito, 2021).



Figura 3.5 Prensa para rotura das lajetas de betão por meio da flexão.

Após a rotura, a característica das diferentes peças ficou bastante semelhante com superfícies essencialmente rugosas na parte interior do substrato que fazia o encontro entre as duas partes. O resultado pode ser observado na imagem da Figura 3.6.

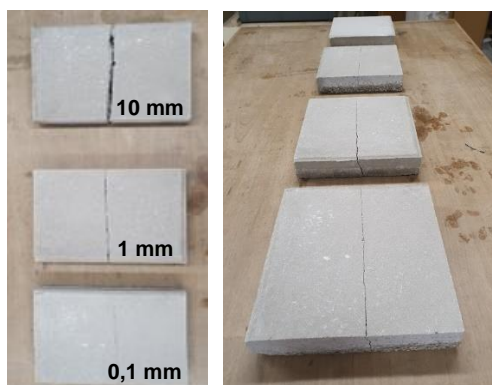


Figura 3.6 Lajetas de betão após cortes e rotura por flexão.

Após o corte, dispunha-se de 12 peças semelhantes como as indicadas na Figura 3.6, as quais foram numeradas e identificadas de 1 a 12 a fim de que se pudesse ter um controlo e rastreabilidade ao longo de todo o processo de tratamento.

A abertura das fissuras foi controlada com espaçadores. Foram definidas três aberturas diferentes com 0,1, 1 e 10 mm, sendo três peças atribuídas para cada um dos tipos. Para o efeito, recorreu-se a espaçadores de 1 e 10 mm, visto que as aberturas de 0,1 mm foram conseguidas simplesmente encostando os pedaços partidos um contra o outro sem nada entre eles.

Os espaçadores utilizados foram os indicados na Figura 3.7, os quais foram posicionados um em cada um dos lados da fissura a fim de manter a abertura relativamente constante de uma extremidade à outra.



Figura 3.7 Espaçadores utilizados para controlo da abertura das fissuras.

Finalmente, foi necessário imobilizar as duas peças com o intuito de que não houvesse movimento relativo entre elas, mas sem uma fixação que não pudesse ser removida posteriormente. Com essa finalidade, optou-se pelo emprego de grampos fixadores que pressionassem ambos os lados das amostras um contra o outro, permitindo assim a obtenção de três amostras com fissuras de 0,1 mm, três amostras com fissuras de abertura igual a 1 mm e três amostras com fissuras de 10 mm de abertura, de modo que as três restantes – que não foram tratadas - fossem utilizadas como base comparativa. A Figura 3.8 e a Figura 3.9 mostram como ficou cada uma das amostras.

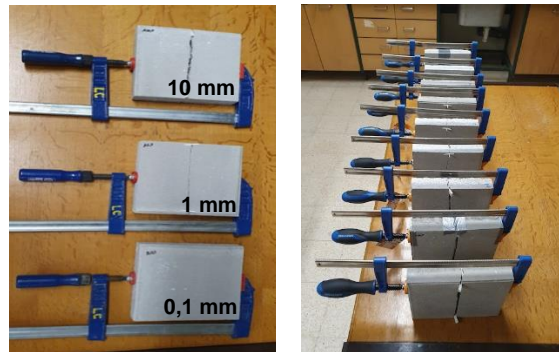


Figura 3.8 Vista geral das amostras após pressão imposta pelos grampos fixadores.

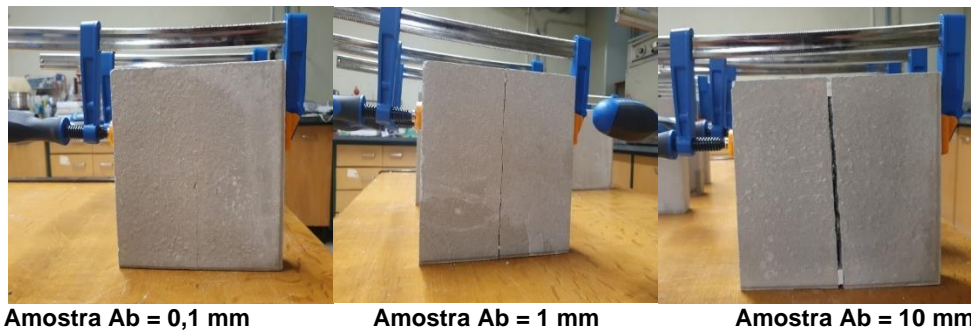


Figura 3.9 Lajetas com as fissuras artificiais após fixação com grampos (aberturas 0,1, 1 e 10 mm).

### 3.3.3 Numeração das amostras

As amostras foram numeradas da seguinte forma:

- Amostras 1, 2 e 3: amostras com fissuras de abertura 0,1 mm;
- Amostras 4, 5 e 6: amostras com fissuras de abertura 1 mm;
- Amostras 7, 8 e 9: amostras com fissuras de abertura 10 mm;
- Amostras 10, 11 e 12: amostras de referência intactas.

## 3.4 Tratamento por biocimentação

### 3.4.1 Impermeabilização e enchimento

O tratamento das fissuras por biocimentação foi efetuado através da injeção de bactérias e solução de alimento diretamente em seu interior. Para tal foi necessário proceder a sua impermeabilização, de modo que o volume da fissura fosse “um pequeno reservatório”. A impermeabilização foi também fundamental para se conseguir efetuar o tratamento mantendo as fissuras verticais, condição necessária para considerar circunstâncias mais realistas.

Recorda-se que se decidiu tratar fissuras verticais para simular a aplicação do tratamento nas condições mais difíceis, já que essas anomalias tanto podem ocorrer nas paredes laterais como na laje de fundo dos reservatórios, sendo fundamental manter o líquido a preencher a totalidade do volume da fissura.

No caso das fissuras com a maior abertura (i.e, 10 mm) prosseguiu-se à impermeabilização com a colocação de uma película plástica impermeabilizante nas superfícies laterais das amostras e também nos substrato de fundo (Figura 3.10), a fim de que a peça ficasse isolada do exterior por essa camada protetora e permitisse a aplicação do fluido com bactérias ao longo do tratamento sem que o mesmo escoasse ou vazasse para fora da amostra.



Figura 3.10 Aplicação de película plástica impermeabilizante nas amostras como fase de preparação para o tratamento (à esquerda a fissura tem 10 mm e está preenchida com areia; à direita a fissura tem 1 mm e não tem qualquer preenchimento).

Entretanto, teve que se colocar a areia a preencher o volume das fissuras de 10 mm antes de se colocar esta película. Como se ilustra na imagem à esquerda da Figura 3.10, esta camada de areia foi mantida na fissura com fita-cola de alta resistência. O preenchimento foi feito com alguma vibração de modo à areia ficar adensada no interior da fissura. A massa de areia colocada em cada fissura apresenta-se na Tabela 3.3 e foi calculada fixando a massa volúmica pretendida no interior da fissura, que é 1,51 g/cm<sup>3</sup>.

Considerando essa massa volúmica foi possível calcular o volume teórico de grãos na fissura indicado na Tabela 3.3. Os valores para cada amostra são muito próximos, o que permite comparar os resultados das três placas.

Tabela 3.3 Areia colocada em cada fissura com 10 mm de abertura.

<b>Amostra</b>	<b>Massa de areia [g]</b>	<b>Volume de grãos [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Massa volúmica <math>\rho_d</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>7</b>	34,19	22,64	1,51
<b>8</b>	35,89	23,67	1,51
<b>9</b>	33,85	22,42	1,51

O cálculo do volume teórico permitiu estimar o volume aproximado de vazios após subtração do volume de grãos (cf. Tabela 3.4). Esses resultados mostram que o volume de vazios era maior do que o volume de grãos e, por conseguinte, a porosidade da fissura com areia apresentava valores superiores a 50%.

As Equações 3.1, 3.2 e 3.3 indicam os cálculos realizados.

$$V_{teórico} = Ab \times t \times l \quad [3.1]$$

$$V_v = V_{teórico} - V_{grãos} \quad [3.2]$$

$$N = \frac{V_v}{V_{teórico}} \times 100 \quad [3.3]$$

sendo  $Ab$ , a abertura da fissura da amostra (cm);  $t$ , a espessura da placa da amostra (cm),  $l$ , a largura da placa da amostra (m),  $V_v$  o volume de vazios da fissura (cm<sup>3</sup>), e  $N$ , a porosidade da fissura preenchida (%).

Tabela 3.4 Volume de vazios e fator de empacotamento em cada fissura com 10 mm de abertura.

Amostra	Volume teórico [cm <sup>3</sup> ]	Volume de grãos [cm <sup>3</sup> ]	Volume de vazios [cm <sup>3</sup> ]	Porosidade [%]
7	80,00	22,64	57,36	71,7
8	80,00	23,67	56,33	70,4
9	80,00	22,42	57,58	72,0

Com as amostras com a película, o próximo passo foi colocar parafina sobreposta à lâmina, com o objetivo de impermeabilizar a parte posterior da amostra e suas arestas laterais, favorecendo a futura administração do fluido de tratamento, conforme Figura 3.11.



Figura 3.11 Passagem de parafina sobre as amostras com película impermeabilizante.

Por fim, para que as amostras estivessem prontas para o início do tratamento, empregou-se também uma fita-cola de alta resistência na superfície frontal das fissuras (Figura 3.12) de forma que o tratamento pudesse ser decorrido com as amostras-teste na vertical concentrando o fluido em seu interior. Isso serviu como maneira de simular as paredes laterais de um reservatório de água com fissuras sob tais condições.



Figura 3.12 Amostra após aplicação de fita-cola de alta resistência sobre a região fissurada.

As amostras com fissuras de abertura 0,1 e 1 mm passaram por procedimento semelhante, mas sem a necessidade de adição de areia como enchimento.



### 3.4.2 Preparação das bactérias

Nesta fase, como eram necessários 300 ml de solução de bactérias para cada etapa do tratamento, o qual se caracterizava como um volume alto, foi imprescindível que as bactérias fossem sendo criadas em balões menores e passadas para balões maiores à medida que atingissem uma densidade ótica medida a 600 nm. Nesse sentido, deu-se início com 5 ml, que se transformaram em 300 ml no final do procedimento.

As misturas eram basicamente constituídas por solução de levedura (YE), sulfato de amônio (AS), TRIS (pH 9) e água destilada (H<sub>2</sub>O), caracterizadoras da solução de alimento utilizada para o crescimento das mesmas, e bactérias que eram inoculadas no meio após serem retiradas do banco onde estavam congeladas.

Assim, o crescimento das bactérias ocorreu nos diferentes balões sob condições específicas de temperatura e rotação da mesa giratória. Sobremaneira, a DO inicial deveria ser de 1 (Al Qabany *et al.*, 2013) de modo que se sabia qual era a quantidade de bactérias necessária para o início do procedimento.

Na Tabela 3.5 pode-se ver as quantidades exatas de cada componente segundo o tamanho de balão utilizado. Na Figura 3.13 visualiza-se a câmara de circulação de ar onde as bactérias foram produzidas e o recipiente de armazenamento e transporte da solução após pronta.

Tabela 3.5 Proporções dos componentes da solução para a produção das bactérias em balões de 5, 25 e 300 ml.

Componente	Balão 5 mL	Balão 25 mL	Balão 300 mL
YE	2 mL	10 mL	120 mL
AS	1 mL	5 mL	60 mL
TRIS	0,65 mL	3,25 mL	39 mL
H <sub>2</sub> O	1,35 mL	6,75 mL	81 mL



Figura 3.13 Recipiente utilizado para armazenamento da solução de bactérias produzidas na câmara de circulação de ar.

### 3.4.3 Aplicação das bactérias

A fim de que se desse início efetivamente ao tratamento das fissuras com a aplicação direta da solução de bactérias e alimento, foi necessário estabelecer uma estratégia de tratamento para o paramento no sentido vertical. A solução implementada foi inserir agulhas com suas respectivas seringas na fita-cola posicionada na superfície da fissura (Figura 3.14), de modo que a extremidade aberta da cabeça da agulha estivesse em contato com o interior da fissura, permitindo a aplicação de dentro para fora, como num processo de injeção.



Figura 3.14 Detalhe do aparato para inoculação das soluções de alimento e bactéria nas fissuras tratadas.

As fissuras de menor dimensão (i.e., com 0,1 mm) não puderam ser tratadas com esse método uma vez que a sua abertura não permitia a inserção das agulhas. Sendo assim, essas tiveram de ser posicionadas na horizontal (Figura 3.15) para a aplicação do fluido bacteriano por gravidade, fazendo com o que o mesmo escoasse de fora para dentro, até atingir os desdobramentos internos das fissuras.

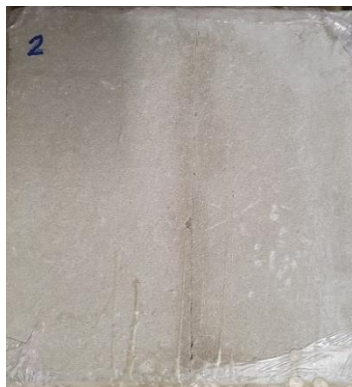


Figura 3.15 Amostra 2 representativa das amostras de abertura de 0,1 mm tratada no sentido horizontal.

Antes da inserção de bactérias ou solução de alimento, aplicou-se água destilada nas fissuras em quantidades específicas de acordo com a abertura das mesmas, com o intuito de saturar seu interior e evitar que a solução de tratamento fosse absorvida rapidamente por sucção ou capilaridade. As proporções de água utilizadas apresentam-se na Tabela 3.6.



Tabela 3.6 Quantidades de água adicionadas às amostras para saturação da superfície a ser tratada antes do início do tratamento.

Amostras	Adição de água destilada [mL]
10 mm	20
1 mm	5
0,1 mm	2

De seguida, o tratamento passou a ser subdividido em ciclos que se caracterizavam por 10 dias de de aplicação segundo o que consta na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8, as quais indicam respetivamente o que foi aplicado em cada dia de ciclo de tratamento, e seu volume.

Tabela 3.7 Caracterização de um ciclo de tratamento.

	Aplicação
Dias 1 ao 5	Bactérias + Alimento
Dias 6 ao 10	Alimento

Tabela 3.8 Volumes de inoculação de bactérias e solução de alimento por ciclo de tratamento.

Amostras	Volume de inoculação por ciclo [mL]	
	Bactérias	Alimento
10 mm	10	10
1 mm	7	7
0,1 mm	2	2

Assim, dividiu-se as aplicações e inoculações nas diversas amostras em ciclos 1, 2 e 3 em conformidade com o calendário da Tabela 3.9, da Tabela 3.10 e da Tabela 3.11. Nestas tabelas, B designa “inoculação de bactérias” e A “inoculação de solução de alimento”.

Tabela 3.9 Calendarização da 1º ciclo de tratamento.

	1º CICLO									
	21/out	22/out	25/out	26/out	27/out	28/out	29/out	02/nov	03/nov	04/nov
10 mm	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A
0,1 mm	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A
1 mm	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A

Tabela 3.10 Calendarização da 2º ciclo de tratamento.

	2º CICLO											
	11/nov	12/nov	15/nov	16/nov	17/nov	22/nov	23/nov	24/nov	25/nov	26/nov	29/nov	30/nov
10 mm	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A	-	-
0,1 mm	-	-	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A
1 mm	-	-	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A

Tabela 3.11 Calendarização da 3º ciclo de tratamento.

	3º CICLO												
	29/nov	30/nov	02/dez	03/dez	06/dez	07/dez	08/dez	09/dez	10/dez	13/dez	14/dez	15/dez	16/dez
10 mm	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A	-	-	-
0,1 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 mm	-	-	-	B + A	B + A	B + A	B + A	B + A	A	A	A	A	A

Foram realizados três ciclos de tratamento para as amostras de 1 e 10 mm de abertura e apenas dois ciclos para as amostras de 0,1 mm de abertura devido ao menor volume a ser preenchido e em face dos resultados obtidos nos testes realizados entre os diversos ciclos.

Outro fator importante é a questão do desfasamento entre os ciclos executados para cada tipo de abertura de fissura. Isso se deveu por ocasião dos testes realizados entre os ciclos. Uma vez que se optou por não realizar testes com água entre os ciclos de tratamento das amostras de abertura de 10 mm visto visualmente se perceber que não estavam tratadas o suficiente, estas tiveram seus ciclos de inoculação acelerados ao longo do tempo se comparado com as demais amostras mais finas.

### 3.5 Ensaio realizados

Conforme referido na secção 3.1, foram realizados alguns ensaios antes, durante e após o tratamento das fissuras, de modo a avaliar as mudanças e evoluções do processo ao longo dos diferentes ciclos. Os ensaios laboratoriais desenvolvidos estão resumidos na Tabela 3.12 e Tabela 3.13 e se distinguem entre ensaios de caracterização do betão e ensaios de caracterização das fissuras e de sua selagem.

Na primeira classificação, encontram-se ensaios de porosidade, caracterização da densidade das partículas sólidas, análise mineralógica e ensaio de tração por flexão. Na segunda classificação, encontram-se ensaios de caracterização do material de selagem (análise mineralógica e microscopia óptica), ensaios de verificação da selagem (ensaio de estanqueidade, velocidade de propagação de ondas e termografia) e ensaio de adequabilidade do tratamento à recuperação da capacidade estrutural (ensaio de tração por flexão). Os ensaios podem ser classificados em destrutivos e não destrutivos. Além dessa classificação, pode-se falar também em ensaios microscópicos e macroscópicos de acordo com a dimensão do que se é analisado. Essas classificações estão listadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 Classificação dos ensaios realizados.

	<b>Destrutivo</b>	<b>Não destrutivo</b>	<b>Microscópico</b>	<b>Macroscópico</b>
<b>Ensaio de porosidade</b>	X		X	
<b>Ensaio para caracterização da densidade das partículas</b>	X		X	
<b>Análise mineralógica</b>	X		X	
<b>Ensaio de tração por flexão</b>	X			X
<b>Microscopia ótica</b>	X		X	
<b>Ensaio de estanqueidade</b>		X		X
<b>Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas</b>		X		X
<b>Termografia</b>		X		X

Na Tabela 3.13 apresentam-se os ensaios realizados segundo o *timing* e reforça-se o fato de que foram realizados ensaios intermédios após cada ciclo de tratamento para monitorização e acompanhamento da evolução do tratamento.

Tabela 3.13 Ensaio realizados.

	Amostras	<i>Timing</i>			
		Pré-tratamento	Após 1º ciclo	Após 2º ciclo	Após 3º ciclo
<b>Ensaio para caracterização do betão</b>					
<u>Ensaio de caracterização</u>					
Ensaio de porosidade	1 a 3	✓			
	4 a 6	✓			
	7 a 9	✓			
Ensaio para caracterização da densidade das partículas	1 a 3	✓			
	4 a 6	✓			
	7 a 9	✓			
Análise mineralógica	1 a 3	✓			
	4 a 6	✓			
	7 a 9	✓			
Ensaio de tração por flexão	1 a 3	✓			
	4 a 6	✓			
	7 a 9	✓			
<b>Ensaio para caracterização das fissuras e de sua selagem</b>					
<u>Ensaio de caracterização do material precipitado</u>					
Análise mineralógica	1 a 3			✓	
	4 a 6				✓
	7 a 9				✓
Microscopia ótica	1 a 3			✓	
	4 a 6				✓
	7 a 9				✓
<u>Ensaio de verificação de selagem</u>					
Ensaio de estanqueidade	1 a 3		✓	✓	
	4 a 6		✓	✓	✓
	7 a 9				✓
Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	1 a 3	✓	✓	✓	
	4 a 6	✓	✓	✓	✓
	7 a 9	✓	✓	✓	✓
Termografia	1 a 3			✓	
	4 a 6				✓
	7 a 9				✓
<u>Ensaio de adequabilidade à recomposição da capacidade estrutural</u>					
Ensaio de tração por flexão	1 a 3			✓	
	4 a 6				✓
	7 a 9				✓

### 3.5.1 Ensaios para caracterização do betão

#### 3.5.1.1 Ensaio de porosidade

Os ensaios para determinação da porosidade do betão foram realizados no Laboratório de Geotecnia. Realizaram-se dois tipos de medidas: (i) porosidade aberta, que leva em consideração o ganho percentual de massa da amostra após a saturação dos poros com a água por aplicação de vácuo seguida de imersão em água e (ii) porosidade total, calculada pelo método de Arquimedes.

Para a porosidade total, aplicou-se o método das medições de massa da amostra seca, saturada e aferição do volume. Isso se deu com a passagem de parafina superficialmente às três amostras, que foram mergulhadas em um tanque preenchido com água, de forma que se pudesse ter essas medições e calcular o índice de vazios do betão. Os cálculos para a determinação da porosidade com base nos resultados experimentais estão indicados nas Equações 3.4 a 3.13.

#### Porosidade aberta

$$w = \frac{M1-M4}{M4} \quad [3.4]$$

$$\gamma_{h \text{ medido}} = \frac{M3}{V_f} \quad [3.5]$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w} \quad [3.6]$$

$$\gamma_s = G_s \times \gamma_w \quad [3.7]$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad [3.8]$$

$$N [\%] = \frac{e}{1+e} \quad [3.9]$$

#### Porosidade total

$$V_c = \frac{10 \times M1}{\gamma_h} \quad [3.10]$$

$$\gamma_h = \frac{M1}{\frac{M2-M3}{\gamma_p} - \frac{M1-M2}{\gamma_w}} \quad [3.11]$$

$$M_a = M_s - M4 \quad [3.12]$$

$$V_v = \frac{M_a}{\rho_w} \quad [3.13]$$

sendo  $M1$ , a massa da amostra (g),  $M2$ , a massa da amostra com parafina (g),  $M3$ , a massa da amostra submersa depois do vácuo e sem estar envolvida pela parafina (g),  $M4$ , a massa da amostra seca por estufa (g),  $w$ , o teor em água (%),  $\gamma_p$ , a massa volúmica da parafina (g/cm<sup>3</sup>),  $\gamma_w$ , a massa volúmica da água (g/cm<sup>3</sup>),  $\gamma_h$ , a massa volúmica aparente da amostra húmida (g/cm<sup>3</sup>),  $\gamma_d$ , a massa volúmica aparente da amostra seca (g/cm<sup>3</sup>),  $\gamma_s$ , a massa volúmica das partículas sólidas (g/cm<sup>3</sup>),  $e$ , o índice de vazios (adm),  $N$ , a porosidade (adm),  $V_f$ , o volume da amostra especificado pelo fabricante (cm<sup>3</sup>),  $V_c$ , o volume da amostra calculado por deslocamento de água (cm<sup>3</sup>),  $M_s$ , a massa da amostra saturada de água (g),  $M_a$ , a massa de água (g),  $V_v$ , o volume de vazios na amostra (cm<sup>3</sup>).

Esta informação é importante para se compreender se a porosidade poderia desencadear a absorção da solução de alimento pelo betão antes de ser consumida pelas bactérias.

#### 3.5.1.2 Ensaio para determinação da densidade das partículas

O ensaio para a determinação da densidade das partículas foi realizado no Laboratório de Geotecnia. Este procedimento teve como objetivo a determinação do índice granulométrico a partir da densidade relativa dos grãos Gs, a fim de determinar a quantidade de vazios existentes no betão utilizado. O ensaio decorreu com a medição da massa e aferição da temperatura do ambiente e do meio, com o auxílio de um picnómetro (Figura 3.16), de um termómetro e de uma balança.



Figura 3.16 Picnómetros utilizados no ensaio para caracterização da densidade das partículas.

#### 3.5.1.3 Análise mineralógica

A análise mineralógica foi realizada no Laboratório de Geologia e Minas, através de um equipamento de Raio-X (Figura 3.17) e tinha como objetivo se compreender a evolução do tratamento e se o objetivo principal havia sido atingido a partir da observação da produção de biocimento em uma de suas formas minerais: vaterite ou calcite. A análise em questão permitiu entender tanto a composição mineralógica dos componentes que estavam sendo utilizados como amostras, como é o caso do betão tomado como substrato para tratamento, quanto avaliar a eficácia do tratamento a partir do entendimento da produção de biocimento nas diferentes amostras com fissuras de aberturas distintas.

