



**N OVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SOFIA CHACRA  
Licenciada em Engenharia Civil

# AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO DE UM BIOBETÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa  
Fevereiro, 2022





**NOVA**

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

# AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO DE UM BIOBETÃO

SOFIA CHACRA

Licenciada em Engenharia Civil

**Orientador:** Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa

## **Júri:**

**Presidente:** Doutor Daniel Aelenei, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

**Arguente:** Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Vogal:** Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL - PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa  
Fevereiro, 2022



**Avaliação da capacidade de autorregeneração de um biobetão**

Copyright © Sofia Chacra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*À minha família*



## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa minha realização pessoal de me formar em engenharia civil. Os últimos anos foram mais difíceis do que o comum, por conta da pandemia de Covid-19, entretanto foi quando tive que superar as incertezas e buscar estabilidade emocional para terminar o curso.

Gostaria de agradecer imensamente a todos que me apoiaram nesse percurso.

À minha família, por me financiar e amparar.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, tanto do Brasil quanto de Portugal, que me fizeram conseguir terminar o curso e aproveitar essa fase da vida.

À Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues, que disponibilizou de seu tempo para me orientar neste trabalho, sem poupar esforços.

Ao Engenheiro Vítor Silva, pelo apoio e colaboração nos ensaios realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

À *Delft University of Technology* e ao projeto da ação *COST - SARCOS*, por oferecer o tema e disponibilizar materiais e guias para a realização deste trabalho.

Por fim, ressaltar minha gratificação em concluir o curso na FCT NOVA, pois tenho a certeza de que se será muito positivo no âmbito profissional.

O meu muito obrigada à todos que participaram e colaboraram para o sucesso da conclusão do meu curso.



## RESUMO

Atualmente, o setor da construção civil cresce consideravelmente, tanto na quantidade de obras executadas quanto nas suas aplicações e intervenções práticas. Uma vez que o betão é um dos produtos mais empregados neste campo, os pesquisadores têm investido esforços para estudar maneiras de otimizá-lo e melhorar suas características. Para isso, a inserção e os tipos de agentes que realizam a autorregeneração no betão estão sendo ensaiados e analisados a fim de obter confirmações que comprovem sua eficiência qualitativa e quantitativa.

No presente estudo, apresenta-se um panorama geral dos tipos de agentes que estão atualmente em estudo, e dá-se ênfase aos bioprodutos. Discutem-se os fatores e condicionantes que afetam essa técnica e os ensaios mais utilizados para avaliar sua eficiência. Nota-se que o tipo de bactéria, método da sua introdução, o tipo de cura e a largura da fenda são os principais aspectos a serem considerados.

Para a avaliação laboratorial da autorregeneração do betão com a introdução de bactéria realizaram-se provetes utilizando materiais e métodos definidos previamente no âmbito de ensaios interlaboratoriais (*RRT 6*) da ação *COST SARCOS (CA15202)*, simultaneamente em diversos laboratórios. Os provetes foram submetidos a fendilhação forçada, e efetuaram-se medições da largura das fendas com lupa binocular e através do ensaio de permeabilidade à água. Todos os resultados obtidos e análise de artigos afirmam ser esta uma técnica promissora, mas que necessita de aprofundados estudos a longo prazo para que a mesma seja validada para uso comercial.

**Palavras-chave:** Biobetão; bactéria; fendilhação; abertura da fenda; autorregeneração do betão; permeabilidade à água.



## ABSTRACT

In the recent years, the civil construction sector has grown significantly in terms of projects developed and practical applications. Concrete—a widely used product in the field—has been a focused area of research; academics and practitioners have devoted time to optimize its applications and improve its features. For that, the self-healing agents and the type of insertion used in the concrete are being analyzed to confirm their qualitative and quantitative efficiency.

This master thesis presents a general overview of the contemporary self-healing agents with a particular focus on bacteria-based bioproducts. The factors influencing the technique and the efficiency of the most used laboratory tests are analyzed and discussed. It should be noted that the bacteria type, the application method, the cure type, and the size of the cracks are the main aspects to be considered.

For the laboratorial evaluation of the self-healing of the concrete with bacteria, samples were produced using materials and methods previously defined within a round robin test (RRT 6) of COST Action SARCOS (CA15202), similarly to what was done in other laboratories. The samples were pre-cracked and the induced crack analyzed width measurements with microscope lens and water permeability test. The results of the analysis suggest that the self-healing application is promising, but a long-term study is recommended before a full commercial application.

**Keywords:** Bioconcrete; bacteria; cracking; crack width; self-healing; water permeability.



## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA .....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
<b>2. SELF-HEALING DO BETÃO .....</b>	<b>5</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	5
2.2. TIPOS DE <i>SELF-HEALING</i> .....	7
2.3. <i>SELF-HEALING</i> ATRAVÉS DE BACTÉRIAS.....	12
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>21</b>
3.1. MATERIAIS, PROJETOS E CURA .....	21
3.2. FENDILHAÇÃO FORÇADA INICIAL .....	23
3.3. MÉTODOS DE ENSAIO.....	25
3.3.1. <i>Medição das fendas</i> .....	25
3.3.2. <i>Permeabilidade à água</i> .....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>43</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>47</b>
ANEXO A.1. RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE MEDIÇÃO DA ABERTURA DE FENDAS.....	47
ANEXO A.2. RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA.....	58



## Índice de figuras

FIGURA 2.1. ANÁLISE DA SELAGEM DAS FENDAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURA: IMERSÃO EM ÁGUA (A); CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM (B); 25°C E 90% HR (C) (LUO ET AL.,2015) .....	15
FIGURA 2.2. EFEITOS DE DIFERENTES BACTÉRIAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO (KHALIQ & EHSAN, 2016) .....	17
FIGURA 2.3. IMAGENS DE MINERALIZAÇÃO E SELAGEM POR AUTORREGENERAÇÃO DE FENDAS COM: 0,3 MM (A); E 0,8 MM (B) (LUO ET AL., 2015) .....	19
FIGURA 3.1. MATERIAIS: FIBRAS DE AÇO (A); SUPERPLASTIFICANTE LÍQUIDO (B); E BIOPRODOTO COM BACTÉRIAS EM PÓ (C).....	22
FIGURA 3.2. BETONEIRA DESPEJANDO O BETÃO DENTRO DO RECIPIENTE (A); MOLDAGEM DOS PROVETES (B); E MOLDES PREENCHIDOS (C) .....	23
FIGURA 3.3. EQUIPAMENTO PARA EXECUTAR A FENDILHAÇÃO FORÇADA (A); E MEDIÇÃO DA FENDAS (B).....	24
FIGURA 3.4. CONDIÇÃO ESQUEMÁTICA DE IMERSÃO DOS PROVETES FENDILHADOS EM ÁGUA PARA A CURA.....	25
FIGURA 3.5. LUPA BINOCULAR DO LABORATÓRIO DA FCT NOVA .....	25
FIGURA 4.1. ABERTURA DE FENDAS DOS PROVETES DE REFERÊNCIA E COM BACTÉRIA COM ABERTURA INICIAL DE 0,2 MM, AO LONGO DO TEMPO .....	36
FIGURA 4.2. ABERTURA DE FENDAS DOS PROVETES DE REFERÊNCIA E COM BACTÉRIA COM ABERTURA INICIAL DE 0,35 MM, AO LONGO DO TEMPO .....	36
FIGURA 4.3. ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA DOS PROVETES DE REFERÊNCIA E DE BACTÉRIA COM ABERTURA INICIAL DE 0,2 MM, AO LONGO DO TEMPO .....	37
FIGURA 4.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA DOS PROVETES DE REFERÊNCIA E DE BACTÉRIA COM ABERTURA INICIAL DE 0,35 MM, AO LONGO DO TEMPO .....	37
FIGURA 4.5. MÉDIA DA ABERTURA DE FENDAS E TAXA DE FLUXO DA ÁGUA DOS PROVETES COM BACTÉRIA .....	38



## Índice de tabelas

TABELA 2.1. SÍNTESE DE ALGUNS ESTUDOS SOBRE <i>SELF-HEALING</i> DE BETÃO SEM UTILIZAÇÃO DE BIOPRODUTOS .....	8
TABELA 2.2. SÍNTESE DE ESTUDOS DE <i>SELF-HEALING</i> DE BETÃO COM BACTÉRIAS.....	12
TABELA 2.3. EVOLUÇÃO DAS BACTÉRIAS NO BETÃO SEGUNDO SUAS CONDICIONANTES E CRITÉRIOS (GAYLARDE,2003 CONSULTADO EM CLAUDINO ET. AL., 2017) .....	16
TABELA 2.4. MICRORGANISMOS E NUTRIENTES PARA PRODUZIR O CARBONATO DE CÁLCIO NO BETÃO (SEIFAN ET AL., 2016). .....	18
TABELA 3.1. QUANTIDADE DOS COMPONENTES PARA AS MISTURAS DOS BETÕES DE REFERÊNCIA E PARA <i>SELF-HEALING</i> DEFINIDA PELO <i>RRT6</i> DO <i>SARCOS</i> (2020) .....	23
TABELA 3.2. FORÇA À FLEXÃO INDUZIDA NOS PROVETES.....	24
TABELA 4.1. SÍNTESE DAS “ESTALACTITES” NOS PROVETES EXECUTADOS NA FCT NOVA .....	30
TABELA 4.2. MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DA ABERTURA DE FENDAS .....	34
TABELA 4.3. TAXA DE FLUXO DA ÁGUA OBTIDOS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA .....	35
TABELA 4.4. CÁLCULO DA TAXA DE <i>SELF-HEALING</i> SEGUNDO ROIG-FLORES ET AL. (2015).....	39
TABELA A.1. 1. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 1 0,2MM.....	47
TABELA A.1. 2. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 2 0,2MM.....	48
TABELA A.1. 3. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 3 0,2MM.....	49
TABELA A.1. 4. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 4 0,35MM.....	50
TABELA A.1. 5. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 5 0,35MM.....	51
TABELA A.1. 6. MEDIÇÕES DO PROVETE DE REFERÊNCIA 6 0,35MM.....	52
TABELA A.1. 7. MEDIÇÕES DO PROVETE COM BACTÉRIA 1 0,2MM.....	53
TABELA A.1. 8. MEDIÇÕES DO PROVETE COM BACTÉRIA 3 0,2MM.....	54
TABELA A.1. 9. MEDIÇÕES DO PROVETE COM BACTÉRIA 4 0,35MM.....	55
TABELA A.1. 10. MEDIÇÕES DO PROVETE COM BACTÉRIA 5 0,35MM.....	56
TABELA A.1. 11. MEDIÇÕES DO PROVETE COM BACTÉRIA 6 0,35MM.....	57



## 1.1. Enquadramento

Durante a realização de obras novas, operações de manutenção e reabilitação das construções há um consumo de grande quantidade de recursos naturais (areia, cimento, aço, alumínio, madeira, água) e de energia. Além de buscar formas de reduzir os resíduos gerados ao longo das obras, para tornar a construção civil mais sustentável, é necessário pensar também na durabilidade das construções (edifícios e outras obras), e na manutenção necessária para preservá-los ao longo dos anos. Assim, há um trabalho complexo na escolha dos materiais e dos métodos construtivos empregados.

O betão armado é um dos materiais mais utilizados na construção civil atualmente e, naturalmente, este material está sujeito à danos, como por exemplo surgimento de fendas, que, se não reparadas, podem causar problemas à integridade das estruturas. Resulta frequentemente em altos custos de manutenção para que a construção mantenha o desempenho desejado (Sbardelotto et al., 2019). Existem diversos produtos que, adicionados aos componentes correntes do betão, e nomeadamente do betão armado, têm potencial de melhorar as suas propriedades e também torná-lo mais sustentável em alguns casos (Jonkers, 2007). Dentre eles, a autorregeneração (*self-healing*) do betão obtida através da introdução de produtos na sua formulação se apresenta como um tipo de solução para expandir a vida útil das estruturas e, dessa forma, reduzir o consumo de materiais utilizados na reparação ou substituição das estruturas. Para facilidade, ao longo deste trabalho vão usar-se os termos *self-healing* e autorregeneração com o mesmo significado, visto que são ambos utilizados nas pesquisas sobre o assunto.

Com a implementação destas tecnologias pretende-se que as necessidades de reparações comuns ao betão armado, como fendilhação de retração térmica ou por deformações, sejam reduzidas (Gupta et al., 2017). Pois pequenas fendilhações no betão são responsáveis pelo desenvolvimento de problemas que limitam a durabilidade da construção, como problemas relacionados ao aumento da permeabilidade à água da estrutura de betão (Jonkers, 2021), e consequente aumento da corrosão das armaduras.

O *self-healing* de pequenas fendas que ocorrem no betão evitará então problemas como a degradação do aço do betão armado e reduz o risco de degradação prematura da estrutura (Jonkers & Schlangen, 2008). Ao passo que em muitos casos os efeitos destes problemas são de difícil resolução e economicamente avultados, o *self-healing* do betão se apresenta como uma possibilidade viável de enfrentar estas questões.

Além disto, o processo de autorregeneração pode ser aplicado ao reparo de fendas de pequena espessura conforme estas ocorrem, impedindo assim que se transformem em fendas maiores, evitando que o material reduza sua capacidade estrutural (Rodrigues, 2018).

Uma outra vantagem que as tecnologias de *self-healing* do betão oferecem é a de alguns tipos serem biodegradáveis e não oferecerem riscos grandes de poluição ao meio ambiente (Rodrigues, 2018), sendo assim uma solução eco-eficiente que aumenta a durabilidade das estruturas.

Nota-se assim a extrema importância de estudar e aprimorar técnicas que minimizem esses impactos ao meio ambiente. Desta forma, a fim de desenvolver e aprofundar a discussão acerca da implementação do *self-healing* do betão, a ação *COST SARCOS - Self-healing as preventive repair of concrete structures (CA 15202)*, uma rede de pesquisa interdisciplinar, teve como interesse desenvolver a capacidade do *self-healing*. A presente dissertação enquadra-se no âmbito do *Interlaboratory Round Robin Test RRT6: Concrete with Bacterial Admixtures*, liderada pela *Delft University of Technology - TU Delft*. A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa - FCT NOVA está denominada como parceiro L12 dentro deste projeto.

A ação *COST SARCOS* teve início no ano de 2016 e finalizou oficialmente em 2020, com a Dra Mercedes Sanchez Moreno na coordenação e Prof Nele De Belie como vice-coordenadora. Participaram nesta rede de investigação *COST* um total de 31 países, e para além do *RRT6* com base em bactérias, foram estudados também outros tipos de *self-healing*.

O principal limitante ao emprego de betão com capacidade de autorregeneração na construção civil está em desenvolver uma mistura que preserve o desempenho desejado do betão, mas que seja financeiramente viável e respeite os critérios de sustentabilidade desejados no projeto (Jonkers & Schlangen, 2008). Assim, este estudo pretende contribuir para aprofundar o conhecimento das técnicas do emprego do betão para não só servir como base das questões acima, como também mostrar fatores que interferem nesse processo.

## 1.2. Objetivo e metodologia

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo avaliar o efeito do *self-healing* num bio-betão, isto é, um betão formulado com a introdução de partículas biológicas – no caso presente, derivadas de lactato contendo bactérias e nutrientes.

Integra-se numa campanha experimental interlaboratorial realizada em paralelo em diversos laboratórios da Europa, na qual foram ensaiados o mesmo tipo de provetes de betões, produzidos de forma muito semelhante e ensaiados de acordo com procedimentos pré-definidos.

Apresenta-se a visão de diferentes autores sobre o assunto, através das análises de artigos.

Descreve-se o material utilizado para a execução dos provetes de betão, de controle e biobetão. A maior parte desses materiais foram disponibilizados pela TU Delft, que liderou a campanha interlaboratorial; apenas os restantes foram disponibilizados pela FCT NOVA. Os provetes foram moldados separadamente, desmoldados e imersos em água para a cura.

Ao fim de um período de cura definido, os provetes foram propositadamente fendilhados, de acordo com procedimentos estabelecidos, e a abertura das fendas avaliada. Após um novo período, e ciclicamente, avaliou-se o *self-healing* ocorrido a partir de ensaios de medição da abertura das fendas e de permeabilidade à água.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos. O primeiro aborda o enquadramento do tema, o objetivo da dissertação e a metodologia que foi utilizada, e como foi estruturada.

O segundo capítulo introduz efetivamente o assunto, abordando de uma maneira geral o tema e depois especifica-se melhor sobre os tipos de agentes de *self-healing* que têm vindo a ser avaliados. Em um primeiro momento relata-se sobre pesquisas feitas com agentes minerais para depois se analisar a utilização de bioprodutos com base em bactérias.

No terceiro capítulo é apresentada a campanha experimental feita nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FCT NOVA. Descrevem-se todos os materiais, a preparação dos betões, respetivas curas e todos os procedimentos de ensaio realizados que seguiram o definido pelo grupo de trabalho do *Round Robin Test RRT6 - Concrete with Bacterial Admixtures*, segundo a ação *COST CA 15202 – SARCOS (2020)*.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na campanha experimental realizada, procurando correlacioná-los com os de outros autores.

