

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EDRIELE CAVALLI**

**ESTUDO DO USO DE ESCÓRIA ALTO-FORNO NO EFEITO  
AUTOCICATRIZANTE EM CONCRETOS**

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**EDRIELE CAVALLI**

**ESTUDO DO USO DE ESCÓRIA ALTO-FORNO NO EFEITO  
AUTOCICATRIZANTE EM CONCRETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil pela Universidade de Caxias do Sul, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof. Ma. Muriel Scopel Froener

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**EDRIELE CAVALLI**

**ESTUDO DO USO DE ESCÓRIA ALTO-FORNO NO EFEITO  
AUTOCICATRIZANTE EM CONCRETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil pela Universidade de Caxias do Sul, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof. Ma. Muriel Scopel Froener

**Aprovada em 02/12/2021**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ma. Muriel Scopel Froener

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Vinício Cecconello

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Ma. Vanessa Giaretton Cappellesso

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

Dedico este trabalho aos meus pais  
Denoi e Luiz, por todo o incentivo; A  
minha irmã Érita por toda a ajuda e  
auxílio; Aos meus amigos e colegas.

## **AGRADECIMENTOS**

Esse trabalho não poderia ter sido desenvolvido sem o auxílio e dedicação de pessoas que me ajudaram a tornar isso possível. Por isso, agradeço em especial:

A Deus pelo dom da vida, por todas as bênçãos e graças obtidas ao longo de todos esses 7 anos de graduação;

Agradeço imensamente aos meus pais, Denoi e Luiz, por todo o incentivo, carinho, dedicação e amor ao longo de todos esses anos. Sem dúvida, sem eles eu não teria me tornado metade da pessoa que sou hoje em dia;

A minha irmã Érita, por todo o auxílio e paciência ao longo deste percurso. Por sempre me incentivar a continuar nessa caminhada e dar todo o suporte necessário;

A minha orientadora Prof. Muriel Scopel Froener, por toda a dedicação ao longo deste trabalho. Por sempre estar disponível para me auxiliar a sanar as dúvidas, compartilhar o seu conhecimento e por toda a contribuição no andamento do mesmo;

A todos os meus colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante o andamento da graduação. Por todas as risadas compartilhadas e companheirismo para o desenvolvimento de tarefas;

Aos laboratoristas por toda a ajuda das tarefas, auxiliando na realização da parte prática desenvolvida ao longo deste trabalho;

Sem cada um de vocês, nada disso seria possível. Muito obrigada por cada um de vocês. Agradeço a todos que de uma forma ou de outra tiveram alguma contribuição para que isso se tornasse real. Me sinto abençoada por ter pessoas tão incríveis junto a mim!

CAVALLI, E. **Estudo do uso de escória alto-forno no efeito autocicatrizante em concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS. 73 f.

O concreto é o material mais utilizado no ramo da construção civil, podendo ser utilizado nas estruturas mais diversas, tais como pontes, rodovias, edificações, entre outros. Porém, para manter a vida útil e segurança dessas estruturas, torna-se necessários fazer manutenções periódicas que podem apresentar um custo bem elevado, podendo ser superior a uma construção nova. Uma estratégia que vem sendo estudada com o intuito de diminuir o intervalo dessas manutenções é o concreto autocicatrizante, que tem como intuito fechar as fissuras logo após a sua abertura, evitando a criação de grandes fendas e a entrada de agentes agressivos. Nesse trabalho, foi utilizado o método de autocicatrização autógena a partir da substituição parcial do cimento CP V ARI por escória alto-forno nas proporções de 25% e 50%. Diferentes relações água/cimento variando entre 0,30, 0,40 e 0,50 também foram avaliadas. Os corpos de prova cilíndricos foram pré-fissurados após 7 dias aplicando esforços de compressão correspondentes à 90% da carga de rompimento. Além disso, passaram pelos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e microscopia óptica aos 28 e 63 dias. As amostras com menor relação água/cimento apresentaram os melhores resultados em relação à resistência à compressão. Além disso, as amostras sem substituição do cimento por escória apresentaram valores mais elevados de resistência à compressão quando comparado com as demais. Em relação aos ensaios de absorção de água por capilaridade, a absorção foi maior aos 63 dias quando comparado aos 28 dias. Já no ensaio de microscopia óptica, foi possível observar o início da autocicatrização das fissuras mais evidente nas amostras com relação água/cimento de 0,30. Porém todas as amostras analisadas apresentaram evidências do início do processo ao cicatrizante na análise de microscopia eletrônica de varredura.

**Palavras-chave:** Concreto. Autocicatrização. Fissuras. Autocicatrização autógena. Escória alto-forno.

CAVALLI, E. **Study of the use of blast furnace slag in the self-healing effect in concrete.** Final essay for the graduation in Civil Engineering. Area of Knowledge of Exact Sciences and Engineering, University of Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS. 73 pages.

Concrete is the most used material in the construction industry, and can be used in the most diverse structures, such as bridges, highways, buildings, among others. However, to maintain the useful life and safety of these structures, it is necessary to carry out periodic maintenance, which can present a very high cost, which may be higher than a new construction. A strategy that has been studied in order to reduce the interval for these maintenances is self-healing concrete, which aims to close cracks right after they are opened, preventing the creation of large cracks and the entry of aggressive agents. In this work, the autogenous self-healing method was used from the partial replacement of CP V ARI cement by blast furnace slag in proportions of 25% and 50%. Different water/cement ratios ranging between 0.30, 0.40 and 0.50 were also evaluated. The cylindrical specimens were pre-cracked after 7 days, applying compression forces corresponding to 90% of the breaking load. In addition, they underwent compressive strength, capillary water absorption and optical microscopy tests at 28 and 63 days. The samples with the lowest water/cement ratio showed the best results in relation to compressive strength. In addition, the samples without cement replacement by slag showed higher values of compressive strength when compared to the others. Regarding the capillary water absorption tests, the absorption was greater at 63 days when compared to 28 days. In the optical microscopy test, it was possible to observe the beginning of the self-healing of the cracks more evident in samples with a water/cement ratio of 0.30. However, all analyzed samples showed evidence of the beginning of the healing process in the scanning electron microscopy analysis.

**Keywords:** Concrete. Self-healing. Cracks. Autogenous Self-healing. Blast furnace slag.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fotografia do reparo realizado na ponte com o adesivo .....	12
Figura 2 - Processo de cicatrização autógena. A) restrição da largura da fissura; B) adição de água; C) hidratação e cristalização da fissura.....	15
Figura 3 - Diferentes formas de cicatrização autógena .....	15
Figura 4 - Cicatrização da fissura.....	22
Figura 5 - Evolução da autocicatrização das amostras .....	23
Figura 6 - Porcentagem de cura das fissuras.....	24
Figura 7 - Curva granulométrica da areia.....	38
Figura 8 - Curva granulométrica da brita.....	40
Figura 9 - Matriz do programa experimental.....	47
Figura 10 - Resultado de resistência à compressão das amostras com a/c de 0,30 .....	49
Figura 11 - Resultado de resistência à compressão das amostras com a/c de 0,40 .....	50
Figura 12 - Resultado de resistência à compressão das amostras com a/c de 0,50 .....	51
Figura 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.....	54
Figura 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 63 dias.....	54
Figura 15 - Análise de MEV das amostras com 50% de substituição de cimento por escória aos 63 dias .....	56



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mecanismos de gatilho para a autocicatrização autógena.....	28
Quadro 2 - Principais compostos do cimento Portland.....	33
Quadro 3 - Composição das misturas com suas respectivas siglas.....	36
Quadro 4 - Informações do aditivo superplastificante .....	41
Quadro 5 - Informações sobre a fibra de vidro .....	41
Quadro 6 - Nomenclatura das amostras de acordo com a execução.....	43
Quadro 7 - Ensaios realizados ao longo da pesquisa .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica da escória alto-forno.....	20
Tabela 2 - Quantificação de material total utilizada para a fabricação dos CP's .....	36
Tabela 3 - Resultado dos ensaios de caracterização do cimento .....	37
Tabela 4 - Resultado dos ensaios de caracterização da areia .....	38
Tabela 5 - Resultado do ensaio de granulometria da brita .....	39
Tabela 6 - Resultado dos ensaios de caracterização da escória alto-forno .....	40
Tabela 7 - Resultados do ensaio no estado fresco. ....	48
Tabela 8 - ANOVA das amostras nos três períodos de cura.....	52
Tabela 9 - Resultados da capacidade de absorção de água por capilaridade	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
$\text{Ca(OH)}_2$	Hidróxido de Cálcio
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de Cálcio
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	Silicato de Tricálcico
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	Silicato de Dicálcico
$\text{H}_4\text{SiO}_4$	Ácido Ortosilícico
$\text{Ca}_2\text{Al[AlSiO}_7]$	Gehlenite
$\text{Ca}_2\text{Mg[Si}_2\text{O}_7]$	Akermanite
$\text{SiO}_2$	Dióxido de Silício
$\text{Ca}^{2+}$	Íons de Cálcio
$\text{CO}_3^{2-}$	Íons de Carbonato
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de Ferro
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de Alumínio
$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
$\text{H}_2\text{O}$	Água
$\text{FeO}$	Óxido de Ferro (II)
$\text{CaO}$	Óxido de Cálcio
$\text{MgO}$	Óxido de Magnésio
S	Enxofre
Si	Silício
O	Oxigênio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Al	Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
$\mu\text{m}$	Micrômetro
mm	Milímetro
g	Gramas
°C	Graus Célsius
PVA	Álcool Polivinílico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1	QUESTÕES DE PESQUISA.....	9
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	9
1.2.1	<b>Objetivo Principal</b> .....	<b>9</b>
1.2.2	<b>Objetivos Secundários</b> .....	<b>10</b>
1.3	HIPÓTESES .....	10
1.4	DELIMITAÇÃO .....	10
1.5	LIMITAÇÕES .....	10
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	11
<b>2</b>	<b>AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS</b> .....	<b>12</b>
2.1	MECANISMO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA .....	15
2.1.1	<b>Adição de minerais como agentes cicatrizantes</b> .....	<b>18</b>
2.1.2	<b>Restrição da largura das fissuras por adição de fibras</b> .....	<b>24</b>
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM NA CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA .....	25
2.2.1	<b>Relação água/cimento</b> .....	<b>26</b>
2.2.2	<b>Ambiente de exposição</b> .....	<b>27</b>
2.2.3	<b>Idade do concreto e das fissuras</b> .....	<b>30</b>
2.2.4	<b>Espessura das fissuras</b> .....	<b>31</b>
2.2.5	<b>Tipos de cimento</b> .....	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	MATERIAIS .....	35
3.1.1	<b>Aglomerante</b> .....	<b>37</b>
3.1.2	<b>Água</b> .....	<b>37</b>
3.1.3	<b>Agregado Miúdo</b> .....	<b>37</b>
3.1.4	<b>Agregado Graúdo</b> .....	<b>39</b>