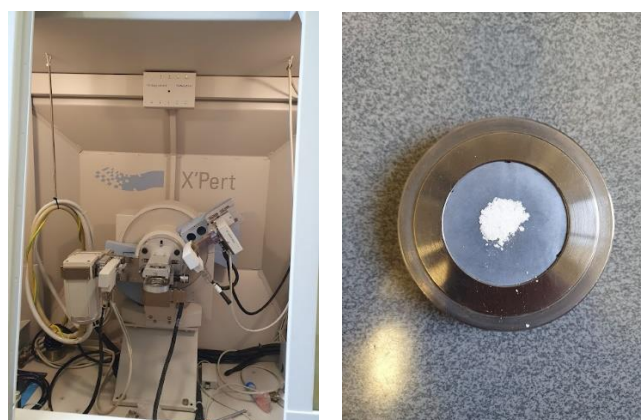


Figura 3.17 Equipamento de Raio-X utilizado nos ensaios de análise mineralógica.

#### 3.5.1.4 Ensaios de tração por flexão

Os ensaios de tração por flexão foram realizados no Laboratório de Construção com a prensa disponível sob a configuração da Figura 3.18.



Figura 3.18 Prensa utilizada para ensaios de tração por flexão.

Colocou-se um vão de  $D = 15$  cm entre os apoios e centralizou-se cada uma das amostras com o eixo de aplicação da carga, como forma de padronizar todos os testes. Velocidades de carregamento de 0,40 kN/s também foram impostas já que era outro fator influenciador dos resultados.

Diante disso, o objetivo central era avaliar as cargas de rotura das amostras intactas, estabelecendo a resistência estrutural de fábrica do betão utilizado e aferir as cargas de rotura finais após a conclusão e fechamento das rodadas de tratamento. Isso traria uma informação útil e complementar que se trata da questão da recuperação do desempenho estrutural do betão após tratado com o processo de biocimentação, dados importantes para compreender se o processo de biocimentação é aplicável para recompor a capacidade estrutural ou somente para o enchimento e selagem de vazios. Também se realizou este ensaio para se ter acesso ao material de selagem do interior da fissura e assim este poder ser caracterizado por análise mineralógica e por microscopia.

### **3.5.2 Ensaios para caracterização das fissuras e de sua selagem**

#### 3.5.2.1 Ensaio de estanqueidade

Realizaram-se ensaios de estanqueidade por meio de colunas de água colocadas logo acima das respectivas fissuras, com medição da perda de água ao longo do tempo. Estes ensaios foram realizados após cada ciclo de tratamento, para medir a evolução da estanqueidade do sistema. Essa é uma característica fundamental para este tratamento, já que se simula a sua aplicação a um paramento vertical da envolvente de um reservatório de água.

Assim, após cada ciclo de tratamento, exceto para as amostras de fissura com 10 mm de abertura – Amostras 7, 8 e 9 - que foram ensaiadas apenas no fim, retirou-se qualquer tipo de material existente na superfície frontal da amostra e efetuou-se um corte linear, de aproximadamente 2 cm de largura, na superfície de fundo onde se encontrava parafina, a fim de que houvesse concordância com o local onde a fissura se encontrava, conforme pode ser visto nas fotografias da Figura 3.19.



Figura 3.19 Abertura da parafina coincidente com a região da fissura para realização de testes com coluna de água.

De seguida, prosseguiu-se com o posicionamento de colunas de acrílico de um metro de comprimento centradas com a superfície das amostras-teste (Figura 3.20), com aplicação de silicone em seu perímetro circular (Figura 3.21), por forma a evitar a saída de água através de espaços não preenchidos entre a amostra e o betão.



Figura 3.20 Colunas de acrílico posicionadas e fixadas com silicone nas respetivas amostras.

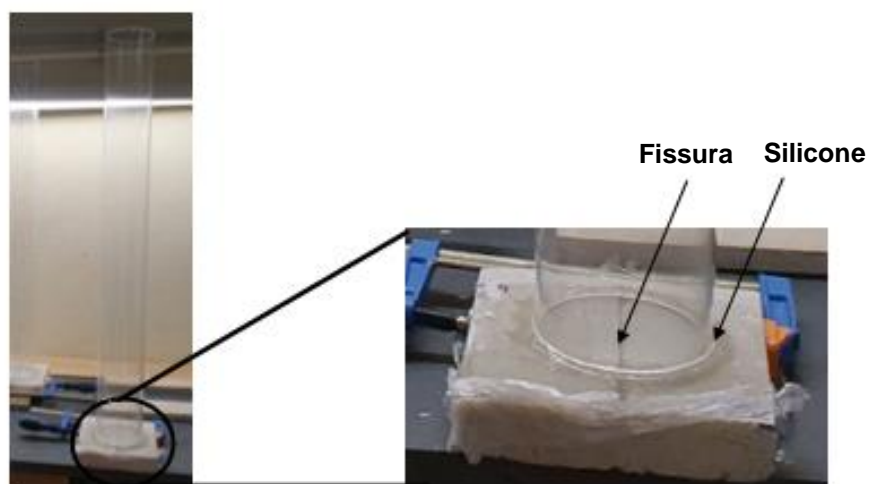


Figura 3.21 Detalhe da aplicação de silicone para vedação de espaço entre a coluna e a superfície em betão.



Procedeu-se, de seguida, à fixação de uma fita métrica descartável na superfície das tubagens (Figura 3.22), de maneira que a marcação zero coincidissem com o fundo da coluna na superfície das amostras. Como os ensaios seriam realizados com o manuseio de água, foi necessário utilizar fita-cola em toda a superfície para não molhar e desfazer o papel da fita métrica.



Figura 3.22 Posicionamento da fita métrica na coluna utilizada nos ensaios de estanqueidade.

Com as amostras prontas para os ensaios, o aparato foi apoiado numa estrutura elevada, com um recipiente abaixo da fissura para a recolha da água infiltrada. Prosseguiu-se com a realização dos testes, conforme aparato ilustrado na Figura 3.23, na Figura 3.24 e na Figura 3.25.

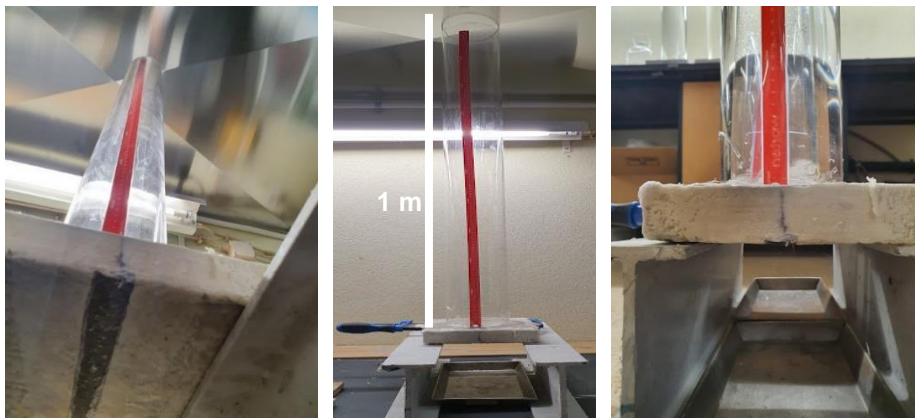


Figura 3.23 Aparato experimental para teste com coluna de água.

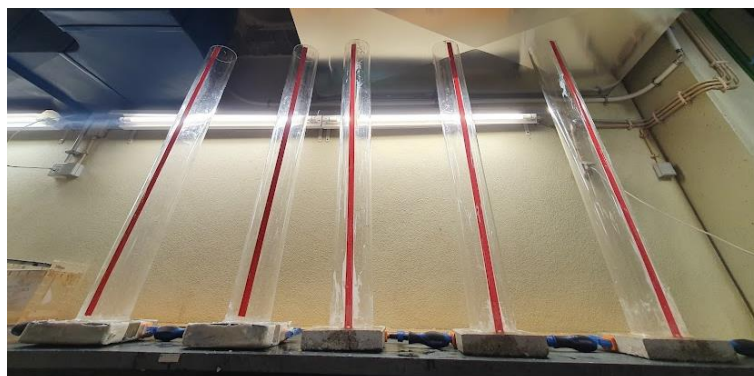


Figura 3.24 Testes com coluna de água sendo realizados.





Figura 3.25 Testes com coluna de água ocorrendo com recipientes de coleta.

Os ensaios decorreram com as colunas de água com um metro de altura ( $h = 1$  m), de modo a que se pudesse aferir o tempo de abaixamento da água e, por conseguinte, o caudal nos diferentes momentos do ensaio. Este caudal foi determinado segundo o raciocínio matemático indicado nas Equações 3.14, 3.15 e 3.16, conhecida a geometria da coluna (i.e. o diâmetro exterior de 12 cm e a espessura de 0,5 cm).

$$D_i = D_e - 2 \times e = 11 \text{ cm} \quad [3.14]$$

$$A_i = \frac{\pi \times D_i^2}{4} = 95,03 \text{ cm}^2 \quad [3.15]$$

$$Q_j = \frac{\frac{h_{j-1} - h_j}{2} + \frac{h_j - h_{j+1}}{2}}{\frac{t_j - t_{j-1}}{2} + \frac{t_{j+1} - t_j}{2}} \times A_i \quad [3.16]$$

sendo  $D_i$ , o diâmetro interno da coluna (cm),  $e$ , a espessura da coluna (cm),  $D_e$ , o diâmetro externo da coluna (cm),  $A_i$ , a área interna da coluna (cm<sup>2</sup>),  $j$ , o instante de tempo (s),  $Q_j$ , o caudal no instante de tempo  $j$ ,  $h_j$ , a altura de água no instante de tempo  $j$ .

Faz-se preponderante mencionar que esses testes foram realizados para todas as amostras ciclo após ciclo e, inclusive, para amostras sem tratamento onde se criaram fissuras com as mesmas aberturas para controlo de referência.

Assim, determinaram-se os caudais iniciais  $Q_{i-1}$  e  $Q_i$  - sendo  $i$  o número do ciclo de tratamento - cada um deles obtido para os valores nos instantes  $j = 0$  (início do ensaio) e pôde-se realizar uma análise de melhoria relativa dos caudais a cada ciclo tendo como referência o caudal medido na fissura antes do tratamento por meio da relação da Equação 3.17.

$$\text{Melhoria [\%]} = \left(1 - \frac{Q_i}{Q_{i-1}}\right) \times 100 \quad [3.17]$$

sendo  $i$ , o número do ciclo sendo a situação de referência  $i = 0$ ,  $Q$ , o caudal no instante  $j = 0$ .

Os resultados desses testes são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

### 3.5.2.2 Termografia

Utilizou-se uma câmara termográfica do tipo *Flir IX Series* para obter as imagens termográficas a partir da diferença de temperatura entre os diferentes substratos de forma que se pudesse avaliar a existência de regiões vazias indicativas de selagem deficiente.

O procedimento foi realizado apenas no final de todos os ciclos de tratamento para cada uma das amostras. Este consistiu no aquecimento prévio das amostras que foram inseridas numa estufa a 105 °C durante 24 horas e no arrefecimento de água destilada que seria aplicada no interior das fissuras visando possibilitar a visão dos caminhos preferenciais de escoamento pelo seu interior.

Fez-se assim porque quanto maior a diferença entre as temperaturas dos dois meios, maiores são os contrastes fornecidos pelo visor da câmara termográfica. Dessa forma, poderiam ser mapeadas as falhas nos tratamentos por meio da visualização de pontos não preenchidos com biocimento no interior das fissuras, como indicado nas imagens da Figura 3.26.



Figura 3.26 Representação da utilização da câmara termográfica.

### 3.5.2.3 Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

A determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas fez-se recorrendo ao equipamento PUNDIT (Figura 3.27) existente no Laboratório de Construção. Este tipo de equipamento avalia o tempo de propagação de uma onda ultrassónica de frequência 54 kHz por sondas de diâmetro 35 mm entre as duas extremidades de aplicação com o uso de provetes. Sendo assim, o *output* trata-se do tempo que a onda demora a percorrer esse percurso (20 cm) até ser detetada na extremidade oposta do provete.

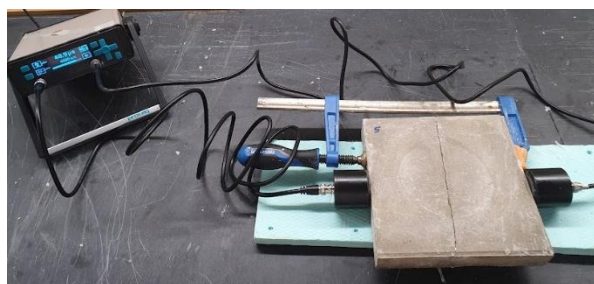


Figura 3.27 Utilização do equipamento PUNDIT nas amostras de betão.

Este ensaio foi realizado em todas as amostras não tratadas e nas que estavam por ser tratadas, antes do início do tratamento e ao longo dos diferentes ciclos, sempre aferindo as medições após a conclusão de cada ciclo de inoculação de 10 dias e entre os ensaios de estanqueidade.

Assim, pôde-se avaliar a diferença na evolução do fechamento dos vazios e se ocorria desprendimento de partículas por lavagem ou não após os ensaios de estanqueidade. Como forma de padronização, todas as medições foram executadas com as amostras devidamente secas, já que as velocidades poderiam ser afetadas.

Como a velocidade de propagação de ondas é tanto maior quanto menos vazios houver num determinado meio - já que as ondas se propagam mais rapidamente nos sólidos do que nos fluidos - pode-se dizer que se o tratamento estivesse a correr bem, haveria mais sólidos sendo produzidos e acoplados ao longo do interior das fissuras, de modo que as ondas passariam a atravessar as amostras de uma extremidade à outra com maior velocidade e, conseqüentemente, menor tempo. Essa seria uma maneira não intrusiva e não destrutiva de analisar a eficiência do tratamento ao longo do tempo.

#### 3.5.2.4 Microscopia ótica

Nesta etapa, houve a preparação de lâminas para visualização do material coletado ao microscópio ótico. Utilizou-se uma espátula pequena que auxiliou no espalhamento do material pela lâmina de vidro conforme indicado na Figura 3.28.

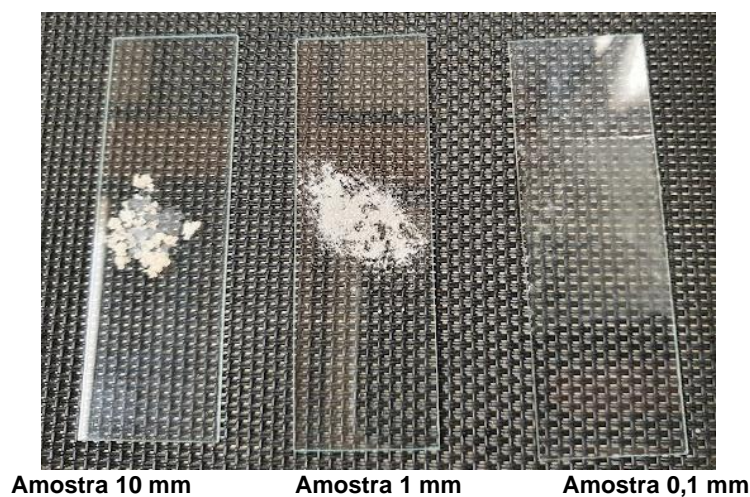


Figura 3.28 Lâminas para visualização ao microscópio ótico de resquícios de areia com biocimento (à esquerda), biocimento das amostras de 1 mm (centro) e biocimento das amostras de 0,1 mm (à direita).

Observaram-se, então, com ampliação de 1600x ao microscópio ótico *AmScope* (Figura 3.29), os fragmentos retirados da superfície das amostras após os ciclos de inoculação de bactérias. Resquícios de areia com biocimento também foram analisados após a rotura das estruturas testadas nos ensaios de flexão.



Figura 3.29 Microscópio ótico *AmScope* com ampliação de 1600x.

O objetivo desta observação microscópica era a visualização de como se arranjava a deposição do biocimento junto das paredes superficiais rugosas do betão no interior das fissuras, assim como com a areia APAS 30, nos casos onde foi utilizada.

#### 3.5.2.5 Modelação 3D

O recurso da modelação computacional 3D foi uma ferramenta adicional utilizada com o objetivo de visualizar a deposição de biocimento na superfície rugosa das fissuras, em particular para as com abertura de 10 mm que foram preenchidas com areia. Para tal, usou-se o *software EyesCloud3D* em sua versão gratuita disponível *online*, tendo como visão interativa do *website* a imagem da Figura 3.30.

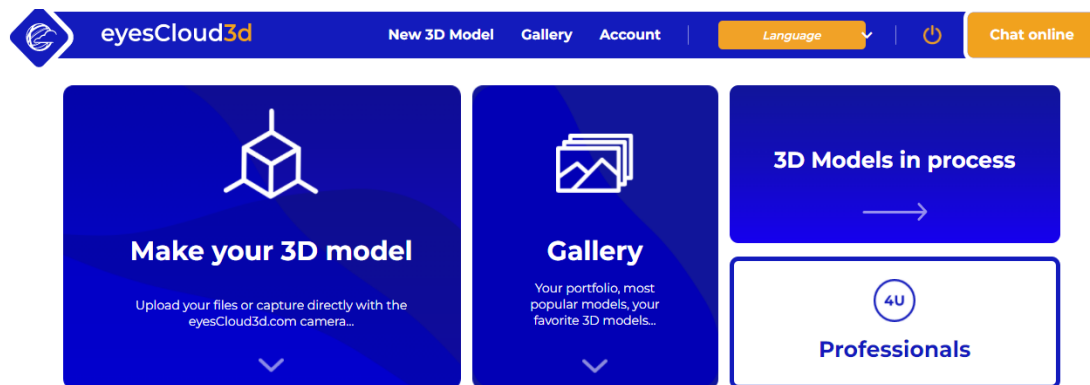


Figura 3.30 Visão da plataforma *EyesCloud3D*.

Para sua utilização, foram tiradas fotografias com o telemóvel, aproximadamente cinco de cada amostra, com ângulos variáveis em relação ao objeto a analisar e inseridas no *software*; o programa executou a integração das várias imagens após sua conversão em *pixels*, criando uma nuvem 3D de pontos que reproduz a topografia da superfície fotografada.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Nota introdutória

O presente capítulo apresenta os resultados experimentais de todos os ensaios descritos no Capítulo 3, não só os relativos à caracterização do betão, como também para ensaios de caracterização das fissuras e da selagem. Cada análise é apresentada e discutida em separado. No final do capítulo é efetuada uma análise e discussão conjunta dos resultados obtidos, sendo avaliada a eficácia da biocimentação no tratamento de fissuras em estruturas de betão sujeitas à pressão da água.

### 4.2 Resultados ensaios para caracterização do betão

#### 4.2.1 Porosidade

O ensaio de porosidade permitiu avaliar o índice de vazios e a porosidade do betão. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 Resultados porosidade total.

Amostra	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	M4 [g]	W [%]	$\gamma_h$	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$M_s$ [g]	$M_{sat}$ [g]	E	N [%]	
Intactas	1	3220,80	3307,40	1739,80	3102,70	0,04	19,36	18,65	26,10	3221,10	3286,90	0,40	28,55
	2	3353,70	3474,00	1805,00	3244,10	0,03	18,60	18,00	26,10	3356,30	3448,00	0,45	31,05
	3	3231,50	3325,00	1737,60	3113,50	0,04	19,11	18,41	26,10	3236,90	3316,00	0,42	29,47

Nota: M1 (massa da amostra), M2 (massa da amostra com parafina), M3 (massa da amostra submersa), M4 (massa da amostra seca por estufa), w (teor em água),  $\gamma_h$  (massa volúmica aparente da amostra húmida),  $\gamma_d$  (massa volúmica aparente da amostra seca),  $\gamma_s$  (massa volúmica das partículas sólidas),  $M_s$  (massa da amostra sem parafina),  $M_{sat}$  (massa da amostra saturada de água), e (índice de vazios), N (porosidade).

Tabela 4.2 Resultados porosidade aberta.

Amostra	$V_f$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_c$ [cm <sup>3</sup> ]	$\gamma_{h\ med}$	$M_a$	$V_v$ [cm <sup>3</sup> ]	N [%]	
Intactas	1	1680,00	1663,82	19,17	184,20	184,20	10,96
	2	1680,00	1802,67	19,96	203,90	203,90	12,14
	3	1680,00	1691,29	19,24	202,50	202,50	12,05

Nota:  $V_f$  (volume da amostra especificado pelo fabricante),  $V_c$  (volume da amostra calculado por deslocamento de água),  $\gamma_{h\ med}$  (massa volúmica medida da amostra húmida),  $M_a$  (massa de água),  $V_v$  (volume de vazios na amostra), N (porosidade).

Obteve-se um valor médio de porosidade total igual a 29,69 %, bastante superior ao obtido para a porosidade aberta cujo valor foi 11,7 %. Este parâmetro avalia a capacidade de o betão absorver a solução de alimento antes de esta ser consumida pelas bactérias. Como a porosidade obtida, e em particular a aberta, não é significativamente elevada, considerou-se que se podia desprezar a absorção excessiva de solução de alimento pelo betão e que se podia prosseguir com o tratamento.

#### 4.2.2 Ensaio para determinação da densidade das partículas

O ensaio para caracterização da densidade das partículas do betão apresentou resultados dentro dos expectáveis, com o valor de  $GS = 2,61$ , que reflete a presença de cimento e de partículas de areia (Anexo C – Ensaio para caracterização da densidade relativa das partículas do betão). Este resultado está próximo dos valores esperados para o betão com presença de quartzo de areia (Cooper e Mazza, 2020).

#### 4.2.3 Análise mineralógica

A matéria extraída da lajeta foi triturada (Figura 4.1) com a ajuda de um triturador manual e enviada para análise mineralógica, a qual teve como resultado a curva e composição apresentadas na Figura 4.2. Essa análise foi importante para compreender quais componentes poderiam ser provenientes do próprio betão e não da biocimentação, tendo-se encontrado os minerais mais comuns do betão.

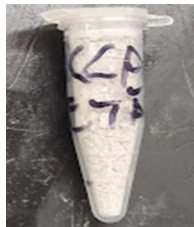


Figura 4.1 Amostra de betão submetida à análise mineralógica.

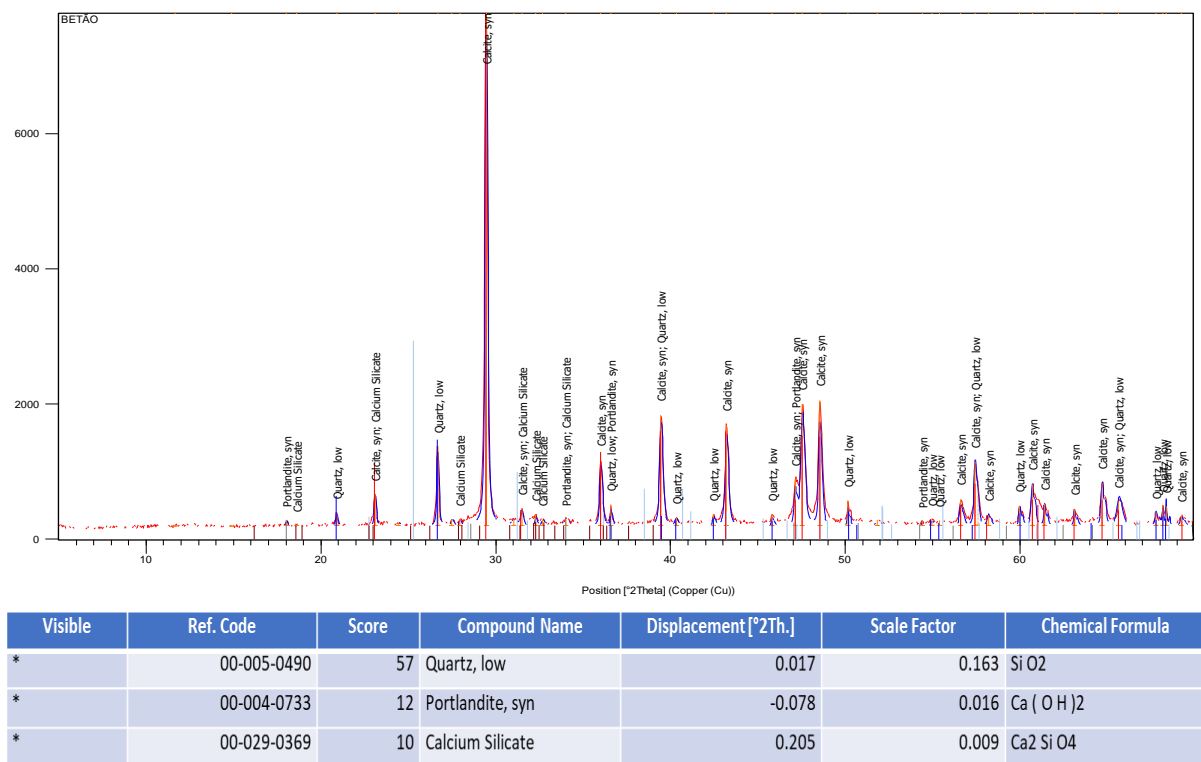


Figura 4.2 Análise mineralógica do betão.