Por final, o último capítulo conclui esta investigação com base nos artigos analisados e nos resultados obtidos da campanha experimental, a fim de avaliar a capacidade de autorregeneração do biobetão com bactéria.

Em anexos apresentam-se os resultados individuais de abertura de fendas e de permeabilidade à água.



## SELF-HEALING DO BETÃO

### 2.1. Considerações gerais

Atualmente o betão é um dos elementos mais utilizados no universo da construção, sendo uma mistura de agregados, cimento e água, podendo ainda conter adições e adjuvantes. Com betões com diferentes constituintes e proporções vão obter-se características e propriedades distintas. Por isso os engenheiros devem definir as propriedades que desejam para o betão, para se poder fazer a formulação específica e adequada ao que se pretende. Quando curado, o betão pode ser considerado uma pedra artificial, tendo como principal característica uma alta resistência à compressão e baixa resistência a tração. Pode ter uma elevada durabilidade embora esta dependa também das várias etapas da construção, tais como aplicação e cura (Jonkers, 2007). A norma NP EN 206 (2013+A1:2017) e a especificação LNEC E 464 (2007) abordam a durabilidade segundo a composição e classe de resistência do betão. O risco de corrosão das armaduras, a razão água/cimento, a resistência à compressão, consistência, teor máximo de cloretos, gelo e degelo, exposição ambiental são fatores a serem considerados para assegurar a vida útil pretendida do betão.

Na antiguidade, e até ao século XIX, o betão tinha como ligante a cal aérea. A cal aérea era obtida a partir da calcinação de calcário ou carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A uma temperatura de quase  $900^\circ\text{C}$ , o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é libertado, formando-se óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) ou cal viva. Quando o  $\text{CaO}$  entra em contato com a humidade do ar ou com água acontece uma reação na qual se produz hidróxido de cálcio ou cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Esta cal, misturada com agregados finos e grossos e amassada com água, constitui um betão conhecido atualmente como romano. Neste betão, a humidade vai transportar  $\text{CO}_2$  que, em contato com o hidróxido de cálcio, vai reagir e produzir carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Para que este betão (não hidráulico) tivesse melhores características de durabilidade em contato com água adicionavam-se frequentemente pozolanas, naturais ou artificiais.

A partir do final do século XIX e principalmente no início do século XX, a cal aérea foi substituída por cal hidráulica natural e depois pelo cimento. Ao longo do tempo foram desenvolvidos vários tipos de betão ajustando a sua composição mineral e assim alterando as propriedades finais desejadas para as aplicações específicas (Jonkers, 2007). Um dos casos mais

frequentes foi a inclusão de adições de pozolanas artificiais. Alguns exemplos de composições que foram alteradas foram na aplicação de cinzas volantes no betão, o que aumenta a sua resistência a ataques químicos, pois há um fechamento dos poros e, conseqüentemente, diminui sua permeabilidade (Jonkers, 2007), assim como a sílica de fumo e as escórias que melhoraram a resistência mecânica (Cabrera-Madrid et al., 2016).

Verificou-se também que algumas destas adições conferiam capacidade de *self-healing* ao betão, colmatando algumas fendas e, dessa forma, tornando as estruturas de betão armado mais resistentes e mais duráveis (Jonkers & Schlangen, 2008).

A fendilhação normalmente ocorre devido à baixa resistência à tração do betão, que ocasiona fendas por retração térmica, por reação química e/ou por deformações ocorridas. O aspecto mais preocupante das fendas é que se compromete a durabilidade do betão, pois, através das aberturas, podem entrar substâncias agressivas (Luo et al., 2015).

Geralmente, as manutenções de estruturas de betão são feitas manualmente, o que implica em custos altos e difícil execução, tornando problemático não só detectar as áreas que precisam de reparação, mas também solucionar essa questão (Luo et al., 2015). Um exemplo prático de aplicação do betão com capacidade de *self-healing* foi nas construções dos canais de irrigação no Equador, realizado por Jonkers e sua equipe (Sierra Beltran et al., 2015).

As duas técnicas existentes hoje para o tratamento de fendas com a aplicação do betão com capacidade de *self-healing* divide-se em ativa e a passiva. Os tratamentos ativos são normalmente inseridos na composição do betão e atuam tanto no interior quanto no exterior da fenda. Os tratamentos passivos acontecem apenas na superfície e predominantemente aplicados como revestimento do betão existente (Seifan et al., 2016). Este tipo de procedimento que insere no betão o agente de *self-healing* através dos poros e vasos é bastante estudado e mostra que realmente ocorre a selagem dos poros, dificultando a movimentação da água (De Muynck et al., 2008). No entanto, mesmo sendo muito promissor, tem a desvantagem de funcionar como uma manutenção, ou seja, deve ser preparado para ser aplicado manualmente no local onde existam fendilhações (Jonkers et al., 2010). O outro tipo de técnica que está ocorrendo no campo de aplicação do betão com *self-healing* é já na execução do betão (Seifan et al., 2016). Ou seja, o agente que vai promover a autorregeneração é adicionado na mistura do betão e, caso venha acontecer a fenda, ele se autorregenerará, formando cristais através de reações químicas, com a ajuda de fatores externos, como por exemplo a humidade da chuva (não necessitando assim de reparos manuais).

Contudo, o custo do betão comum e mais utilizado é cerca de três vezes menor do que o do betão com *self-healing*. No entanto, a comparação entre betão comum e betão com *self-healing* deve incluir no 1º o custo de manutenção, estimado em €115 por m<sup>3</sup> de custo direto (Silva et al., 2015), que à partida o 2º já não necessitará no seu período de vida útil (Claudino et al., 2017).

Mesmo tendo vantagens na parte financeira em alguns casos, o desconhecimento ao longo do tempo do comportamento dos materiais que fazem *self-healing* é uma questão tratada

como problemática (Sbardelotto et al., 2019). E outra questão importante e que poucos estudos comprovam quantitativamente é a sustentabilidade. O autor Sbardelotto (2019) apresenta a autorregeneração do betão como sustentável, pois ela consegue diminuir as manifestações patológicas e minimizar os reparos, como consequência reduzir a emissão de poluentes oriundos dessas atividades. Rodrigues (2018) mostra que as bactérias e outros bioprodutos são benéficos no ponto de vista da ecologia, pois não apresentam riscos de poluição ao meio ambiente, logo que são biodegradáveis. O estudo de Jonkers & Schlangen (2008) apresentam que quando combinado dois componentes bacterianos o betão se torna mais sustentável e promissor. Entretanto, relata que a eficiência de *self-healing* precisa ser estudada e quantificada em outros trabalhos.

Assim, entende-se que o campo de betão com capacidade de *self-healing* deve ser muito estudado, pois ainda existem muitas lacunas em relação à sua aplicação e como será seu comportamento.

## 2.2. Tipos de *self-healing*

Fendas menores de 0,2 mm que ocorrem em estruturas não são consideradas problemáticas estruturalmente, uma vez que não influenciam no desempenho mecânico; no entanto, podem modificar propriedades de permeabilidade e, conseqüentemente, deixar o betão se expor à ações da água e de outros agentes agressivos (Jonkers, 2021). Por isso as análises do betão com *self-healing* são principalmente feitas através de uma lupa binocular e ensaios de permeabilidade à água, para que seja possível comparar a eficácia. Um betão que tem baixa permeabilidade tem como consequência uma maior durabilidade, pois minimiza a deterioração causada por agentes externos (De Muynck et al., 2008).

A capacidade de *self-healing* da fenda tem aspetos importantes a ter em conta, como por exemplo sua abertura – estudos apontam que é mais comum fendas pequenas, de 0,1 à 0,2 mm, terem um bom desempenho de regeneração (Edvardsen, 1999). Outros três fatores a serem considerados são: a metodologia para incluir o agente na mistura do betão; a quantidade de água no betão, pois é esta que possibilita as reações químicas que devem acontecer para haver o *self-healing*; e por último, mas não menos importante, o agente que se inclui no betão (Jonkers, 2021).

Atualmente há no mercado diversas opções de componentes e agentes para serem introduzidos no betão, com o objetivo de melhorar as suas propriedades e características, como por exemplo o aumento da resistência à compressão e do *self-healing* das fendas. Entretanto, alguns dos produtos existentes não são adequados principalmente devido ao quesito de poluição durante a fabricação e dificuldade de produção (De Muynck et al., 2008). Além disso, o próprio cimento Portland é responsável por contribuir com 7% das emissões de CO<sub>2</sub> global antropogênico (Jonkers et al., 2010). Assim, técnicas inovadoras passaram a surgir e serem

ensaiadas e estudadas, com o objetivo de diminuir o consumo do cimento, mantendo ou melhorando as propriedades dos betões e garantindo, dessa forma, a sua maior durabilidade. Uma das maneiras para tal aumento de durabilidade é adicionar agentes de autorregeneração.

As técnicas que mais estão sendo analisadas no campo do *self-healing* da fendilhação de baixa espessura do betão ocorrem pela: adição de produtos químicos encapsulados e em microtubos, adições minerais como as cinzas volantes, microfibras, cristalinas (*crystalline admixture*) e adição de bioprodutos (Echegaray et al., 2015).

A Tabela 2.1 apresenta sinteticamente alguns estudos que fizeram ensaios para analisar o comportamento do betão com *self-healing* através da utilização de diferentes materiais, com exceção de bioprodutos.

Tabela 2.1. Síntese de alguns estudos sobre *self-healing* de betão sem utilização de bioprodutos

Ref.	Agentes de <i>self-healing</i>	Provetes [mm]	Fendilhação forçada	Tamanho da fenda [mm]	Idade de ensaio após fendilhação	Avaliação do <i>self-healing</i>	Síntese de procedimentos	Discussão e Síntese dos resultados
Roig-Flores et al., 2015	<i>Crystalline admixture</i>	Cilindros (150 de diâmetro e 300 de altura)	Depois de 2 dias de cura	0,3	42º dia	Permeabilidade à água	Medida a passagem de água a cada 5 minutos. Medido em quatro exposições diferentes (absorção por imersão da água, absorção por contato com água, absorção por contato com humidade e exposição à condições ambiente). Baseado na EN 12390-8 (2009).	Ensaio usado como valor de referência, porque o objetivo principal é impedir a passagem da água. Provetes têm um comportamento mais linear.
						Abertura de fenda	Medição por fotos. Medido em quatro exposições diferentes (absorção por imersão da água, absorção por contato com água, absorção por contato com humidade e exposição à condições ambiente).	Analisadas para fazer uma correlação com a permeabilidade à água e para analisar a evolução. Imersos em água tem o melhor comportamento de <i>self-healing</i> (0,9). Pior comportamento foi em contato com a água (-0,8). Contato com a humidade e condições ambientes não apresentaram comportamento bom (0,15 e -0,15).
Termkhajornkit et al., 2009	Cinzas volantes	Cilindros (100 de diâmetro e 200 de altura). Fatias com espessura máxima de 50	Depois de saturada por 24h	Pedaços de 2,5 a 5	Até 182º dia	Resistência à compressão	Curado em condições fechadas sem mudanças. Média de três medidas nos 182 dias, pelo método JIS R5201.	Resistência diminui quando o cimento é muito substituído pelas cinzas. Resistência à compressão aumenta depois dos 28 dias.

Tabela 2.1. Síntese de alguns estudos sobre *self-healing* de betão sem utilização de bioprodutos (cont.)

Ref.	Agentes de <i>self-healing</i>	Provetes [mm]	Fendilhação forçada	Tamanho da fenda [mm]	Idade de ensaio após fendilhação	Avaliação do <i>self-healing</i>	Síntese de procedimentos	Discussão e Síntese dos resultados
					Até 365° dia	Porosidade	Curado em condições fechadas sem mudanças. Medido uma vez no 365 dia.	Porosidade diminui quando o cimento é muito substituído pelas cinzas. Diminui a porosidade depois dos 28 dias.
					28° dia e 91° dia	Coefficiente de difusão de cloretos	Curado em condições fechadas sem mudanças. Medido pela cromatografia de íons no 28 dia e 91 dia, pelo método japonês JSCE-G571-2003	Betão sem cinzas mostra coeficiente menor. Difusão do cloreto foi melhor com 25% de cinzas e aos 91 dias
					Até 365° dia	Grau de hidratação	Curado em condições fechadas sem mudanças. Medido até os 365 dias. Pelo método de dissolução seletiva usando soluções de HCl e $Na_2CO_3$ e pelas X-ray diffraction analysis (XRD) Rietveld	Aumenta rapidamente até os 28 dias e nas outras idades se mantém constante. Quanto mais cinzas mais aumenta a hidratação, depois dos 28 dias
Snoeck et al., 2014	Microfibras e polímeros superabsorventes	Prisma (160 x 40 x 15)	Desmoldado depois de 24h, fendilhado ao 7° dia e cura até aos 28 dias em humidade relativa (HR)>90% e temperatura 20±2°C	-	28° dia e 56° dia	Flexão por 4 pontos	Software Proteus 10.1 mede curvas força-deslocamento, que depois são transformadas em curvas tensão-deformação. Curado em três condições diferentes: (a) 1 dia em água e um dia é HR<60% (b) HR>90% (c) HR<60	Fendas maiores que 200 µm não apresentaram <i>self-healing</i> . Quando não submersos em água, amostras contendo SAPs mostraram propriedades de <i>self-healing</i> devido à absorção de umidade.
		Cilindros (78 de diâmetro e 20 de altura)		0,3	Dos 28 dias até constância de resultados	Permeabilidade à água	Amostras saturadas a vácuo com água deionizada e medido: área da seção transversal da coluna de fluido, espessura da amostra, área da superfície da amostra submetida ao fluxo, tempo, pressão inicial e pressão final. Cálculo da expressão do coeficiente de permeabilidade à água	Menos fluxo de água ao longo do tempo, mais <i>self-healing</i> . O tamanho pequeno é inadequado para a vedação total das fendas, pois as pequenas partículas não podem transpor a fenda. Quando as partículas de SAP são expostas a um ambiente húmido, aumentam de volume e fecham a fenda. Os SAPs são bons em regiões com quase nenhuma chuva ou para estruturas não expostas à chuva direta. Pois absorvem a menor quantidade de umidade e a fornecem à matriz cimentícia para <i>self-healing</i>

Tabela 2.1. Síntese de alguns estudos sobre *self-healing* de betão sem utilização de bioprodutos (cont.)

Ref.	Agentes de <i>self-healing</i>	Provetes [mm]	Fendilhação forçada	Tamanho da fenda [mm]	Idade de ensaio após fendilhação	Avaliação do <i>self-healing</i>	Síntese de procedimentos	Discussão e Síntese dos resultados
					Depois do ensaio de permeabilidade à água	Análise microscópica e termogravimétrica	Estereomicroscópio Leica S8 e câmara DFC 295	A análise termogravimétrica foi feita para determinar a composição da cristalização branca encontrada nos outros ensaios
Qureshi et al., 2016	Minerais expansivos (MgO, bentonite e cal virgem)	Prisma (50 x 50 x 220)	7 dias em água	0,40 à 0,5	28º dia e 56º dia	Carregamento mecânico e eficiência de cura	Ensaio de curvatura três apoios. Três tipos de cura. Três medições: a carga em que ocorreu a fenda inicial, o ponto de descarga inicial, a carga máxima atingida pela amostra durante o recarregamento	Resistência tem um aumento grande quando colocado em condição de imersão. Pior resistência é em condição ambiente. Imagens confirmam e também mostram que há um fechamento maior do 28 dia ao 56 dia. Melhora na resistência e na durabilidade, pois há uma desificação nas camadas de <i>self-healing</i>
					1º dia, 7º dia, 14º dia, 21º dia, 28º dia e 56º dia	Medidas da área da fenda	Usado estereoscópio e analisado no software Image-J	
					Depois de 28 dias curados em imersão na água	Coefficiente de absorção	Baseado nas diretrizes RILEM TC 116-PCD. Realizados nos provetes em condição de imersão. Coeficiente calculado por uma expressão	Redução considerável do coeficiente, quase se igualando com a amostra de controle que não foi fendilhada. Observação nos microscópios validaram a informação. Bom desempenho em fendas grandes (~400um)
					Feitos depois do carregamento mecânico	Investigação microestrutural dos materiais de cura	Realizado com Fourier infrared spectroscopy (FTIR), XRD e microscopia eletrónica de varrimento (SEM)	Os minerais encapsulados mostram uma formação de produtos que posteriormente fazem <i>self-healing</i> eficiente. CO <sub>2</sub> reage com Ca(OH) <sub>2</sub> , Mg(OH) <sub>2</sub> , C-S-H e forma carbonato e hidro-carbonato. Ou seja, mais camadas formadas para o <i>self-healing</i>

Da Tabela 2.1 verifica-se que os ensaios de permeabilidade à água, de resistência à compressão, análises fotográficas para medição geométrica são os principais meios de análise da autorregeneração. Assim, como consequência dos ensaios que se pretende realizar os tipos de provetes escolhidos são normalmente cilindros ou prismas. Normalmente, os provetes nestes ensaios são fendilhados (pré-crack) e expostos a situações ambientes diferentes para entender o efeito do agente na capacidade de *self-healing*.