<b>3.1.5 Escória Alto-Forno.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.6 Aditivo Superplastificante.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.7 Fibra.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 MÉTODOS DE ENSAIO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.1 Confeção dos Traços de Concreto, Cura e Pré-Fissuração.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2 Ensaio no Estado Fresco.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3 Ensaio no Estado Endurecido.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.4 Resistência a compressão.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.5 Absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura.....</b>	<b>46</b>
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 ESTADO FRESCO.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....</b>	<b>55</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais presente no ramo da construção civil, podendo ser encontrado em diversos tipos de obras, entre eles edificações, rodovias, pontes, usinas hidrelétricas, entre outros. Devido a sua alta demanda, é estimado que em torno de 11 bilhões de toneladas de concreto são utilizadas anualmente, sendo que, só no Brasil, o consumo gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos. De maneira sucinta, pode-se afirmar que o concreto é uma pedra artificial que se molda de acordo com a criatividade construtiva do homem no estado fresco, podendo apresentar diferentes formas e tamanhos. Quando endurecido, possui resistência similar às rochas naturais. (INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2009).

Muitos países, incluindo Alemanha, Coréia e EUA, estão tendo gastos significativos com reparação de estruturas, podendo ultrapassar o preço de uma construção nova. Nos Estados Unidos estima-se que anualmente se gasta em torno de 18 bilhões de reais em reparos de estruturas existentes, o que causa um grande impacto na economia do país (LI; HERBERT, 2012). Além disso, uma das manifestações patológicas que mais afetam as estruturas de concreto armado é a corrosão do aço por consequência do contato com íons de cloreto (DARQUENNES et al., 2016).

Uma estratégia que vem sendo estudada, e que vai além dos métodos convencionais de reparo e de prevenção de danos, é o uso de concretos autocicatrizantes ou autorreparadores. Esse processo tem como característica o selamento das fissuras logo após a sua abertura, no seu estado inicial evitando o crescimento de grandes fendas e deixando a estrutura menos suscetível ao ataque de agentes agressivos. Desta forma, os reparos requeridos seriam menores ou até mesmo dispensáveis, diminuindo assim os custos com manutenções (WANG, 2013).

O processo de autocura pode ser classificado em dois grupos: autógeno e autônomo. A cura autógena refere-se ao método de recuperação no qual a cura é realizada por componentes que estão presentes no concreto mesmo quando seu objetivo principal não é a autocura, por exemplo, o uso de adições

mineiras (VAN TITTELBOOM et al., 2013). Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), esse processo acontece através da hidratação contínua e dissolução das partículas de cimento e, subsequente, carbonatação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). No entanto, a cura autógena está limitada a pequenas fissuras e só é eficaz quando há água disponível. Já a cura autônoma é o termo usado para o processo de selamento das fissuras a partir de adições modificadas que, se não fosse pelo objetivo de recuperação das fissuras, não seria encontrado na composição do concreto. Exemplo disso, são as adições de bactérias (DE ROOIJ et al., 2013).

A fim de contribuir para o conhecimento da capacidade de autocicatrização das matrizes cimentícias, esse trabalho preconiza a abordagem do processo de cura autógena a partir da adição de minerais. Desta forma, será estudado o emprego de escória alto-forno como substituição parcial do cimento adicionado a mistura em duas proporções distintas, 25% e 50%. A mesma foi escolhida por apresentar grande potencial de autocicatrização e por possuir em suas composições silicato dicálcico ( $\text{SiO}_2$ ), responsável pela formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

## 1.1 QUESTÕES DE PESQUISA

Como o uso da escória alto-forno influencia na autocicatrização de fissuras em concretos quando submetidos a ação da água?

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1 Objetivo Principal

Esse trabalho tem como objetivo principal analisar o processo autocicatrizante com diferentes teores de escória alto-forno e diferentes relações água/cimento em concretos quando expostos à cura submersa em água.

### 1.2.2 Objetivos Secundários

a) Analisar as propriedades mecânicas de concretos autocicatrizantes com o uso de escória alto-forno;

b) Verificar a influência da relação água/cimento na cicatrização dos concretos;

c) Analisar a microestrutura dos compostos formados quando utilizado escória alto-forno na mistura e com diferentes relações água/cimento em concretos autocicatrizantes.

### 1.3 HIPÓTESES

A partir da utilização de escória alto-forno, é possível se obter um concreto autocicatrizante capaz de selar as fissuras que são formadas nos estágios iniciais, dispensando, ou diminuindo de forma significativa, as futuras manutenções nas estruturas. Além disso, com a adição da mesma é possível obter um aumento da resistência mecânica e a redução na absorção de água.

### 1.4 DELIMITAÇÃO

O presente trabalho delimita-se em analisar a autocicatrização do concreto com substituição parcial de 25% e 50% da quantidade de cimento da mistura por escoria alto-forno.

### 1.5 LIMITAÇÕES

O seguinte trabalho limita-se ao uso de apenas três relações água/cimento, sendo elas 0,30, 0,40 e 0,50. Além disso, os ensaios de análise de resultados foram limitados de acordo com os aparelhos disponíveis na Universidade de Caxias do Sul (UCS). Além disso, o ensaio de microscopia eletrônica de varredura não foi realizado em todas as amostras trabalhadas ao longo do trabalho, apenas com substituição parcial de 50% do cimento por escória e com tempo de cura de 63 dias.



## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi realizado de acordo com às atividades descritas a seguir:

- a) Consulta de referências bibliográficas sobre o assunto, tanto em livros como em artigos científicos, além disso as normas necessárias para a realização do estudo;
- b) Desenvolvimento da metodologia de pesquisa;
- c) Definição dos materiais que serão utilizados para a parte prática, bem como suas quantidades;
- d) Entrega para os avaliadores.

## 2 AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Mesmo havendo relatos de que os estudos sobre concretos autocicatrizantes começaram há mais de cem anos, a grande pioneira no assunto foi a professora Carolyn Dry em 1994 (DRY, 2008). Seu estudo consistia em incorporar ao concreto um conjunto de tubos de vidro ocos com 100mm de comprimento preenchidos com material de cura, nesse processo foi utilizado metil metacrilato. Quando a estrutura fosse rompida, e conseqüentemente os tubos também, o produto seria liberado em seu interior e seria preenchido as rachaduras. Importante ressaltar que a ideia foi aplicada em uma estrutura exposta a extremo calor (KANELLOPOULOS; QURESHI; AI-TABBAA, 2015).

Essa ideia foi comprovada na prática, como mostrado na Figura 1, sendo aplicada em uma ponte na qual observou-se o preenchimento de fissuras a partir da liberação dos adesivos encapsulados dentro das fibras. Além disso, foi constatado também uma melhora no desempenho da estrutura por meio da dissipação dos esforços pelas rachaduras já curadas, evitando falhas catastróficas na mesma (DRY, 2008).

Figura 1- Fotografia do reparo realizado na ponte com o adesivo



Fonte: DRY (2008).

Ao mesmo tempo em que Carolyn Dry evoluía nas suas pesquisas, Victor Li começou a fazer testes com o intuito de conseguir resultados em concretos cicatrizantes reforçados com adição de fibras. Em meados dos anos 2000, outros pesquisadores iniciaram estudos no Japão, na França, no Reino Unido e nos Países Baixos (VAN TITTELBOOM et al., 2013). Porém, o assunto ganhou relevância apenas em 2005 em um programa de pesquisa inovador (IOP) liderado pelo professor holandês Zwaag sobre materiais autocicatrizantes (ZWAAG, 2007).

No Brasil o estudo pioneiro nessa área foi em 2011 sendo desenvolvido pelo Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). O objeto deste estudo foi o concreto autocicatrizante a partir da adição de um aditivo cristalizante que, junto com a escória alto-forno, forma um material que, juntamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , cria cristais que se depositam nos poros e nas fissuras auxiliando no selamento das mesmas (TAKAGI, 2013).

De forma ampla, a autocicatrização pode ser classificada de duas formas: cura autógena e cura autônoma. A cura autógena refere-se a uma forma de cicatrização onde os materiais que tem essa função compoem o concreto mesmo sem o objetivo de autocura. Já a cura autônoma se relaciona a adição de um material no concreto com o propósito de autocicatrização que, em outras situações, não é encontrado na composição do mesmo (DE ROOIJ et al., 2013).