#### 4.2.4 Ensaios de tração por flexão

Os resultados dos ensaios de tração por flexão apresentam-se na Tabela 4.3, onde  $F$  representa a resistência mecânica antes do tratamento,  $\sigma$ , a tensão de resistência antes do tratamento,  $F_{trat}$ , a resistência mecânica após tratamento. Este resultados mostram que o processo de tratamento de fissuras em betão com biocimentação não é adequado para a recuperação da capacidade de resistência estrutural, uma vez que apenas as Amostras 1, 2 e 3 tiveram a sua capacidade resistente quase totalmente restaurada (i.e., com relações  $F_{trat}/F$  da ordem de 95 %). Nota-se, por exemplo, que as cargas de rotura registradas nos testes das Amostras de 4 a 9 tiveram relações  $F_{trat}/F$  extremamente baixas, sendo que algumas nem sequer foram medidas pela prensa do laboratório.

Tabela 4.3 Resultados ensaio de resistência mecânica das amostras antes e após tratamento.

Amostra		F [kN]	$\sigma$ [MPa]	$F_{trat}$ [kN]	$F_{trat}/F$ [%]
0,1 mm	1	8,81	7,49	8,80	99,8
	2	11,08	9,42	10,30	93,0
	3	9,50	8,08	8,90	93,7
1 mm	4	10,44	8,88	1,40	13,4
	5	10,41	8,85	1,40	13,4
	6	8,02	6,82	1,40	13,4
10 mm	7	9,46	8,04	-	-
	8	7,74	6,58	-	-
	9	8,83	7,51	-	-
Intactas	10	7,70	6,55	-	-
	11	7,60	6,46	-	-
	12	8,10	6,89	-	-

### 4.3 Resultados ensaios para caracterização do material de selagem das fissuras

#### 4.3.1 Análise mineralógica

Os resultados das análises mineralógicas serviram para demonstrar que o tratamento decorreu da maneira esperada, com a produção de biocimento, de fórmula química  $\text{CaCO}_3$ , nas suas duas formas mineralógicas mais comuns: calcite e vaterite. Estas diferenciam-se pelo sistema cristalino, solubilidade e diâmetro médio, conforme parâmetros indicados na Figura 4.3. A calcite, de formato cristalino cúbico, é menos solúvel e, portanto, a forma que se deseja que seja produzida pelo tratamento visto o contato direto do substrato com a água.



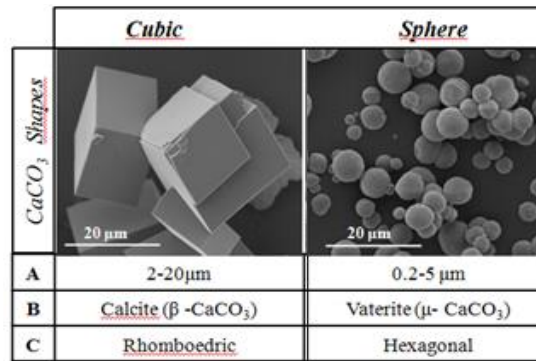
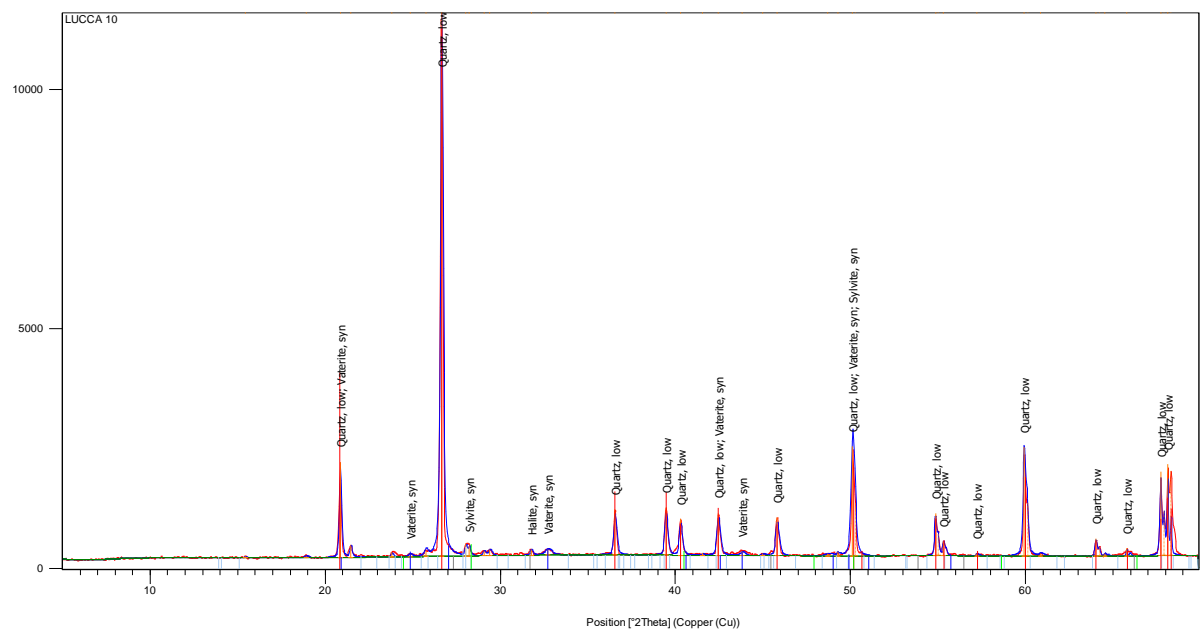


Figura 4.3 Arranjos do carbonato de cálcio em calcite e vaterite (A (diâmetro médio), B (fase cristalina), C (sistema cristalino)) (Saraya e Rokbaa, 2016).

Os resultados das análises mineralógicas apresentados na Figura 4.4 mostraram que as amostras sem adição de areia – Amostras de 1 a 6 - apresentaram vaterite e dois outros sais advindos do não processamento da solução de alimento por completo, sendo o excedente KCl e NaCl. A deposição do biocimento também pode ser observada na Figura 4.5.



Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-024-0030	25	Vaterite, syn	0.000	0.020	Ca C O3
*	00-041-1476	8	Sylvite, syn	0.000	0.022	K Cl
*	00-005-0628	16	Halite, syn	0.000	0.008	Na Cl

Figura 4.4 Análise mineralógica das amostras 1 a 6 de biocimento (sem adição de areia).



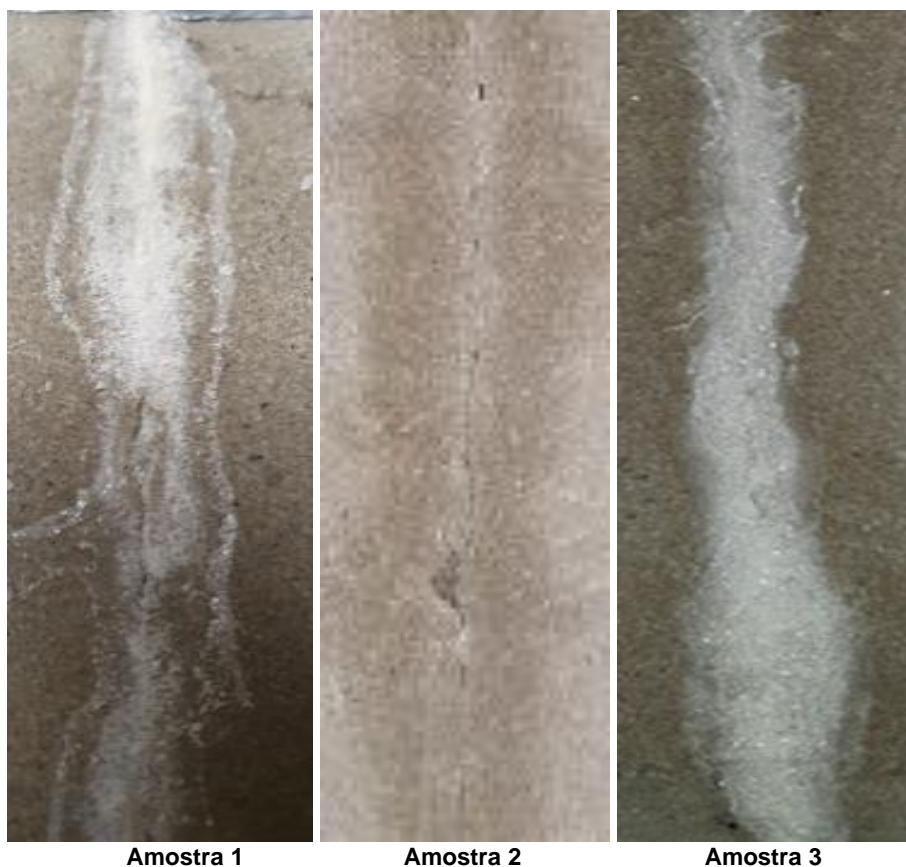


Figura 4.5 Biocimento da superfície das fissuras das amostras 1, 2 e 3 enviado para análise mineralógica.

Os resultados foram semelhantes para as amostras com maiores aberturas de fissura (i.e., 10 mm) nas quais houve adição de areia. Possivelmente, houve maior precipitação de calcite em razão das condições de rugosidade proporcionadas pela areia que possibilitaram a agregação do biocimento nas paredes dos grãos. As coletas de material são indicadas na Figura 4.6 e os resultados na Figura 4.7.



Figura 4.6 Coletas das amostras 7, 8 e 9 com adição de areia.

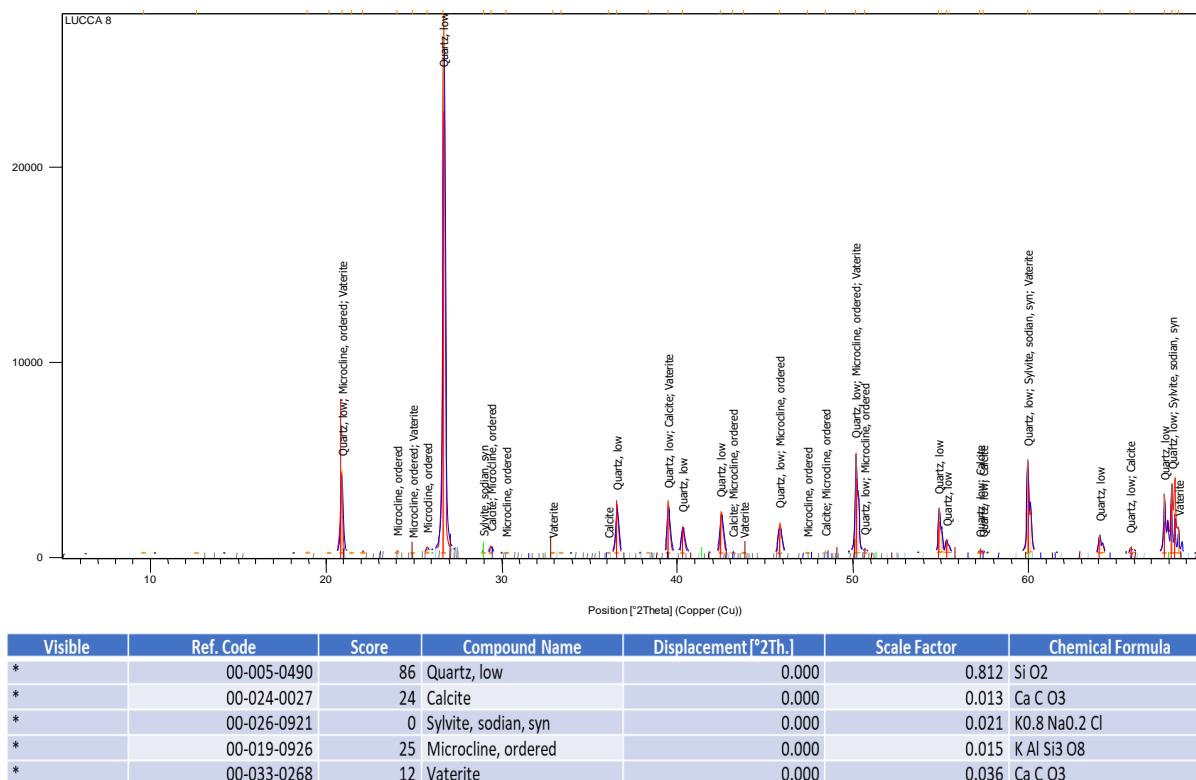


Figura 4.7 Análise mineralógica amostras 7, 8 e 9 (com adição de areia).

Um precipitado, essencialmente branco e folicular, apareceu nas paredes laterais das amostras, o que fez com que surgisse a hipótese de poder estar a ocorrer ascensão capilar do fluido das bactérias e da solução de alimento para a superfície, onde possivelmente estaria sendo produzido biocimento. O material foi retirado do substrato lateral paralelo à direção das fissuras com auxílio de uma espátula fina metálica e de um *Eppendorf* e destinado para análise mineralógica com o intuito de compreender se o material era biocimento, como indicados na Figura 4.8 e na Figura 4.9.



Figura 4.8 Produção de precipitado branco na superfície lateral das amostras.



Figura 4.9 Material precipitado coletado e destinada à análise mineralógica.

Como resultado, indicado na Figura 4.10, constatou-se que o precipitado era o sal KCl proveniente da solução de alimento. Descartou-se a possibilidade de este composto ser proveniente do próprio betão por causa da análise mineralógica anterior deste material. Este resultado mostrou também que a baixa porosidade do betão não impediu a infiltração da solução de alimento.

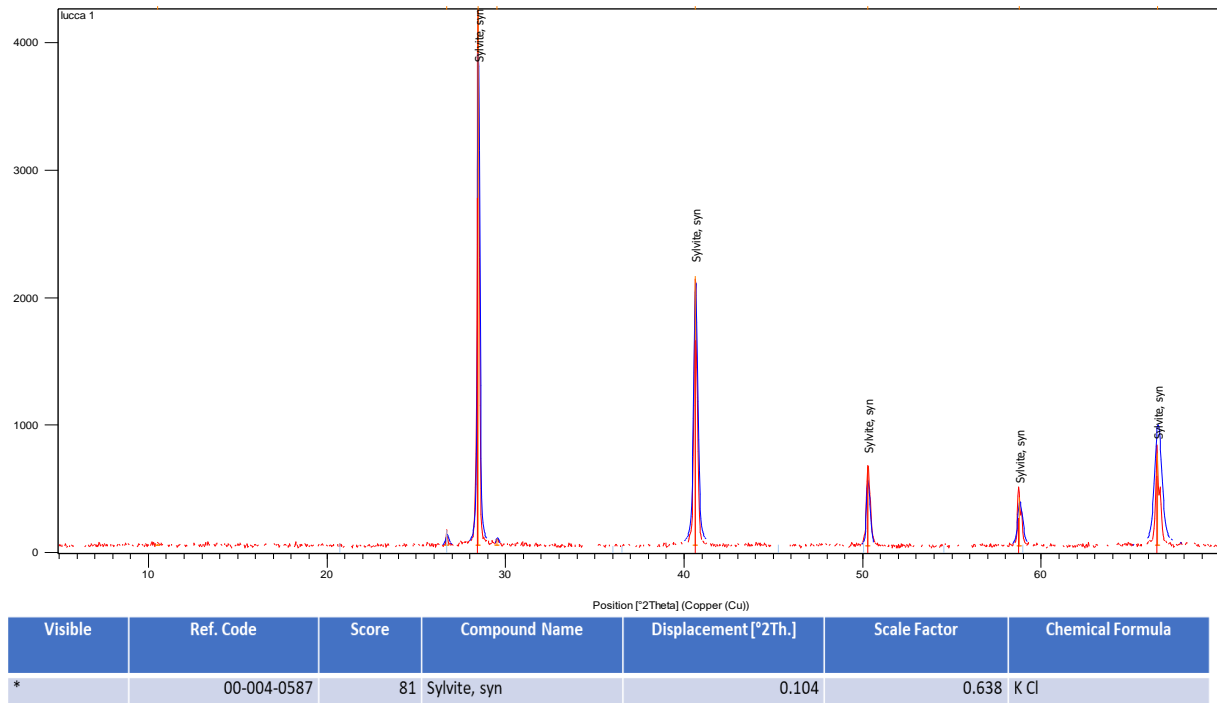


Figura 4.10 Análise mineralógica do produto precipitado branco.

#### 4.3.2 Microscopia óptica e visualização do material de enchimento

Após a conclusão dos tratamentos, pequenas quantidades de fragmentos das amostras depois da rotura à tração por flexão foram coletadas e observadas ao microscópio óptico com ampliação de 1600x (Figura 4.11).

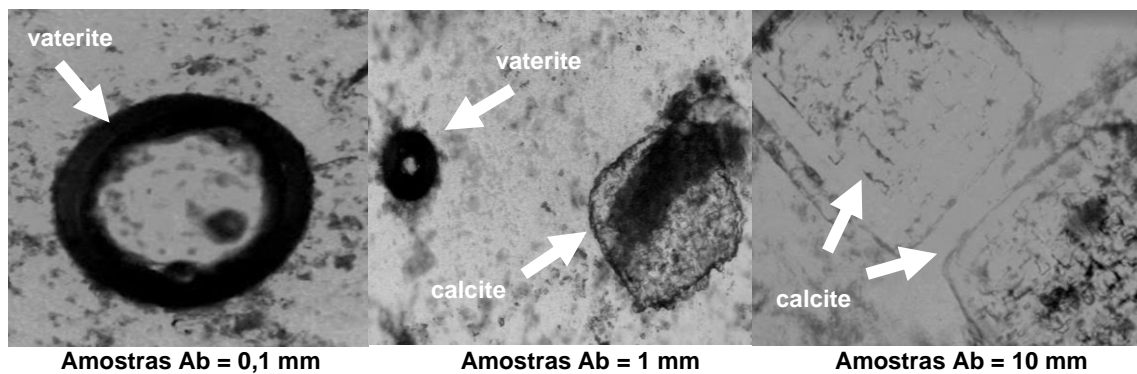


Figura 4.11 Imagens geradas pelo microscópio óptico com ampliação de 1600x.

Foram observados alguns cristais cujas estruturas aparentam ser arranjos da calcite e vaterite em razão de suas configurações cúbicas e esféricas (Figura 4.3), respectivamente, o que demonstra que o fenómeno da biocimentação realmente ocorreu.

Nas imagens microscópicas geradas a partir das análises das frações existentes no interior das fissuras de abertura de 10 mm – Amostras 7, 8 e 9 – foi possível perceber a produção de biocimento agregado aos grãos de areia APAS30. As imagens da Figura 4.12 retratam a deposição de calcite junto dos grãos graúdos de areia.

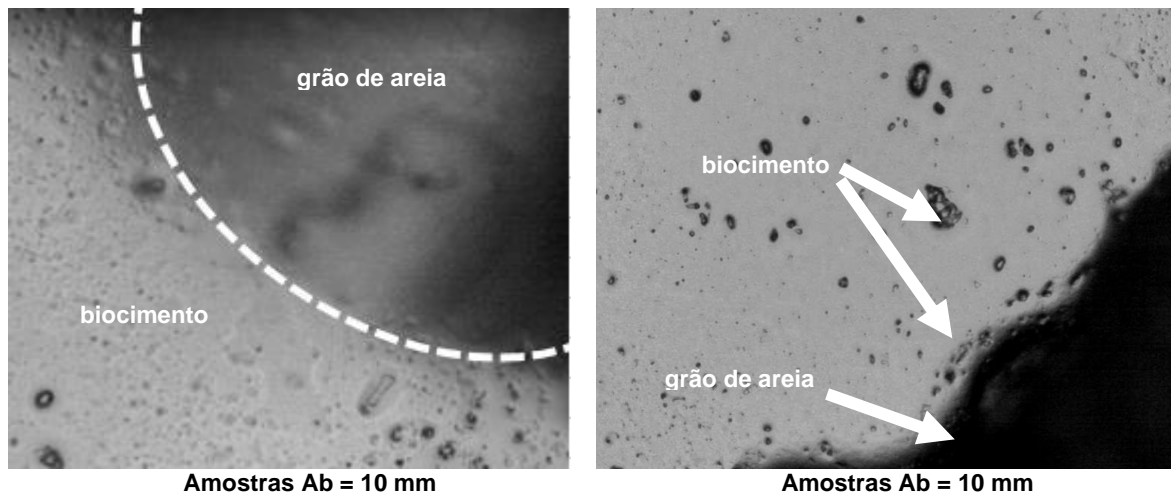


Figura 4.12 Imagem microscópica da deposição do biocimento em proximidade das paredes de grão de areia utilizado como enchimento nas amostras 7, 8 e 9.

No geral, os resultados são coerentes com as análises mineralógicas visto que, nas amostras de abertura 0,1 e 1 mm tratadas sem adição de areia (Amostras 1 a 6), regista-se a presença de estruturas cristalinas cúbicas e esféricas, indicando a coexistência de calcite e vaterite, e que, nas amostras de abertura 10 mm (Amostras 7 a 9), é possível ver unicamente sedimentos cúbicos de calcite concordantes com os resultados mineralógicos.

#### **4.4 Resultados ensaios de estanqueidade para avaliação da selagem**

##### **4.4.1 Nota introdutória**

Os resultados dos ensaios de estanqueidade realizados com colunas de água estão organizados em: (i) análise de situação de referência, com os resultados dos caudais para as amostras anteriormente a qualquer tratamento, (ii) melhoria progressiva do tratamento, indicando resultados para os diferentes ciclos de tratamento e (iii) comparação da evolução dos resultados antes e após o procedimento ciclo por ciclo.

#### **4.4.2 Situação de referência – amostras antes do tratamento**

Os resultados do abaixamento do nível de água e dos caudais iniciais para as amostras antes do início do tratamento estão indicados na Figura 4.13 (para as amostras com fissuras de 0,1 mm de abertura) e na Figura 4.14 (para as amostras com fissuras de 1 mm de abertura).

Estes resultados permitem avaliar como os caudais são perdidos através das fissuras sem qualquer tratamento e, assim, compará-los com os resultados após os ciclos de tratamento com biocimentação.