Roig-Flores et al. (2015) pesquisaram sobre o *self-healing* do betão com *crystalline admixture*, classificada como um aditivo redutor de permeabilidade, realizando seis ensaios focando o estudo em como esse betão se comporta em diferentes tipos de ambiente. As principais conclusões tiradas foram que este tipo de agente trabalha melhor no betão quando condicionado a uma imersão total, ou seja, é uma opção para lugares com chuva direta ou lugares realmente imersos em água. A outra conclusão tirada foi que o método de tirar fotografias para determinar os parâmetros geométricos não foi uma alternativa confiável de dados. Entretanto, apresentam a taxa de *self-healing* como um bom método de avaliação do *self-healing*, Equação 2.1:

$$\text{Taxa de } self\text{-healing} = 1 - \frac{\text{Fluxo final}}{\text{Fluxo inicial}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Na Eq. 2.1 o Fluxo final é a passagem de água no último dia de ensaio e o Fluxo inicial a passagem do dia 0. Valores próximos de zero representam fluxos similares, quanto maior foi o efeito do *self-healing* a taxa tende a 1 e valores negativos são uma reabertura da fenda.

Já Termkhajornkit et al. (2009) optaram por estudar e desenvolver betões com cinzas volantes como agente de *self-healing*. Esse material pozzolânico produz um gel C-S-H através da reação da pozolana com a cal livre ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente no betão hidratado. Realizando quatro ensaios laboratoriais puderam entender que, quando há uma substituição muito grande do agente pelo cimento, o betão não apresenta necessariamente características melhores. Ou seja, concluíram que uma substituição de 25% consegue aumentar a resistência e diminuir a porosidade - duas características extremamente importantes para a manutenção do betão.

Snoeck et al. (2014) estudaram o *self-healing* de betão com a introdução de microfibras e polímeros superabsorventes. Concluíram que é possível utilizar tais agentes para melhorar a durabilidade e a resistência do betão, mas à custa de impacto em outros aspectos, como por exemplo o surgimento de fendas em outros lugares devido a recuperação das propriedades mecânicas.

Qureshi et al. (2016) encapsularam minerais expansivos e estudaram seu comportamento através de quatro ensaios, como apresenta a Tabela 2.1. Sua análise mais relevante é que, diferentemente de outros agentes, os minerais expansivos trabalham bem em fendilhações grandes (maiores de 400  $\mu\text{m}$ ), pois conseguem densificar melhor as camadas de *self-healing*.

Compreende-se que o estudo e desenvolvimento de um betão com *self-healing* é muito promissor, mas suas características finais e a longo prazo ainda não foram bem quantificadas e validadas. Para cada método e agente que realiza a autorregeneração há suas vantagens e desvantagens, assim como foi apresentado.

Apesar de muitos estudos acerca do assunto, os betões com capacidade de autorregeneração com adições inorgânicas são de certa maneira limitados (Luo et al., 2015), no sentido de

disponibilidade de materiais, de sustentabilidade, facilidade de execução. Por isso, alguns investigadores decidiram introduzir bactérias como agente regenerador.

### 2.3. *Self-healing* através de bactérias

As ações e aplicações das bactérias e enzimas vêm sendo analisadas por inúmeros investigadores e em várias áreas de pesquisa, como por exemplo na aplicação de consolidação de areia (Gollapudi et al., 1995), reparações de pedra calcária em monumentos (Dick et al., 2006), proteção à água de argamassas de terra (Parracha et al., 2021) ou de cal aérea (Oliveira et al., 2021). Já a introdução das bactérias no betão para autorregeneração, avaliada através da selagem de fendas e de poros, é relativamente recente (Jonkers et al., 2010).

Assim como Seifan et al. (2016) apresentam, existem dois tipos de tratamento de fendas (ativo e passivo). O biotratamento representa a inserção do bioproduto com a finalidade de reparar fendas existentes, como é comum utilizar em reabilitação e conservação de edifícios (Jimenez-Lopez et al., 2008). Um estudo prático foi a reparação de um parque de estacionamento encabeçado por Wiktor e Jonkers (2015). Entretanto, o projeto *COST CA 15202 – SARCOS RRT6* pretende investigar a capacidade de um biobetão, ou seja, um betão que tem a bactéria como um dos componentes da mistura e serve predominantemente como prevenção (atuar no caso de fendilhação vir a ocorrer depois do betão ter sido aplicado em obra, e sem ter de ser especificamente reparado).

Diferentes equipas de investigação optam por estudar um grupo de bactérias, a fim de entender o seu comportamento mecânico, a permeabilidade à água, a durabilidade, entre outras características. Alguns exemplos de estudos de *self-healing* de betão com bactérias estão sintetizados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Síntese de estudos de *self-healing* de betão com bactérias

Ref.	Bioproduto	Provetes (dimensões em mm)	Cura	Idade de Ensaio	Ensaios para avaliação do <i>self-healing</i>	Procedimentos	Resultados
De Muynck et al., 2008	<i>B. sphaericus</i> LMG 225 57	Cubo (40)	Um dia a 20°C e 90% de HR, desmolda e curados em água por 27 dias	-	Observação de lâmina delgada ( <i>Thin section</i> )	Epóxi fluorescente inserido e análise através de microscópio <i>Leica DMLP</i> e câmara <i>Canon S50</i>	A permeabilidade do betão diminui quando aplicada uma camada com o bioproduto. Camada de cristais de carbonato melhoraram a resistência à deteriorização
		Cubo (10)		-	Microscopia eletrónica de varrimento (SEM)	Revestido com <i>Sputter Coater</i> (Baltec SCD005) e analisadas pelo microscópio FEI XL30	
		Cubo (100)		Depois de 28 dias	Resistência à compressão	<i>Splitting test</i>	

Tabela 2.2. Síntese de estudos de *self-healing* de betão com bactérias (cont.)

Ref.	Bioproduto	Provetes (dimensões em mm)	Cura	Idade de Ensaio	Ensaio para avaliação do <i>self-healing</i>	Procedimentos	Resultados
		Cilindro (50 de altura e 100 de diâmetro)		-	Coefficiente de migração de cloreto acelerado	Método Nordtest NT Build 491	
		Cubo (100)		2, 4 e 6 semanas	Carbonatação acelerada	2 semanas de carbonatação. Pulverizado com solução de fenolftaleína. Determinado a profundidade de carbonatação em mm	
		Cilindro (50 de altura e 100 de diâmetro)		-	Qualificação da bactéria variando a profundidade	Medida a diferença de massa depois de expor os provetes a soluções específicas	
		Cubo (10)		-	Variação de massa		
		Cubo (40)		-	Absorção da água	Baseado em RILEM 25 PEM (II-6). Face de baixo exposta a $10 \pm 1$ mm de água e a face de cima em condições ambientais ( $20 \pm 2$ °C e HR $60 \pm 10$ %). Pesadas: 15 min, 30 min, 1 h, 1,5 h, 3 h, 5 h, 8 h, 24 h, 72 h, 96 h, 120 h, 144 h, 168 h. Calculado o coeficiente de absorção	
		Cilindro (50 de altura e 150 de diâmetro)		-	Permeabilidade ao vapor	Baseado no método RILEM-CEMBUREAU. 2 vezes a cada 24 h	
		Cubo (100)		Depois de 21 dias	Congelar e descongelar	Norma Belga NBM B-15 231	
Jonkers & Schlangen, 2008	<i>Bacillus cohnii</i> DSM6307, <i>Bacillus halodurans</i> DSM 497, <i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM 8715	-	-	1 dia	Formação dos esporos e produção de calcita em culturas líquidas	Análise por microscópio adicionado $\text{NaHCO}_3$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ e nitrato de sódio e, para a produção de calcita $\text{NaHCO}_3$ , nitrato de sódio e $\text{CaCl}_2$	Alto número de esporos de bactérias resultaram numa diminuição de 10% da resistência à compressão. Extrato de levedura, peptona, amido, ureia, poliacrilato de sódio e aspartato de sódio resultaram na diminuição de força após 28 dias e, glutamato de sódio e cálcio, formato de cálcio, acetato e lactato não mostraram perda de força. Dois componentes no sistema bacteriano o torna mais sustentável e mais promissor
	<i>Bacillus cohnii</i> DSM6307	Fatias de cilindro (5 de espessura e 22 de diâmetro)	Curado por 7 dias selado com plástico. Imerso em água. Depois de 10 dias foram lavadas com água destilada	3, 7 e 28 dias	Potencial de produção de calcita	Análise através de <i>Philips XL30 Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM)</i>	
	<i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM 8715	Cilindro (22 diâmetro e 30 altura)	28 dias de cura	28 dias	Resistência à tração	<i>Splitting test</i> da pasta	
		Cubo (40)	3 dias de cura	3, 7 e 28 dias	Resistência à compressão	-	

Tabela 2.2. Síntese de estudos de *self-healing* de betão com bactérias (cont.)

Ref.	Bioproduto	Provetes (dimensões em mm)	Cura	Idade de Ensaio	Ensaio para avaliação do <i>self-healing</i>	Procedimentos	Resultados
Jonkers et al., 2010	<i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM 8715 e <i>B. cohnii</i> 6307	-	-	Regularmente	Seleção e cultura das bactérias	Análise e quantificação através de microscópio	Poros maiores nos ensaios mais cedo (3 e 7 dias). Resistência à compressão: alto número de esporos causaram uma redução de 10%; lactato de cálcio aumentou sutilmente no 28 dia. Minerais formados na superfície da fissura no 7 dia
	<i>B. cohnii</i> 6307	Cubo (40)	Condições ambiente	9, 22, 42 e 153 dias	Viabilidade de bactérias incorporadas	Estimativa do número de bactérias viáveis ( <i>most probable number MPN</i> ) através de um programa de computador	
	<i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM 8715	Cubos (40 e com 5)		3, 7, e 28 dias	Resistência à compressão Distribuição do tamanho de poro	Bancada manual de pressão Determinado porosimetria por intrusão de mercúrio ( <i>MIP</i> ) usando <i>micromeritics autopore IV mercury porosimeter</i>	
	<i>B. cohnii</i> 6307	Cubo (40)	Separado em pedaços no 7 ou 28 dia de cura. Pedaços curados em condições ambientes por 8 dias	7 e 28 dias	Capacidade de produção de minerais	Análise através de <i>ESEM Philips XL30 Series</i>	
Khaliq & Ehsan, 2016	<i>B. subtilis</i>	Cilindro (150 diâmetro e 300 altura)	Desmoldado depois de 24 h e curados em temperatura e HR controlada	3, 7, 14 e 28 dias	Resistência à compressão	Provetes submetidos a compressão controlada até fendas apечerem. Fendas com aprox. 1mm foram marcadas para observações futuras	Produção de cristais de carbonato de cálcio na superfície da fissura. Máxima eficiência com a introdução de graphite nanopatelets (GNP). Abertura das fissuras depois do 7º dia de cura mostra uma perda de eficiência. Sem eficiência de autocura quando introduzido diretamente a bactéria. Aumento sutil na resistência à compressão
				7 e 28 dias	Análise microestrutural	Análise feita através de <i>SEM</i>	
				7 e 28 dias	Análise da mineralização e autocura	Análise feita através de <i>XRD</i>	
Luo et al., 2015	<i>Bacillus sphaericus</i>	Cilindro (75 de diâmetro e 35 de altura)	24 h para desmolde, curado a 25°C e (a) imergido em água, (b) 90 % RH, (c) molhado-seco	7, 14, 28, 60, 90 dias	Permeabilidade à água	Tudo de PVC transparente selado no prisma, análise da diferença de alturas da água	Muitas condições modificam a autocura, inclusive as condições de cura. Reparação microbiana está limitada por 0,8 mm de abertura de fissura. Após os 60 dias a porcentagem de autocura é muito pequena
		Prisma (40 x 40 x 160)	24 h para o desmolde, 21 dias de cura imergido em água			Análise da autorregeneração	

Nos diferentes estudos citados na Tabela 2.2 as bactérias foram adicionadas ao betão de maneiras diferentes, pois a produção de cada bactéria utilizada é também distinta. Os três grupos principais de inserção do bioproduto são o vascular, encapsulamento e mistura com outros ingredientes (Blaiszik et al., 2010). Vantajosamente, o encapsulamento promove uma proteção às bactérias e feito em formatos esféricos ou tubular há uma efetividade da bactéria viver um tempo maior, pois resistem melhor na preparação do betão. O *self-healing* se inicia quando há a ruptura da cápsula (Seifan et al., 2016). Cada estudo opta pelo tipo de inserção, assim como os ensaios a serem realizados, o que influencia nas dimensões dos provetes e também seu tempo de cura.

De uma maneira geral, um maior número de pesquisas é feito através da introdução de esporos de bactérias diretamente na mistura do betão. Dos artigos analisados, uma minoria inseria o bioproduto de maneira “vascular”, técnica na qual os agentes não entram em contato direto com o betão, pois usam essas estruturas ocas para se moverem (Seifan et al., 2016). Em relação aos ensaios, a resistência à compressão, absorção da água e análise microscópica foram feitos em praticamente todos os artigos analisados na Tabela 2.2. Por conta destes ensaios os provetes são geralmente cubos ou fatias de cilindros.

Entende-se através da análise da Tabela 2.2 que os investigadores usam diferentes linhas de pesquisas para avaliar o efeito do *self-healing* e contribuir para o desenvolvimento desse tema, como por exemplo Luo et al. (2015) que utilizaram tipos diferentes de ensaios para entender o comportamento das fendilhações face a diversos fatores externos.

Verifica-se dos estudos analisados que o processo de *self-healing* do betão é diretamente dependente de inúmeros fatores, como o tipo de bactéria, a sua concentração, a ativação das bactérias, os tipos e as quantidades de cada um dos componentes do betão, o modo de introdução da bactéria, o processo de cura (Khaliq & Ehsan, 2016). Um exemplo é o resultado do ensaio do Luo et al. (2015) que apresenta que diferentes condições de cura podem influenciar consideravelmente na eficiência da autorregeneração. A Figura 2.1 comprova tal resultado, pois evidencia que a cura húmida (25°C e 90% HR) é o pior método de cura, uma vez que a selagem da fenda, aberta por flexão diametral, não ocorre de maneira promissora.

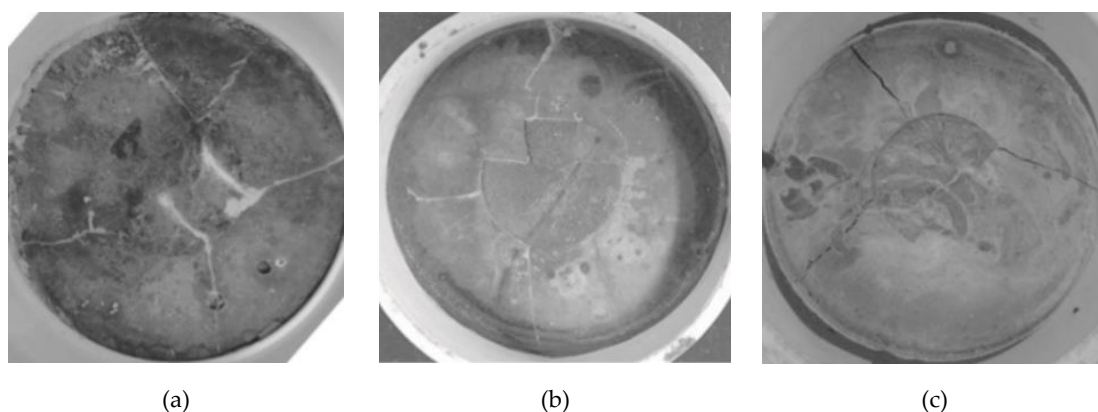


Figura 2.1. Análise da selagem das fendas em diferentes condições de cura: imersão em água (a); ciclos de molhagem-secagem (b); 25°C e 90% HR (c) (Luo et al.,2015)

Para além disso, há condicionantes e critérios que modificam a evolução e a reprodução da bactéria, os quais podem ser analisados na Tabela 2.3. Tais critérios são os pontos-base do início da pesquisa de betão com *self-healing* através de bactérias.

Tabela 2.3. Evolução das bactérias no betão segundo suas condicionantes e critérios (Gaylarde, 2003 consultado em Claudino et. al., 2017)

Condicionante	Crítérios
Água	Ambientes húmidos possuem uma maior propensão para o desenvolvimento de microrganismos.
Nutrientes	O tipo de nutriente disponível irá definir o microrganismo capaz de iniciar o processo. Esses nutrientes podem ser desde o aditivo orgânico utilizado na preparação do betão ou argamassa, como é o caso dos lignosulfonatos, compostos inorgânicos ou mesmo matéria orgânica resultante da morte de outros microrganismos.
pH	Normalmente bactérias se desenvolvem melhor em ambientes com pH mais ácido.
Temperatura	Temperaturas entre 20°C e 30°C são consideradas ideais para a maioria dos organismos.
Número de organismos	Existência de certo número de organismos viáveis, ou seja, capazes de se reproduzir.