O processo de cicatrização autógena é caracterizado principalmente pela hidratação de partículas cimentícias gerando a dissolução das mesmas e, conseqüentemente, a carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Além disso, expansões na matriz de concreto e deposição de detritos trazidos pela água também podem ser consideradas como formas de cura autógena (VAN TITTELBOOM et al., 2013). Por isso, pesquisas realizadas na área geralmente tem como objetivo a revisão dos materiais já utilizados no concreto com o intuito de entender melhor os processos de hidratação e de carbonatação, avaliando o processo de preenchimento das fissuras em ambientes com a presença de umidade (BIANCHIN, 2018). Mesmo que o processo de cicatrização autógena apresente restrições quando relacionado a espessura das fissuras, existem estudos que

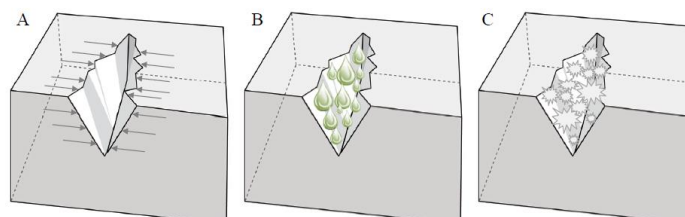
comprovam que esta metodologia pode ser aprimorada quando há uma quantidade maior de aglutinante reativo e fornecimento de água (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Avaliando experimentos com a cicatrização autônoma é possível integrar diferentes áreas do conhecimento, estendendo-se para os materiais poliméricos, mecânica dos fluídos e biologia. Porém, essas abordagens estão sendo estudadas a menos tempo quando comparado a autógena, não havendo ainda estudos suficientes que comprovem a sua viabilidade econômica na prática. Porém, mesmo assim, esse método já vem apontando resultados bastante promissores, onde muitas das técnicas aplicadas têm como objetivo a complementação do processo de cicatrização autógena ou até mesmo independência de desempenho (BIANCHIN, 2018).

Entre os métodos de cicatrização autônoma, os principais que se destacam são: encapsulamento de polímeros ou de minerais e cicatrização microbiológica. O método de cicatrização microbiológica faz uso de bactérias que são adicionadas na mistura e podem permanecer dormentes sem interferir negativamente nas demais características do concreto. Após ativadas, por meio da água e o oxigênio, elas começam a produzir esporos de carbonato de cálcio que irão selar a fissura. Além deste, o método de encapsulamento consiste em cápsulas na mistura no qual o seu interior é preenchido com algum material cicatrizante. Quando a estrutura é rompida, esses tubos também se quebram liberando o produtor reparador (DE BELIE et al., 2018)

Na maioria dos processos autógeno ou autônomo, há a necessidade da presença de água para que ocorra a cicatrização. Na Figura 2 é mostrado de forma esquemática o processo de cicatrização autógena. Além disso, o processo torna-se mais eficiente quando as fissuras apresentam pequenas larguras e ocorrem em concretos de menores idades. Para concretos com idades mais avançadas, o processo de cicatrização torna-se inteiramente dependente da precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Figura 2 - Processo de cicatrização autógena. A) restrição da largura da fissura; B) adição de água; C) hidratação e cristalização da fissura



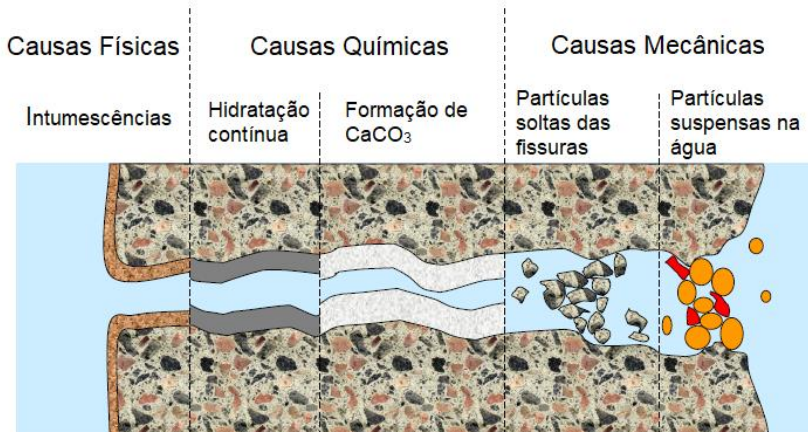
Fonte: VAN TITTELBOOM; DE BELIE (2013).

Como o enfoque deste trabalho é o processo de cicatrização autógena, nos próximos tópicos estão aprofundados os estudos sobre essa forma de autocicatrização em concretos.

## 2.1 MECANISMO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA

No método da autocicatrização autógena, as fissuras se curam devido a interação dos grãos de aglomerante, presença de água e o ambiente de exposição. É considerado um processo natural que tende a acontecer por meio de processos em decorrência de reações químicas, ações mecânicas ou por intermédio de processos físicos. Em geral, ocorre de forma natural, podendo ser melhorada com o uso de algumas adições (HELENE et al., 2018). Na Figura 3 está demonstrado as diferentes causas que podem levar a uma cicatrização autógena.

Figura 3 - Diferentes formas de cicatrização autógena

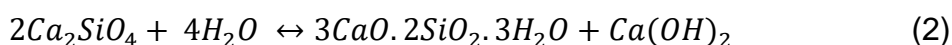
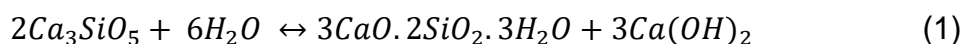


Fonte: Adaptado de DE ROOIJ et al. (2013).

A causa física é proveniente do inchaço da pasta de cimento hidratada próximo as faces das rachaduras. Nesse processo de hidratação, a partir da absorção de água, se acredita que ocorra uma redução em torno de 10% da

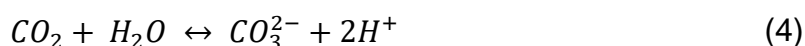
entrada de fluidos pelas fissuras. Quando a superfície se torna mais espessa, em função da saturação pela água, é possível ocorrer o fechamento de pequenas fissuras, porém, quando seca, pode ser que a fissura volte a aumentar. (DE ROOIJ et al., 2013).

Já em relação aos processos químicos dois métodos são possíveis, onde um deles está relacionado a hidratação contínua do concreto a partir da reação de grãos de cimento que não reagiram inicialmente devido à falta de água (DE ROOIJ et al., 2013). O processo é caracterizado pela hidratação destes grãos quando os mesmos entram em contato com a água, a partir das aberturas criadas, gerando o C-S-H (JIANG et al., 2014). Isso acontece quando o silicato de tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) e o silicato de dicálcico ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) entram em contato com a água, demonstrado pelas Reações 1 e 2 respectivamente, formando o C-S-H e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Li et al., 2013).



Como o alito com composição química  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , relativo a reação do silicato tricálcico, contém mais cálcio ele reage mais rápido sendo responsável pela resistência inicial. Já a belita com composição química  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , referente a reação do silicato de dicálcico apresenta uma reação mais lenta, devido a menor quantidade de cálcio na sua composição, sendo responsável pelo aumento da resistência em idades mais avançadas. Durante a hidratação, alguns grãos de alita e belita não são hidratados, sendo envoltos por partículas de C-S-H, resultando em uma forma de encapsulamento natural (Li et al., 2013). Quando hidratados, esses grãos crescem nos espaços livres criados pelas fissuras ocupando cerca do dobro do espaço do grão de cimento de tamanho original. Geralmente, a hidratação contínua não é capaz de fechar completamente as fissuras, mas admitindo espessuras menores que 0,1 mm e juntamente com outras causas, pode haver a cicatrização. (DE ROOIJ et al., 2013).

Além do método de hidratação contínua, a outro processo químico que pode ser considerado como mecanismo de autocicatrização e a recristalização do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) lixiviada da pasta de concreto e a formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esses processos podem ocorrer de forma simultânea, porém em diferentes taxas. A hidratação contínua pode ocorrer assim que os grãos não hidratados entram em contato com a água. Por outro lado, o processo de recristalização do hidróxido de cálcio e a formação do carbonato ocorrem mais lentamente. Isso ocorre pois, para que o carbonato de cálcio consiga ser gerado, são necessários íons de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) que estão presentes na água, porém geralmente aparecem em pequenas quantidades retardando o processo. Entretanto, assim que o processo de autocicatrização vai acontecendo mais íons de  $\text{CO}_3^{2-}$  vão adentrando a fissura. O hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é formado dentro das fissuras no processo de hidratação dos grãos anidros quando em contato com a água, porém de forma lenta e gradual, proporcionando um aprimoramento do processo de formação do carbonado de cálcio. Isso ocorre pois quando o  $\text{Ca(OH)}_2$  entra em contato com água há a formação do íon de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que junto com o  $\text{CO}_3^{2-}$  gera o carbonato de cálcio. (HUANG et al., 2015). Esse processo pode ser confirmado nas Reações 3, 4 e 5.



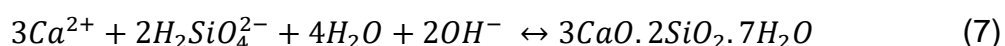
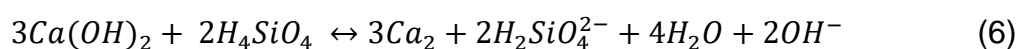
Além das causas físicas e químicas, há duas causas mecânicas. Em geral, a autocicatrização por processos mecânicos ocorre ou por sedimentação ou fratura das partículas. Onde, em ambos os casos, as mesmas são transportadas pela água podendo causar a obstrução das fissuras. Contudo, esses processos apresentam menores efeitos na cicatrização. (DE ROOIJ et al., 2013).

Muitas são as formas de cicatrização autógena, sendo elas consideradas naturais. Dentre elas estão: por intermédio da adição de minerais e/ou de fibras.

### 2.1.1 Adição de minerais como agentes cicatrizantes

A hidratação residual é o método que vem sendo mais utilizado, pois além de reconstituir a fissura, é capaz de recuperar as propriedades mecânicas do concreto (BIANCHIN, 2018). Esse método de cicatrização pode ser ainda mais efetivo quando parte do cimento da mistura é substituído por minerais de aluminossilicatos, como cinza volante, escória alto-forno, sílica ativa e argila, pois a reação pozolânica proveniente desses materiais ajuda no grau de autocura do concreto (Li et al., 2013). Esses minerais são adicionados a mistura no momento da fabricação do concreto e, quando em contato com a água através das fissuras, reagem selando as aberturas (Huang et al., 2016).