Amostras de abertura de fissura 0,1 mm

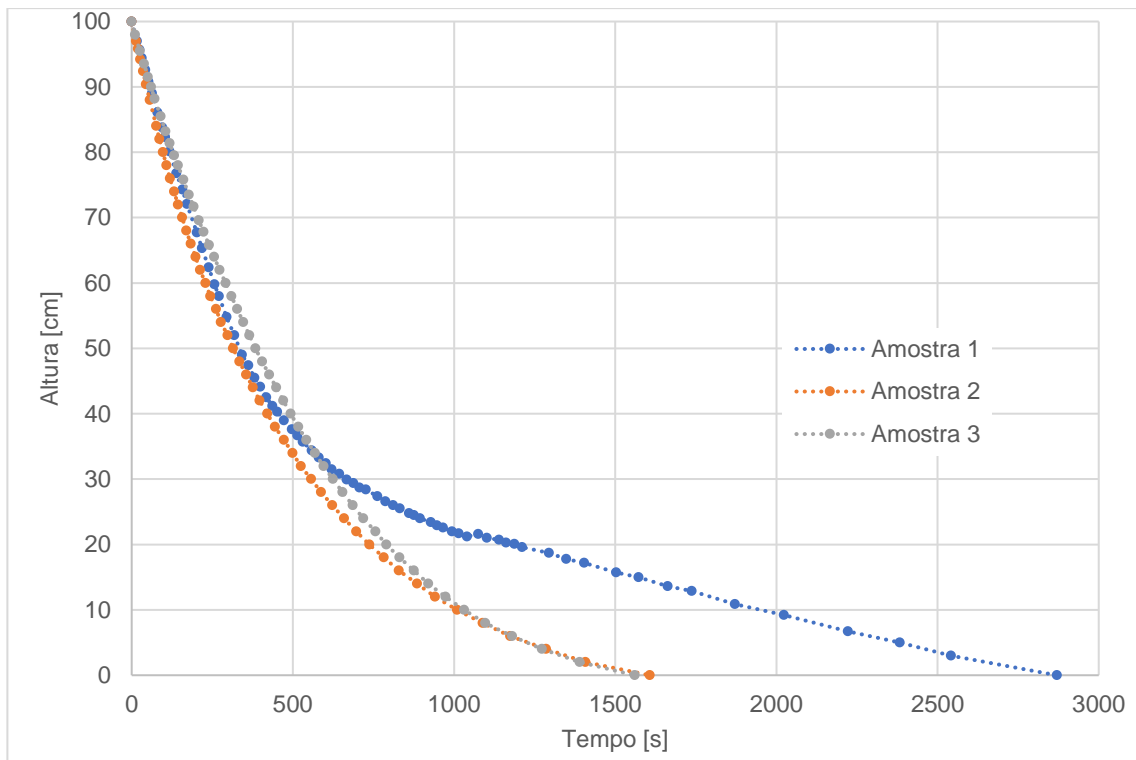
Os resultados dos ensaios para as amostras de fissuras com abertura 0,1 mm – Amostras 1, 2 e 3 - mostraram uma certa repetibilidade, à exceção da Amostra 1 que mostrou ter maior selagem do que as outras duas, por demorar mais tempo a esvaziar a coluna de água. As evoluções do nível da água e do caudal escoado ao longo do tempo são apresentados na Figura 4.13.

O caudal inicial da Amostra 1 foi 18 cm<sup>3</sup>/s com um tempo de escoamento total de aproximadamente 2800 s. O caudal inicial da Amostra 2 foi ligeiramente superior, 22 cm<sup>3</sup>/s, e o esvaziamento total da coluna líquida durou cerca de 1600 s. O caudal inicial da Amostra 3 foi 19 cm<sup>3</sup>/s, demorando aproximadamente 1600 s para que o escoamento se desse por completo.

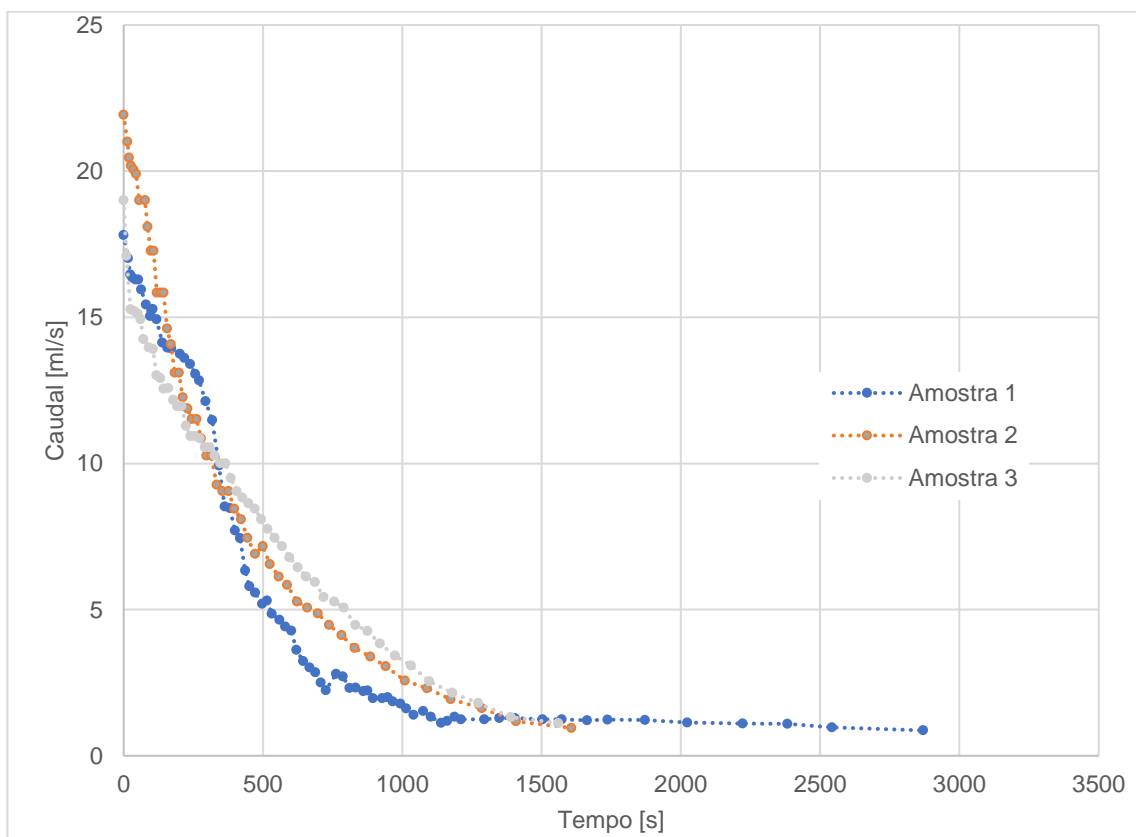
Amostras de abertura de fissura 1 mm

Os resultados dos ensaios para as amostras de fissuras com abertura 1 mm – Amostras 4, 5 e 6 - mostraram comportamentos similares, mas com certa alteração da Amostra 4 em relação às outras. As evoluções do nível da água e do caudal escoado ao longo do tempo são apresentados na Figura 4.14.

O caudal inicial da Amostra 4 foi 79 cm<sup>3</sup>/s com um tempo de escoamento total próximo a 250 s, o a Amostra 5 foi 178 cm<sup>3</sup>/s, com um tempo de esvaziamento de 100 s, e o da Amostra 6 foi 158 cm<sup>3</sup>/s, levando também aproximadamente 100 s para o completo esvaziamento.

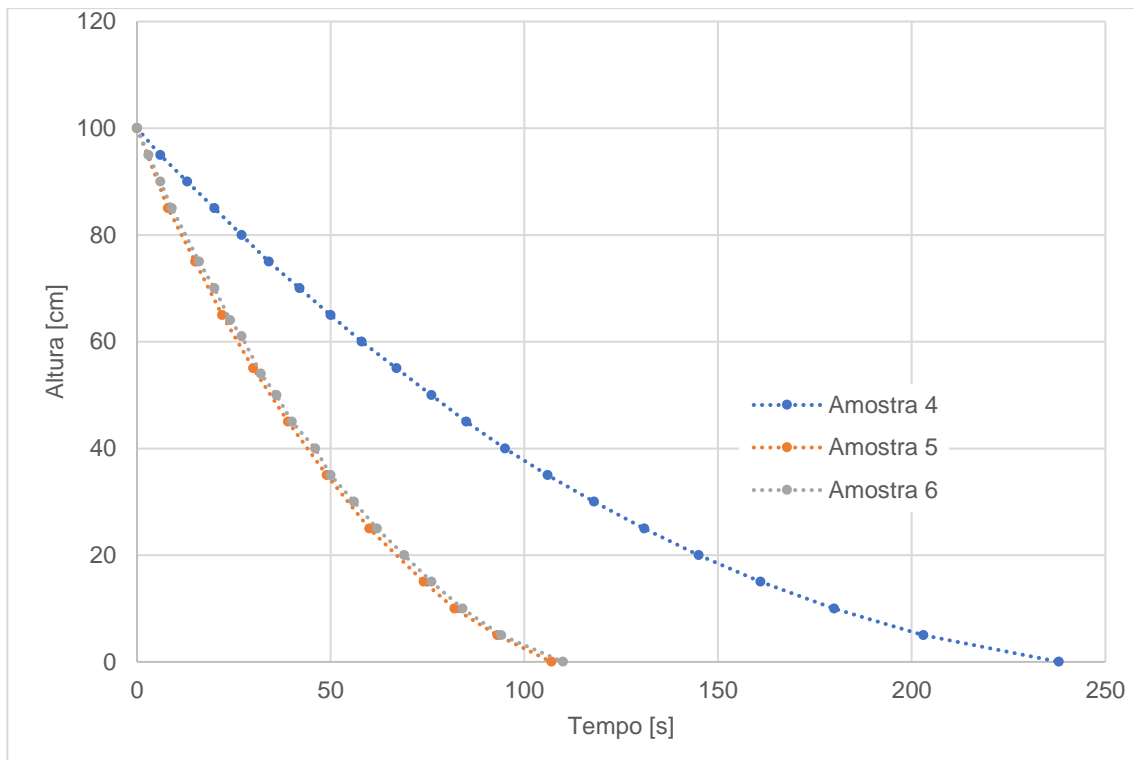


(a)

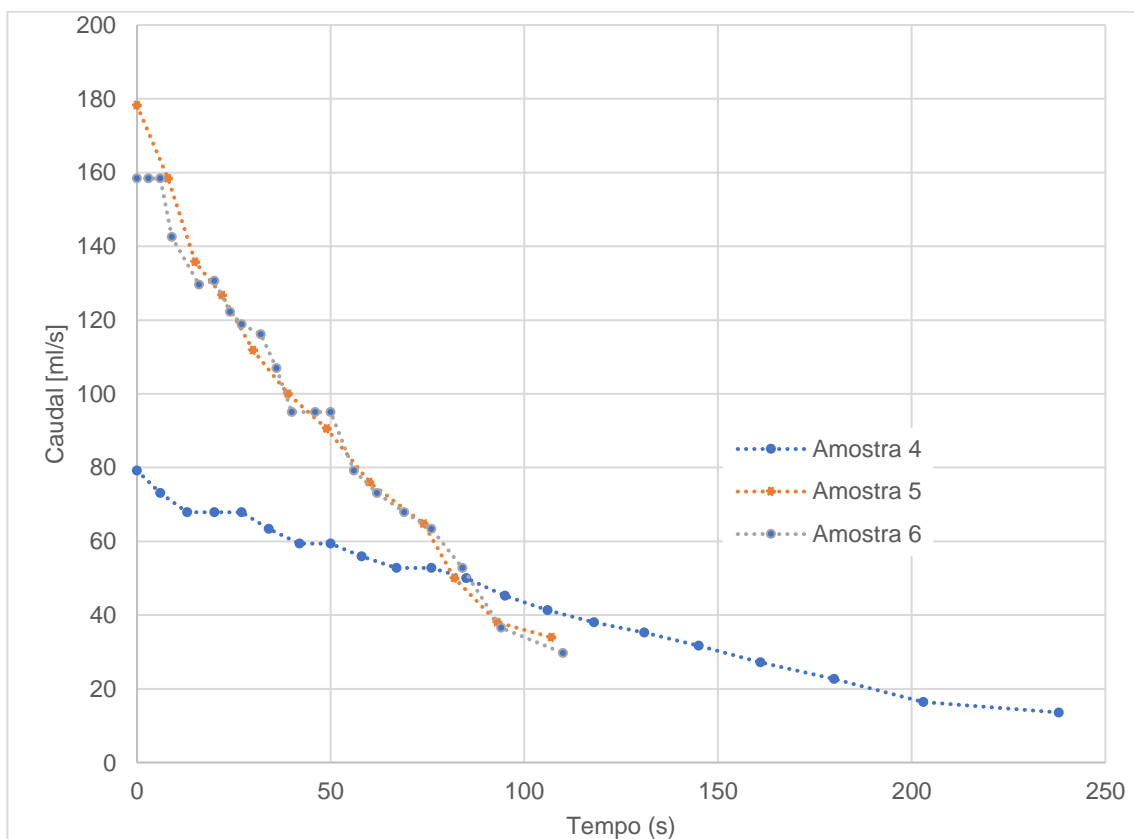


(b)

Figura 4.13 Ensaios de estanqueidade antes do tratamento – para a situação de referência (Amostras 1, 2 e 3 com fissura de 0,1 mm): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.



(a)



(b)

Figura 4.14 Ensaios de estanqueidade antes do tratamento – para a situação de referência (Amostras 4, 5 e 6 com fissura de 1 mm): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal..

Amostras de abertura de fissura 10 mm

Para as amostras com fissuras de abertura de 10 mm – Amostras 7, 8 e 9 - não se realizou o ensaio de estanqueidade para a situação de referência dada a sua considerável abertura, a qual gerava um escoamento muito rápido e difícil de medir. No entanto, estimou-se o caudal inicial escoado recorrendo à lei de vazão dos pequenos orifícios, descrita pela Equação 4.1.

$$Q = C \times A \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad [4.1]$$

sendo  $Q$ , o caudal escoado ( $m^3/s$ ),  $C$ , o coeficiente de vazão do orifício (adimensional),  $A$ , a área da secção transversal do orifício ( $m^2$ ),  $g$ , a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ), e  $h$ , a altura do nível de água (m) acima da cota do fundo.

Considerando o coeficiente de vazão do orifício  $C = 0,6$  e considerando a área do orifício dada por:

$$A = L \times a = 11 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} = 11 \text{ cm}^2 \quad [4.2]$$

Estimou-se o caudal inicial para a situação de referência das Amostras 7, 8 e 9:

$$Q_0 = 0,6 \times 11 \times 10^{-4} \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 1} = 2923 \text{ cm}^3/s \quad [4.3]$$

sendo  $Q_0$ , o caudal inicial no instante  $j=0$  ( $cm^3/s$ ).

#### **4.4.3 Situação ao longo dos ciclos – amostras durante o tratamento**

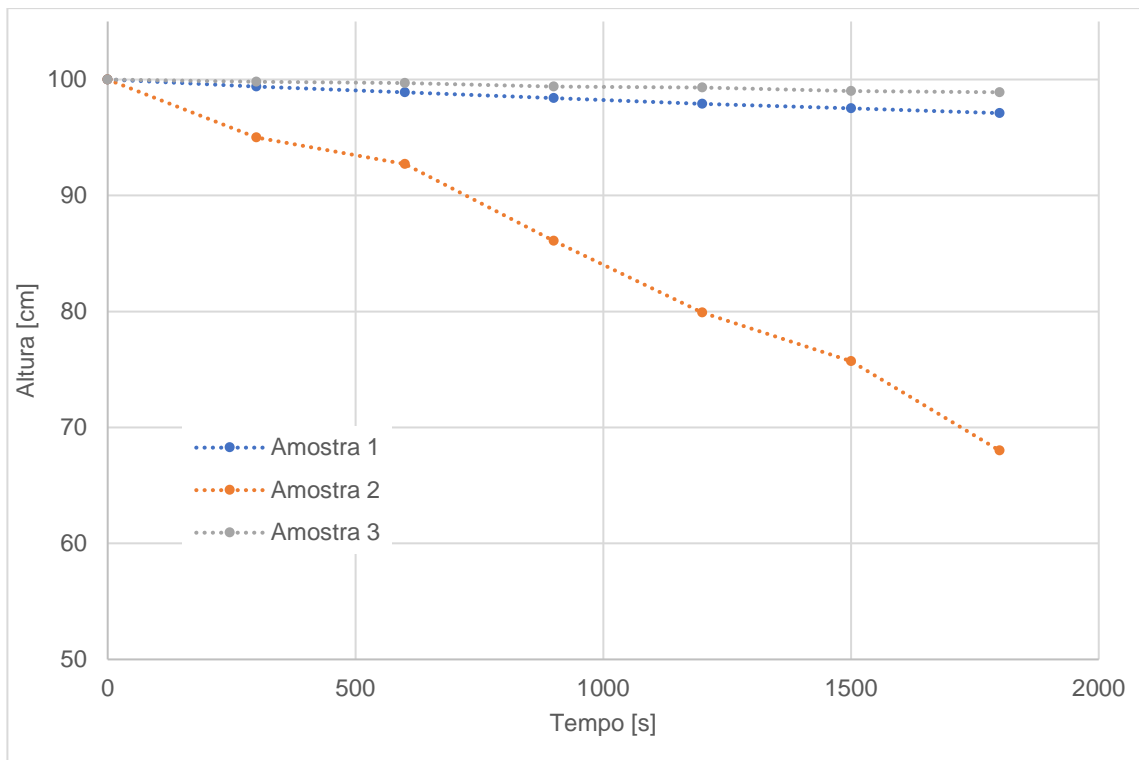
No decorrer do tratamento, os ensaios de estanqueidade foram realizados após cada um dos ciclos com o intuito de visualizar a evolução do processo. Os resultados com a evolução dos escoamentos para cada ciclo e abertura da fissura são apresentados da Figura 4.15 à Figura 4.21 e analisados nos parágrafos seguintes.

Amostras de abertura de fissura 0,1 mm

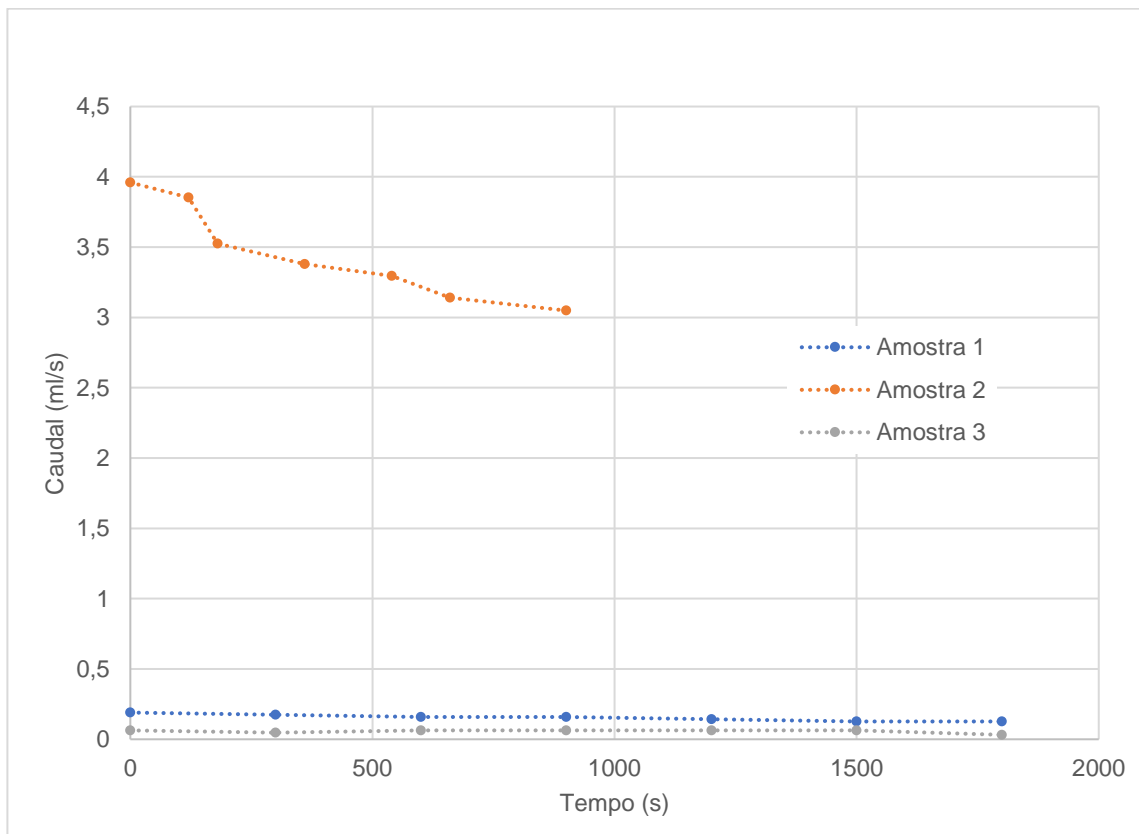
Os resultados dos ensaios para as amostras de fissuras com abertura 0,1 mm – Amostras 1, 2 e 3 – podem ser visualizados na Figura 4.15 e Figura 4.16. Nestas figuras observa-se que houve recuperação quase total da estanqueidade, fato constatado pela comparação entre os caudais iniciais dos ensaios antes e após os diferentes ciclos de tratamento. Os caudais iniciais da Amostra 1 passaram de 18  $cm^3/s$  para 0,19  $cm^3/s$  ao fim do primeiro ciclo para 0  $cm^3/s$  ao fim da segunda, mostrando selagem completa. Os caudais iniciais da Amostra 2 iniciaram em 22  $cm^3/s$  na situação de referência e passaram a 3,96  $cm^3/s$  ao fim do primeiro ciclo e a 1,53  $cm^3/s$  ao fim da segunda. Os caudais iniciais da Amostra 3 começaram em 19  $cm^3/s$  antes do tratamento e passaram para 0,06  $cm^3/s$  ao fim do primeiro ciclo e 0  $cm^3/s$  ao fim do segundo.

De modo geral, só na Amostra 2 é que não foi alcançada a selagem total, sendo considerada uma exceção. Este resultado explica-se pelo fato de esta amostra apresentar um pequeno orifício com configuração angulosa que não foi devidamente selado (provavelmente destacamento do material da fissura após a rotura da placa), como indicado na Figura 4.17.



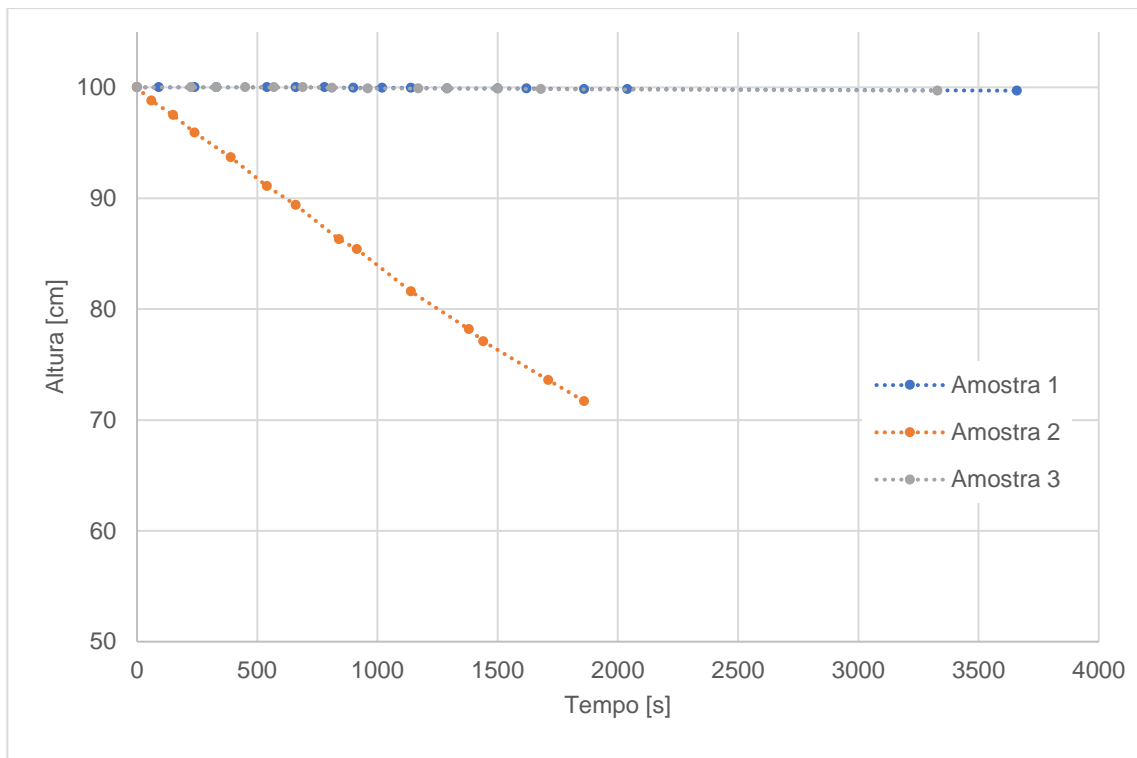


(a)

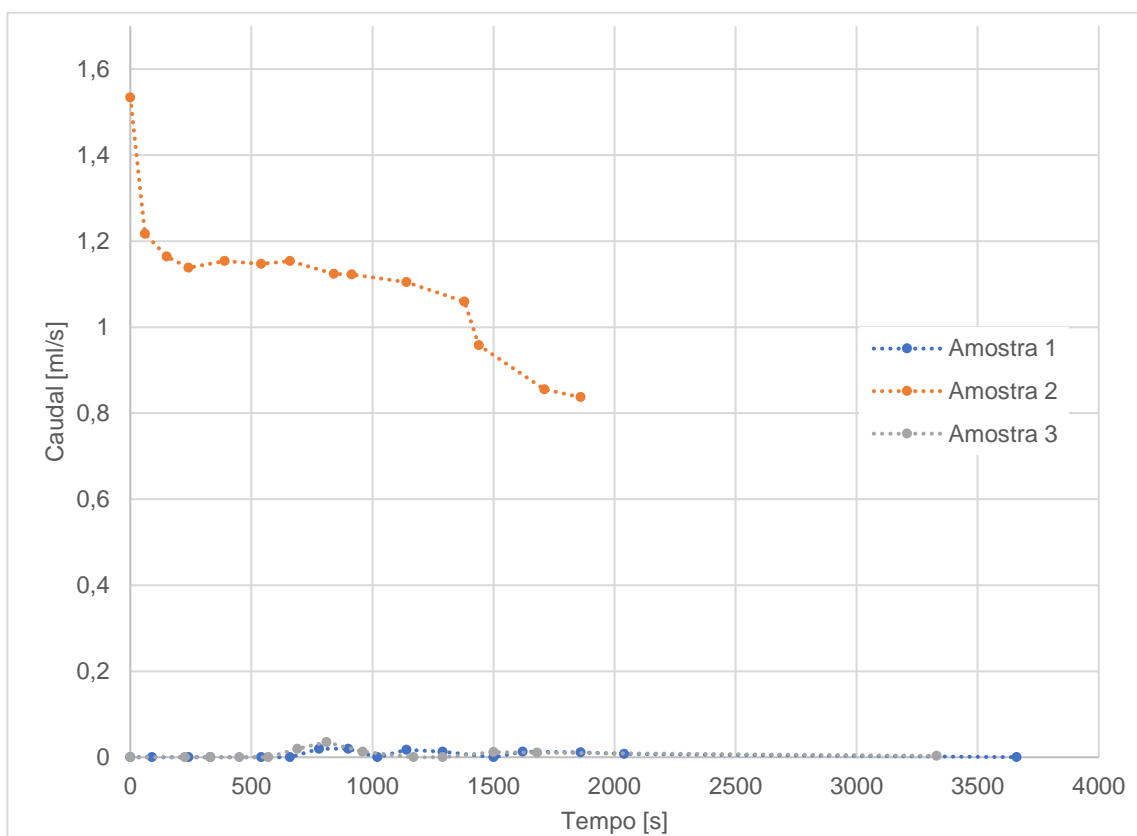


(b)

Figura 4.15 Ensaio de estanqueidade após o 1º ciclo de tratamento (Amostras 1, 2 e 3): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal



(a)



(b)

Figura 4.16 Ensaio de estanqueidade após o 2º ciclo de tratamento (Amostras 1, 2 e 3):  
 (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.