Como as bactérias se desenvolvem melhor em condições ácidas, a introdução direta do agente no betão (condições alcalinas) influencia a atividade metabólica e, por conta disso, tem-se um tempo de vida limitado (Seifan et al., 2016). Segundo Jonkers & Schlangen (2008) as bactérias *alkaliphilic* e *endolithic* mostram uma grande vantagem no processo de *self-healing*, pois esses tipos de bacilos se reproduzem e sobrevivem sem comida ou oxigênio por um longo período.

Outra condicionante para a capacidade de *self-healing*, segundo Roig-Flores et al. (2015) é a maneira como ocorre a formação dos cristais dentro da fenda após a adição de agentes minerais ao betão. São divididos em quatro possibilidades diferentes da geometria da fenda em profundidade: fenda uniforme, tronco piramidal, convexo e côncavo, e cada um desses tem pontos que se precipitam os cristais mais facilmente. Tal fato pode ser relacionado com a formação de carbonato de cálcio quando se adiciona bactérias, pois, independente do agente de autorregeneração, a tendência é a formação inicial acontecer onde a fenda é menor ou mais estreita. Assim, quando a mineralização acontece dentro da fenda e não na superfície, há uma variância maior nos resultados dos ensaios, logo que cada provete tem um local de selagem de fenda diferente.

Uma das justificativas para o uso do betão de *self-healing* é quando se analisa os resultados dos ensaios de permeabilidade, e estes apresentam selagem da fenda ou uma selagem dos poros, pois traz como consequência uma maior proteção contra agentes químicos externos (Jonkers & Schlangen, 2008).

Outros ensaios como o de resistência são também analisados para validarem o uso do biobetão. Nos ensaios de resistência à compressão, quando se trata da bactéria *B. Pseudofirmus*, observa-se uma perda de resistência de quase 10% em relação ao betão sem a bactéria (Jonkers & Schlangen, 2008), entretanto alguns estudos apresentam como resultado de análises um aumento quando a razão de água e cimento é baixa (Edvardsen, 1999). Outros autores mostraram uma melhora significativa da resistência à compressão quando comparados com o betão comum, sendo o melhor comportamento ao sétimo dia com um aumento de 46%. Além disso, as deformações por tração também mostraram um efeito positivo, ou seja, a resistência à tração do betão com bactérias é melhor do que o comum (Echegaray et al., 2015).

Para Jonkers & Schlangen (2008) as bactérias devem ser introduzidas logo na preparação de betão para ocorrer a autorregeneração e é necessário já prever possíveis efeitos negativos que podem acontecer na resistência, pois os impactos das diferentes bactérias e a maneira como são introduzidas condicionam consideravelmente a compressão do betão e a sua eficiência (Khaliq & Ehsan, 2016). Como é mostrado na Figura 2.2, diferentes bactérias apresentam porcentagens de variação de resistência à compressão distintas.

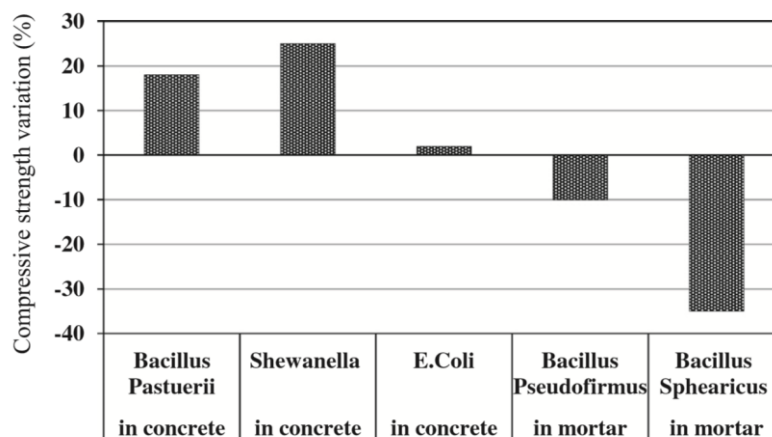


Figura 2.2. Efeitos de diferentes bactérias na resistência à compressão do betão (Khaliq & Ehsan, 2016)

No betão com bactérias são produzidas reações bioquímicas, como a transformação de lactato de cálcio em carbonato de cálcio, ou seja, uma conversão metabólica que resulta na autorregeneração das fendas. A Tabela 2.4 apresenta os microrganismos e nutrientes usados para produzir o carbonato de cálcio no betão.

Com relação ao desenvolvimento do *self-healing*, este acontece de maneira diferente em cada idade. A bactéria do gênero *Bacillus* mostra uma produção de carbonato de cálcio significativa depois da introdução de água; entretanto não se desenvolve de maneira promissora depois dos 7 dias de cura. Isto acontece por estar relacionado com a introdução dos esporos de bactérias (desprotegidos) diretamente na mistura do betão, os quais têm vida útil limitada depois do segundo mês (Jonkers, 2021).

Tabela 2.4. Microrganismos e nutrientes para produzir o carbonato de cálcio no betão (Seifan et al., 2016).

	Microorganism	Nutrient	Embedment in concrete
Bacterial metabolic conversion of organic acid	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Calcium lactate, calcium glutamate, yeast extract, and peptone	Direct
	<i>Bacillus pseudofirmus</i> and <i>B. cohnii</i>	Calcium lactate, calcium acetate, yeast extract, and peptone	Direct
	<i>B. cohnii</i>	Calcium lactate and yeast extract	Immobilized
	<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>		Immobilized
Ureolysis	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized
		Urea and calcium chloride	Direct
		Urea, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized
		Urea and calcium chloride	Direct
		Urea, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized
		Urea, calcium chloride, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized
		Urea, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized
		Urea, calcium chloride, and calcium acetate	-
	Urea, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized	
	<i>S. pasteurii</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Urea and calcium chloride	Direct
	<i>Bacillus sphaericus</i> <i>S. pasteurii</i>	Urea and calcium acetate	Direct
	<i>S. pasteurii</i>	Urea and calcium chloride	Immobilized
		Urea, calcium nitrate, and calcium chloride	-
		Urea and calcium nitrate	-
		Urea and calcium chloride	Immobilized
<i>S. pasteurii</i> and <i>Bacillus cereus</i>	Urea, nutrient broth, and calcium chloride	Direct	
<i>Bacillus amyloliquedaciens</i>	Urea, calcium acetate yeast extract, and glucose	-	
<i>Sporosarcina soli</i> , <i>Bacillus massiliensis</i> , <i>Arthrobacter crystallopoietes</i> and <i>Lysinibacillus fusiformis</i>	Urea and calcium chloride	Direct	
Denitrification	<i>Diaphorobacter nitroreducens</i> and <i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, calcium formate, calcium nitrate, and yeast extract	Immobilized

Além disso, os ensaios mostram que fendilhações com média de 0,15 mm conseguem-se fechar completamente, enquanto em outros tipos de betão autorregenerável só se fecham parcialmente (Jonkers, 2021). Luo et al. (2015) apresentam imagens das fendas com 0,3 mm e 0,8 mm de abertura, nas quais nitidamente se consegue perceber que no primeiro caso há uma autorregeneração quase completa, enquanto com a abertura maior já não (Figura 2.3).

Segundo Rodrigues (2018), uma concentração de 5% da bactéria *Bacillus megaterium* em um betão pode torná-lo significativamente mais resistente e durável. Isso acontece porque essa bactéria consome o hidróxido solúvel, proveniente do contato da água com o betão, e produz  $\text{CaCO}_3$ . Tal carbonato fecha as fendas e preenche os poros; os esporos bacterianos ficam dormentes até ocorrerem outras fendas e a água penetrar novamente. Os ensaios mostraram a melhoria da porosidade com a produção de cristais de carbonato de cálcio. Todos os ensaios

realizados mostraram resultados semelhantes, o que significa que há um comportamento constante desse bacilo.

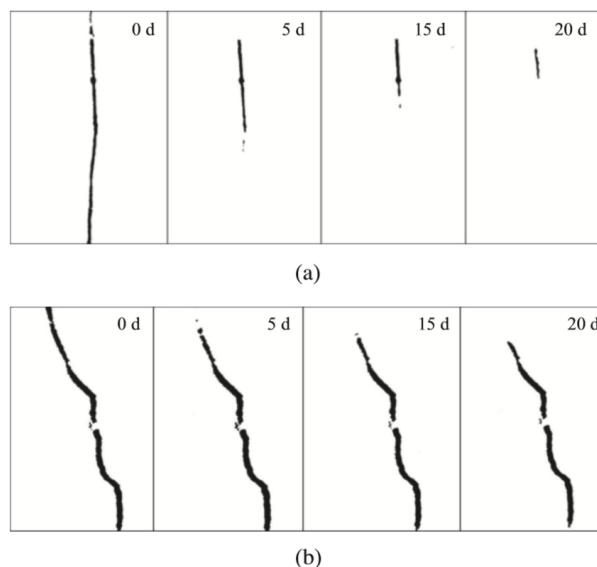


Figura 2.3. Imagens de mineralização e selagem por autorregeneração de fendas com: 0,3 mm (a); e 0,8 mm (b) (Luo et al., 2015)

Segundo ensaios realizados por Luo et al. (2015) com os esporos da bactéria *Bacillus sphaericus* encapsulada, a permeabilidade à água dos provetes que continham as bactérias era 10 vezes menor do que dos que não continham. Da mesma forma, a pesquisa feita por De Muynck et al. (2008) mostrou uma significativa perda de absorção da água dos provetes tratados com bactéria e fonte de cálcio.

As pesquisas referentes a agentes de *self-healing* colocados no betão são muitas no campo das bactérias, pois vários autores mostram um bom comportamento de fechamento da fenda (Stocks-Fischer et al., 1999). Reitera-se que a grande vantagem desse comportamento é a diminuição de reparações e substituição de estruturas, pois há uma selagem/colmatação das fendas de maneira natural, assim diminui significativamente o custo de futuras manutenções (Rodrigues, 2018).

Os autores Ferrara et al. (2018) em colaboração com a ação *COST* apresentam a quantificação da capacidade do *self-healing* através de três equações e também pelos valores dos índices de autorregeneração. Isto possibilita previsões e modelos de análises das características do biobetão.

Predominantemente os artigos e pesquisas deste campo tem profundos estudos sobre o tipo de bactéria e seu desenvolvimento. No entanto na síntese anterior priorizou-se a análise dos ensaios que podem ajudar na análise dos ensaios descritos no Capítulo 3. Além disso, a Universidade de Liubliana disponibilizou os resultados dos ensaios ainda não publicados (Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov, 2020) para análises e comparações diretas, eles foram igualmente realizados, assim como descrito no próximo capítulo.



## CAMPANHA EXPERIMENTAL

Embora, tal como se verificou no capítulo anterior, o *self-healing* possa ocorrer no betão através de diversos métodos e de diversas adições, o foco da presente dissertação é através da utilização de bactérias.

Os materiais e os procedimentos experimentais utilizados foram previamente definidos na campanha experimental interlaboratorial da ação *COST CA 15202 - SARCOS*, nomeadamente no *Round Robin Test RRT6 - Concrete with Bacterial Admixtures* (2020), e foram utilizados nos laboratórios de diferentes países.

A seguir serão descritos os procedimentos experimentais realizados com a finalidade inicial da participação da pesquisa *RRT6* e avaliação da capacidade de *self-healing* de um betão com bactéria. Os ensaios decorreram ao longo de sete meses.

Os ensaios do mês 0 e mês 1 foram realizados pela autora da dissertação, com auxílio da colega e engenheira Ingrid Nayara Firmino de Lima. Os ensaios do mês 3 foram executados pelos colegas e engenheiros Rafael Menezes e Thaís Oliveira de Sousa. Os ensaios no mês 6 foram realizados pelo Rafael Menezes e Ingrid Firmino. Realizou-se dessa maneira por conta da pandemia de COVID-19, que impossibilitou a deslocação da autora da dissertação para a realização dos ensaios a partir do Brasil. Entretanto, todos os ensaios foram acompanhados pela autora por vídeo chamada para amparo e indicações.

### 3.1. Materiais, provetes e cura

Para a realização dos provetes de betão, de referência e com bactérias, definiram-se os seguintes materiais e respectivos requisitos; muitos dos quais foram fornecidos a partir da TU Delft para todos os laboratórios participantes nos ensaios interlaboratoriais:

- Cimento - CEM I 42.5 N - providenciado pela TU Delft 25kg.
- Fibras de aço - ArcelorMittal HE 55/35 - providenciado pela TU Delft 2kg (Figura 3.1).
- Areia - agregados de quartzo, dimensão máxima de 8 mm – areia natural e cascalho de rio (ou disponível no local com dimensões máximas semelhantes) - Considerar a umidade presente na areia para ajuste dos pesos da areia e da água - utilizou-se areia natural.

- Superplastificante - Glenium 51 superplasticizer da BASF - providenciado pela TU Delft na forma líquida (Figura 3.1).

- Bioproduto com bactérias - partículas derivadas de lactato contendo esporos bacterianos e nutrientes - providenciado pela TU Delft na forma sólida (Figura 3.1).

A introdução das fibras de aço na mistura do betão serviram para garantir um reforço homogêneo e maior ductilidade; assim, se asseguraria um maior controle no processo da fendilhação forçada inicial (ACI 544.1R-96, 1996). No caso do superplastificante, a sua introdução pretendeu reduzir a quantidade de água de amassadura dos betões e uniformizar a respetiva trabalhabilidade, ou seja, que não diminuiria a consistência nem a resistência final entre os participantes do projeto *RRT6* (Pessoa et al., 2001).

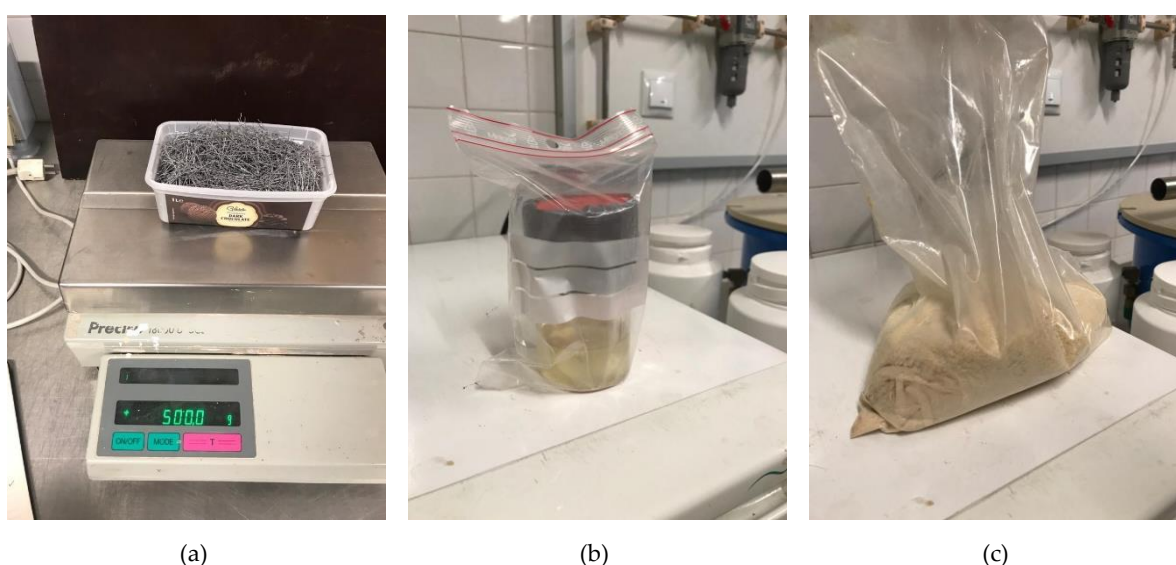


Figura 3.1. Materiais: fibras de aço (a); superplastificante líquido (b); e bioproduto com bactérias em pó (c)

A separação do material foi realizada de forma precisa através de balança com precisão de três casas decimais, balança com precisão de uma casa decimal, provetas e recipientes de separação. A Tabela 3.1 apresenta os materiais e valores que foram separados no dia de execução dos betões. A quantidade de cada betão produzido considerou seis provetes com medidas de  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ , além de 20% de desperdício do total. Os moldes utilizados foram feitos com material resistente de contraplacado marítimo e as medidas específicas.

A preparação dos materiais decorreu na manhã do dia 20 de outubro de 2020 no laboratório da FCT NOVA.

Os betões foram executados no mesmo dia no período da tarde com o auxílio de uma betoneira, apresentada na Figura 3.2. O processo de mistura foi realizado da seguinte forma: introdução dos agregados, cimento, bactérias e fibras na betoneira por esta ordem, e mistura por aproximadamente três minutos até que se obtivesse homogeneidade; em seguida, adição da água e do superplastificante e mistura por dez minutos até atingir a mistura homogênea do betão.