Em ambientes alcalinos, certos tipos de silicatos podem se dissolver a partir dos materiais pozolânicos adicionados a mistura gerando o ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ), como mostrado na Reação 6. O  $H_4SiO_4$  reage com a portlandita dissolvida produzindo o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), como mostrado pela Reação 7 (Li et al., 2013).



O C-S-H produzido durante a reação pozolânica, quando comparado com o gerado na hidratação de grãos de cimento, apresenta a mesma eficácia no fechamento de fissuras. Porém, como a taxa de reação pozolânica depende do pH e da síntese de hidróxido de cálcio, apresenta um processo mais lento quando comparado às reações de hidratação. Em fissuras com características parecidas, é provável que concretos com adições pozolânicas demorem mais para conseguir cicatriza-las, contudo isso pode garantir a autocura em concretos com idades mais avançadas, mesmo após o consumo de todos os grãos de anidro, aumentando a vida útil das estruturas (Li et al., 2013).



No trabalho em questão, a técnica da hidratação residual a partir da adição de minerais irá ser abordada. Optou-se por fazer uma substituição parcial do cimento adicionado na mistura por escória alto-forno nas proporções de 25% e 50%. Tendo em vista que o enfoque do trabalho será o efeito desta adição mineral, a seguir será abordado as características e especificações do material em questão.

#### 2.1.1.1 Escória alto-forno

A escória alto-forno é um subproduto gerado a partir da fabricação do ferro gusa formado pela composição química das impurezas do minério de ferro como calcário e dolomita e cinzas de carvão mineral. Durante a produção do ferro gusa, a escória alto-forno se deposita no fundo do forno passando por um processo de separação e resfriamento. (PIMENTEL et al.,2017).

O resfriamento pode acontecer de forma rápida ou lenta, sendo que quando resfriado rapidamente, possui uma forma granular e amorfa de silicatos de cálcio, magnésio e alumínio que, após ser moída, apresenta finura adequada para utilização como adição no cimento. Em contrapartida, no momento em que ocorre de forma lenta, se solidifica na forma de um material cristalino, estável e composto de silicatos, especialmente gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$ ) e akermanite ( $\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$ ), tendo poucas propriedades pozolânicas. (PIMENTEL et al.,2017).

Quando adicionada ao concreto, a escória alto-forno pode apresentar diversos efeitos benéficos, entre eles: melhora na trabalhabilidade, menor velocidade na liberação de calor por retardar a hidratação, melhora na resistência a longo prazo e, em especial, a durabilidade e eliminação do risco da reação álcali-sílica, independente do teor de álcalis do cimento Portland ou da reatividade do concreto (NEVILLE, 2016).

A mistura de cimento Portland com escória alto-forno apresenta uma hidratação com maior produção de C-S-H e menos  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Também apresenta uma hidratação mais lenta devido a dependência da decomposição da fase vítrea pelos íons de hidroxila durante a hidratação do cimento (NEVILLE, 2016).

A composição química da escória alto-forno pode variar de acordo com os constituintes e proporções dos materiais utilizados, matérias-primas, eficiência do forno, método de resfriamento, entre outros, como pode ser visto na Tabela 1. Além de ser classificada do ponto de vista químico como básica ou ácida.

Tabela 1 - Composição química típica da escória alto-forno

<b>Óxidos</b>	<b>Escória básica (BATTING &amp; ESPER, 1988)</b>	<b>Escória ácida (adaptado de Soares, 1982)</b>
CaO	40 - 45	24 - 39
SiO <sub>2</sub>	30 - 35	38 - 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 - 18	8 - 19
MgO	2,5 - 9	1,5 - 9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 2	0,4 - 2,5
FeO	0 - 2	0,2 - 1,5
S	0,5 - 1,5	0,03 - 0,2

Fonte: Adaptado de JOHN (1995).

De acordo com a NBR 5735 (ABNT 1991) somente se a relação de  $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2 > 1$  for atendida, a escória pode ser classificada como básica, podendo ser utilizada como adição para o concreto, caso contrário é ácida. Os óxidos mais importantes presentes na composição química da escória alto-forno são CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO que representam cerca de 95% do total dos óxidos. (DE ALMEIDA, 2014).

De Almeida (2014) utilizou escória alto-forno como agregado na mistura do concreto nas porções de substituição de 50% até 100%. Analisando os resultados aos 28 dias, foi possível observar uma queda significativa na resistência à compressão conforme se aumentava a quantidade de escória na mistura. Segundo a autora, isso ocorreu pelo motivo de que a escória deixa o processo de hidratação mais lento acarretando em uma demora maior para apresentar ganho de resistência.

O efeito da escória alto-forno no concreto nos resultados da resistência à compressão também foi estudado por Madrid et al. (2016). Foi utilizado diferentes teores de escória alto-forno em substituição parcial do cimento e com relações água/cimento distintas. Segundo os autores aos 28 dias, é possível

observar uma ligeira queda na resistência à compressão conforme o teor de minerais aumenta na mistura em algumas relações água/cimento. Em contrapartida, os resultados observados aos 90 dias há uma melhora significativa na resistência a compressão em níveis de substituição de 20% a 60% dos minerais. Porém, em ambos os casos se torna evidente a queda das propriedades mecânicas com teores de substituição de 80% ou mais. (MADRID et al., 2016).

Takagi (2013) analisou a autocicatrização de cimentos comerciais com diferentes teores de escória. Optou pelo uso do CP III-40 RS, CP II-E 40 e CP V ARI plus com quantidades de escória alto-forno na sua mistura de 55%, 34% e 0%, respectivamente. Nos resultados do autor aos 84 dias com cura submersa em água saturada com cal, as amostras compostas por cimentos com maior teor de escória alto-forno apresentaram uma maior recuperação das propriedades mecânicas.

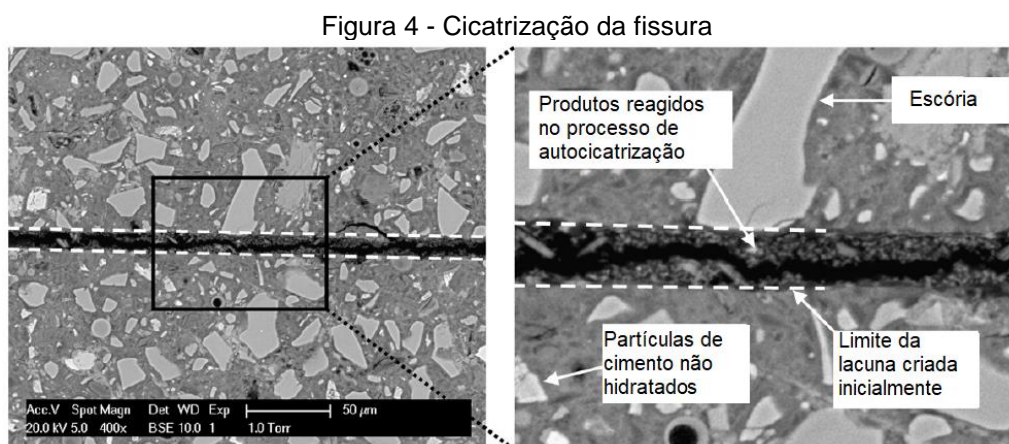
Além disso, Takagi (2013) observou também o processo de absorção de água por capilaridade das amostras. Onde observou que para as amostras com um teor de substituição de 55% cimento por escória, maior foi a redução de absorção de água ao longo do tempo. De acordo com o autor, isso acontece pelo motivo de que quanto maior for a adição de escória, maior será a autocicatrização das amostras e menor será a absorção de água.

No trabalho desenvolvido por Jiang et al. (2015) onde foi substituído 8% do cimento adicionado na mistura por escória alto-forno também foi observado uma queda na absorção de água por capilaridade nas amostras tanto aos 7 como aos 28 dias de cura submersa em água. Porém, além disso, os autores comentam que os resultados aos 7 dias são mais satisfatórios do que aos 28 dias, mostrando que o processo autocicatrizante acontece mais rápido nas primeiras idades.

Por outro lado, nos trabalhos de Cascudo (1997) e Ferreira (2003) foi observado um aumento na absorção de água com o aumento da cicatrização das amostras. De acordo com os autores, isso ocorreu devido a diminuição dos