Figura 4.17 Indicação do defeito pontual na Amostra 2.

Amostras de abertura de fissura 1 mm

Os resultados obtidos para as amostras com fissuras de abertura 1 mm - Amostras 4, 5 e 6 – podem ser visualizados nos gráficos da Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20.

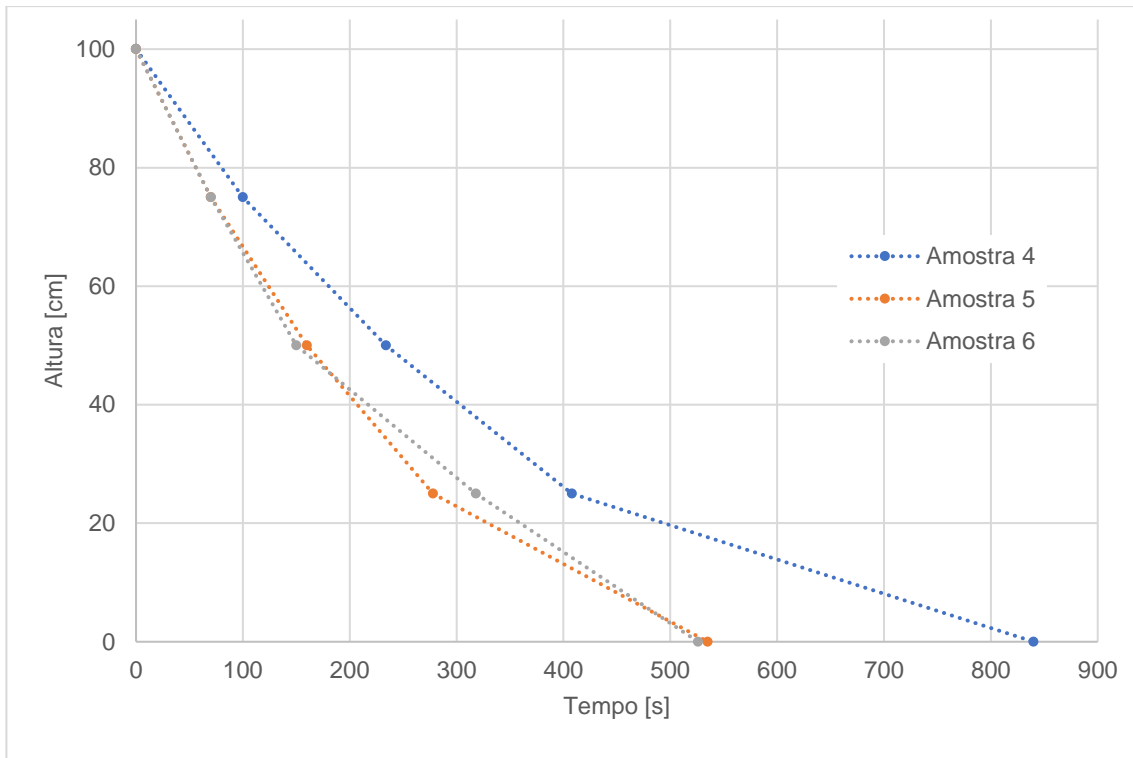
O comportamento foi satisfatório, porque houve melhoria significativa da estanqueidade após o tratamento e ao longo dos ciclos, constatado pelos caudais iniciais dos ensaios.

Os caudais iniciais da Amostra 4 passaram de 79 cm<sup>3</sup>/s para 23,76 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 1º ciclo, para 2,09 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 2º ciclo e para 0,73 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º ciclo, mostrando praticamente a selagem total da fissura.

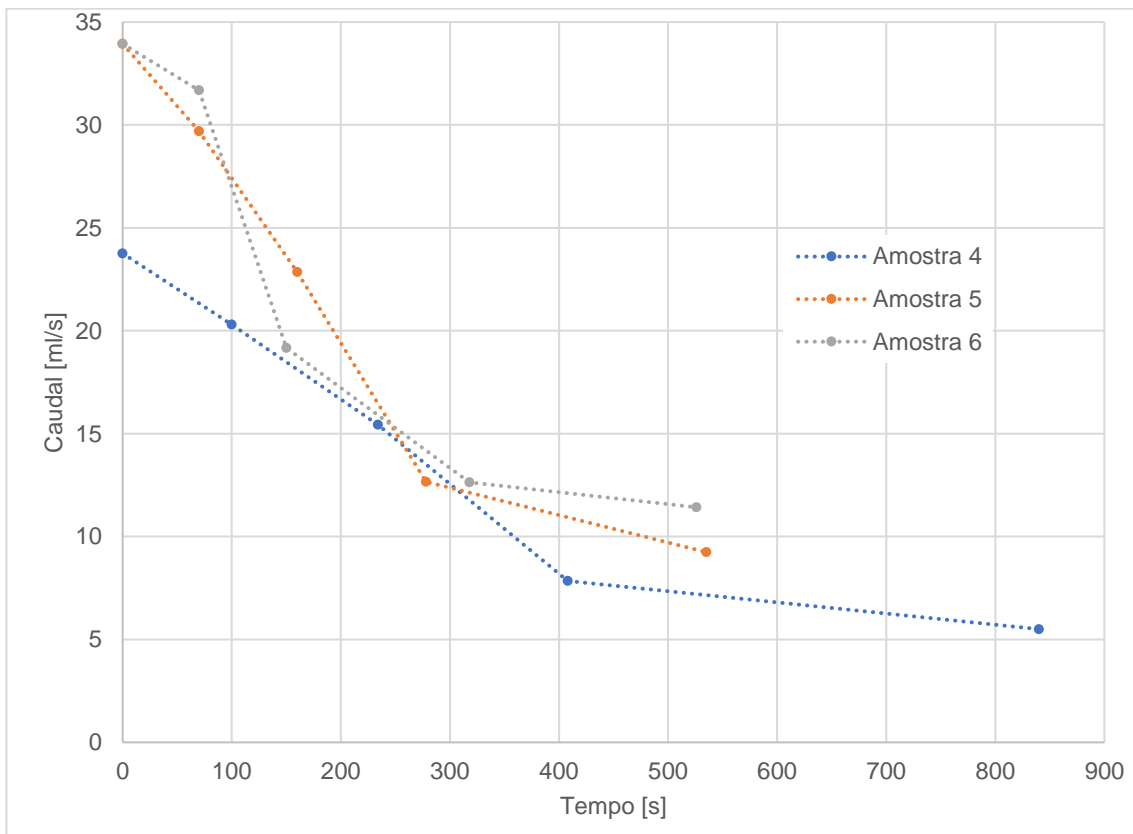
Os caudais iniciais da Amostra 5 passaram de 178 cm<sup>3</sup>/s para 45,23 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 1º ciclo, para 38,01 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 2º ciclo e 7,36 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º, indicando resultados positivos, mas levemente piores do que os da Amostra 4.

Os caudais iniciais da Amostra 6 passaram de 158 cm<sup>3</sup>/s para 33,94 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 1º ciclo, para 21,12 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 2º e para 17,82 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º ciclo.

Essa variabilidade no comportamento de cada uma das amostras ocorreu em razão das particularidades geométricas de cada fissura. Isso se deu por se tratar de betão fendilhado, uma mistura heterogênea que não apresenta comportamento padrão quando rompido.

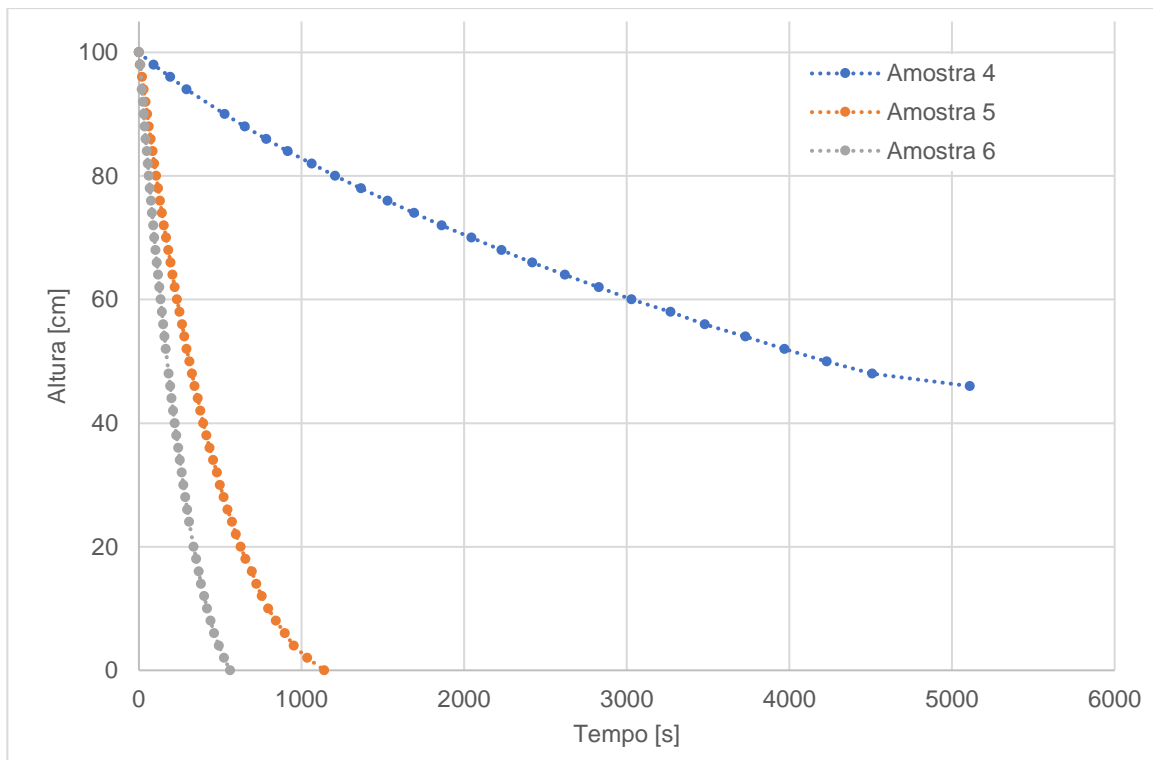


(a)

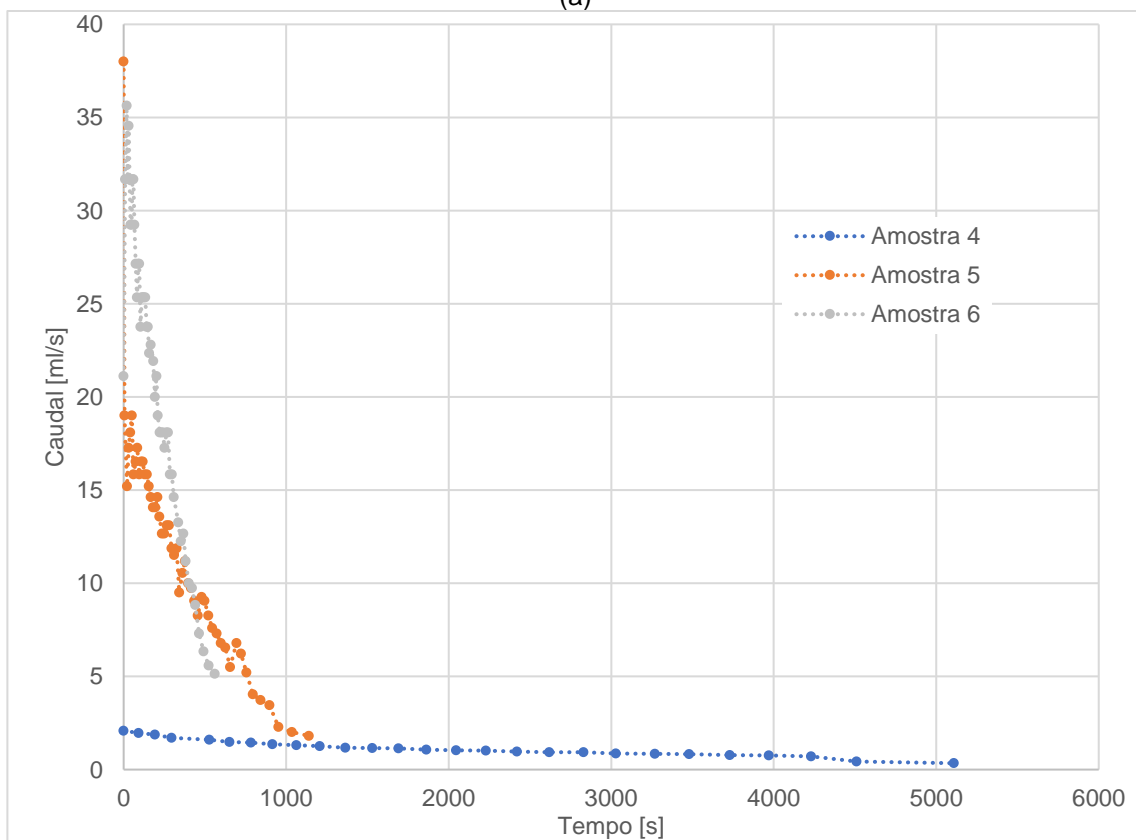


(b)

Figura 4.18 Ensaio de estanqueidade após o 1º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.

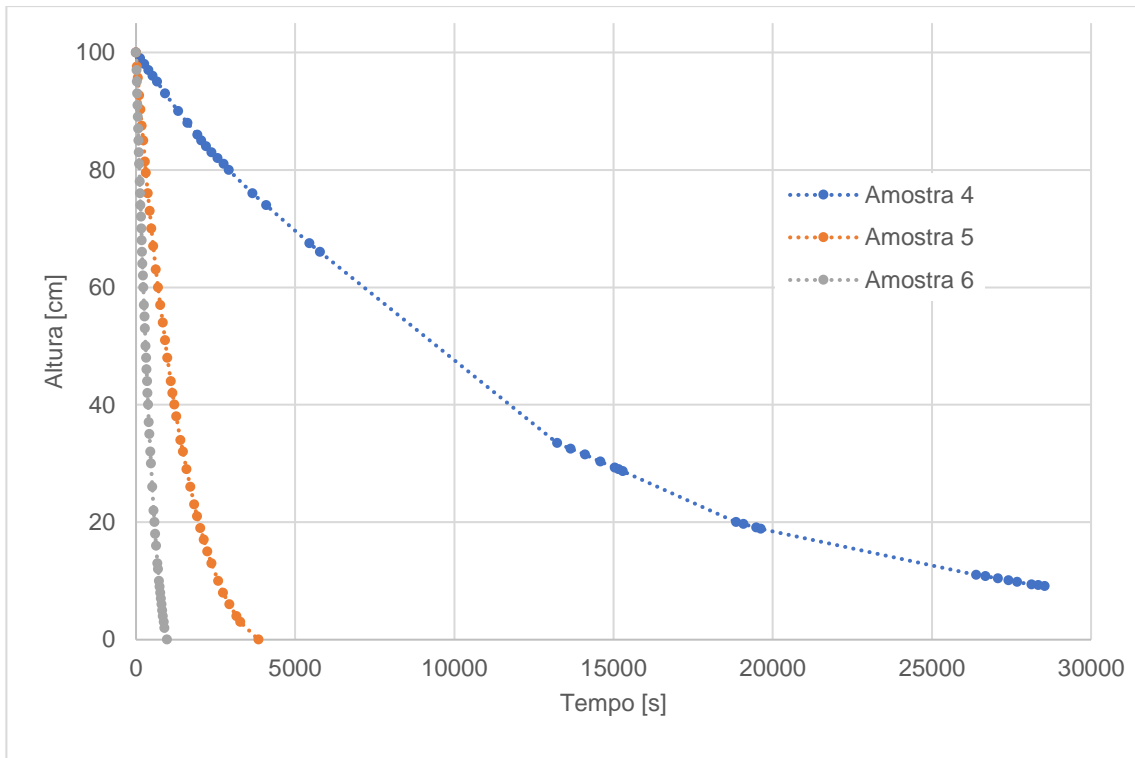


(a)

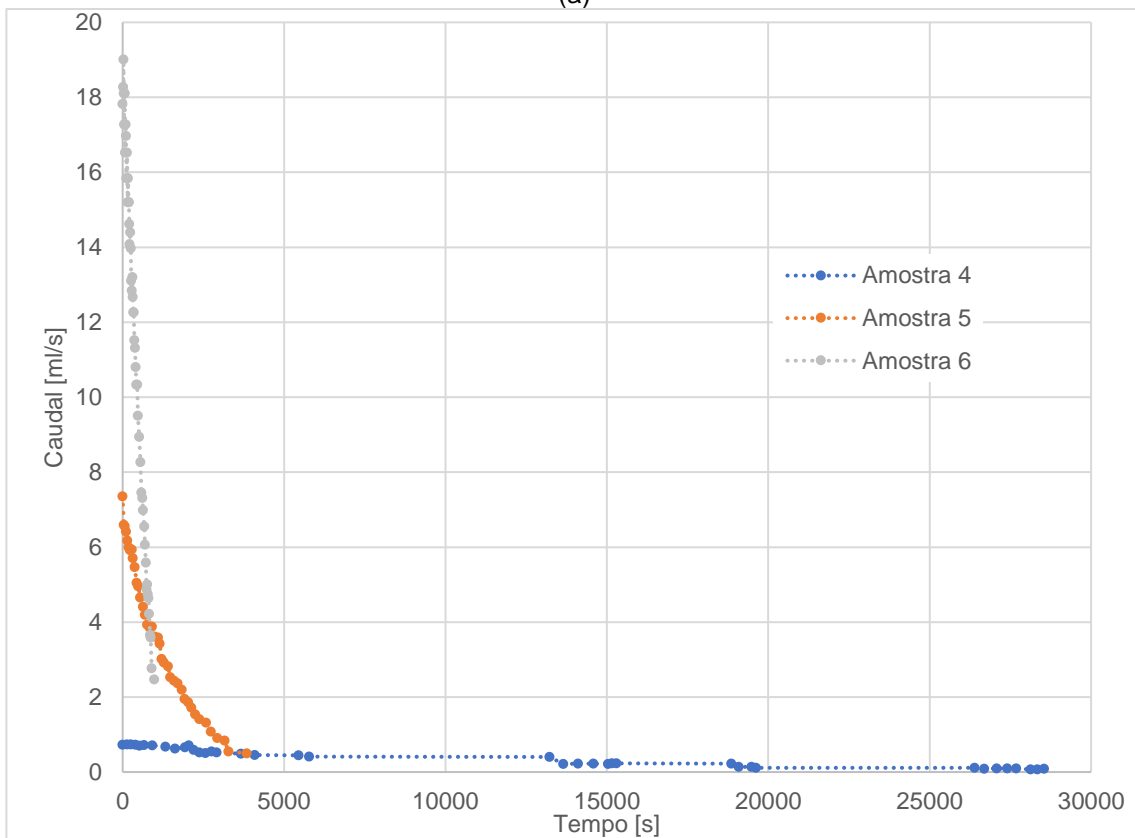


(b)

Figura 4.19 Ensaios de estanqueidade após o 2º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.



(a)



(b)

Figura 4.20 Ensaio de estanqueidade após o 3º ciclo de tratamento (Amostras 4, 5 e 6): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.

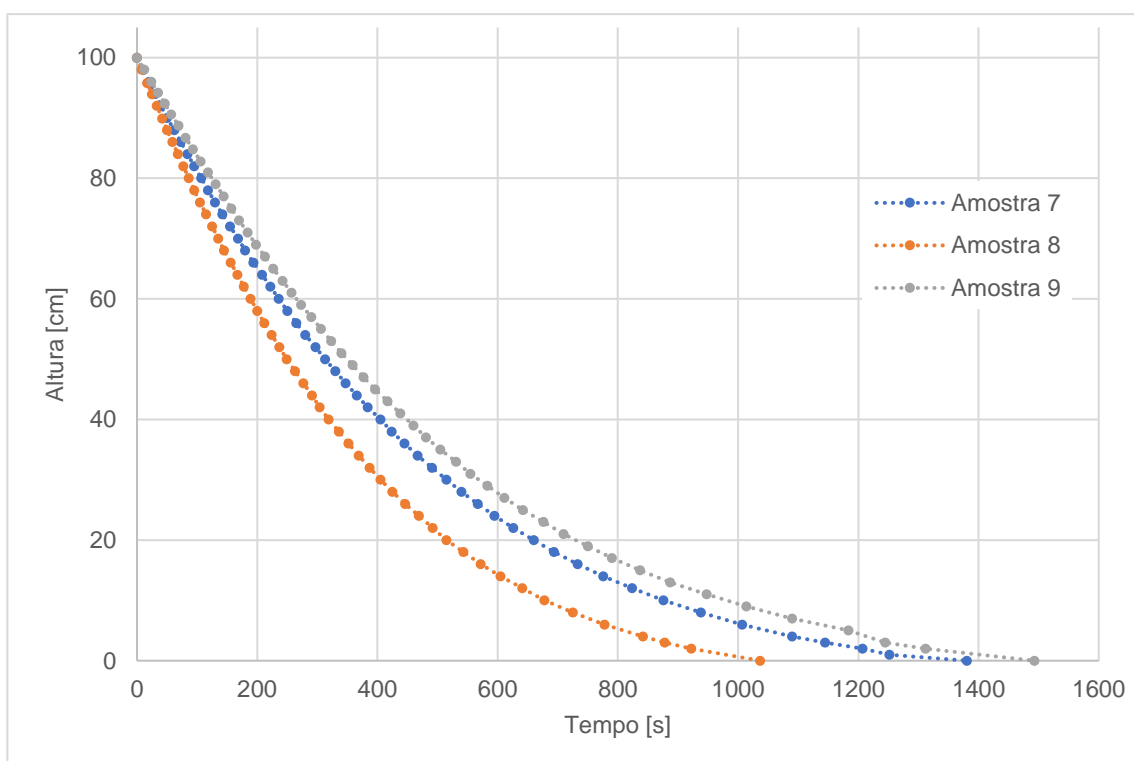
Amostras de abertura de fissura 10 mm

Os resultados das amostras com fissuras de abertura 10 mm – amostras 7, 8 e 9 – são apresentados na Figura 4.21. O tratamento destas amostras mostrou-se promissor se analisado do ponto de vista de redução do escoamento final comparativamente com a situação de referência.