Tabela 3.1. Quantidade dos componentes para as misturas dos betões de referência e para *self-healing* definida pelo RRT6 do SARCOS (2020)

Material	Referência [kg/m <sup>3</sup> ]	Self-healing [kg/m <sup>3</sup> ]
Cimento - CEM I 42.5 N	326	324
Água	180	178
Areia natural 0/4	756	750
Brita 4/8	716	710
Fibras de aço	32	31,6
Superplastificante Glenium 51	0,4	0,4
Partículas com bactéria	0	8,4

Primeiramente foi executado o betão de referência, no qual não foram adicionadas bactérias. Somente em seguida foi realizado o betão com bactérias, evitando assim possíveis contaminações.

A Figura 3.2 mostra o processo da colocação dos betões nos moldes no laboratório da FCT NOVA.



Figura 3.2. Betoneira despejando o betão dentro do recipiente (a); moldagem dos provetes (b); e moldes preenchidos (c)

Foi aguardado um dia para a secagem inicial do betão e para os provetes puderem ser desmoldados. Os provetes foram submersos em dois reservatórios: os provetes de referência foram colocados no reservatório A e os com bactérias foram colocados no reservatório B.

### 3.2. Fendilhação forçada inicial

Todos os provetes foram mantidos imersos em água por 27 dias consecutivos até ao dia 16 de novembro de 2020, quando foram fendilhados.

Aos 28 dias de idade dos provetes de betão, estes foram sujeitos a flexão para abertura de fendas forçadas. Uma vez que a análise se daria em seis amostras de betão sem bactérias e seis amostras com bactérias, estes foram divididos em grupos de três. Ou seja, aberturas de três amostras de betão de referência com  $0,2 \pm 0,05$  mm e três de  $0,35 \pm 0,05$  mm; o mesmo para o betão com bactérias.

O equipamento utilizado para o procedimento da fendilhação forçada foi a máquina de tração universal Zwick, como mostra a Figura 3.3. Assegurou-se a velocidade de 0,015 mm/min e, de tempos em tempos, foram inseridos medidores de fendas para confirmar se a abertura desejada já havia sido atingida Figura 3.3. Tais medidores são espaçadores de 0,2 mm e 0,3 mm fornecidos pela TU Delft, em folha de cobre.

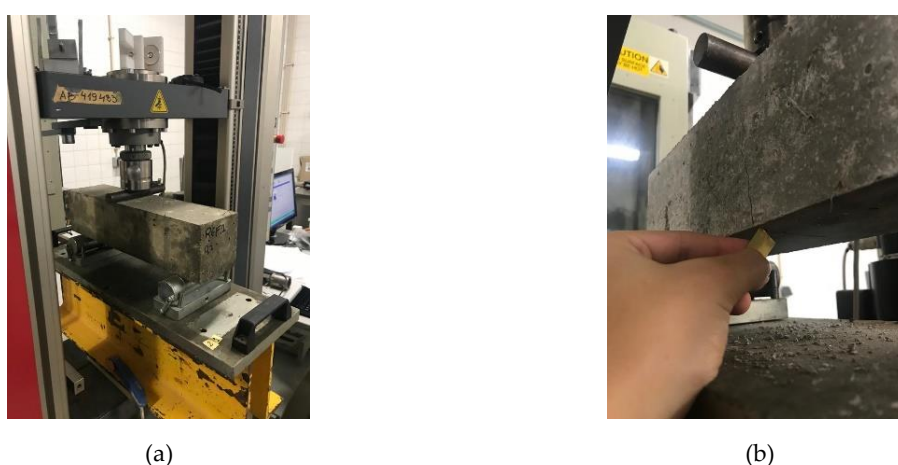


Figura 3.3. Equipamento para executar a fendilhação forçada (a); e medição da fendas (b)

Neste processo de fendilhação foram marcados os provetes, tendo os de referência as iniciais REF e os com bactérias SH.

Cada provete fendilhou com uma determinada tensão à flexão, cuja força está apresentada na Tabela 3.2. A respetiva resistência à flexão corre onde ao valor máximo da tensão de tração na camada mais externa e inferior do provete, onde apareceram as fendas que foram analisadas ao longo desta campanha experimental.

Tabela 3.2. Força à flexão induzida nos provetes

Provete	F [N]
REF 1 0,2	11900
REF 2 0,2	11800
REF 3 0,2	15000
REF 4 0,35	10000
REF 5 0,35	11010
REF 6 0,35	10060
SH 1 0,2	15965
SH 3 0,2	12220
SH 4 0,35	12080
SH 5 0,35	11880
SH 6 0,35	12014

Ao analisar as forças da Tabela 3.2 obtêm-se médias de 11628 N dos provetes de referência e 12832 N dos com bactérias. Isso representa que, assim como nos ensaios de Echegaray et al. (2015), a idade jovem há um efeito positivo na resistência à tração dos provetes com *self-healing* em comparação com os comuns.

Durante a realização deste procedimento um dos provetes com bactérias partiu-se devido a um desajuste do equipamento. Sendo assim, todos os ensaios realizados foram feitos com onze provetes, seis de betão comum (de referência) e cinco com bactérias.

Após o processo de fendilhação, e após todos os ensaios seguintes, os provetes voltaram a ser colocados nos respectivos reservatórios e posicionados com as aberturas para baixo, nunca em contato direto com o fundo do reservatório, mas sim sob apoios nas extremidades, como apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4. Condição esquemática de imersão dos provetes fendilhados em água para a cura

### 3.3. Métodos de ensaio

#### 3.3.1. Medição das fendas

Todos os onze provetes foram medidos com a assistência do microscópio de marca Olympus modelo Research Stereo SZH10 e de sua lupa binocular Olympus DF PL 2x-4 (Figura 3.5) e, de um medidor de fendas. Foram realizadas 8 marcações iniciais e 5 medidas em cada uma dessas marcações.



Figura 3.5. Lupa binocular do laboratório da FCT NOVA

Foram seguidas as indicações precisas definidas pelo guia da TU Delft, que foi responsável pela campanha experimental *RRT6* da ação *COST SARCOS*:

- As marcações iniciais não podem apresentar irregularidades como fendas paralelas, falta de agregados, falta de partículas.
- As marcações devem ter a distância de  $\pm 5$  mm da borda do provete.
- As marcações devem ter uma distribuição uniforme.
- Se não for possível a uniformidade, deve-se ter no mínimo 5 mm de diferença entre as medidas.
- Tal ensaio foi realizado ao mês 0, mês 1, mês 3 e mês 6, com a secagem prévia de um dia em condições ambientes de laboratório, após retirada da imersão.

É importante ressaltar que no último ensaio, do sexto mês, usou-se um medidor de fendas diferente dos meses anteriores.

### **3.3.2. Permeabilidade à água**

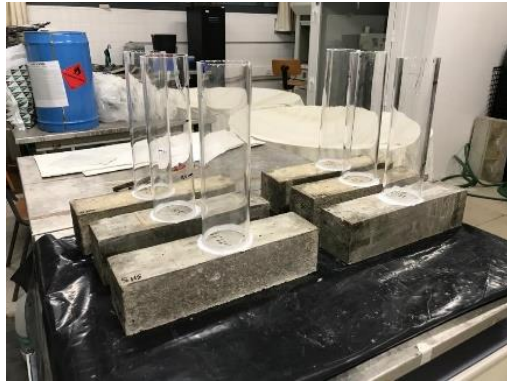
Os ensaios da permeabilidade à água foram realizados nas mesmas idades dos provetes em que foram feitas as medições das fendas, ou seja, no mês 0, mês 1, mês 3 e mês 6 e em todas as amostras em condições de secagem de um dia em condição ambiente.

Para este ensaio, sela-se um tubo acrílico transparente com aproximadamente 900 mm de diâmetro interior na superfície fendilhada do provete, com silicone "*Bison acrylaatkit 30 minuten*" (fornecido pela TU Delft) usado no ensaio do mês 0, e "*Ceys silicone transparente 30 minutos*" usado nos outros três ensaios. O produto é passado no perímetro exterior do tubo assegurando uma vedação completa. Ao fim de 1 dia de secagem do silicone procede-se ao ensaio.

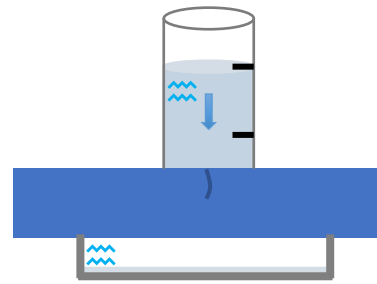
O processo de ensaio consiste em medir o tempo da passagem de um litro de água. Especificamente, aciona-se o cronômetro no momento em que se coloca 1,5 L de água (medido em uma balança de precisão) e o mesmo é parado quando a água atinge a marca de 0,5 L, como é apresentado na Figura 3.6. Caso este tempo ultrapasse 20 min, avalia-se o volume de água que passou pela fenda, ou seja, a altura da marcação 1,5 L até a superfície da água.

No mesmo dia em que foram medidas as fendas, executou-se a colagem dos tubos transparentes nos provetes REF 1, REF 2, REF 3, SH 1 e SH 3.

Depois da análise de tais provetes, foram colados os tubos, esperou-se pelo mesmo período de secagem e foram executados os ensaios nos provetes REF 4, REF 5, REF 6, SH 4, SH 5 e SH 6, assim como representa a Figura 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.6. Provetes com os tubos transparentes de medição no laboratório da FCT NOVA (a); e representação esquemática do tubo transparente sobre o provete (b)

Após a medição de todos os tempos, foi calculada a eficiência da selagem da fenda através da Equação 3.1:

$$SE = \frac{Q_{REF}(t) - Q_{SH}(t)}{Q_{REF}(t)} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.1})$$

Na Eq. 3.1:

$SE$  – eficiência da selagem da fenda calculada no período de ensaio (t)

$Q_{REF}(t)$  – quantidade de água que passou pela fenda do provete sem bactéria no período do ensaio (t)

$Q_{SH}(t)$  – quantidade de água que passou pela fenda do provete com bactéria no período do ensaio (t)

O próximo capítulo abordará os resultados obtidos nos ensaios, sua discussão e comparação com resultados de outros autores.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são abordados os resultados dos ensaios realizados nos laboratórios do DEC da FCT NOVA, que são comparados diretamente com os valores obtidos pela Universidade de Liubliana que é participante dos ensaios interlaboratoriais (resultados não publicados) (Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov, 2020). Para as discussões pertinentes e possíveis comparações utilizaram-se ainda outras publicações, que foram citadas e sintetizadas anteriormente.

A Tabela 2.2 sintetiza as discussões e os resultados de alguns artigos analisados e, como apresentado no Capítulo 2, os diversos autores discutem sobre esse tema de acordo com cada linha de pesquisa. Nota-se que muitos realizaram ensaios para entender o comportamento do betão com *self-healing* em termos de resistência à compressão, diminuição da porosidade e também a formação dos minerais e cristais nas amostras. As cinco referências bibliográficas utilizadas como referência para a discussão (De Muynck et al., 2008; Jonkers & Schlangen, 2008; Jonkers et al., 2010; Khaliq & Ehsan, 2016; Luo et al., 2015) seguem uma linha de pesquisa que estuda quais são as características e fatores que influenciam a capacidade de *self-healing*, assim como os efeitos causados quando introduzida a bactéria no betão e exposto a determinadas condições ambientes.

No decorrer dos ensaios realizados nos laboratórios do DEC da FCT NOVA, nem todas as marcações puderam ser realizadas, pois começaram a surgir “estalactites” nos provetes e algumas partes das fissuras estavam fechadas. A Tabela 4.1 apresenta as fotografias referentes a esta eventualidade com detalhamento dos provetes e da época.

Observa-se que os provetes com betão com bactéria apresentam uma formação amarelada e os provetes de referência, uma formação esbranquiçada. As imagens da Universidade de Liubliana mostram uma semelhante formação nos provetes com *self-healing*, entretanto não amarelada e sim esbranquiçada (Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov, 2020). Diferentemente do que os autores Jonkers et al. (2010) apresentam, há formação de cristais depois dos 28 dias, como comprovado pelas imagens abaixo.

Tabela 4.1. Síntese das “estalactites” nos provetes executados na FCT NOVA

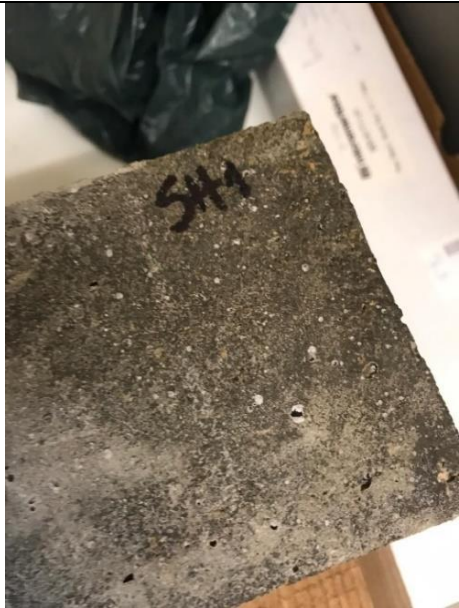
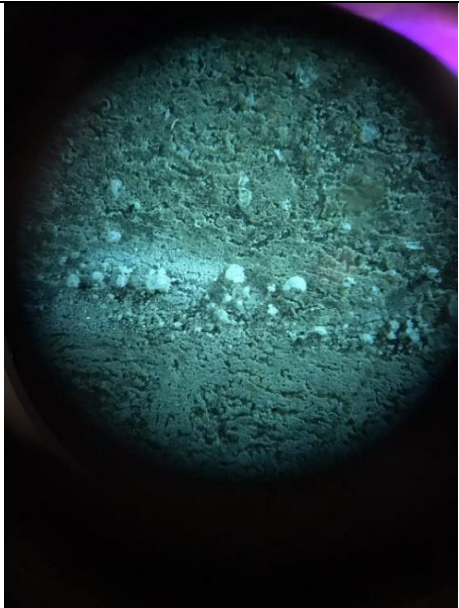
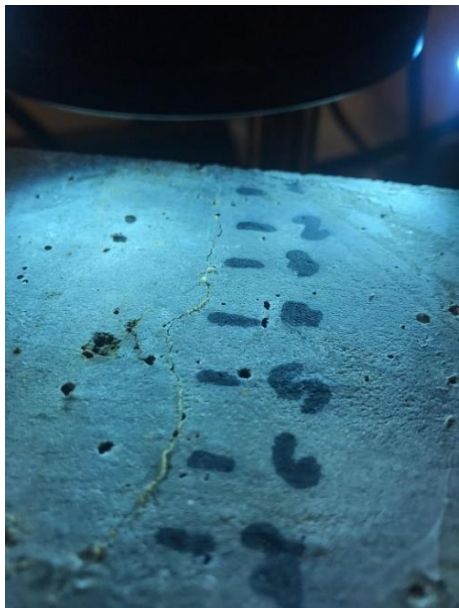

<b>Mês 0 - 0 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes sem bactéria: todos apresentavam pequenas bolas esbranquiçadas	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular
<b>Mês 1 - 29 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes com bactéria: apenas SH1 e SH3 apresentavam "estalactites" amareladas	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular, mostrando marca que, na figura ao lado está junto a número

Tabela 4.1. Síntese das "estalactites" nos provetes executados na FCT NOVA (cont.)


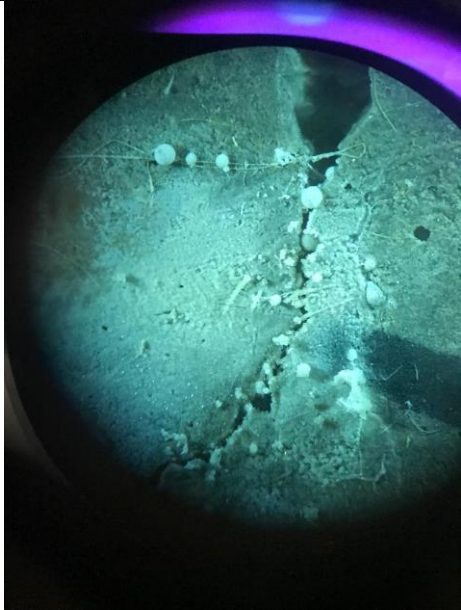
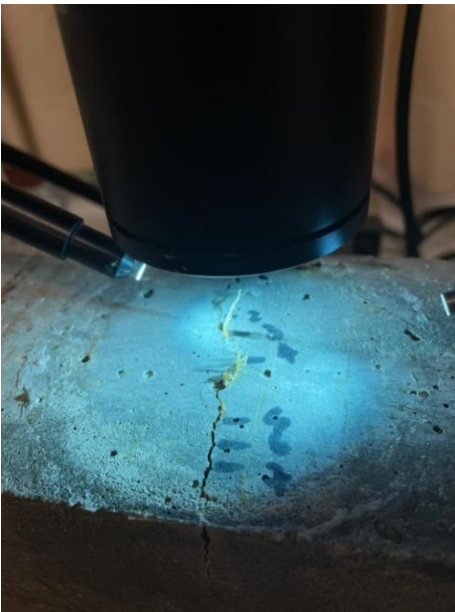

<b>Mês 1 - 29 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes sem bactérias: todos apresentavam "estalactites" esbranquiçadas	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular, mostrando marca que, na figura ao lado está junto a número
<b>Mês 3 - 91 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes com bactéria: todos apresentavam "estalactites" pequenas e amareladas, exceto o SH6 que apresentava uma maior	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular, mostrando marca que, na figura ao lado está junto a número

Tabela 4.1. Síntese das "estalactites" nos provetes executados na FCT NOVA (cont.)