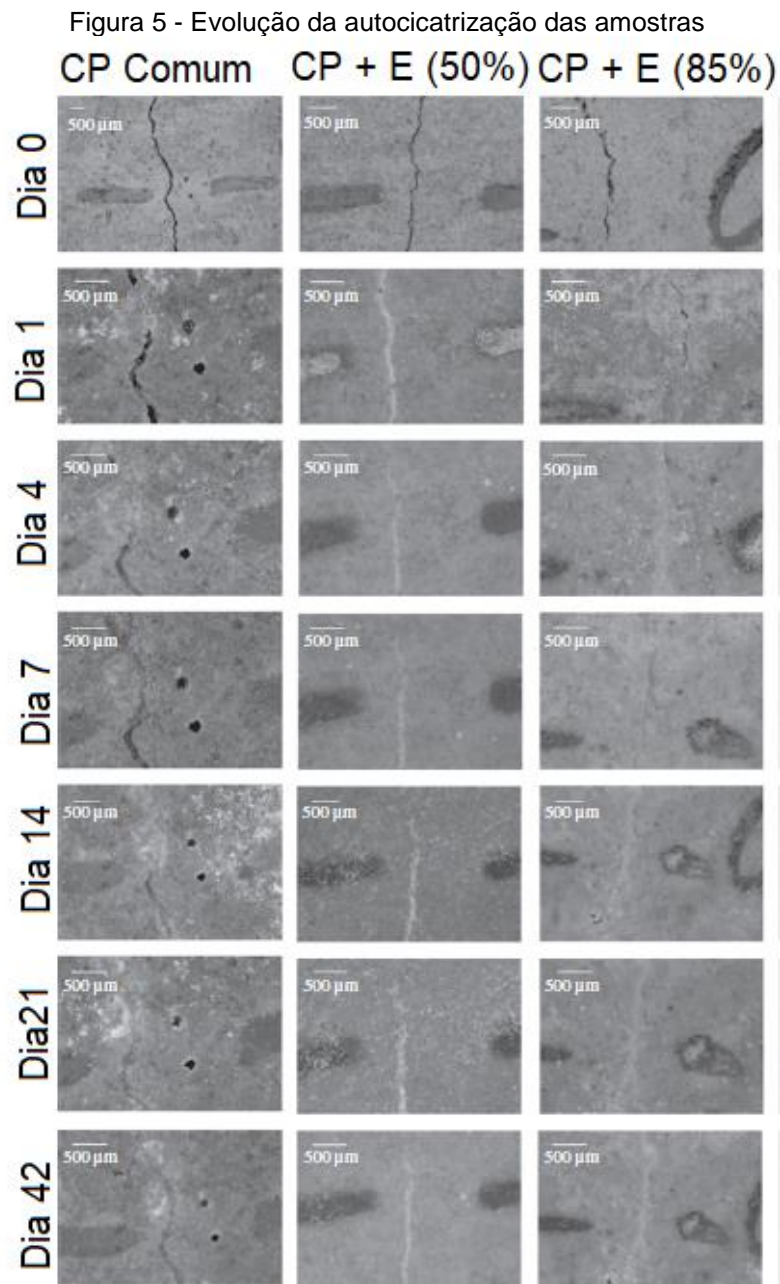
poros das amostras, o que ajuda a aumentar a sucção de água aumentando a absorção por capilaridade ao longo do tempo.

No trabalho desenvolvido por Huang et al. (2014) onde se substituiu cerca de 66% da quantidade de cimento adicionada na mistura por escória alto-forno, foi analisado o processo de autocicatrização das amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram expostas a cura ambiente por 28 dias e 220 horas de cura submersa saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ao final deste processo, os autores observaram o início da cicatrização das amostras. Isso pode ser observado na Figura 4.



Fonte: Adaptado de HUANG et al. (2014).

Já no estudo de Van Tittelboom et al. (2012) foi feita uma substituição parcial da quantidade de cimento adicionado na mistura de concreto por escória alto-forno de forma gradual. As porcentagens de substituição foram de 50%, 70% e 85%, ambas as amostras com relação água/cimento de 0,40. Com o auxílio de um microscópio óptico foi possível analisar o processo de autocicatrização das amostras em diferentes dias como mostrado na Figura 5. Foi constatado que para fissuras com espessura limitadas, após um dia de cura submersa estavam completamente fechadas. Além disso, constataram também que larguras com 200 μm foram completamente seladas dentro de um prazo de 42 dias.

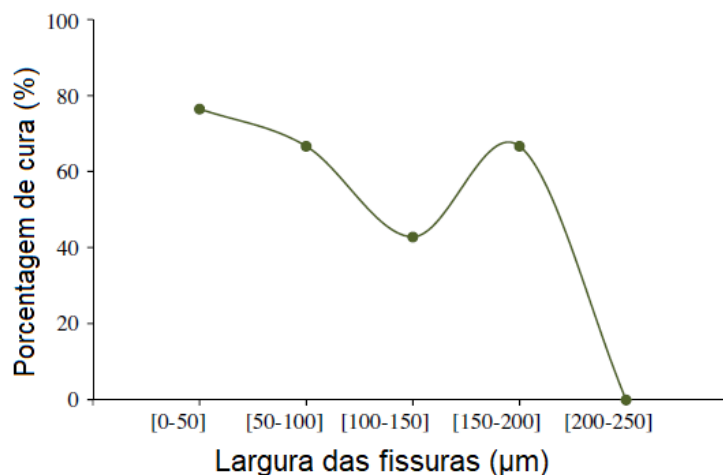


Fonte: Adaptado de VAN TITTELBOOM et al. (2012).

Van Tittelboom et al. (2012) também dividiram em categorias as fissuras de acordo com as suas larguras iniciais, podendo ser divididas em: 0 – 50 µm, 50 – 100 µm, 100 – 150 µm, 150 µm – 200 µm e 200 – 250 µm. As porcentagens de cura das aberturas podem ser analisadas na Figura 6, correspondendo a eficiência da cicatrização após os 42 dias de cura submersa. Com essa curva, foi concluído que quanto maior for a largura das fissuras mais difícil será recupera-las inteiramente. Neste estudo de caso, não foi possível cicatrizar

totalmente aberturas com mais de 200  $\mu\text{m}$  no prazo de 42 dias, porém, segundo os autores, isso seria possível com mais alguns dias de cura.

Figura 6 - Porcentagem de cura das fissuras



Fonte: Adaptado de VAN TITTELBOOM et al. (2012).

No estudo de Oliver et al. (2016) tinha como objetivo analisar o efeito da escória alto-forno no processo autocicatrizante em concretos recém fissurados e expostos a cura úmida. Após 7 dias, foi possível observar um resultado positivo, onde amostras que continham adição de escória alto-forno apresentaram um progresso de autocicatrização em até 2 vezes mais quando comparado as amostras que não continham escória.

### 2.1.2 Restrição da largura das fissuras por adição de fibras

A incorporação de fibras no concreto é um método que pode ajudar na autocura, podendo ser adicionado fibras de PVA, aço, carbono, vidro, entre outras. Pode auxiliar tanto na restrição da largura das aberturas como na criação de pontes para a cristalização dos grãos anidros. (ZHANG et al., 2020).

O uso de fibras com o objetivo de restringir a largura de fissuras foi estudado por Li et al. (2013) a fim de promover a cura autógena do concreto. Inicialmente, foram utilizadas fibras de polietileno, porém por serem um pouco mais caras, as mesmas foram substituídas por fibras de álcool polivinílico (PVA). Os resultados obtidos foram satisfatórios para fissuras de 30  $\mu\text{m}$ , sendo possível

observar a cicatrização total. Entretanto, para fissuras de 50  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$  se observou apenas fechamentos parciais (Li et al., 2013).

A adição de fibras no concreto favorece a produção dos produtos de cura. Essas fibras presentes no concreto ajudam a diminuir a seção transversal da rachadura, aumentando o pH do material e assim, diminuindo a possibilidade de escoamento. Além disso, devido a razões fluidodinâmicas, quando a água escoar ao redor da fibra uma zona turbulenta é formada. Nesta zona, a velocidade da água pode ser estagnada, favorecendo a precipitação do produto de cura formado pela hidratação dos grãos de cimento disponíveis fechando a rachadura. (Li et al., 2013).

De acordo com Moreira (2017), a adição de 0,28% de fibras de sisal na mistura com 1,00% de aço aprimorou o processo de autocicatrização, acelerando o processo de deposição de carbonato de cálcio na fissura. A autocicatrização foi mais rápida para essas amostras com adição de fibras celulares, onde, após 6 meses de cura condicionada a ciclo de molhagem e secagem, apresentaram indícios de cura.

No estudo realizado do Yang et al. (2009) constatou-se que com o uso de 4,5% de fibras de PVA na composição do concreto causou uma diminuição nas larguras das fissuras de 150  $\mu\text{m}$  para 50  $\mu\text{m}$ . Com isso, apresentou de 76% a 100% das aberturas curadas recuperando quase que totalmente as propriedades mecânicas.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA

Há vários fatores que podem influenciar durante o processo de cicatrização autógena. Dentre os principais é possível citar a relação água/cimento, tipo de aglomerante usado, a idade do concreto, tamanho das fissuras e ambiente de exposição.

### 2.2.1 Relação água/cimento

Um dos fatores que mais influenciam na autocicatrização autógena é a relação água/cimento, pois é a quantidade de água disponível na mistura que definirá o nível de hidratação do concreto na reação inicial. Para relações de água/cimento menores, maiores serão a quantidade de grãos anidros disponíveis para a autocicatrização das fissuras quando em contato com a água. Já em relações de água/cimento mais altas, a hidratação na reação inicial será relativamente maior, diminuindo a quantidade de grãos não hidratados disponíveis futuramente para ajudar no processo de autocicatrização.

Os trabalhos disponíveis para a leitura apresentam diferentes opiniões sobre a relação água/cimento adequada para a hidratação total dos grãos de anidro do cimento. Segundo Gruyaert et al. (2010), a relação de água/cimento de 0,5 levou a hidratação de 74% do concreto.

Levando em conta o posicionamento de Neville (2016), existe uma relação água/cimento mínima, quando o mesmo for curado em água, de 0,36. De acordo com esse trabalho, 0,36 é uma relação suficiente para que haja a hidratação completa, pois em relações menores que a recomendada pode acontecer de não ter espaço suficiente para a acomodação dos grãos de hidratação criando espaços vazios.

Já quando a cura acontece em meios onde a mesma não é feita por intermédio da água, para se obter uma hidratação completa a relação de água/cimento indicada é de 0,42. A hidratação completa acontece quando 1 grama de cimento se combina com cerca de 0,23 g de água e absorve fisicamente em torno de 0,19 g de água. Porém, a hidratação total geralmente não é possível devido a não distribuição uniforme de água e o espaço limitado para a acomodação dos produtos hidratados. (JENSEN; HANSEN, 2001).

Levando em consideração a relação água/cimento, é possível observar que quanto menor ela for e maior a quantidade de água adicionado na mistura, melhor será a autocicatrização. Isso se deve por conter um maior número de grãos não hidratados, devido à baixa relação água/cimento. (Zhang et al., 2020).