A combinação do enchimento em areia APAS30 e com o biocimento produzido ao longo das inoculações proporcionou um meio agregado ao substrato com poucos vazios, reduzindo os caudais escoados pelas fissuras ao longo dos ensaios.

Os caudais iniciais da Amostra 7, por exemplo, passaram de 2923 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência estimados pela lei dos pequenos orifícios para 19,01 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º ciclo de tratamento, mostrando ser adequado o comportamento para selagem da fissura. Os caudais iniciais da Amostra 8 passaram de 2923 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência para 23,76 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º ciclo de tratamento e os caudais iniciais da amostra 9 passaram de 2923 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência para 15,84 cm<sup>3</sup>/s ao fim do 3º ciclo de tratamento, sendo o melhor resultado das três amostras.

Registaram-se em certos momentos do tempo, pequenas variações dos caudais para cima e para baixo mas com uma tendência sempre de decrescente. Essas ocorrências podem ser devidas a erros de leitura ou obstruções temporárias das fissuras devido a desprendimento de material.



(a)

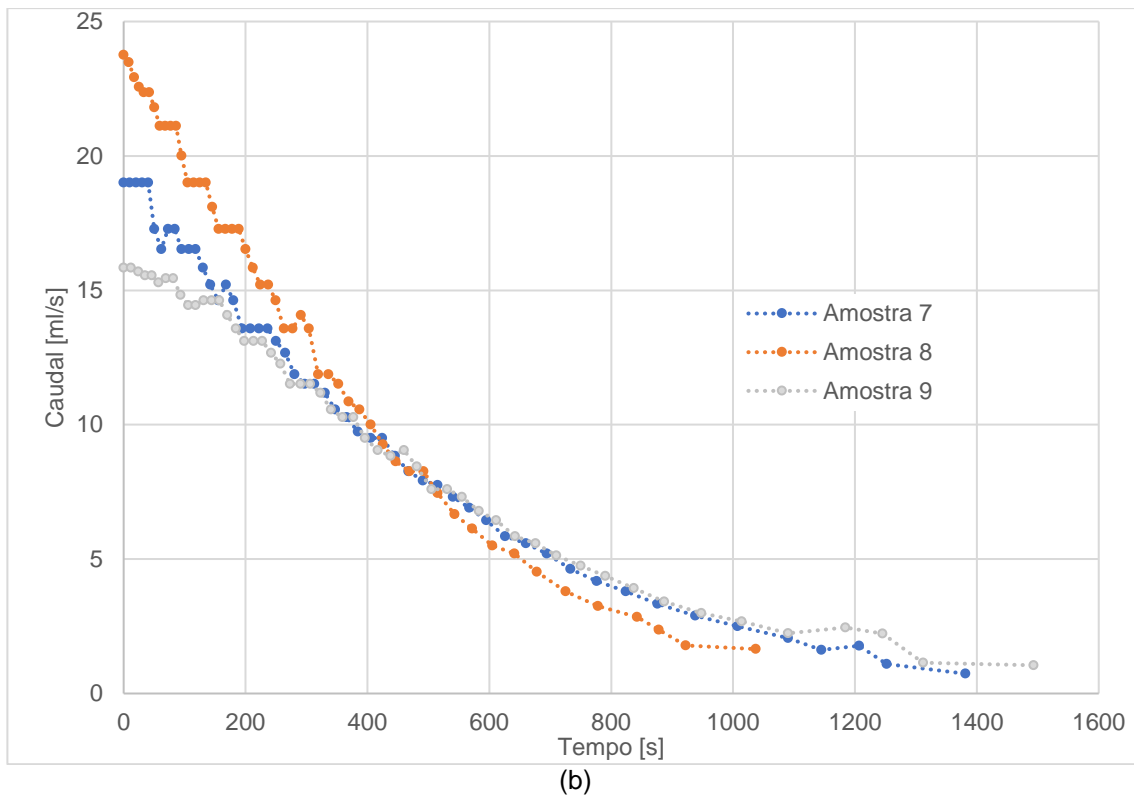


Figura 4.21 Ensaio de estanqueidade após o 3º ciclo de tratamento (Amostras 7, 8 e 9): (a) variação temporal da altura de água; (b) variação temporal do caudal.

#### 4.4.4 Comparação da evolução dos resultados antes e após o tratamento

Tendo os caudais iniciais em cada uma das fases do tratamento (caudais da situação de referência) e os caudais iniciais após a conclusão de cada ciclo, foi possível elaborar uma tabela comparativa dos resultados. Nesta tabela, apresenta-se também a análise de melhoria relativa da estanqueidade por meio de percentuais. As células encontram-se preenchidas com uma escala de cores segundo nível de satisfação da melhoria (verde – satisfatório, amarelo – adequado, laranja – razoável e vermelho – insatisfatório), estando a legenda indicada abaixo da tabela. Os caudais também se designam por Q1, o caudal inicial após o 1º ciclo de tratamento, Q2, o caudal inicial após o 2º ciclo de tratamento e Q3, o caudal inicial após o 3º ciclo de tratamento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.



Tabela 4.4 Análise da melhoria da estanqueidade entre os diferentes ciclos de tratamento.

Evolução do tratamento										
Amostra		Q antes tratamento [cm³/s]	Q1 [cm³/s]	Melhoria em relação à ronda anterior [%]	Q2 [cm³/s]	Melhoria em relação à ronda anterior [%]	Melhoria em relação à situação de referência [%]	Q3 [cm³/s]	Melhoria em relação à ronda anterior [%]	Melhoria em relação à situação de referência [%]
0,1 mm	Amostra 1	18	0,19	98,93%	0,00	100,00%	100,00%	-	-	-
	Amostra 2	22	3,96	81,94%	1,53	61,26%	93,01%	-	-	-
	Amostra 3	19	0,06	99,67%	0,00	100,00%	100,00%	-	-	-
1 mm	Amostra 4	79	23,76	70,00%	2,09	91,21%	97,36%	0,73	65,27%	99,08%
	Amostra 5	178	45,23	71,44%	38,01	15,96%	76,00%	7,36	80,65%	95,35%
	Amostra 6	158	33,94	80,95%	21,12	37,78%	88,15%	17,82	15,63%	90,00%
10 mm	Amostra 7	2923	-	-	-	-	-	19,01	-	99,35%
	Amostra 8	2923	-	-	-	-	-	23,76	-	99,19%
	Amostra 9	2923	-	-	-	-	-	15,84	-	99,46%

Nota: ■ 100 % - 95 %; ■ 95 % - 80 %; ■ 80 % - 50 %; ■ 50 % - 0 %

Estes resultados mostram um decréscimo generalizado do caudal inicial dos ensaios de estanqueidade ciclo após ciclo, tendo todas as amostras tratadas apresentado melhorias de pelo menos 90 % em comparação com a situação de referência. Isso indica que o tratamento é eficaz na reparação de fissuras em termos de estanqueidade, visto ser um índice elevado de melhoria, mas que ainda não atinge os 100 % desejados em todos os casos quando se trata de reparação em reservatórios. Além disso, dois ciclos de tratamento são suficientes para fissuras com abertura 0,1 mm (Amostras 1, 2 e 3), enquanto para fissuras maiores, são essenciais pelo menos três ciclos de tratamento para atingir uma melhoria de estanqueidade de 90% em relação à situação de referência.

A repetibilidade dos dados aqui representados com curvas de comportamento semelhantes para as amostras com fissuras de abertura 10 mm com adição de areia (Figura 4.21) mostram indícios de que o tratamento combinado com areia ser viável e promissor, com níveis de eficácia próximos a 100 %. Os comportamentos das diferentes amostras tornam-se de difícil previsibilidade devido, sobretudo, à irregularidade da superfície das fissuras, cuja rugosidade varia em cada caso devido à composição heterogénea do betão com diferentes tamanhos de agregados. Isso origina também o aparecimento de defeitos pontuais em ângulo em certas ocasiões. No geral, os resultados dos ensaios de estanqueidade realizados através de testes com coluna de água foram bastante satisfatórios mesmo com essas pequenas divergências de comportamento entre amostras como mencionado.

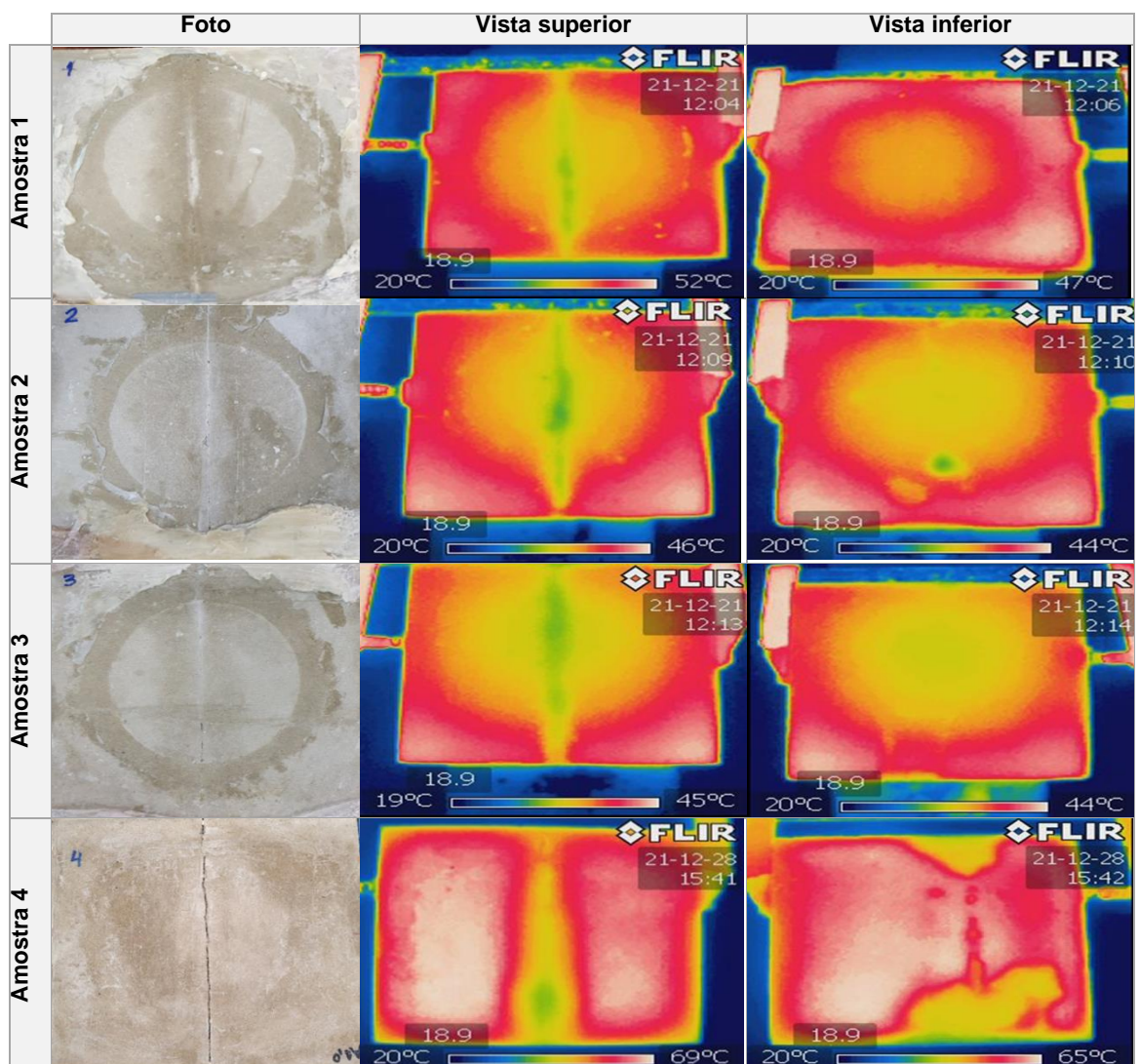
#### 4.5 Ensaios complementares de verificação da qualidade da selagem

##### 4.5.1 Termografia

Os resultados das imagens obtidas pela câmara termográfica foram satisfatórios e correlacionados com os resultados dos ensaios de estanqueidade. Estes resultados são apresentados na Figura 4.22. Nas

imagens, as cores vermelhas indicam maiores temperaturas e, portanto, as regiões mais seladas, enquanto as cores verdes (de menor temperatura) indicam a presença de água. Estes resultados mostram locais nos quais o tratamento não havia sido bem realizado, necessitando de atenção especial e novos ciclos de tratamento.

Este é o caso da Amostra 2 com um orifício de caminho preferencial de passagem de água, além das Amostras 6 e 8, que se mostraram as piores de cada categoria por se observarem caudais mais significativos. Olhando para a vista inferior de cada uma das amostras, pode-se perceber os pontos onde há falhas de selagem. As imagens com maiores contrastes de cores apresentam maiores falhas, enquanto imagens mais uniformes (a temperaturas elevadas) são indícios de que as amostras tornaram-se mais homogêneas, logo mais estanques, por consequência de produções de biocimento mais eficazes.





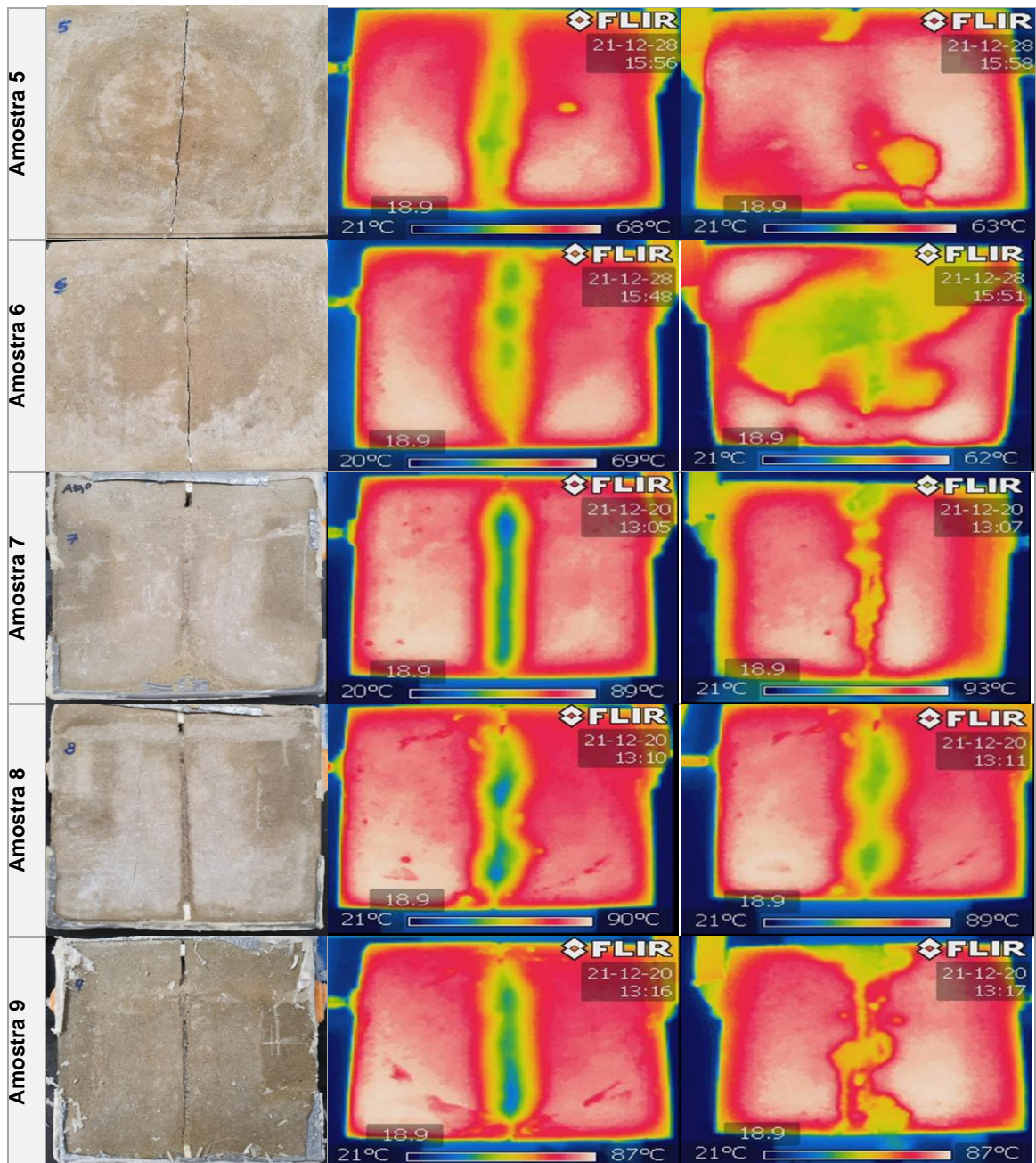


Figura 4.22 Resultados ensaio com câmara termográfica

#### 4.5.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

Os ensaios de medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas realizados antes do tratamento e ao fim de cada ciclo auxiliaram na compreensão da evolução da produção de biocimento no interior das fissuras, com o fechamento gradual dos espaços vazios.

Os resultados para a situação de referência (antes do início do tratamento) estão indicados na Tabela 4.5 e mostram que as velocidades de propagação das ondas ultrassónicas no betão estudado apresentam índices em torno de 4175 m/s, o que está de acordo com o que se esperava para tal tipo de elemento.

Tabela 4.5 Resultados de referência para o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.

Amostra		Medição de referência sem fissura [ $\mu\text{s}$ ]
0,1 mm	1	47,80
	2	47,10
	3	47,20
1 mm	4	48,15
	5	48,80
	6	47,00
10 mm	7	48,30
	8	48,90
	9	47,53
Média		47,9
Desvio padrão		0,7

Na Tabela 4.6 indica-se o acompanhamento da evolução dos resultados do ensaio e, a partir dela, nota-se que como houve um rebaixamento do tempo de propagação das ondas ultrassônicas por conta da produção de biocimento, a qual propiciou velocidades maiores de propagação das ondas pelo sólido. As cores seguem uma variação de tal modo que os verdes mostram tempos de medição menores e mais satisfatórios por estarem as fissuras melhor seladas, enquanto as cores vermelhas indicam o oposto. As cores amarelas e laranjas são intermediárias e a legenda está indicada abaixo da tabela. Na tabela também se designam  $M1_i$ , a medição após o 1º ciclo, mas antes do ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ),  $M1_f$ , a medição após o 1º ciclo e após o ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ),  $M2_i$ , a medição após o 2º ciclo, mas antes do ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ),  $M2_f$ , a medição após o 2º ciclo e após o ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ),  $M3_i$ , a medição após o 3º ciclo, mas antes do ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ),  $M3_f$ , a medição após o 3º ciclo e após o ensaio de estanqueidade ( $\mu\text{s}$ ).

Tabela 4.6 Análise da evolução dos resultados do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas ao longo dos ciclos de tratamento.

Medições tempo de propagação de ondas ultrassônicas									
Amostra		Medição fissura não tratada [ $\mu\text{s}$ ]	Medição fissura não tratada com areia [ $\mu\text{s}$ ]	$M1_i$	$M1_f$	$M2_i$	$M2_f$	$M3_i$	$M3_f$
				[ $\mu\text{s}$ ]	[ $\mu\text{s}$ ]	[ $\mu\text{s}$ ]	[ $\mu\text{s}$ ]	[ $\mu\text{s}$ ]	[ $\mu\text{s}$ ]
0,1 mm	1	53,80	-	49,73	49,70	49,30	48,17	-	-
	2	54,03	-	48,40	48,50	47,73	47,67	-	-
	3	55,43	-	48,83	49,23	47,50	47,47	-	-
1 mm	4	112,43	-	50,90	50,90	48,30	48,23	48,40	48,23
	5	71,40	-	50,47	50,53	48,77	49,53	48,90	48,90
	6	116,53	-	48,97	48,67	48,03	47,90	48,13	47,63
10 mm	7	0,00	131,93	54,40	-	49,73	-	48,47	48,90
	8	0,00	144,57	56,47	-	51,57	-	49,97	50,63
	9	0,00	310,90	51,30	-	49,60	-	47,97	48,73

Nota: ■ 47 – 49  $\mu\text{s}$ ; ■ 49 – 51  $\mu\text{s}$ ; ■ 51 – 60  $\mu\text{s}$ ; ■ 60 – 100  $\mu\text{s}$  ou 0  $\mu\text{s}$

Nota: A medição da fissura não tratada com areia só se aplica para as amostras com abertura de 10 mm (Amostras 7, 8 e 9).

Assim, as amostras de abertura 0,1 mm apresentaram bons resultados, havendo melhoria significativa do tempo de propagação das ondas ultrassônicas, as quais passaram de tempos de aproximadamente 54,50  $\mu$ s no pré-tratamento para médias de 47,70  $\mu$ s após o último ciclo. Esses valores são essencialmente próximos dos valores de referência de 47,40  $\mu$ s para tal categoria, mostrando o efetivo preenchimento das fissuras. Da mesma forma, as amostras de abertura de fissura 1 mm apresentam tempos de propagação de 112,43  $\mu$ s, 71,40  $\mu$ s e 116,53  $\mu$ s antes do tratamento, respectivamente para as Amostras 4, 5 e 6, alterados para 48,23  $\mu$ s, 48,90  $\mu$ s e 47,63  $\mu$ s após os três ciclos de tratamento. Esses valores também são similares aos valores de referência para tal classe, 48,10  $\mu$ s, 48,00  $\mu$ s e 47,60  $\mu$ s, indicativo da deposição de biocimento.

Por fim, as amostras de abertura de fissura 10 mm – Amostras 7, 8 e 9 - que nem se quer permitiam a passagem de sinal das ondas num primeiro momento por conta do espaçamento entre as duas partes, tiveram seus tempos de propagação das ondas retomadas para valores de 48,90  $\mu$ s, 50,63  $\mu$ s e 48,73  $\mu$ s, respectivamente. Esses números também são similares aos de referência, reflexo da eficácia do tratamento. Um ponto de significativa importância é o fato de as medições anteriores e posteriores aos ensaios de estanqueidade terem apresentado valores pouco alterados, o que corrobora ao fato de não haver lavagem ou despreendimento excessivo de partículas sólidas após o contato com a água. Isso pode estar relacionado com a forma de deposição do carbonato de cálcio e a questão da maior durabilidade (e menor solubilidade) principalmente forma mineralógica calcite identificada na análise mineralógica.

#### 4.5.3 Modelação 3D

As imagens geradas pelo *software Eyescloud3D* para as amostras tratadas sem adição de areia (Amostras 1 a 6) não permitiram a visualização de padrões de deposição de biocimento, sendo inconclusivas. No entanto, as imagens geradas para as Amostras 7, 8 e 9 com areia permitiram mostrar o relevo dos depósitos de biocimento com a areia nas superfícies do betão, apresentadas na Figura 4.23. Estas imagens indicam algumas camadas homogêneas e uniformes que se formaram ao longo dos ciclos de tratamento.