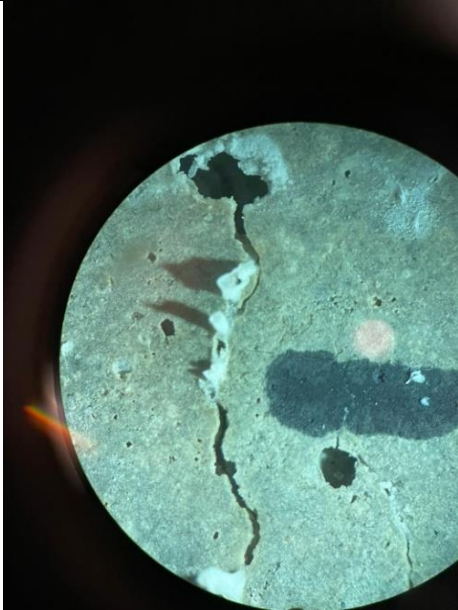


<b>Mês 3 - 91 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes sem bactérias: todos apresentavam "estalactites" esbranquiçadas	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular, mostrando marca que, na figura ao lado está junto a número
<b>Mês 6 - 182 dias depois da fendilhação</b>	
Provetes com bactéria: todos apresentavam "estalactites" pequenas e amareladas, exceto o SH6 que apresentava uma maior	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular

Tabela 4.1. Síntese das “estalactites” nos provetes executados na FCT NOVA (cont.)

Mês 6 - 182 dias depois da fendilhação	
Provetes sem bactérias: todos apresentavam "estalactites" grandes e esbranquiçadas	
	
Fotografia normal	Fotografia da lupa binocular, mostrando marca que, na figura ao lado está junto a número

É possível que os provetes de referência tenham sido contaminados, o que pode justificar a formação das "estalactites". Essa contaminação pode ter acontecido, por exemplo, através de resíduos consolidados no fundo do reservatório. Os autores Roig-Flores et al. (2015) explicam que as diferentes formações dos cristais e minerais podem influenciar o resultado dos ensaios e, em alguns momentos, os tornam imprecisos e inconfiáveis. Então entende-se que essa contaminação pode ter condicionado o ambiente à produção de minerais e cristais de maneira indesejada nos provetes de referência, os quais não apresentam bactéria e não era esperado ter uma selagem da fenda.

A Tabela 4.2 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados que conseguiram ser medidos e obtidos do ensaio de abertura das fendas, mesmo com essas formações que não estavam previstas (todas as medições são encontradas no Anexo A.1). A média foi calculada através da medição de oito localizações fixas com cinco medições em cada uma delas, de acordo com o documento base *SARCOS RRT: Guidelines for crack width measurement - Preliminary descriptio* (Van Mullem et al., 2019). Entretanto, essas 40 medidas solicitadas dificilmente foram atingidas em todos os provetes e em todas as idades. Este ensaio representa quantitativamente a selagem da fenda.

Quando se analisa as médias das medidas da Tabela 4.2 entende-se que a fendilhação forçada não obteve as aberturas desejadas, pois os provetes de referência que deveriam estar com 0,2 mm estão com 0,5 mm, assim como os provetes com bactéria. E aqueles que deveriam estar com 0,35 mm estão com valores superiores. Um dos fatores que pode ter condicionado

esse processo de fendilhação é o dano na fenda quando se introduz a folha de cobre como medidor, observação também notada pela Universidade do Minho em seus resultados não publicados (Neves & ZahabiZadeh, 2021).

Tabela 4.2. Médias e desvios padrão da abertura de fendas

Mês	0		1		3		6	
	Média [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio padrão [ $\mu\text{m}$ ]	Média [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio padrão [ $\mu\text{m}$ ]	Média [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio padrão [ $\mu\text{m}$ ]	Média [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio padrão [ $\mu\text{m}$ ]
REF 1 0,2	341	107	288	104	219	59	50	41
REF 2 0,2	721	79	710	95	660	132	669	289
REF 3 0,2	446	145	379	168	213	101	38	81
REF 4 0,35	340	184	320	135	275	141	242	234
REF 5 0,35	603	138	581	107	583	125	206	285
REF 6 0,35	547	77	623	101	520	76	188	260
SH 1 0,2	649	89	618	121	589	84	547	181
SH 3 0,2	282	74	198	54	173	44	166	126
SH 4 0,35	574	126	486	140	520	118	332	343
SH 5 0,35	584	58	571	54	530	45	620	181
SH 6 0,35	696	92	637	113	547	141	508	332
Média REF 0,2	<u>503</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>459</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>364</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>253</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>
Média REF 0,35	<u>497</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>508</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>459</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>212</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>
Média SH 0,2	<u>465</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>408</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>381</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>356</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>
Média SH 0,35	<u>618</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>565</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>532</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>	<u>487</u>	<u><math>\mu\text{m}</math></u>

Já a Universidade de Liubliana apresenta médias dos provetes de 0,2 mm com 0,167 mm e provetes de 0,35 mm com 0,248 mm, valores muito mais próximos dos desejados (Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov, 2020).

Entretanto, como apresentado por Luo et al. (2015), a abertura da fenda afeta os resultados e comparações com outros autores. Assim, entende-se que a discussão confrontando outros autores é complexa quando se analisa a dimensão da fenda, pois esta é um fator condicionante para a capacidade e eficiência do *self-healing*.

Dando continuidade à análise, os dados decorrentes do ensaio de permeabilidade à água são expressos em minutos (Anexo A.2). O ensaio apresenta a passagem de água pela fenda, o que representa indiretamente a evolução da selagem. Com esses valores se calcula a taxa de fluxo da água (litros/minuto) de todos os provetes apresentados na Tabela 4.3. Estes são resultados diretos do ensaio. Entretanto, para análise de dados, é preciso calcular a eficiência da vedação do método de cura pela Equação 3.1 descrita no Capítulo 3.3.2.

Observação: o provete SH 3 0,2 e o REF 3 0,2 passaram de 20 minutos no ensaio de permeabilidade à água. O procedimento neste caso é anotar a medida da marcação de 1,5 l no tubo acrílico (marca superior) até a superfície de água restante, ou seja, água que passou pela fenda nos 20 min de ensaio. Nos ensaios do SH 3 0,2: mês 1, a altura medida foi de 5,2 cm, no mês 3 de 1,5 cm e mês 6 de 4 cm e, no provete REF 3 0,2 no ensaio do mês 6 a altura foi de 14,5 cm.

Tabela 4.3. Taxa de fluxo da água obtidos no ensaio de permeabilidade à água

Mês	0	1	3	6
<b>Provete</b>	<b>Permeabilidade à água [litros/minuto]</b>			
REF 1 0,2	0,192	0,096	0,060	0,060
REF 2 0,2	0,923	0,550	0,480	0,536
REF 3 0,2	0,355	0,231	0,089	0,041
REF 4 0,35	0,265	0,109	0,078	0,073
REF 5 0,35	0,377	0,201	0,078	0,051
REF 6 0,35	0,682	0,395	0,300	0,462
SH 1 0,2	0,652	0,645	0,465	0,500
SH 3 0,2	0,076	0,015	0,004	0,011
SH 4 0,35	0,480	0,387	0,373	0,423
SH 5 0,35	0,638	0,492	0,480	0,309
SH 6 0,35	0,789	0,682	0,952	0,682

A eficiência de vedação calculada no tempo de ensaio (SE) calculada pela Equação 3.1:

- 1° ensaio (mês 0): SE = 13,18 %
- 2° ensaio (mês 1): SE = 68,45 %
- 3° ensaio (mês 3): SE = 151,30 %
- 4° ensaio (mês 6): SE = 88,97 %

Segundo os resultados acima, o maior grau de *self-healing* aconteceu aos 91 dias (mês 3). Este resultado é diferente das análises de Jonkers (2021), que afirma que a partir do segundo mês a produção de carbonato de cálcio é limitada, logo que a duração da vida dos esporos de bactéria é restrita a um a dois meses. Esses valores de SE são imprecisos, pois fazem uma comparação direta com os provetes de referência, os quais foram fortemente afetados com a formação de “estalactites”.

Para efeito de análise, o que se nota é que, mesmo surgindo imprevistos como estalactites e medições feitas por pessoas diferentes, poucos números foram diferentes da expectativa e há uma certa constância nos resultados dos ensaios de permeabilidade à água e medição das fendas. Assim, para melhor entendimento dos resultados dos ensaios realizados, foram feitos gráficos para uma melhor compreensão e para possibilitar discussão. As Figuras 4.1 e 4.2 são a representação dos resultados tratados e obtidos pela medição das fendas através da lupa binocular. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os resultados do ensaio de permeabilidade à água.

Com a análise das Figuras 4.1 e 4.2, compreende-se que houve uma selagem das fendas dos provetes com *self-healing*, pois há uma diminuição das medidas da abertura das fendas. Entretanto, alguns não apresentaram esse comportamento, como por exemplo o provete SH 5 0,35. Diferentemente do que era esperado dos provetes de referência, valores próximos à abertura inicial, estes também apresentaram valores de fechamento de fenda, principalmente do terceiro para o sexto mês. Outra observação que pode ser feita pelas figuras foi que o betão de

referência (sem bactérias) teve uma discrepância de resultados, diferente dos com bactéria que tiveram uma maior linearidade na abertura da fenda. Uma possível explicação para esses comportamentos são as dimensões das “estalactites” e o modo como a profundidade da fenda foi preenchida, pois, pela análise das imagens da Tabela 4.1 e também laboratorial, a “estalactite” esbranquiçada aparenta ser mais espessa e rígida.

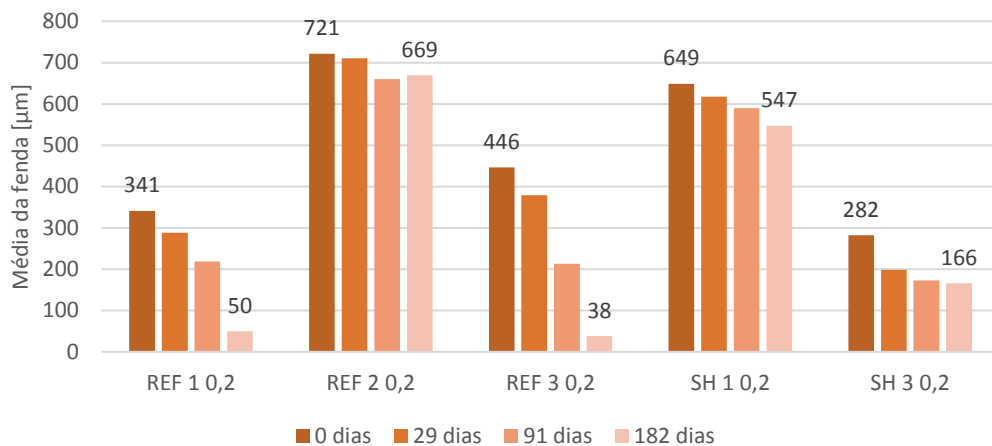


Figura 4.1. Abertura de fendas dos provetes de referência e com bactéria com abertura inicial de 0,2 mm, ao longo do tempo

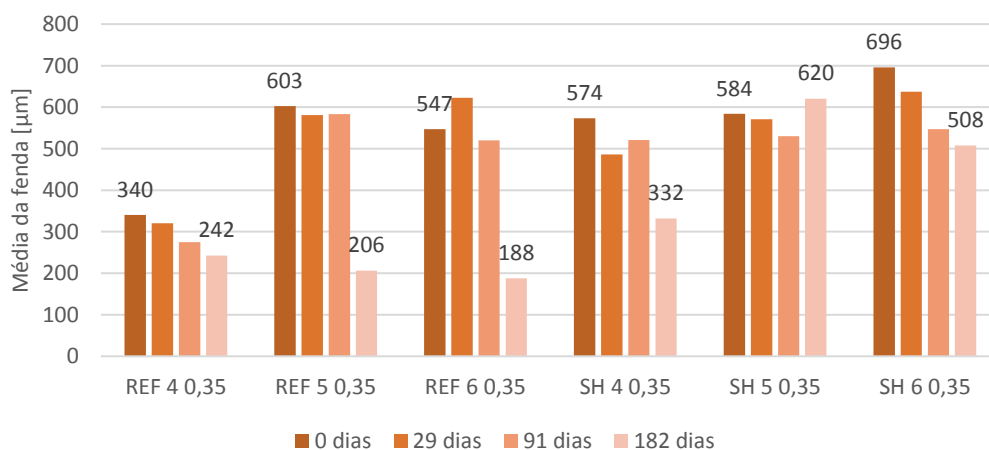


Figura 4.2. Abertura de fendas dos provetes de referência e com bactéria com abertura inicial de 0,35 mm, ao longo do tempo

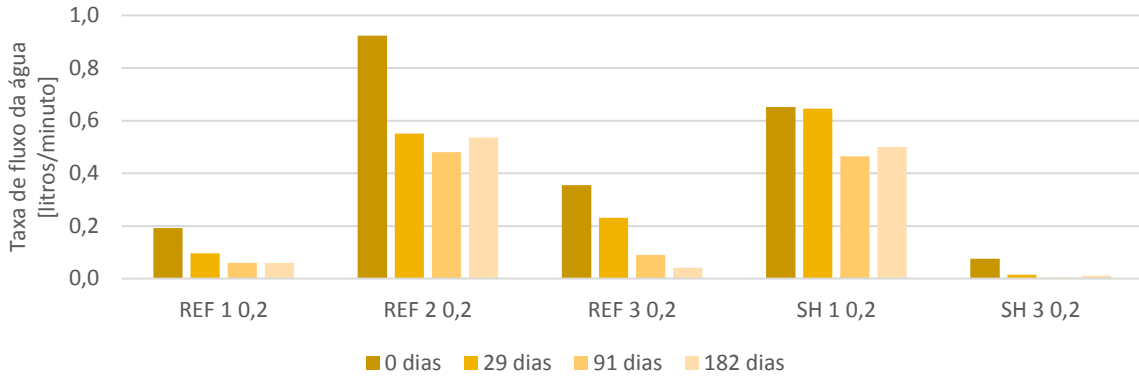


Figura 4.3. Ensaio de permeabilidade à água dos provetes de referência e de bactéria com abertura inicial de 0,2 mm, ao longo do tempo

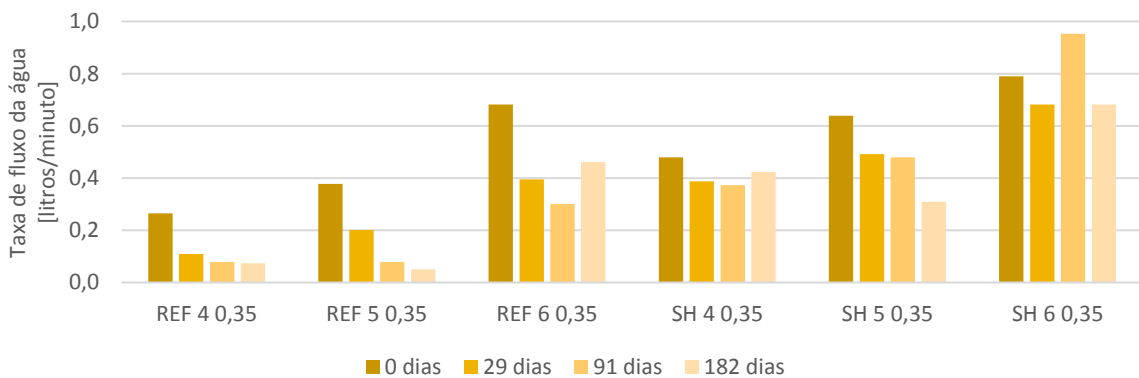


Figura 4.4. Ensaio de permeabilidade à água dos provetes de referência e de bactéria com abertura inicial de 0,35 mm, ao longo do tempo

Para além disso, foi observado que, como esperado, houve uma diminuição da taxa de fluxo segundo o ensaio de permeabilidade à água na maioria dos provetes com *self-healing*. Mas pela análise das Figuras 4.3 e 4.4 percebe-se que o comportamento não acontece linearmente, pois o provete SH 4 0,35 aumentou a taxa no último ensaio do mês 6 e o provete SH 6 0,35 aumentou no ensaio do mês 3. Através dos resultados quantitativos do ensaio de permeabilidade à água realizados no DEC da FCT NOVA, parece ter ocorrido uma diminuição nos poros dos provetes do betão com bactéria; justifica-se através das conclusões dos ensaios realizados por Rodrigues (2018), que afirma que quanto mais o carbonato de cálcio preenche os vazios, menor será a porosidade.