Qian et al. (2009) concorda que quanto menor for a relação água/cimento melhor será o processo autocicatrizante das amostras. Mas, fala também que o processo está relacionado à disponibilidade de grão tanto do cimento utilizado como do material complementar, neste caso, a escória alto-forno.

Além de influenciar na quantidade de grãos anidros, a relação água/cimento pode interferir em outros aspectos do concreto. Sendo eles: trabalhabilidade, porosidade, permeabilidade, resistência a compressão e durabilidade.

A trabalhabilidade pode ser definida como uma propriedade física do concreto no seu estado fresco, quando relacionado com a sua facilidade e homogeneidade que o mesmo pode ser lançado, misturado, adensado e, no seu estado endurecido quando referente ao seu acabamento (NEVILLE, 2016). Sendo assim, quando maior for a relação água/cimento da mistura melhor será a trabalhabilidade do concreto.

A permeabilidade e a porosidade são duas características do concreto que podem estar relacionadas, pois, a permeabilidade refere-se a uma taxa de fluxo de fluido em um sólido e a porosidade à quantidade de espaços vazios. Além disso, a resistência a compressão apresenta uma relação inversamente proporcional a relação água/cimento, sendo comprovada a partir da Lei de Adrams. Tendo em vista que com o aumento da relação água/cimento gera um acréscimo na porosidade do concreto, acaba que, por consequência, diminuir a resistência a compressão da estrutura (METHA; MONTEIRO, 2008).

### **2.2.2 Ambiente de exposição**

Segundo Sisomphon et al. (2013), a condição de exposição desempenha um papel importante no processo de autocura. A autocicatrização autógena só ocorre se houver um mecanismo que intensifique, ou seja, ajude o processo acontecer. Esses mecanismos podem ser divididos em três categorias: ingresso de líquidos e gases, fornecimento de calor e formação de fissuras, como mostrado na Quadro 1. Esse mecanismo de intensificação do processo está

diretamente ligado ao ambiente em que está exposto, dependendo quase que inteiramente da presença da água. (Van Tittelboom e De Belie, 2013).

Quadro 1 - Mecanismos de gatilho para a autocicatrização autógena

	<b>Mecanismo de gatilho</b>	<b>Resultados</b>
<b>Ingresso de líquidos e gases</b>	Água + CO <sub>2</sub>	Cristalização por catalizador com precipitação de fases fibrosas de calcita
	Água	Cicatrização autógena por hidratação contínua
	Água + CO <sub>2</sub>	Cicatrização autógena por precipitação de CaCO <sub>3</sub>
	Água	Expansão, intumescência e precipitação de aditivos
	Água	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Umidade relativa do ar	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Solução de cloretos	Degradação do revestimento de tubos porosos de PP e liberação de Ca(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> através dos poros
	Água + O <sub>2</sub>	Ativação de esporos e precipitação bacteriana de CaCO <sub>3</sub>
	Água	Precipitação bacteriana de CaCO <sub>3</sub>
	CO <sub>2</sub>	Degradação do revestimento envolto em partículas de argila expandida e liberação de Na <sub>2</sub> PFO <sub>3</sub>
<b>Fornecimento de calor</b>	90°C + água	Fechamento de fissuras por fitas retráteis de polietileno de tereftalato (PET) seguido pela cicatrização autógena
	100°C	Derretimento do revestimento de cera envolto em cápsulas porosas de PP e liberação de Metil Metacrilato
	150°C	Derretimento de partículas de copolímeros de acetato de vinil-etileno VAE
	48°C	Derretimento do revestimento de parafina e agentes retardadores de hidratação
	93°C	Derretimento de filmes de copolímeros de VAE ao redor de arames espiradas e liberação de resinas epóxi
<b>Formação de fissuras</b>	+ água	Fechamento de fissuras por fibras superelásticas de liga metálica com memória de forma seguida pela cicatrização autógena
	+ água	Rompimento de cápsulas e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Delaminação de fibras vegetais e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Atuação do bombeamento e injeção de agentes cicatrizantes para dentro de camada de concreto poroso

Fonte: Adaptado de VAN TILLERBOOM e DE BELIE (2013).

Sisomphon et al. (2013) trabalhou com quatro diferentes tipos de cura, sendo elas: a exposição contínua na água, submersão com água renovada a cada 12 horas, processos de molhagem e secagem e exposição ao ar. Os autores concluíram que o processo de molhagem e secagem apresentou melhor desempenho na recuperação da resistência mecânica e cicatrização. Já na condição de cura de exposição ao ar não foi observado nenhuma evidência de cicatrização. Quando comparado os métodos exposição contínua na água e

submersão renovada a cada 12 horas, a segunda técnica apresentou um melhor desempenho quanto a exposta de forma contínua.

Para Qian et al. (2010) e Sisomphon et al. (2013), quando se compara duas situações diferentes de cura, a submersa e a por processos de molhagem e secagem, ambos concordam que o segundo método apresenta melhor desempenho. Isso acontece pois no processo de molhagem e secagem há a interação com o CO<sub>2</sub> que potencializa a cicatrização.

No trabalho feito por Kanellopoulos et al. (2015) foi proposto o uso de cápsulas de vidro com silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) e sílica coloidal (SiO<sub>2</sub>) em cura ambiente, úmida e submersa. Observou-se que tanto para a recuperação das fissuras quanto para as propriedades mecânicas, o método se mostrou mais eficiente na cura submersa, recuperando 100% das fissuras. Já na cura com umidade relativa alta houve uma recuperação parcial e as amostras que foram expostas apenas ao ambiente não mostraram resultados.

No desenvolvimento de Maes et al. (2016), onde foi aplicado o processo de molhagem e secagem de 12 horas e cura submersa, ambos com presença de cloreto de sódio (NaCl) na água, não foram observadas diferenças significativas. Entretanto, no processo de ciclos foi observado a cicatrização de fissuras 0,15 mm logo nos primeiros 7 dias, enquanto que processo de cura submersa, os resultados significativos demoraram um pouco mais para aparecer.

Quando comparado curas submersas, com ou sem a presença de hidróxido de cálcio na água, Huang et al. (2014) observou que o carbonato de cálcio se torna o principal componente responsável pela cura das fissuras quando há hidróxido de cálcio diluído na água. Sendo assim, foi possível concluir que os produtos criados para a recuperação das fissuras não dependem somente da hidratação contínua dos grãos, mas também da formação da portlandita na reação.

Qian et al. (2009) analisou também o processo de cura submersa em água ou ao ar livre. Quando ambos são comparados, note-se que o primeiro

método mostra uma taxa de recuperação de 65-105% quanto que para ao ar livre a taxa fica entre 40-60%.

### **2.2.3 Idade do concreto e das fissuras**

Como já descrito, quanto maior for a quantidade de grãos anidros disponíveis para sofrer o processo de hidratação melhor será o desempenho da cicatrização. Essa quantidade de grãos disponível está diretamente relacionada com a idade de concreto, pois quanto maior ela for maior também será a hidratação na matriz cimentícia, resultando em uma baixa porção de grãos disponíveis para hidratação tardia. Com isso, é possível concluir que a idade do concreto tem relação direta com a capacidade de regeneração, bem como a idade da fissura, sendo que para fissuras em idades iniciais a cura é mais intensa e rápida. (CAPPELLESSO, 2018).

O aumento da idade do concreto pode indicar uma maior hidratação e como consequência uma queda no potencial de recuperação. Porém, se observa que com o passar do tempo há uma estabilização no processo, onde não acontecem mudanças significativas na quantidade de grãos para a hidratação tardia disponíveis. (BIANCHIN, 2018).

Zhong e Yao (2008) comprovam essa ideia testando a cura de fissuras formadas logo após a desforma do concreto e 60 dias depois. De acordo com os resultados, para os concretos onde as fissuras foram feitas logo após a deforma, mostraram uma melhor recuperação das propriedades mecânicas. Enquanto que, para o caso avaliando com fissuras feitas 60 dias depois, a recuperação observada foi quase nula.

Oliver et al. (2009) observou que para as amostras que foram fissuradas logo após a desforma e colocadas em cura submersa em água, até os 14 dias apresentaram uma recuperação rápida e depois o efeito foi decrescendo. Ou seja, de acordo com o autor o processo de autocicatrização acontece mais rapidamente após duas semanas da formação das fissuras e depois vai desacelerando.

No estudo de Yildirim et al. (2018) foi produzido um concreto Engineered Cementitious Composite (ECC) que possui uma alta capacidade de deformação e recuperação. Nele foi adicionado adições de cinza volante e escória alto-forno, juntamente com fibras de PVA e aditivo superplastificante. As amostras permaneceram por um ano no processo de cura em sacos plásticos isolados com umidade relativa do ar de  $95\pm 5\%$  e temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ . Após esse período, as mesmas foram submetidas a cargas de tração para criar as fissuras e expostas a diferentes meios de cura, sendo eles água, ar, ciclos de molhagem e secagem e ar +  $\text{CO}_2$ , no qual os resultados foram analisados após 90 dias. Constatou-se que para as amostras expostas a cura em ciclos de molhagem e secagem, houve o selamento de fissuras de até  $485\ \mu\text{m}$  em 30 dias. Com isso, os autores concluíram que a cura autógena independe da idade da estrutura, mas sim das condições de cura e da composição da mistura.

#### **2.2.4 Espessura das fissuras**

Mesmo que as normas apresentem limitações as espessuras de fissuras relacionadas com a agressividade, sem dúvida que uma abertura, por menor que seja, é um caminho mais fácil para a penetração de agentes agressivo. Sendo assim, é recomendado, sempre que possível, que se façam manutenções com o objetivo de minimizar a entrada desses agentes (FILHO; CARMONA, 2013).