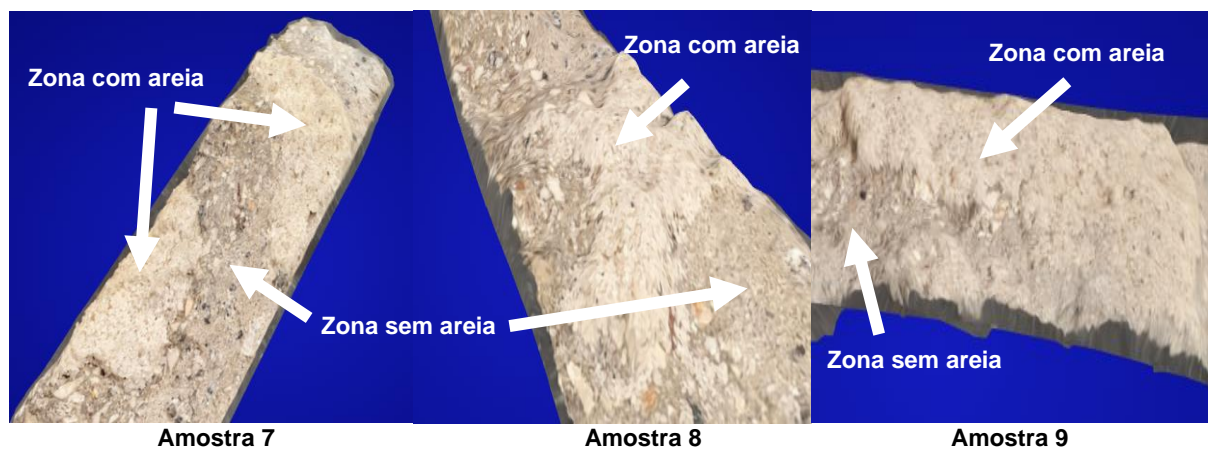


Figura 4.23 Modelação após tratamento das amostras 7, 8 e 9.



Pelas imagens da Figura 4.23 também é possível ver que a rotura ocorreu nas três ocasiões maioritariamente pelas regiões entre a areia e o betão, mostrando que embora seja adequada a fixação do material depositado à superfície da amostra, o encontro dos dois meios é o local mais crítico. Com a funcionalidade do mapa topográfico do *Eyescloud3D* que aplicou uma nuvem de pontos na superfície da fissura, foi possível visualizar a diferença da rugosidade das fissuras após a rotura das amostras. Como pode ser visto nas imagens da Figura 4.24, a coloração mais uniforme indica uma superfície mais lisa e, portanto, menos rugosa, enquanto o maior contraste mostra o oposto. Assim, nota-se que a adição de areia com a deposição de biocimento proporcionou um substrato mais rugoso em todas as amostras, sendo as mais eficazes as amostras 7 e 9. Essa análise também parte do princípio que regiões com coloração azul indicam falhas substanciais ocasionadas pela geometria das amostras que não foram preenchidas ou o destacamento do preenchimento, que provavelmente ficou na outra face da fissura após a rotura.

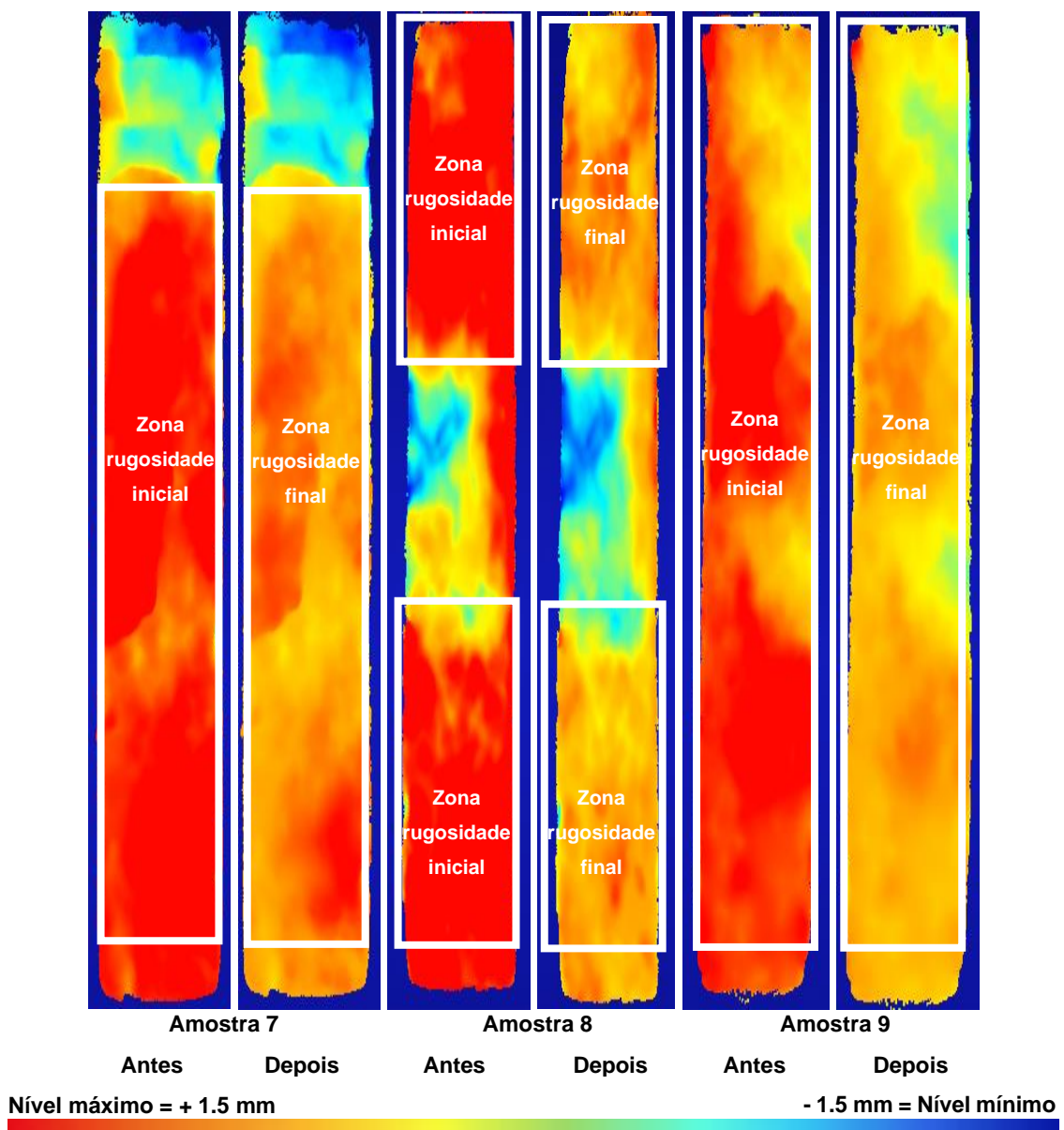


Figura 4.24 Mapa topográfico gerado através de nuvem de pontos da superfície da fissura indicando a rugosidade antes e após tratamento (amostras 7, 8 e 9)

## **4.6 Análise conjunta dos resultados**

Procede-se, nesta secção, à análise conjunta dos resultados. Para o efeito, os resultados dos ensaios encontram-se são discutidos para cada uma das amostras, concluindo o capítulo com os melhores e piores casos para cada uma das categorias.

### **4.6.1 Amostras com fissura de abertura 0,1 mm**

Amostra 1

Na Amostra 1, a análise mineralógica indicou precipitação principalmente de vaterite, a qual também pode ser vista pelas imagens microscópicas com formação de cristais esféricos. Essa estrutura cristalina, embora mais solúvel e menos durável apresentou boa perspectiva de resultado. Os ensaios de estanqueidade, por exemplo, mostraram uma redução de caudal inicial de 18 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência para 0 cm<sup>3</sup>/s após os dois ciclos de tratamento, com uma melhoria de 100 % que também foi provada pela imagem de termografia com selagem total de sua abertura. O ensaio de propagação de ondas ultrassónicas também foi condizente e apontou para melhoria satisfatória da velocidade de propagação das ondas pela amostra, indicativo de preenchimento dos vazios por precipitação de biocimento.

Amostra 2

Na fissura da Amostra 2, a análise mineralógica e as imagens por microscópio também indicaram a presença de vaterite. Nos ensaios de estanqueidade, esta amostra apresentou o pior resultado da categoria com mudança de caudal inicial de 22 cm<sup>3</sup>/s na situação de referência para 1,53 cm<sup>3</sup>/s após o tratamento. Isso deveu-se a uma fuga através de um orifício anguloso, também identificado na termografia. Essa heterogeneidade também se observou nas velocidades com o PUNDIT que mostrou melhoria proporcional menor que a observada para as outras amostras com esta abertura.

Amostra 3

A Amostra 3 mostrou concordância com as demais e indicou presença de vaterite. Os ensaios de estanqueidade foram positivos com caudais iniciais de referência de 19 cm<sup>3</sup>/s e após o tratamento de 0 cm<sup>3</sup>/s. Isso foi corroborado com a análise por termografia e ensaio de propagação de ondas que indicaram uma excelente selagem.

### **4.6.2 Amostras com fissura de abertura 1 mm**

Amostra 4

Na Amostra 4, a análise mineralógica indicou precipitação de vaterite e calcite conjuntamente, que foram vistas por imagens microscópicas de cristais esféricos e cúbicos, respectivamente. Os ensaios de estanqueidade apresentaram recuperação do caudal inicial para 0,73 cm<sup>3</sup>/s após o desfecho do tratamento, sendo que o caudal de referência era de 79 cm<sup>3</sup>/s, ou seja, com uma melhoria de 99,1 %.

A termografia também identificou adequada selagem com pequenos vazamentos pelas extremidades. Por fim, o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas apresentou resultados promissores apontando para a melhor recuperação frente às demais amostras com mesma abertura.

Amostra 5

Em semelhança com a Amostra 4, a Amostra 5 apresentou coexistência de precipitados esféricos e cúbicos, vaterite e calcite, que foram indicados pela análise mineralógica e microscopia ótica. Os caudais iniciais sofreram uma redução de 178 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência para 7,36 cm<sup>3</sup>/s após o tratamento, reflexo de uma melhoria proporcional de 95,4 %. A termografia mostrou imagens que indicam um vazamento pontual na extremidade, sendo os resultados com o PUNDIT condizentes e satisfatórios em razão da baixa incidência de descontinuidades após o tratamento.

Amostra 6

A Amostra 6 também apresentou precipitação de vaterite e calcite segundo os ensaios mineralógico e microscópico. Os caudais tiveram uma menor recuperação da estanqueidade com melhoria de 90 %, passando de 158 cm<sup>3</sup>/s da referência para 17,82 cm<sup>3</sup>/s no pós-tratamento.

A termografia embora satisfatória, apresentou regiões em verde na vista inferior da amostra, o que indicou mais passagem de água em relação às restantes fissuras com a mesma abertura, fator também apontado pelo PUNDIT, que gerou resultados indicativos da pior propagação de ondas nesta amostra.

#### **4.6.3 Amostras com fissuras de abertura 10 mm**

Amostra 7

A Amostra 7 apresentou precipitação em maior escala de biocimento em forma de calcite, que foi observada também pelas imagens do microscópio ótico que indicaram cristais cúbicos. As condições aderentes propiciadas pelo enchimento com areia promoveram um ganho substancial de rugosidade que promoveu maior agregação e atividade das bactérias, como salientado no ensaio de modelação 3D. Ademais, os ensaios de estanqueidade foram razoáveis com amortecimento do caudal inicial estimado de 2923 cm<sup>3</sup>/s da situação de referência para 19 cm<sup>3</sup>/s após a conclusão do último ciclo de tratamento, com melhoria de cerca de 99,4 %. A termografia também mostrou imagens com apenas leves escoamentos pela fissura, que foram concordantes com os resultados do ensaio com o auxílio do PUNDIT, indicativos de adequada melhoria de velocidade da propagação de ondas ultrassônicas pela amostra.

Amostra 8

A Amostra 8 teve deposição de cristais cúbicos como a calcite e ensaios de estanqueidade razoavelmente satisfatórios, com passagem do caudal inicial estimado de 2923 cm<sup>3</sup>/s de referência para 23,8 cm<sup>3</sup>/s depois de tratado (melhoria de 99,2 %). A termografia viabilizou a retirada de fotografias



que indicaram a existência de caminhos de escoamento preferenciais na centralidade da amostra, os quais também puderam ser vistos na modelação 3D, com falhas de preenchimento nessa região. Por fim, o PUNDIT também se mostrou satisfatório, mas com a menor velocidade de propagação das ondas entre as amostras com abertura de 10 mm.

Amostra 9

A Amostra 9 indicou deposição de calcite tanto pela análise mineralógica, quanto pela visualização por microscópio ótico. O caudal inicial de referência de 2923 cm<sup>3</sup>/s passou a 15,8 cm<sup>3</sup>/s ao fim do tratamento com melhoria proporcional de 99,5 %, a melhor da categoria. Os ensaios de termografia e PUNDIT também mostraram os mais satisfatórios resultados dentre as amostras com fissura de abertura 10 mm, fatores que condizem com a maior acentuação da rugosidade segundo as imagens da modelação 3D.

#### **4.6.4 Os melhores e os piores resultados**

Os resultados obtidos nos ensaios de estanqueidade são apresentados na Figura 4.25, os resultados da câmara térmica são apresentados na Figura 4.26 e os de PUNDIT na Tabela 4.7. Os melhores resultados do tratamento estão assinalados com retângulos azuis e as piores com retângulos vermelhos.

No geral, os melhores resultados ocorreram nas amostras com fissuras de menor abertura efetiva, isto é, de 0,1 mm. Também se obtiveram resultados muito bons para as amostras com abertura de 10 mm e preenchimento de areia.

Nestes casos, o tratamento mostrou ser eficaz no tratamento da fissura em termos de estanqueidade e indicou otimização do tempo de tratamento, visto que com um menor número de ciclos de aplicação das bactérias foi possível atingir um resultado melhor se comparado com as fissuras de 1 mm.

As Amostras 3, 4 e 9, indicadas por retângulos azuis, foram as melhores para a respetiva abertura, enquanto as Amostas 2, 6 e 8, indicadas por retângulos vermelhos, foram as piores.

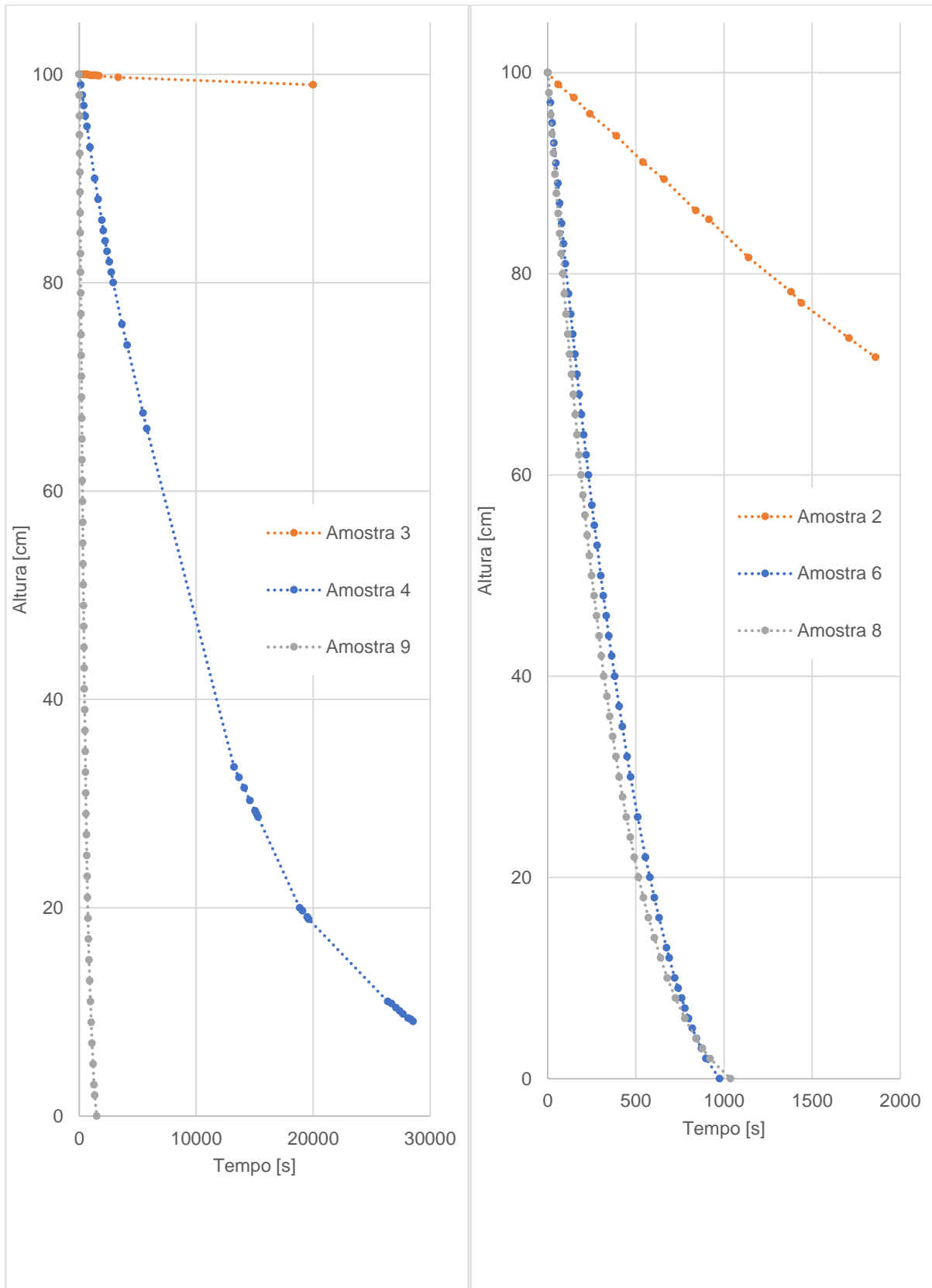


Figura 4.25 Ensaio de estanqueidade indicando as melhores (à esquerda) e piores (à direita) resultados do tratamento

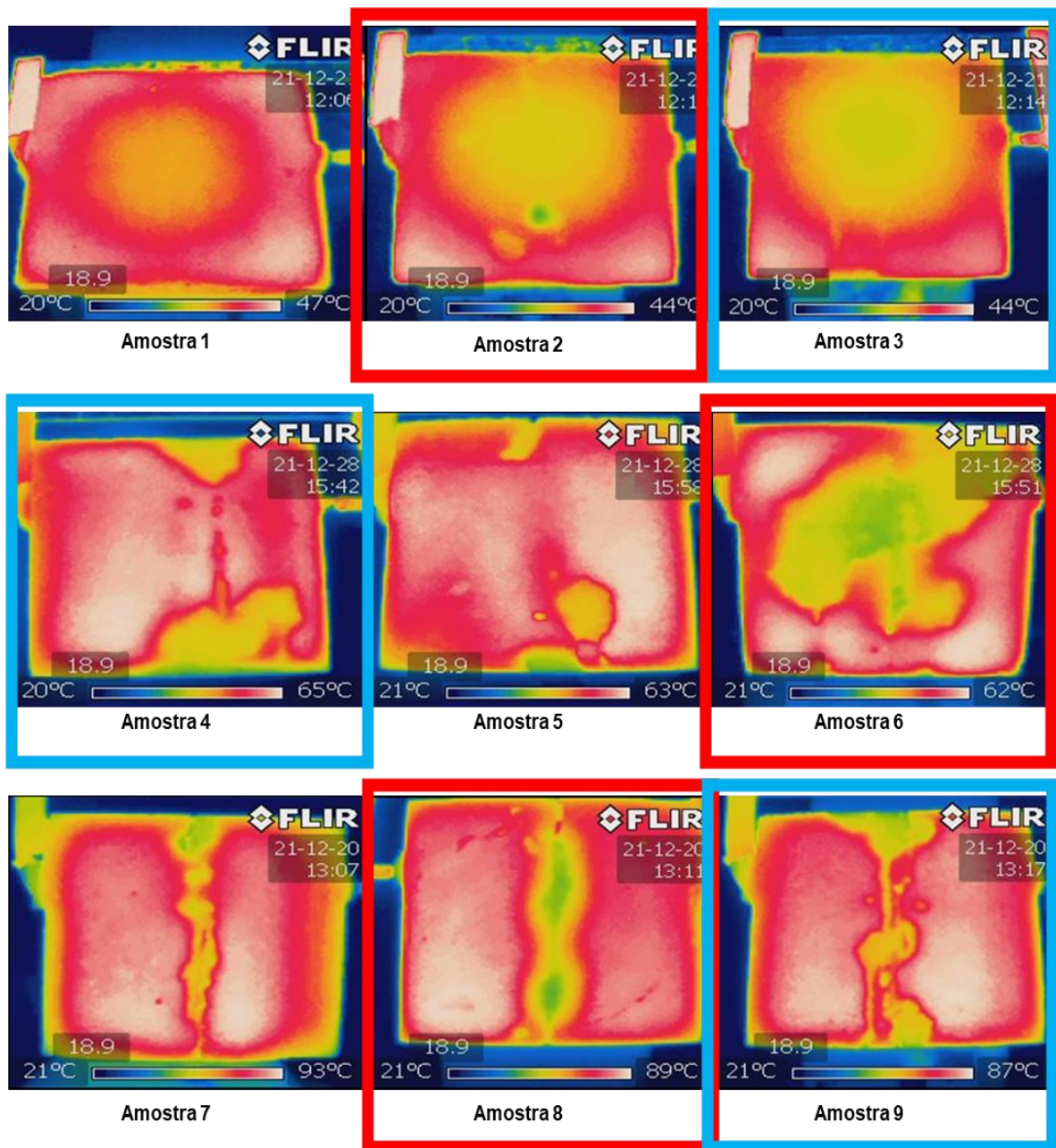


Figura 4.26 Indicação das melhores (rectângulo a azul) e piores (rectângulo a vermelho) amostras após tratamento pelas imagens da câmara termográfica (vistas inferiores).

Tabela 4.7 Ensaio de propagação de ondas ultrassónicas indicando melhores (rectângulo a azul) e piores (rectângulo a vermelho) amostras.

Medições tempo de propagação de ondas (PUNDIT)									
Amostra		Medição fissura não tratada [μs]	Medição fissura não tratada com areia [μs]	M1 <sub>i</sub> [μs]	M1 <sub>f</sub> [μs]	M2 <sub>i</sub> [μs]	M2 <sub>f</sub> [μs]	M3 <sub>i</sub> [μs]	M3 <sub>f</sub> [μs]
	1	53,80	-	49,73	49,70	49,30	48,17	-	-
0,1 mm	2	54,03	-	48,40	48,50	47,73	47,67	-	-
	3	55,43	-	48,83	49,23	47,50	47,47	-	-
	4	112,43	-	50,90	50,90	48,30	48,23	48,40	48,23
1 mm	5	71,40	-	50,47	50,53	48,77	49,53	48,90	48,90
	6	116,53	-	48,97	48,67	48,03	47,90	48,13	47,63
	7	0,00	131,93	54,40	-	49,73	-	48,47	48,90
10 mm	8	0,00	144,57	56,47	-	51,57	-	49,97	50,63
	9	0,00	310,90	51,30	-	49,60	-	47,97	48,73

Nota: ■ 47 – 49 μs; ■ 49 – 51 μs; ■ 51 – 60 μs; ■ 60 – 100 μs ou 0 μs

#### 4.7 Considerações sobre o tratamento de biocimentação para selagem de fissuras em reservatórios

Como considerações finais, realizaram-se os ensaios de estanqueidade com um metro de coluna de água pois considerou-se ser um valor de altura de água em paredes laterais de reservatórios baixos ou com pouca água. Como as pressões na parede do reservatório têm uma distribuição hidrostática (i.e. diagrama de pressões triangular), as pressões máximas registam-se na base do reservatório (Figura 4.27), sendo dadas por

$$p = \gamma * h = 9800 \text{ N/m}^3 \times 1 \text{ m c. a.} = 10 \text{ kPa} \quad [4.4]$$

onde  $\gamma$  é o peso volúmico da água e h a altura de água acima da lage de fundo do reservatório. Assim, optou-se por realizar os ensaios de estanqueidade com amostras colocadas na base do reservatório para estarem sujeitas a maiores pressões.



Figura 4.27 Pressão hidrostática em um reservatório rectangular (Evandro, 2021).

Neste sentido, não se pode dizer que os comportamentos obtidos ao longo dos ensaios de estanqueidade podem ser extrapolados para pressões mais elevadas, acima de 10 kPa, devendo, para tal, realizar ensaios para alturas de água maiores.

O número de ciclos de tratamento neste trabalho (três ciclos) também foi fixado antes do início do tratamento por corresponder à experiência anterior no IST no tratamento de fissuras em pedra natural. Porém o acompanhamento da eficácia da selagem a cada ciclo propiciou que se interrompesse o tratamento das amostras de abertura 0,1 mm – Amostras 1, 2 e 3 – uma etapa antes do planeado. Isso mostra que a duração do tratamento é flexível e que se pode alterar se se realizar um acompanhamento contínuo. A evolução da deposição do biocimento pode ser observada no Anexo D - Deposição de biocimento ao longo do tempo.