Os ensaios de De Muynck et al. (2008) mostram uma diferença entre os resultados dos provetes com e sem bactéria: provetes com bactéria têm valores consideravelmente menores de absorção da água. Entretanto, essa característica não pode ser afirmada de acordo com as Figuras 4.3 e 4.4, com exceção do provete SH 3 0,2.

Nos provetes de referência percebe-se uma maior constância na selagem, ou seja, os valores da taxa de fluxo de água diminuem proporcionalmente ao mês anterior (Figura 4.3 e 4.4). Porém, igual ao ensaio de medições, era esperado que os provetes sem bactéria não apresentassem uma mudança da taxa de fluxo da água; a possível justificativa para não ter acontecido isso é a contaminação destes que influenciaram consideravelmente na abertura das fendas. Também diferente do esperado, quando se analisa os resultados da Universidade de Liubliana se nota uma selagem da fenda dos provetes de referência tanto pelo ensaio de medição quanto pelo ensaio de permeabilidade à água (Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov, 2020). Todos os provetes apresentam um fechamento de fenda mais considerável até aos 32 dias (mês 1), assim como em alguns dos resultados das Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4.

A relação entre abertura de fendas e permeabilidade à água é analisada na Figura 4.5. Nesta comparou-se apenas provetes com bactéria, pois os provetes de referência não apresentaram resultados condizentes com o esperado.

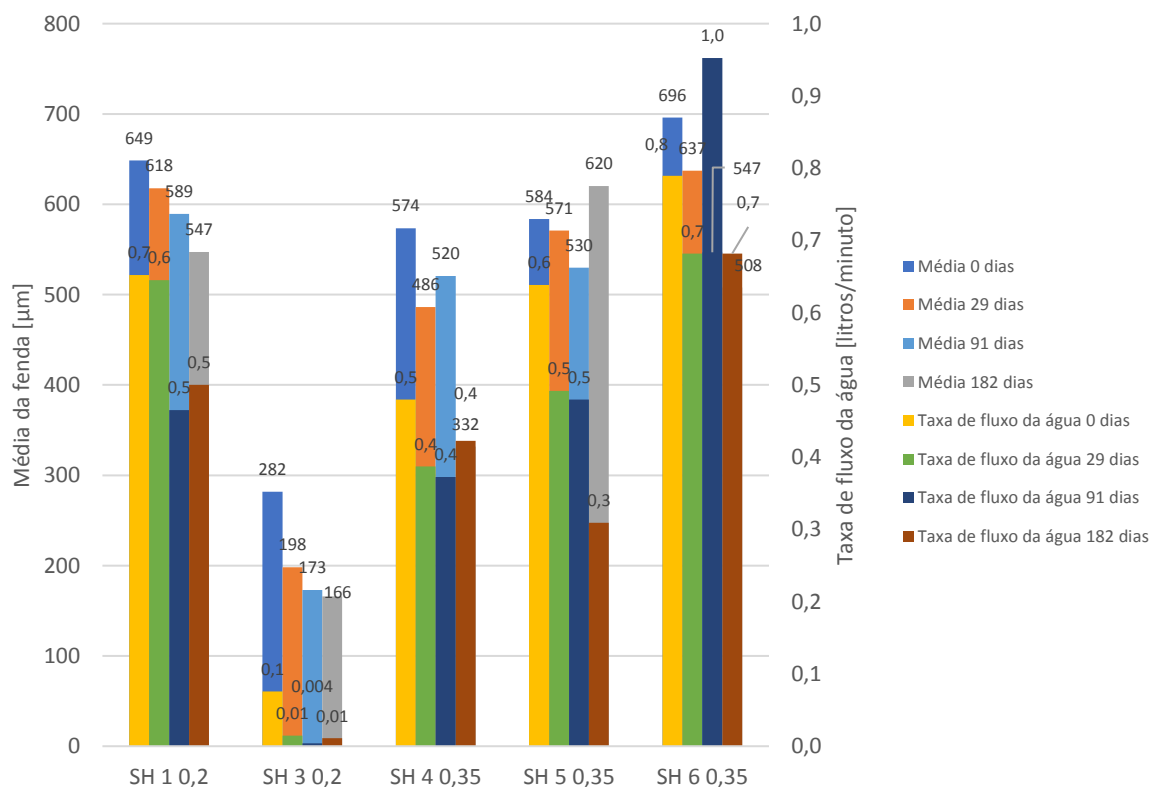


Figura 4.5. Média da abertura de fendas e taxa de fluxo da água dos provetes com bactéria

A partir da observação da Figura 4.5, pode-se compreender que não há um padrão nos resultados dos ensaios realizados; porém há uma sutil constância de que quanto menor a média da abertura da fenda, menor será a taxa de fluxo da água. Tal condiz com o esperado e a realidade, pois quanto mais selada a fenda estiver, menos volume de água passará por ela no momento do ensaio. Na comparação com os resultados da Universidade de Liubliana, apresentados em Jakubovskis & Bokan-Bosiljkov (2020), o que se verificou foi o mesmo, sem

padrão real, mas com uma leve tendência de resultados. Esta análise se enquadra no referido por Khaliq & Ehsan (2016): a fendilhação depois de 28 dias de cura proporciona uma maior densificação da microestrutura do carbonato de cálcio dentro da fenda do betão com *self-healing*. Entretanto, o tempo de cura tem sua capacidade potencializada dentre 3 a 7 dias - ou seja, a fendilhação forçada inicial da campanha experimental nos laboratórios da FCT não aconteceu no período de cura que otimiza o processo de *self-healing*; porém, mesmo assim, quando se fendilha aos 28 dias, há a cristalização na profundidade da fenda.

Em contrapartida, como dito anteriormente, o betão preparado para avaliar a capacidade do *self-healing* foi executado no laboratório da FCT NOVA com partículas derivadas de lactato contendo esporos bacterianos e nutriente. Segundo Jonkers & Schlangen (2008) a preparação com dois componentes o torna mais propício a melhor desenvolvimento e formação de cristais.

Segundo a Equação 2.1 de Roig-Flores et al. (2015), os valores obtidos dos provetes com bactéria são os apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Cálculo da Taxa de *self-healing* segundo Roig-Flores et al. (2015)

Provete	Taxa de <i>self-healing</i>
SH 1 0,2	0,233
SH 3 0,2	0,853
SH 4 0,35	0,120
SH 5 0,35	0,515
SH 6 0,35	0,136

Nesta análise da Tabela 4.4 os valores dos provetes de referência também não foram comparados, uma vez que o esperado era que estes apresentassem valores próximos a zero; entretanto, não se obteve esse resultado. Isto deve ter sido decorrente, como dito anteriormente, do crescimento de substâncias dentro da profundidade da fenda.

Em relação aos provetes que continham as bactérias pode-se perceber que o provete SH 3 0,2 teve uma disparidade em relação aos outros, pois pode-se verificar uma maior taxa de *self-healing* quando a fendilhação é menor (medida na realidade com aproximadamente 0,282 mm) (Tabela 4.4). Luo et al. (2015) limita o efeito do *self-healing* para fendas maiores de 0,8 mm, o que justifica o valor dos provetes com abertura 0,35 mm, no real 0,618 mm de média, serem menores, mas não deixarem de realizar o processo de formação de carbonato de cálcio.

Quando se calcula a média da taxa de *self-healing* (Equação 2.1) do primeiro, terceiro e sexto mês obtém-se respectivamente 0,19 , 0,25 e 0,23. Ou seja, o *self-healing* acontece de maneira mais promissora aos 91 dias (mês 3); assim como apresentado acima na análise da eficiência de vedação (Equação 3.1).

Os estudos citados no Capítulo 2 apresentam também outros tipos de análises, como por exemplo a resistência mecânica; no entanto, não foi realizado este tipo de ensaio no DEC

da FCT NOVA e, por conta disto, não são comparados nem analisados valores. Mas pode-se afirmar que o tipo de bactéria e a proporção de materiais utilizados na mistura do betão são fatores de grande influência nesta característica.

Finalmente, com este estudo e análise de dados, pode-se perceber que há uma tendência de selagem das fendas dos provetes com bactérias, diminuindo os valores da abertura da fenda e da taxa do fluxo da água, mesmo sendo dificilmente comparáveis e tendo ocorrido várias condicionantes na realização desses procedimentos.

## 5. CONCLUSÃO

Ao final deste estudo organiza-se esta conclusão a partir da análise e consideração de todos os resultados observados ao longo do trabalho com o propósito de avaliar a capacidade de autorregeneração do biobetão com ênfase nas bactérias.

Para uma melhor compreensão das condicionantes, dos desafios, das diferentes maneiras de estudar o betão com *self-healing* analisaram-se diversas publicações sobre o tema, nomeadamente as que definiam os procedimentos experimentais desenvolvidas no âmbito da ação *COST SARCOS (CA 15202)*. Para a campanha experimental a TU Delft enviou o bioproducto e alguns dos outros materiais para a produção de betões de referência e o com bactérias, moldaram-se os provetes e colocaram-se em cura. Realizou-se a fendilhação forçada dos provetes e através de ensaios avaliou-se o fechamento dessas fendas.

Por conta dos imprevistos ocorridos durante a campanha experimental, não se pode comprovar quantitativamente através dos resultados dos ensaios realizados nos laboratórios da FCT NOVA que há uma eficiência da ação do *self-healing* com as bactérias utilizadas, nem afirmar que é viável utilizar essa técnica em construções novas ou na reparação das existentes. Entretanto, pode-se dizer que os resultados dos ensaios puderam identificar uma leve selagem das fendas e dos poros dos provetes de betão produzidos com bactérias.

Outra conclusão que esse trabalho traz é que inúmeros fatores influenciam a qualidade e capacidade do *self-healing* de um betão, e isso dificulta a comparação dos resultados. Os principais aspectos a serem levados em consideração para a avaliação da capacidade de autorregeneração são o tipo de bactéria, como foi feita a inserção do bioproducto no betão, os componentes e quantidades utilizados na preparação do betão, a cura dos provetes, a idade que ocorre a fendilhação, sua abertura, a idade que decorrem os ensaios de avaliação. Além disso, uma grande limitação na pesquisa sobre a autorregeneração de um biobetão é o tamanho da abertura das fendas. Nos ensaios interlaboratoriais notou-se que, quanto maior a fenda, menor será a capacidade de selagem. Em escala numérica: 0,2mm de abertura de fenda teria um bom desempenho e maiores de 0,8mm quase não se notaria o efeito do *self-healing*.

As análises sobre o betão com bioproducto são diversificadas e ainda precisam ser melhor desenvolvidas para poder se ter afirmações qualitativas e quantitativas e, depois disso espera-se que essa técnica possa ser aplicada em larga escala e com precisão sobre suas características e funcionalidades a longo prazo. Como esse campo de pesquisa ainda tem muito espaço para estudos e discussões, pois é um assunto relativamente novo e com várias lacunas a serem explicadas, através desta dissertação procurou-se contribuir mais um pouco na evolução do conhecimento na área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 544.1R-96 (1996). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI.
- Blaiszik, B. J., Kramer, S. L., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., & White, S. R. (2010). Self-healing polymers and composites. *Annual Review of Materials Research*, 40, 179-211. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104532>
- Cabrera-Madrid, J. A., Escalante-García, J. I. & Castro-Borges, P. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *Revista ALCONPAT*, 6 (1), 64-83. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.116>
- Claudino, C. M. A., Da Cunha Gomes, B. M., Neves, Y. T. & Das Vitórias Nascimento, M. (2017). Presença de bactérias no concreto: uma análise da biodeterioração e bioregeneração. CONPAR2017 – Recife.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N. & Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 1005-1014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>
- Dick, J., De Windt, W., De Graef, B., Saveyn, H., Van der Meeren, P., De Belie, N., & Verstraete, W. (2006). Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species. *Biodegradation*, 17(4), 357–367. <https://doi:10.1007/s10532-005-9006-x>
- Echegaray, C. F. P. L., Rojas, S. K. H. & Acapana, E. S. (2015). Los beneficios del uso de bacterias en el concreto auto-regenerante. *Revista CIVILIZATE*, 7, 36-38.
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. In: *Innovation in concrete structures: Design and construction*. Thomas Telford Publishing, 473-487.
- EN 12390-8 (2009). Testing hardened concrete. Part 8: depth of penetration of water under pressure. CEN, Brussels.
- Ferrara, L., Asensio, E. C., Monte, F. L., Flores, M. R., Moreno, M. S., Snoeck, D., Van Mullem, T. & De Belie, N. (2018). Experimental Characterization of the Self-Healing Capacity of Cement Based Materials: An Overview. *Proceedings*, 2(8), 454. <https://doi:10.3390/icem18-05322>

- Gollapudi, U.K., Knutson, C.L., Bang, S.S., Islam, M.R., 1995. A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*, 30, 695-705. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)00435-W](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)00435-W)
- Gupta, S., Dai Pang, S. & Kua, H. W. (2017). Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review. *Construction and Building Materials*, 146, 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>
- Jakubovskis, R. & Bokan-Bosiljkov, V. (2020). Crack width measurement of reference and bacteria concrete specimens - water absorption and chloride ingress. SARCOS RRT6. University of Ljubljana.
- 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. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 62(4), 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.03.002>
- Jonkers, H. M. & Romero-Rodriguez, C. (2020). RRT6 Concrete with Bacterial Admixtures - SARCOS – Interlaboratory Testing. Delft University of Technology.
- Jonkers, H. M. & Schlangen, E. (2008). Development of a bacteria-based self-healing concrete. In: *Proc. int. FIB Symposium*, 425-430.
- Jonkers, H. M. (2007). Self-healing concrete: a biological approach. In: *Self-healing materials*. Springer, Dordrecht, 195-204.
- Jonkers, H. M. (2021). Bacteria-based self-healing concrete. In-*Genium*, (1), 84-93. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119709>
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36 (2), 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
- Khaliq, W. & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>
- LNEC E 464 (2007). Especificação: Metodologia prescritiva para a vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais. LNEC, Lisboa.
- Luo, M., Qian, C. & Li, R. (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 87, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117>

- Neves, A. R. R. & ZahabiZadeh, B. (2021). Preliminary tests in order to evaluate the facilities and test procedures mentioned in the protocol to assess healing efficiency. SARCOS. University of Minho.
- NP EN 206 (2013+A1:2017). Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ, Caparica.
- Oliveira, A., Pereira, A.S., Lemos, P., Guerra, J.P., Silva, V. & Faria, P. (2021). Effect of innovative bioproducts on air lime mortars. *Journal of Building Engineering*, 35, 101985. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101985>
- Parracha, J.L., Pereira, A.S., Velez da Silva, R., Silva, V. & Faria, P. (2021), Effect of innovative bioproducts on the performance of bioformulated earthen plasters. *Construction and Building Materials*, 277, 122261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122261>
- Pessoa, M., Brito, P., Almeida, F., Coelho, M. F., Costa, R. P. D., & Portugal, A. (2001). Síntese e Caracterização de um Superplastificante para Betão. In *Chempor 2001 - 8ª. Conferência Internacional de Engenharia Química*, 1539-1547.
- Qureshi, T. S., Kanellopoulos, A. & Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 629-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.030>
- Rodrigues, F. P. (2018). Desenvolvimento de concretos auto curáveis utilizando a bactéria *Bacillus Megaterium*. *Revista Científica UMC*, 3 (3).
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P. & Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, 86, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>
- Sbardelotto, E. K., Zito, A. N., Mendes, A. R., Silva, A. P. P. S. & Vanderlei, R. D. (2019). Relações entre tecnologias de concretos autocicatrizantes e aspectos de sustentabilidade. XI EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica. <http://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/3326>
- Seifan, M., Samani, A. K. & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100 (6), 2591-2602.
- Sierra Beltran, M. G., Jonkers, H. M., Mors, R. M., & Mera-Ortiz, W. (2015). Field application of self-healing concrete with natural fibres as linings for irrigation canals in Ecuador. In *ICSHM 2015: Proceedings of the 5th International Conference on Self-Healing Materials*, Durham, USA, 22-24.
- Silva, F. B., Boon, N., Belie, N. D., & Verstraete, W. (2015). Industrial application of biological self-healing concrete: Challenges and economical feasibility. *Journal of Commercial Biotechnology*. 21(1), 31-38. <https://doi: 10.5912/jcb662>

- Snoeck, D., Tittelboom, K. V., Steuperaert, S., Dubrueel, P. & De Belie, N. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25 (1), 13-24. [https://doi: 10.1177/1045389X12438623](https://doi.org/10.1177/1045389X12438623)
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K. & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil Biology and Biochemistry*, 31 (11), 1563-1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- Termkhajornkit P., Nawa, T., Yamashiro, Y. & Saito, T. (2009). Self-healing ability of fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Composites*, 31 (3), 195-203. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009>
- Van Mullem, T., Van Tittelboom, K. & Snoeck, D. (2019). SARCOS RRT: Guidelines for crack width measurement. Preliminary description. Ghent University.
- Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2015). Field performance of bacteria-based repair system: Pilot study in a parking garage. *Case Studies in Construction Materials*, 2, 11–17. <https://doi:10.1016/j.cscm.2014.12.004>