De acordo com Reinhardt et al. (2013) a cicatrização das fissuras na cura autógena depende da espessura da fissura, por isso eles afirmam que quanto mais próximas as faces estiverem uma das outras, maior será a possibilidade de recuperação. Justificam essa ideia dizendo que quanto menores as fissuras, a expansão da matriz cimentícia tem um efeito mais significativo, ocorrendo a cicatrização mais rápido. Em fissuras mais largas, esse processo de expansão irá ocorrer da mesma forma, porém, devido ao distanciamento entre as faces, o mecanismo terá uma contribuição menor.

Para Yang et al. (2011), as aberturas com maiores espessuras não conseguem selar devido à falta de grãos disponíveis para a hidratação. E como

nem sempre há a disponibilidade da porção de grãos suficientes, acarretam em espaços sem serem preenchidos por inteiro.

Com o intuito de reduzir a espessura das fissuras, Li et al. (2013) propôs o uso de fibras com o objetivo de diminuir a fragilidade do concreto favorecendo a abertura de rachaduras menores. Com fissuras mais estreitas, o processo de aut cicatrização ocorre de forma mais eficiente e mais rápida devido a menor necessidade de produtos para o fechamento.

Cappelesso (2018) observou que para concretos confeccionados com o cimento CP II-F, foram obtidas fissuras com maior espessura para relações água/cimento menores de acordo com o método de abertura de fissuras utilizado. Para aberturas realizadas aos 3 dias após a concretagem, o tamanho variou entre 0,5 a 2 mm para relação água/cimento de 0,3; 0,3 a 1,2 mm para relação água/cimento de 0,4 e de 0,2 a 1 mm para relação água/cimento de 0,5.

### **2.2.5 Tipos de cimento**

As características e propriedades dos concretos vão depender da qualidade e proporções de materiais que são compostos. Do ponto de vista químico, o cimento é o mais ativo, podendo-se dizer que é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos no produto final desejado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002). De acordo com a NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos (ABNT, 2018) a composição básica do cimento é composta pelo clínquer e, a partir da adição de outros materiais. A norma ressalta também que cada um dos tipos é indicado para determinadas aplicações por apresentar diferentes propriedades mecânicas.

Levando em conta a composição básica, o cimento Portland tem em sua matéria-prima calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Sua fabricação consiste na moagem e mistura dos materiais em um forno giratório onde estes materiais são parcialmente fundidos tomando forma de pequenas esferas. Essas esferas são denominadas de clínquer, que passam por um processo de resfriamento

bruto para posteriormente serem moídos e se transformarem em um pó bastante fino. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Os materiais que compõem o clínquer são os principais constituintes do cimento e influenciam de forma significativa o processo de hidratação. Esses compostos são representados por abreviações, onde cada um dos óxidos recebe uma letra: CaO = C; SiO<sub>2</sub> = S; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F; e H<sub>2</sub>O = H. No Quadro 2 são mostrados os compostos do cimento Portland, com suas composições e abreviaturas. (NEVILLE, 2016).

Quadro 2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviaturas
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Fonte: NEVILLE (2016).

Os óxidos C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF estão presentes no cimento Portland comum em diferentes quantidades, sendo elas, 45% e 60%, 15% e 30%, 6% e 12%, e 6% e 8%, respectivamente (MEHTA; MONEIRO, 2008). Cada composição apresenta diferentes características, onde o C<sub>3</sub>S e o C<sub>2</sub>S são os responsáveis principais pela resistência da matriz cimentícia hidratada. Já o C<sub>3</sub>A está presente em pequena quantidade no cimento pois apresenta uma reação bastante acentuada quando misturado com água, podendo acarretar na pega instantânea do concreto. Para impedir isso, é adicionado sulfato de cálcio ao clínquer. Além do C<sub>3</sub>A, o C<sub>4</sub>AF também reage com o sulfato de cálcio formando sulfoferrito de cálcio e sulfoaluminato de cálcio, que ajudam a acelerar o processo de hidratação dos silicatos. (NEVILLE, 2016).

Como visto nas Reações 1 e 2, já citadas no tópico 2.1, ambos os silicatos necessitam de quase a mesma quantidade de água para gerar o Ca(OH)<sub>2</sub>, porém o C<sub>3</sub>S produz mais que o dobro quando comparado ao C<sub>2</sub>S (NEVILLE, 2016). Os compostos gerados no processo de hidratação, tanto o C-S-H como o Ca(OH)<sub>2</sub>, são importantes para a cicatrização autógena. Podendo acontecer pela hidratação tardia dos grãos anidros que geram o C-S-H, como pelo processo de carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub>. Como cimentos com maiores teores

de  $C_3S$  tem maior tendência a produzir maior quantidade de  $Ca(OH)_2$ , pode ser que o uso de um cimento com essas características apresente uma maior potencialidade de autocicatrização pelo processo de carbonatação do hidróxido de cálcio lixiviado, resultando em concretos com menor durabilidade. (CAPPELLESSO, 2018).

É importante ressaltar que no estado endurecido, o concreto é composto de grãos de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratados. O C-S-H compõem de 50% a 60% dos volumes de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, sendo responsável pelas propriedades do mesmo. A portlandita, ou  $Ca(OH)_2$ , constitui cerca de 20% a 25% dos cristais formado, auxiliando também no aumento da resistência como o C-S-H. O sulfoaluminato de cálcio representa cerca de 15% a 20% do volume formado, por isso, possui apenas um papel secundário em relação as propriedades do composto. As partículas de grãos de clínquer não hidratadas podem ser encontradas devido à má distribuição das partículas de clínquer ou o grau de hidratação. Com o progresso do processo de hidratação, as partículas menores se dissolvem e as maiores diminuem de tamanho. Por conta do espaço limitado disponível, os produtos de hidratação tendem a se cristalizar bem próximo das partículas em hidratação, criando uma camada ao redor delas. (MEHTA; MONEIRO, 2008).

Além da composição do cimento, é interessante levar em consideração as adições minerais, pois contribuem na autocicatrização do concreto, visto que produzem C-S-H secundário, como já falado no item 2.1.3 deste trabalho. Por isso torna-se vantajoso o uso de materiais cimentícios que apresentam na sua composição escória alto-forno, sílica ativa, cinza volante, entre outros.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido com o objetivo de atender os propósitos descritos inicialmente, focados na análise da autocicatrização do concreto.

Como variáveis fixas e controláveis podemos citar os tipos de materiais que serão empregados, como o aglomerante, agregados graúdos e miúdos e adições minerais. As relações água/cimento, fixadas em 0,30, 0,40 e 0,50 e os dias de execução dos ensaios definidos em 28 e 63 dias após as amostras serem colocadas nos tanques de cura submersa. Essas datas são correspondentes para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Já para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura, foi definido apenas a execução de ensaio para os 63 dias após a colocação das amostras em cura. Além disso, o tipo de cura em que as amostras serão expostas, optado por utilizar cura submersa em água. Já como variáveis não controláveis, é possível apontar a temperatura e a umidade do local em que serão executados o concreto e os ensaios.

Por fim, como variáveis de resposta será avaliado a resistência à compressão com o objetivo de analisar as mudanças na resistência da estrutura com a adição de minerais. Além desta, também terá o ensaio de absorção de água executado com as amostras fissuras, com o objetivo de analisar as possíveis alterações. Por último, a análise de imagens feita com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura com o intuito de observar o processo de autocicatrização das amostras.

Para se entender melhor o programa experimental, foi elaborado uma matriz experimental, demonstrada na Figura 10.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais escolhidos para a fabricação dos concretos estudados no trabalho, foram divididos nas seguintes categorias: cimento, agregados, minerais, aditivo e fibras. Além disso, foi estipulado a água que será utilizada

para a mistura e um traço de referência levando em consideração o estudo de Cappellessio (2018) sobre concretos autocicatrizantes. Por fim, foram definidas as misturas que serão executadas, como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Composição das misturas com suas respectivas siglas

Nomenclatura	Relação a/c	Composição
0,3CP	0,3	Cimento + Água
0,3CP25E		Cimento + Água + 25% de escória alto-forno
0,3CP50E		Cimento + Água + 50% de escória alto-forno
0,4CP	0,4	Cimento + Água
0,4CP25E		Cimento + Água + 25% de escória alto-forno
0,4CP50E		Cimento + Água + 50% de escória alto-forno
0,5CP	0,5	Cimento + Água
0,5CP25E		Cimento + Água + 25% de escória alto-forno
0,5CP50E		Cimento + Água + 50% de escória alto-forno

Fonte: Autora (2021).

O traço em massa escolhido é 1:1,37:2,18 definido como um traço rico. Optou-se pelo uso deste devido a maior quantidade de cimento na sua composição, aumentando proporcionalmente a parcela de mineral utilizado. Isso torna-se relevante pois o mesmo irá substituir o aglomerante adicionado a mistura em quantidades de 25% e 50%. Ainda de acordo com o trabalho da autora Cappellessio (2018), foi definido o consumo de cimento de 481,67 kg/m<sup>3</sup>. Com esse traço inicial e o dado de consumo de cimento, tornou-se possível o cálculo da quantidade de materiais necessárias, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantificação de material total utilizada para a fabricação dos CP's

Mistura	Relação a/c	Traço	Cimento (kg)	Escória Alto-Forno (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Fibra (kg)	Aditivo (kg)
C + A	0,30	1:1,37:2,18	9,08	0,00	12,44	19,79	2,72	0,02	0,06
C + A + E25		1:1,37:2,18	6,81	2,27	12,44	19,79	2,72	0,02	0,06
C + A + E50		1:1,37:2,18	4,54	4,54	12,44	19,79	2,72	0,02	0,06
C + A	0,40	1:1,37:2,18	9,08	0,00	12,44	19,79	3,63	0,02	0,01
C + A + E25		1:1,37:2,18	6,81	2,27	12,44	19,79	3,63	0,02	0,01
C + A + E50		1:1,37:2,18	4,54	4,54	12,44	19,79	3,63	0,02	0,01
C + A	0,50	1:1,37:2,18	9,08	0,00	12,44	19,79	4,54	0,02	0
C + A + E25		1:1,37:2,18	6,81	2,27	12,44	19,79	4,54	0,02	0
C + A + E50		1:1,37:2,18	4,54	4,54	12,44	19,79	4,54	0,02	0

Fonte: Autora (2021).