Outros pontos importantes de serem comentados estão relacionados com a durabilidade do tratamento e se este poderá afectar a qualidade da água do reservatório. Por conta do contacto direto das fissuras tratadas por biocimentação com a água, poderia vir a ocorrer uma solubilização do material precipitado ao longo do tempo. Isto pode ser ainda mais importante para as fissuras com maiores aberturas, onde se colocou areia. A solubilidade do material inviabilizaria o tratamento por não ser durável. Por conta disso, a forma mineral do carbonato de cálcio é importante, pois se for calcite é insolúvel.

A possibilidade de haver dissolução causaria uma contaminação da água, porém neste trabalho não se realizaram análises de qualidade da água devido à limitação de tempo. Em razão dessas possibilidades, esses testes de qualidade da água poderiam trazer resultados que indicassem se o tratamento é adequado para quaisquer tipos de reservatórios, sejam eles de água para consumo humano ou não, como por exemplo os destinados a rega.

#### **4.8 Recomendações para a aplicação da metodologia em casos reais**

Para a aplicação desta técnica de biocimentação numa situação real de tratamento de um reservatório, apresentam-se algumas recomendações:

- sugere-se que se realizem, pelo menos, três ciclos de inoculações para fissuras maiores e duas para fissuras menores, cada qual com 10 aplicações (as cinco primeiras de bactérias e solução de alimento e as últimas cinco apenas de solução de alimento);
- a adição de areia como enchimento sempre que possível e principalmente em fissuras de abertura igual ou maior a 5 mm com o intuito de melhorar o tratamento;
- a realização de aplicações com intervalos de pelo menos 2 h a fim de respeitar o período de cura e reação dos compostos;
- o ensaio para verificação da qualidade da selagem de cada ciclo com o objetivo de realizar um acompanhamento contínuo da evolução do tratamento; para este efeito, técnicas macro e não destrutivas são aconselháveis, como termografia em grande escala, ensaios de estanqueidade adaptados e tomografia computadorizada.



## 5 CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Após a conclusão dos estudos relacionados à análise da técnica de biocimentação para o tratamento de fissuras aparentes em reservatórios de água em betão, foi possível entender alguns aspetos importantes acerca desse modelo de tratamento, desde a sua viabilidade, dificuldades de aplicação, desafios até a sua eficácia sob diferentes perspectivas e condições de tratamento.

De modo geral, aos objetivos específicos deste trabalho foram atingidos:

1. efetuou-se a análise da biocimentação como técnica nova de selagem de fissuras em reservatórios e avaliação de como pode ser aplicada na prática;
2. avaliou-se a eficiência desta forma de tratamento na selagem de fissuras em betão de pequena a média dimensão (i.e., abertura entre 0,1 e 10 mm);
3. avaliou-se a resposta do tratamento sob condições nas quais a superfície selada deve ficar em ambiente submerso, como é o caso dos reservatórios de água.

Os resultados do trabalhos mostram que a biocimentação pode ser aplicada em superfícies verticais por injeção em profundidade após a selagem da fissura pelo exterior com algum material retrátil que possa ser extraído após a realização do tratamento. No presente tratamento, aplicou-se uma fita-cola de alta resistência na centralidade da fissura longitudinal que conferiu uma selagem provisória adequada durante o tratamento, viabilizando sua aplicação. Essa técnica mostrou-se como uma alternativa bastante simples de ser colocada em prática e embora tenham ocorrido pequenos vazamentos entre a superfície do betão e a fita-cola, isso não comprometeu o tratamento. A aplicação de parafina nesses locais pontuais de vazamento foi uma medida adicional para estancar as perdas do fluido. Esta funcionou bem por ser também um componente de fácil remoção após o término do procedimento.

O tratamento por biocimentação para selagem das fissuras de betão mostrou-se eficiente, mas com comportamentos distintos a variar segundo a abertura das fissuras. Sobretudo, as fissuras de abertura 0,1 mm – Amostras 1, 2 e 3 – se mostraram com melhor comportamento quando comparadas com as demais. Para as fissuras superiores a 0,1 mm, o tratamento foi mais efetivo quando se aplicou um material de enchimento complementar no interior do vazio como foi o caso da areia nas Amostras 7, 8 e 9. Isso ocorreu visto que após os ciclos de aplicação do tratamento, formou-se um conglomerado entre o biocimento e a areia bastante sólido que se agarrou nas paredes rugosas do betão, agregando-se à amostra com maior eficácia e fechando a fissura mais facilmente.

Portanto, pode-se constatar que a técnica de biocimentação para o tratamento de fissuras em betão simples é satisfatória para o fechamento das fissuras e promoção da estanqueidade da amostra, tendo conseguido recuperar quase 100 % para as amostras de 0,1 mm. No entanto, a biocimentação não se mostrou adequada para reconstituição da capacidade estrutural do betão, uma vez que resistências

mecânicas aferidas posteriormente à conclusão do tratamento não se mostraram confiáveis para essa afirmação. Assim, técnicas adicionais como a do grampeamento ou costura de fissuras, como mostrado na Tabela 2.3, poderiam ser utilizadas de modo complementar à biocimentação para reforço e recomposição da capacidade resistente da estrutura.

A eficácia no tratamento é dependente de vários fatores, como sejam, a abertura das fissuras, a característica interna da superfície, a rugosidade do substrato, a geometria do corte, a existência de defeitos localizados, o uso de material de enchimento ou não, e da própria aplicação do biocimento. Nos casos de estudo, as características das fissuras de abertura de 10 mm não possibilitaram o fechamento por completo das fissuras, permitindo um escoamento de água que se traduziria, na realidade, como perda de água de um reservatório. Isso, num caso real, poderia vir a afetar o sistema de armazenamento de água, já que se sabe da existência de muitas perdas no sistema nos dias de hoje, com aproximadamente 30% de volume perdido da água captada em Portugal (Diário de Notícias, 2019).

Outra conclusão relevante com os trabalhos experimentais, foi a curva de melhoria no decorrer dos ciclos subsequentes. É possível perceber que há um número ótimo de ciclos de tratamento que sugerem um melhor custo-benefício, uma vez que a partir de certas aplicações a melhoria marginal passa a ser baixa, não compensando o esforço e custo despendido. Nesse sentido, embora não se tenha conseguido atingir a estanqueidade completa para as fissuras de abertura de 10 mm, houve uma evolução proporcional satisfatória, o que condiz com o número ótimo mencionado.

Feitas essas considerações, pode-se ter uma perspetiva de como decorre um tratamento de uma fissura por biocimentação de acordo com suas características. Porém o principal desafio foi inferir a maneira como a fissura se desenvolveria já que o meio com o que se trabalhou foi o betão, o qual impede a criação de fissuras idênticas nas diferentes amostras. Por fim, é plausível de se afirmar que a técnica de biocimentação permite para uma selagem adequada de fissuras em reservatórios de betão, embora na confira resistência estrutural. Em ocasiões com fissuras mais abertas, tem que haver a adição de um material de enchimento para ajudar na formação de um conglomerado para preencher os vazios. Para fissuras menores, basta a aplicação das bactérias e da solução de alimento. No geral, a estanqueidade pode ser alcançada após alguns (dois-três) ciclos de tratamento, fator que corrobora com sua utilização em superfícies que estão em contacto direto com a água, como nos reservatórios.

## **5.2 Estudos futuros**

Como estudos futuros, apresentam-se de seguida alguns aspetos que se consideram relevantes. Primeiro, será importante definir o número de ciclos necessários para a selagem de cada abertura com maior precisão. Assim, poder-se-ia estabelecer a quantidade de aplicações segundo as características da fissura, além de perceber se seria possível a selagem completa de todas as fissuras por meio do alongamento do período de tratamento.



Segundo, é crucial estudar alturas diferentes de coluna de água e determinar a pressão máxima (alturas de água superiores a um metro) que as fissuras aguentariam em ensaios de estanqueidade.

Terceiro, o aprofundamento dos estudos sobre o risco de dissolução do biocimento também são particularmente importantes. Para isso, os ensaios de estanqueidade poderiam ser mantidos por mais tempo a fim de perceber se há lavagem do biocimento após certo período de contacto com a água.

Quarto, testes de avaliação da qualidade da água também são relevantes de serem estudados. Isso porque pode haver o risco de contaminação da água em casos de reservatórios para abastecimento humano, prejudicando a potabilidade deste recurso.

Quinto, será crucial a investigação das características da areia utilizada no enchimento das fissuras de maior dimensão, por exemplo, a composição, a dimensão, a forma e a rugosidade da superfície das partículas, massa volúmica, absorção de água, teor de finos, cloretos, sulfatos, granulometria típica, entre outros. Isto para averiguar se há possibilidade de aumentar o desempenho e eficácia da resposta do tratamento segundo esse fator.

Sexto, recomenda-se aprofundar os estudos voltados para otimização de recursos, tempo e dinheiro, buscando a melhoria de desempenho dessa técnica alternativa e estudando maneiras de torná-la mais competitiva e viável de aplicação a um maior leque de necessidades distintas.

Sétimo, sugere-se realizar um estudo de maior profundidade acerca da comparação da técnica de biocimentação para tratamento de fissuras com métodos convencionais que são tradicionalmente utilizados a fim de se compreender as vantagens, desvantagens e inconvenientes entre ambas.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, D. M., (2013), "Técnicas de diagnósticos utilizadas em Engenharia Civil", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M. S., (2013), "Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures", *Con. Build. Mat*, vol. 48, pg. 1–5.
- Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M.S., (2011), "Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures", *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*, vol. 38, pg. 1229–1234.
- Al Qabany, A., Soga, K. & Santamarina C., (2013), "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *J. Geotech and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, pg. 992-1001.
- Andrade, P., (2006), "Estimativa da profundidade de fendas no concreto através da utilização do ultrassom e eco-impacto", Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil de Santa Catarina.
- Branco, F., Brito, J., (2012), "Reabilitação de edifícios de alvenaria resistente", Técnicas de Reabilitação de Construções, disciplina de Tecnologia da Construção de Edifícios, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Brito, J., (2021), "Reabilitação de estruturas e elementos de betão", Tecnologia da Construção de Edifícios, Mestrado Integrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
- Bonshor, R., Bonshor, L., (2001), "Cracking in buildings", Routledge, London.
- Cardoso, R., Pedreira, R., Duarte, S., Monteiro G., Borges, H. and Flores-Colen, I., (2016), "Biocementation as rehabilitation technique of porous materials", in *Building Pathology and Rehabilitation*, Springer, vol. 1, pg. 99-120.
- Cardoso, R., Arbabzadeh, E., Tenório de Lima, J., Flores-Colen, I., Pereira, M.F.C., Costa e Silva, M., Duarte, S.O.D., Monteiro, G.A., (2021), "The Influence of Stone Joints Width and Roughness on the Efficiency of Biocementation Sealing", *Construction and Building Materials*, vol. 283, pg. 122-743.
- Cardoso, R., Monteiro A., Flores-Colen, I. e Monteiro G., (2018), "Considerações sobre o uso da biocimentação para reparação de fendas em vigas de betão armado", *Betão Estrutural*, vol. 1, pg. 35-57.
- Choi, S.G., Wang, K., Wen, Z. Chu, J., (2017), "Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation", *J. Cement and Concrete Composites*, vol. 83, pg. 209-221.
- CIB Working Commission W86, (1993), "Building Pathology". *Building pathology, a state-of-the-art-report*, Delft University.
- Cóias, V., (2006), "Inspeções e ensaios na reabilitação de edifícios", Instituto Superior Técnico, Lisboa Press, ISBN 972-8469-53-5.
- Cooper, M., Mazza, J., (2020), "Densidade do solo e densidade de partículas", Universidade de São Paulo.
- Covas, D., Alegre, H., (2010), "Gestão Patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água", Euro Press ISBN 978-989-8360-04-5.
- Daskalakis I. M., Rigas F., Katsikis I., Karageorgis A., Magoulas A., (2006), "Development of an environmentally friendly technique for the conservation of monuments via biomineralization", *Ecosystems & Sustainable Development in Greece*, vol. 1, pg. 629-634.
- Diário de Notícias, (2019), "DECO denuncia desperdício de 90 milhões de euros por ano com perdas de água", disponível em: < <https://www.dn.pt/vida-e-futuro/deco-denuncia-desperdicio-de-90-milhoes-de-euros-por-ano-com-perdas-de-agua-11044123.html>>.

- Dick, J., Windt, W. D., Graef, B. D., Saveyn, H., Meeren, P. V. D., Belie, N. D., Verstraete, W., (2006), "Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species", SpringerLink, vol. 17, pg. 57-67.
- Estrela, S., (2018), "Argamassas tradicionais de revestimento de paredes: fendilhação e sua reparação", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Evandro, R. D., (2021), "Mecânica dos fluidos. Estática dos fluidos", Tese de Bacharelado, Instituto Federal de Santa Catarina.
- Flores-Colen, I., e Brito, J., (2005), "Diagnóstico, Patologia e Reabilitação de Construção em Betão Armado", Mestrado em Ciências da Construção da Universidade de Lisboa.
- Galvão, J. M. P., (2009). "In-situ testing to evaluate the mechanical performance of rendered façades – rebound hammer and ultrasound technique", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Gaspar, P. L., Flores-Colen, I, Brito, J., (2006), "Técnicas de Diagnóstico e Classificação de Fissuração em Fachadas Rebocadas", Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- IME, (2006), "Fissuras em Reservatórios de Concreto Armado", Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro.
- Jacobson, A. D., Wu, L., (2009), "Microbial dissolution of calcite at T=28°C and ambient pCO<sub>2</sub>", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Elsevier, vol. 73, pg. 2314-2331 .
- Jimenez-Lopez, C., Jroundi, F., Pascolini, C., Rodriguez-Navarro, C., Piñar-Larrubia G., Rodriguez-Gallego, M., González-Muñoz, M.T., (2008), "Consolidation of quarry calcarenite by calcium carbonate precipitation induced by bacteria activated among the microbiota inhabiting the stone", *Int Biodeterior Biodegrad*, vol. 62, pg. 352–363.
- Le Metayer, G., Orial, S. C., Loubière, J. F., Perthuisot, P., (1999), "Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony", *Sedimentary Geology*, vol. 126, pg. 25-34.
- Leroy Merlin, (2022), disponível em: < [https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Pavimentos-revestimentos/Pavimento-exterior-relva-artificial/Pavimentos-betao/WPR\\_REF\\_17024175](https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Pavimentos-revestimentos/Pavimento-exterior-relva-artificial/Pavimentos-betao/WPR_REF_17024175)>.
- Machado, L., (2014), "Catálogo de Técnicas de Diagnóstico em Elementos Não Estruturais de Edifícios Correntes", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Mercado Livre (2022), disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1150013934-lupa-medidor-de-fissuras-trincas-em-paredes-escala-010mm-\\_JM#position=20&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=560c7d91-3fba-4e6d-bf2e-2dd22e5991b4](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1150013934-lupa-medidor-de-fissuras-trincas-em-paredes-escala-010mm-_JM#position=20&search_layout=stack&type=item&tracking_id=560c7d91-3fba-4e6d-bf2e-2dd22e5991b4)>.
- Minto, J. M., Tan, Q., Lunn, R. J., Mountassir, G. E., Guo, H., Cheng, X., (2018), "Microbial mortar'-restoration of degraded marble structures with microbially induced carbonate precipitation", *Construction and building materials*, vol. 180, pg. 44-54.
- Oz-Diagnóstico, (2022), "Detecção de defeitos com o método 'impacto-eco'", disponível em: [http://www.oz-diagnostico.pt/\\_pt/layout.asp?area=3000&subarea=3300](http://www.oz-diagnostico.pt/_pt/layout.asp?area=3000&subarea=3300).
- Pedreira, R., (2014), "Biocimentação de solos arenosos para melhoramento das suas características hidro-mecânicas", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Peng, S., Zhang, K., Fan, Ling., Kang, J., Peng, K., Wang, F., (2020), "Permeability Reduction and Electrochemical Impedance of Fractured Rock Grouted by Microbial-Induced Calcite Precipitation", *Geofluids*, Hindawi, vol. 36, pg. 1-11.
- Rocha, B. P., Giacheti, H. L., (2019), "Characterizing a tropical soil via seismic in situ tests", *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 37, pg. 3.

- Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., BenChekroun, K. Gonzalez-Munoz, M.T., (2003), "Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization", *Appl. Environ. Microb.*, vol. 69, pg. 2182–2193.
- SAAE, (2019), "Reservatórios em reparação", Serviço Autônomo de Água e esgoto de Viçosa.
- Saraya M., Rokbaa, H., (2016), "Preparation of vaterite calcium carbonate in the form of spherical nano-size particles with the aid of polycarboxylate superplasticizer as a capping Agent". *Am J Nanomater.*, DOI: 10.12691/ajn-4-2-3.
- Shohet, I. & Paciuk, M., (2004), "Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions", *Construction Management & Economics*, vol. 22 (10), pg. 1081-1090.
- Siddique, R., Chahal, N. K., (2011), "Effect of ureolytic bacteria on concrete properties", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pg. 3791-3801.
- Silva, M. T. A., Rocha, J. H. A., Monteiro, E. C. B , Póvoas, Y. V. , Kohlman Rabbani, E.R., (2019), "Evaluation of the ultrasound test for estimating the depth of cracks in concrete", *Revista ALCONPAT, Scielo Org.*, vol. 9, pg. 1-12.
- Silveira, E.C., (2006), "Fissuração: 168 casos reais", Aquarius Instituto Militar de Engenharia.
- Souza, V., Ripper, T., (1998), "Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto", Editora Pini, ISBN: 9788572660969.
- Stocks-Fischer S., Galinat J. K., Bang S. S., (2009), "Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil Biol*", *Biochem South Dakota School of Mines and Technology in USA*.
- Thomaz, E. C. S., (2003), "Fissuração - 168 Casos Reais", Tese de Bacharelado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro.
- Tiano, P., Cantisani, E., Sutherland, I., Paget, J.M., (1995-2006), "Biomediated reinforcement of weathered calcareous stones", *J. Cult. Herit*, vol. 7, pg. 49–55.
- Ultra-lab Engenharia Diagnóstica, (2022), "Engenharia Diagnóstica. Precisão, segurança, economia.". Disponível em: < <https://ultralabengenharia.com.br/sobre-a-ultralab-engenharia>>.
- Veiga, R., (1998), "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação", Programa de Investigação do LNEC de Lisboa.
- Velasco, C., (2018), "Brasil perde quase 40 % da água tratada com vazamentos", *Jornal O Globo*. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/brasil-perde-quase-40-da-agua-tratada-com-vazamentos-e-fraudes-aponta-estudo.ghtml>.
- Verstraete, W., De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N., (2008), "Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete", *Construction and building materials*, vol. 22, pg. 875–885.
- Von Fay, K.F., (2015), "Guide to Concrete Repair", Second Edition, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Books for Business.
- Votruba, L., Broža, B., (1989), "Water management in reservoirs", Elsevier B.V, 1<sup>st</sup> edition, vol. 33, ISBN: 9780080870243.
- Wiktor, V., Jonkers, H.M., (2015), "Field performance of bacteria-based repair system: Pilot Study in a Parking Lot", *Case studies in construction materials*, vol. 2, pg. 11-17.
- Zhang, Z., Weng, Y., Ding, Y., Qian, S., (2019), "Use of Genetically Modified Bacteria to Repair Cracks in Concrete", *Journal Materials Research*, vol. 12, pg. 3901-3912.

## ANEXOS

### Anexo A – Catálogo bactéria *Bacillus pasteurii*

*Bacillus pasteurii* or *Sporosarcina pasteurii* (Miquel 1889) Yoon et al. 2001VP

#### CCM 2056T

- Other numbers: ATCC 11859, CUG 7425, CIP 66.21, DSM 33, LMD 48.21, LMG 7130, NCDO 1776, NCIMB 8841, NCTC 4822, T. Gibson 22, N.R. Smith 673, N.R. Smith 929.
- Taxonomic status: Type strain.
- History: < NCIB (*Bacillus pasteurii*).
- Additional information: Type (6585); Type of *Bacillus pasteurii* (4895). Production of urease (625).
- Cultivation conditions: Medium 13, 30°C.

#### CCM 2879

- Other numbers: DSM 276, D. Claus 1.
- History: < DSM (*Bacillus pasteurii*) < D. Claus.
- Isolated from: garden soil.
- Cultivation conditions: Medium 13, 30°C.

#### CCM 2880

- Other numbers: DSM 323, D. Claus 3.
- History: < DSM (*Bacillus pasteurii*) < D. Claus.
- Isolated from: garden soil.
- Cultivation conditions: Medium 13, 30°C.

## Anexo B – Ficha técnica da areia APAS30



1515-CPR-0205



13

### DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

Nº 5/2013

1. Código de identificação único do produto-tipo: **Agregado 0/1**
2. Descrição do produto-tipo: **Refª APAS 30 (registo na guia de remessa)**  
**Areia com presença de minerais de quartzito, quartzo e feldspato. Partículas de forma subprismática, subangulosa e com superfície ligeiramente rugosa.**
3. Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante: **EN 13139:2002; EN 13139:2002/AC:2004 (agregado para argamassas).**
4. Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º:  
**Areipor - Areias Portuguesas, Lda. Rua da Alameda, Ap 755 - 2671-601 Bucelas**  
**E-mail: [geral@areipor.mail.pt](mailto:geral@areipor.mail.pt) Telefone: 21 968 80 10 Fax: 21 968 80 19**
5. Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:  
**Sistema de avaliação 2+**

6. No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:

**E.I.C. - Empresa Internacional de Certificação, organismo notificado, nº 1515, realizou a inspeção inicial e o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu o certificado de conformidade nº 1515-CPD-0205 de 30 de maio de 2013 e substituído pelo certificado de conformidade nº 1515-CPR-0205 de 21 de fevereiro de 2018, válido até 30 de março de 2021, desde que não se alterem significativamente as condições definidas nas normas harmonizadas ou as condições de fabrico e do controlo de produção em fábrica.**

7. Desempenho declarado

Norma harmonizada	EN 13139:2002	EN 13139:2002/AC:2004		
Características	Desempenho	Granulometria típica		
Dimensão Nominal - Tamanho das partículas	0/1			
Massa Volúmica* (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a = 2,61 - 2,71$ $\rho_{rd} = 2,58 - 2,68$ $\rho_{ssd} = 2,59 - 2,69$	Abertura (mm)	(%)	Tolerância (%)
Absorção de água*	< 0,9%			
Teor de finos	Categoria 1	2	100	100
Teor de cloretos	< 0,01%	1	100	95-100
Teor de sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>0,2</sub>	0,250	2	0-27
Teor de enxofre total	< 0,1%	0,063	0,0	0,0-5,0
Teor de húmus	Mais claro que padrão			

Notas: Resultados que não constam, não foram realizados ou não solicitados.  
A origem dos valores dos ensaios químicos são da responsabilidade do produtor da matéria-prima.  
Mais informações disponível na Ficha de Dados de Segurança

8. O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7.

A presente declaração de desempenho é emitida em conformidade com o Regulamento (UE) nº 305/2011 sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

## Anexo C – Ensaio para caracterização da densidade relativa das partículas do betão

Tabela 0.1 Calibração e valores de referência para o ensaio de caracterização da densidade das partículas do betão

Calibração	
M1 - massa picnômetro vazio e seco [g]	38,89
M2 - massa picnômetro cheio d'água [g]	136,08
M3 - massa ajustada picnômetro cheio d'água [g]	136,08
Picnômetro	76
Massa Amostra [g]	25,00
Temperatura água [°C]	24,00
d [g/cm <sup>3</sup> ]	1,00
k (quociente entre densidades)	1,00

Ensaio	
M4 - massa solo seco [g]	23,86
M5 - massa picnômetro àgua + solo [g]	150,82
Temperatura [°C]	24,00
Massa solo úmido [g]	50,40
Massa cápsula utilizada [g]	109,55

Tabela 0.2 Resultado ensaio para caracterização da densidade das partículas do betão

Gs	
Valor	2,61



**Anexo D - Deposição de biocimento ao longo do tempo**

2 aplicações



5 aplicações



10 aplicações



20 aplicações