## ANEXOS

### Anexo A.1. Resultados individuais do ensaio de medição da abertura de fendas

Tabela A.1. 1. Medições do provete de referência 1 0,2mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 1 0,2</b>				
Loc 1	500 450 450 450 400			
	<b>450</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 2	400 400 400	350 400 550		100
	<b>400</b>	<b>433,333333</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>100</b>
Loc 3	300 300 350 350 650	200 200 150	200 200 250	50 50 50 0 0
	<b>390</b>	<b>183,333333</b>	<b>216,666667</b>	<b>30</b>
Loc 4	300 450 250 350 350	200 300	100 300	50 100 0 0 0
	<b>340</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>30</b>
Loc 5	300 300 300 200 200	300 250 250	200 250	100 100 100
	<b>260</b>	<b>266,666667</b>	<b>225</b>	<b>100</b>
Loc 6	200 200 200 250 300	300 300	250	50 50
	<b>230</b>	<b>300</b>	<b>250</b>	<b>50</b>
média geral	<b>341,1</b>	<b>288,5</b>	<b>218,8</b>	<b>50,0</b>
desvio padrão geral	<b>107,2</b>	<b>104,4</b>	<b>59,4</b>	<b>40,8</b>

Tabela A.1. 2. Medições do provete de referência 2 0,2mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 2 0,2</b>				
Loc 1	800 700 700 700 700	800 750 700 700 650	800 500 600	200
	<b>720</b>	<b>720</b>	<b>633,333333</b>	<b>200</b>
Loc 2	800 700 750 750 700	700 700 650	450 300	150 200
	<b>740</b>	<b>683,333333</b>	<b>375</b>	<b>175</b>
Loc 3	800 600 450	800 450	650 700	1200 900
	<b>617</b>	<b>625</b>	<b>675</b>	<b>1050</b>
Loc 4	750 750 650 750 800	800 750 650 750 800	650 700 700 800	850 650
	<b>740</b>	<b>750</b>	<b>712,5</b>	<b>750</b>
Loc 5	750 750 800	750 450 800	800 750	750
	<b>767</b>	<b>666,666667</b>	<b>775</b>	<b>750</b>
Loc 6	650 800 750 750 750	650 800 700 750	750 700 650	1300 650 650
	<b>740</b>	<b>725</b>	<b>700</b>	<b>866,666667</b>
Loc 7	600 750 800 800 800	500 800 750 750 750	600 800 800 800	700 700 650 700
	<b>750</b>	<b>710</b>	<b>750</b>	<b>688</b>
Loc 8	800 700 700 650 550	800 750 700 650	650 650 700 400	600 650 600
	<b>680</b>	<b>725</b>	<b>600</b>	<b>616,666667</b>
média geral	<b>721,1</b>	<b>710,2</b>	<b>660,0</b>	<b>669,3</b>
desvio padrão geral	<b>78,9</b>	<b>94,6</b>	<b>132,3</b>	<b>288,6</b>

Tabela A.1. 3. Medições do provete de referência 3 0,2mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 3 0,2</b>				
Loc 1	300 500 450 450 550 <b>450</b>	300 200    <b>250</b>	     <b>#DIV/0!</b>	50 150 100   <b>100</b>
Loc 2	300 350 400 400 400 <b>370</b>	350 200 300   <b>283,333333</b>	250 200 200 150 100 <b>180</b>	0 0 0 0 0 <b>0</b>
Loc 3	350 400 350 400 350 <b>370</b>	250 250    <b>250</b>	250 50 150 150 250 <b>170</b>	50 250 0 0 0 <b>60</b>
Loc 4	300 300 400 400 350 <b>350</b>	300 300 350   <b>316,666667</b>	300 200 150   <b>216,666667</b>	280 0 0 0 0 <b>56</b>
Loc 5				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 6	800 650 650 800 550 <b>690</b>	600 650 650 600  <b>625</b>	350 450    <b>400</b>	0 0 0 0 0 <b>0</b>
Loc 7				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 8				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>446,0</b>	<b>378,6</b>	<b>213,3</b>	<b>38,3</b>
desvio padrão geral	<b>145,0</b>	<b>168,4</b>	<b>100,8</b>	<b>81,1</b>

Tabela A.1. 4. Medições do provete de referência 4 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 4 0,35</b>				
Loc 1	500 600 500 450 500			
	<b>510</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 2	500 500 650 650 600	400 400 450 350 350	350 400 400 350	350 400 450
	<b>580</b>	<b>390</b>	<b>375</b>	<b>400</b>
Loc 3	550 500 500 500	500 500 500 450 450	400 400 400	550 600 450
	<b>513</b>	<b>480</b>	<b>400</b>	<b>533,3333333</b>
Loc 4	400 350 400	400 300 300	350	0 0 0 0 0
	<b>383</b>	<b>333,3333333</b>	<b>350</b>	<b>0</b>
Loc 5	300 350 350 300 300	300 250	350 250	250 100
	<b>320</b>	<b>275</b>	<b>300</b>	<b>175</b>
Loc 6	250 200 200 150 200	250 200 200	100 100 50	
	<b>200</b>	<b>216,666667</b>	<b>83,33333333</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 7	100 100 150 150 100	250 100 100	350 100 50	
	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>166,666667</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 8	100 100 150 50	50		
	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>340,3</b>	<b>320,5</b>	<b>275,0</b>	<b>242,3</b>
desvio padrão geral	<b>183,9</b>	<b>135,1</b>	<b>141,4</b>	<b>234,4</b>

Tabela A.1. 5. Medições do provete de referência 5 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 5 0,35</b>				
Loc 1	550 550 800 1050 550 <b>700</b>	500 550 800 <b>616,66667</b>	600 750 <b>675</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 2	600 600 650 600 550 <b>600</b>	750 650 600 500 400 <b>580</b>	750 600 500 350 <b>550</b>	0 0 0 0 0 <b>0</b>
Loc 3	450 400 500 500 600 <b>490</b>	600 600 500 550 <b>562,5</b>	600 600 <b>600</b>	550 550 <b>550</b>
Loc 4	600 600 650 650 <b>625</b>	550 <b>550</b>	500 <b>500</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 5	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 6	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 7	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 8	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>602,6</b>	<b>580,8</b>	<b>583,3</b>	<b>206,3</b>
desvio padrão geral	<b>137,9</b>	<b>107,1</b>	<b>125,0</b>	<b>284,7</b>

Tabela A.1. 6. Medições do provete de referência 6 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>REF 6 0,35</b>				
Loc 1	650 550 450 450 <b>510</b>	500 550 500 700 <b>562,5</b>	550 550 <b>550</b>	550 500 <b>525</b>
Loc 2				0 0 0 0 <b>0</b>
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>0</b>
Loc 3	500 650 550 <b>567</b>	600 800 700 <b>700</b>	400 <b>400</b>	450 <b>450</b>
Loc 4	700 500 <b>600</b>	600 600 750 <b>650</b>	600 <b>600</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 5	600 550 550 500 550 <b>550</b>	550 <b>550</b>	500 <b>500</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 6				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 7				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 8				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>546,7</b>	<b>622,7</b>	<b>520,0</b>	<b>187,5</b>
desvio padrão geral	<b>76,7</b>	<b>100,9</b>	<b>75,8</b>	<b>260,2</b>

Tabela A.1. 7. Medições do provete com bactéria 1 0,2mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>SH 1 0,2</b>				
Loc 1	550 550 800 650 650			
	<b>640</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 2	650 550 800 700 650	600 550 750 750 500	500 650	550 650 500 550
	<b>670</b>	<b>630</b>	<b>575</b>	<b>562,5</b>
Loc 3	650 600 650 650 700	550 500 600 600 650	700 650 600 650	600 650 700 750
	<b>650</b>	<b>580</b>	<b>650</b>	<b>675</b>
Loc 4	650 500 550 700 700	600 600 800 750 750	600 650 650	800 700 550
	<b>620</b>	<b>700</b>	<b>633,333333</b>	<b>683,333333</b>
Loc 5	700 750 750 750 750	750 700 750 600 650	700 700 450	550 550
	<b>740</b>	<b>690</b>	<b>616,666667</b>	<b>550</b>
Loc 6		600 600 850	600 500 450	500 400
	<b>#DIV/0!</b>	<b>683,333333</b>	<b>516,666667</b>	<b>450</b>
Loc 7	650 650 700 650 650	450 500 500 450 350	600 550 500 500	200 100
	<b>660</b>	<b>450</b>	<b>537,5</b>	<b>150</b>
Loc 8	550 600 350 650 650			
	<b>560</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>648,6</b>	<b>617,9</b>	<b>589,5</b>	<b>547,1</b>
desvio padrão geral	<b>88,7</b>	<b>121,1</b>	<b>84,3</b>	<b>180,7</b>

Tabela A.1. 8. Medições do provete com bactéria 3 0,2mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>SH 3 0,2</b>				
Loc 1	250 350 200 250 250			
	<b>260</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
Loc 2	250 250 250 250 200	200 200 250 200 200	200 200 200 150	300 250 200 250 200
	<b>240</b>	<b>210</b>	<b>187,5</b>	<b>240</b>
Loc 3	300 450 350	200 200 250	150 150 200	400 250
	<b>367</b>	<b>216,666667</b>	<b>166,666667</b>	<b>325</b>
Loc 4	250 200	200 200	250 200 150	100 100 100
	<b>225</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>100</b>
Loc 5	200 300 300 300 350	150 150 200 200 100	200 200 150 150 150	50
	<b>290</b>	<b>160</b>	<b>170</b>	<b>50</b>
Loc 6	400 300 250 200 200	250 250 200 200 150	150	0 0 0 0 0
	<b>270</b>	<b>210</b>	<b>150</b>	<b>0</b>
Loc 7	500 250 250	200 100 50	100 100 100	150 200 150
	<b>333</b>	<b>116,666667</b>	<b>100</b>	<b>166,666667</b>
Loc 8	200 250 300 350 350	200 250 300 250 250	150 150 200 250 250	300 300 350
	<b>290</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>316,666667</b>
média geral	<b>281,8</b>	<b>198,2</b>	<b>172,9</b>	<b>165,9</b>
desvio padrão geral	<b>73,8</b>	<b>53,5</b>	<b>44,2</b>	<b>125,7</b>

Tabela A.1. 9. Medições do provete com bactéria 4 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>SH 4 0,35</b>				
Loc 1	650 800 700 700 650 <b>700</b>	750 600 650 400 600 <b>600</b>	600 600 450 500 550 <b>540</b>	650 600 750 650 500 <b>630</b>
Loc 2	700 700 700 750 750 <b>720</b>	700 650 650 600 650 <b>650</b>	600 650 700 600 <b>637,5</b>	800 750 700 <b>750</b>
Loc 3	550 600 600 650 700 <b>620</b>	550 600 400 450 500 <b>500</b>	600 550 600 <b>583,333333</b>	800 700 750 600 700 <b>710</b>
Loc 4	500 600 600 550 650 <b>580</b>	500 500 550 650 550 <b>550</b>	550 550 550 500 550 <b>540</b>	750 500 0 0 0 <b>250</b>
Loc 5	600 500 450 500 650 <b>540</b>	400 400 350 400 450 <b>400</b>	400 400 150 <b>316,666667</b>	200 0 0 0 0 <b>40</b>
Loc 6	400 400 400 350 400 <b>390</b>	200 250 300 300 400 <b>290</b>	<b>#DIV/0!</b>	550 0 0 0 0 <b>110</b>
Loc 7	450 400 500 400 <b>438</b>	400 350 350 <b>366,666667</b>	400 400 <b>400</b>	0 0 0 0 <b>0</b>
Loc 8	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>573,5</b>	<b>486,4</b>	<b>520,5</b>	<b>331,8</b>
desvio padrão geral	<b>126,3</b>	<b>140,5</b>	<b>118,2</b>	<b>343,4</b>

Tabela A.1. 10. Medições do provete com bactéria 5 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>SH 5 0,35</b>				
Loc 1	600 650 600 550	600 650 600 600	500 550 550 450	750 700 750
	<b>600</b>	<b>620</b>	<b>512,5</b>	<b>733,333333</b>
Loc 2	500 550 650 650 650	500 500 550 600 650	600 600 600 550	550 650 650 650
	<b>600</b>	<b>560</b>	<b>587,5</b>	<b>625</b>
Loc 3	600 550 600 550 450	550 550 500 550 500	550 550 500 500	700 800 750 700
	<b>550</b>	<b>530</b>	<b>525</b>	<b>737,5</b>
Loc 4	550 550 550 600 500	550 550 600 550 550	600 550 450 450	650 600 600 600
	<b>550</b>	<b>560</b>	<b>512,5</b>	<b>612,5</b>
Loc 5	650 650 650 600 500	650 650 600 600 500	500 500 500	650 550 600 600
	<b>610</b>	<b>600</b>	<b>500</b>	<b>600</b>
Loc 6	700 650 650	600 550 600	550 550 550	800 650 750 800
	<b>667</b>	<b>583,333333</b>	<b>550</b>	<b>750</b>
Loc 7	600 600 600 550 500	550 600 600 500 500	550 500 450 550	750 700 550 600
	<b>570</b>	<b>550</b>	<b>512,5</b>	<b>650</b>
Loc 8	500 550 600 600 550	500 500 550 600 700	550 550 500 550	600 650 500 0 0
	<b>560</b>	<b>570</b>	<b>537,5</b>	<b>350</b>
média geral	<b>583,8</b>	<b>571,1</b>	<b>530,0</b>	<b>620,3</b>
desvio padrão geral	<b>57,8</b>	<b>54,1</b>	<b>44,7</b>	<b>180,9</b>

Tabela A.1. 11. Medições do provete com bactéria 6 0,35mm

Dia de medição	17/11/2020	16/12/2020	16/02/2021	18/05/2021
<b>SH 6 0,35</b>				
Loc 1	750 700 700 700 600	650 650 700 700 700	550 600 650 550	700 750 800 650
	<b>690</b>	<b>680</b>	<b>587,5</b>	<b>725</b>
Loc 2	750 750 750	600 550 450	500 350	750
	<b>750</b>	<b>533,333333</b>	<b>425</b>	<b>750</b>
Loc 3	650	500 550	150	0 0 0 0
	<b>650</b>	<b>525</b>	<b>150</b>	<b>0</b>
Loc 4	650	500 500		0 0 500 450 400
	<b>650</b>	<b>500</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>270</b>
Loc 5	450 600 800 700 700	600 600 800 650 650	400 600 600 550	750 800 800 800
	<b>650</b>	<b>660</b>	<b>537,5</b>	<b>787,5</b>
Loc 6	600 600 650 600 700	650 650 500 650 650	650 600 650	750 750 650 800
	<b>630</b>	<b>620</b>	<b>633,333333</b>	<b>737,5</b>
Loc 7	750 750 800 900 800	600 650 800 1000 700	650 700	800 700 600
	<b>800</b>	<b>750</b>	<b>675</b>	<b>700</b>
Loc 8				
	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>#DIV/0!</b>
média geral	<b>696,0</b>	<b>637,0</b>	<b>546,9</b>	<b>507,7</b>
desvio padrão geral	<b>92,3</b>	<b>113,2</b>	<b>140,8</b>	<b>331,6</b>

## Anexo A.2. Resultados individuais do ensaio de permeabilidade à água

	[minutos]	[segundos]	[minutos]	[segundos]	[minutos]	[segundos]	[minutos]	[segundos]
REF 1 0,2	18/11/2020		17/12/2020		17/02/2021		19/05/2021	
	05:13,0	313	10:22,7	623	16:39,0	999	16:44,0	1004
REF 2 0,2	18/11/2020		17/12/2020		17/02/2021		19/05/2021	
	01:04,7	65	01:48,8	109	02:05,0	125	01:52,0	112
REF 3 0,2	18/11/2020		17/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	02:49,0	169	04:20,2	260	11:11,0	671	20:00,0	1200
REF 4 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	00:03:46	226	00:09:11	551	00:12:45	765	00:13:41	821
REF 5 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	02:39,4	159	04:58,5	299	12:48,0	768	19:43,0	1183
REF 6 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	01:28,2	88	02:31,7	152	03:20,0	200	02:10,0	130
SH 1 0,2	18/11/2020		17/12/2020		17/02/2021		19/05/2021	
	01:31,8	92	01:33,3	93	02:09,0	129	02:00,0	120
SH 3 0,2	18/10/2020		17/12/2020		17/02/2021		19/05/2021	
	13:12,0	792	20:00,0	1200	20:00,0	1200	20:00,0	1200
SH 4 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	02:04,9	125	02:34,8	155	02:41,0	161	02:22,0	142
SH 5 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	01:33,9	94	02:02,3	122	02:05,0	125	03:14,0	194
SH 6 0,35	19/11/2020		18/12/2020		18/02/2021		20/05/2021	
	01:16,2	76	01:28,3	88	01:03,0	63	01:28,0	88