### 3.1.1 Aglomerante

Para que fosse possível verificar a influência da escória alto-forno misturada junto ao cimento, decidiu-se por utilizar o cimento CP V ARI por apresentar uma composição mais pura apresentando uma menor influência nos resultados. O cimento foi caracterizado levando em consideração suas características físicas e sua composição. Para a análise física foram realizados ensaios de massa específica NBR 16605 (ABNT, 2017) e índice de finura NBR 11579 (ABNT, 2012). Na Tabela 3 é possível analisar os resultados obtidos.

Tabela 3 - Resultado dos ensaios de caracterização do cimento

Ensaio Realizado	Norma	Exigência da Norma	Resultado do Ensaio
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16605	-	2,95
Índice de Finura - Resíduo na Peneira #75 µm (%)	NBR 11579	≤ 6,0	≤ 6,0

Fonte: Autora (2021).

### 3.1.2 Água

Para o amassamento da mistura, foi utilizada a água fornecida pela rede de distribuição de Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE). A mesma é responsável pelo tratamento da rede de abastecimento público da cidade de Caxias do Sul.

### 3.1.3 Agregado Miúdo

Neste trabalho foi utilizado apenas um tipo de agregado miúdo na mistura, sendo este a areia média, tendo em vista a sua disponibilidade, qualidade e viabilidade econômica. O mesmo foi fornecido pelo Laboratório de Engenharia Civil (LENC) da Universidade de Caxias do Sul. Após a escolha, foram realizados ensaios de granulometria e dimensão máxima característica seguindo a NBR NM 284 (ABNT, 2013), bem como massa específica de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Os resultados dos ensaios podem ser visualizados na Tabela 4.

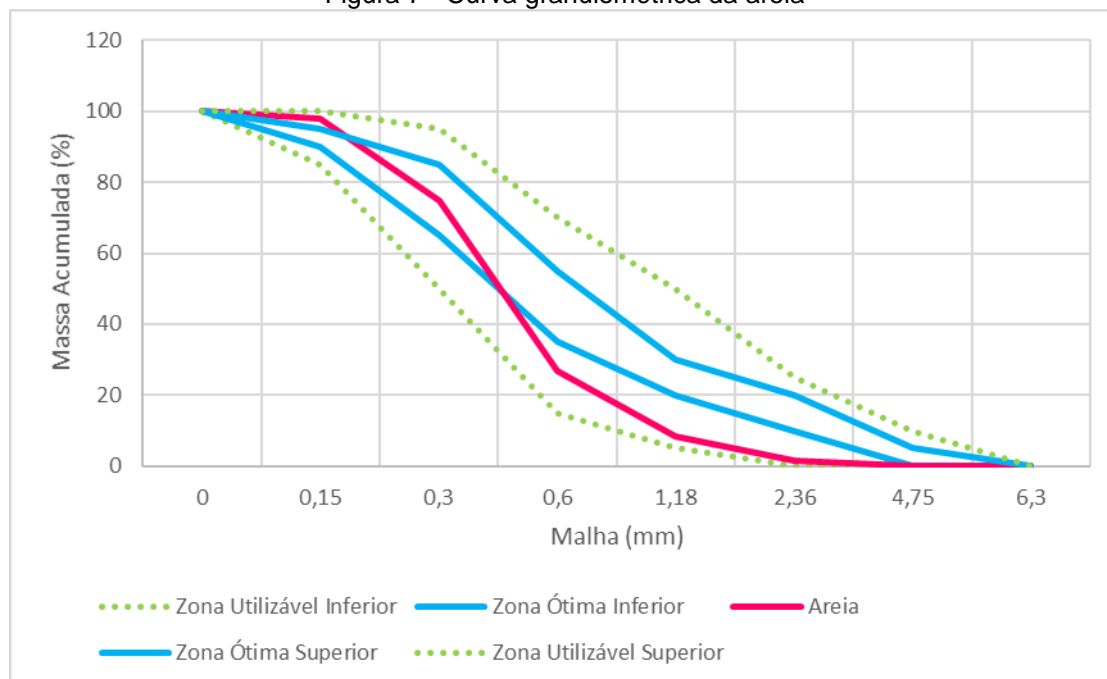
Tabela 4 - Resultado dos ensaios de caracterização da areia

<b>Ensaio de Granulometria</b>		
Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa Acumulada (%)
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	2	2
1,18	7	9
0,60	18	27
0,30	48	75
0,15	23	98
Fundo	2	100
Diâmetro Máximo (NBR NM 248) = 4,75mm		
Módulo de Finura (NBR NM 248) = 2,10		
Massa Específica (NBR NM 52) = 2,62 g/cm <sup>3</sup>		

Fonte: Autora (2021).

A partir dos dados obtidos na Tabela 4, foi possível montar a curva granulométrica da areia utilizada na mistura e dos limites de distribuição da granulometria dos agregados miúdo de acordo com a NBR 7211 (ABNR, 2009). Na Figura 7 é possível verificar a curva constatando que o agregado utilizado está dentro dos parâmetros normativos.

Figura 7 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.4 Agregado Graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado somente a brita 1, com origem basáltica, escolhida a partir da disponibilidade na região, qualidade e dimensão. O mesmo foi fornecido pelo Laboratório de Engenharia Civil (LENC) da Universidade de Caxias do Sul.

Após a escolha, foram realizados ensaios de caracterização, tais como composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura seguindo a NBR NM 284 (ABNT, 2003) e determinação da massa específica NBR NM 53, onde os resultados estão descritos na Tabela 5.

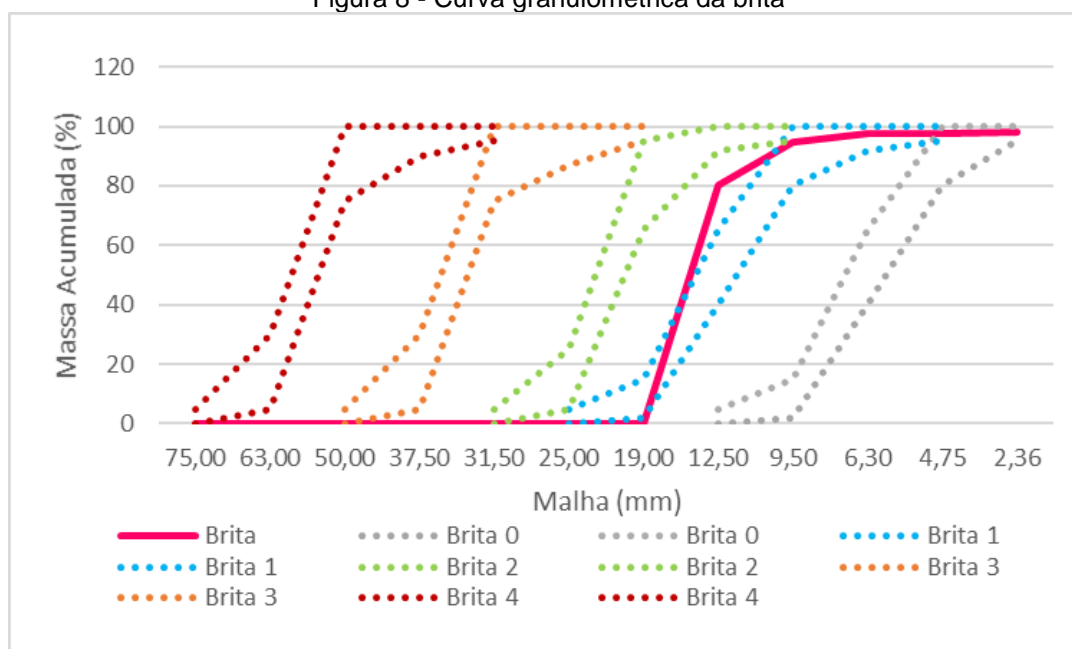
Tabela 5 - Resultado do ensaio de granulometria da brita

<b>Ensaio de Granulometria</b>		
Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa Acumulada (%)
19,00	0	0
12,50	80	80
9,50	14	95
6,30	3	98
4,75	0	98
2,36	1	98
Fundo	2	100
Diâmetro Máximo (NBR NM 248) = 19,0 mm		
Módulo de Finura (NBR NM 248) = 4,68		
Massa Específica (NBR NM 53) = 2,54 g/cm <sup>3</sup>		

Fonte: Autora (2021).

Com os resultados obtidos no ensaio de granulometria e os parâmetros descritos na NBR 7211 (ANBR, 2009) foi possível gerar a curva granulométrica do agregado. A mesma pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Curva granulométrica da brita



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.5 Escória Alto-Forno

Para a análise da autocatrização do concreto foi escolhido utilizar escória alto-forno como adição mineral substituindo 25% e 50% do cimento adicionado na mistura. Na Tabela 6 é possível visualizar os resultados obtidos diante das propriedades físico-químicas da escória alto-forno utilizada.

Tabela 6 - Resultado dos ensaios de caracterização da escória alto-forno

Ensaio Realizado	Norma	Exigência da Norma	Resultado do Ensaio
Índice de Desempenho aos 28 dias	NBR 12653	$\geq 75\%$	125,14%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16605	-	2,86
Índice de Finura - Resíduo na Peneira #75 $\mu\text{m}$ (%)	NBR 11579	$\leq 6,0$	$\leq 6,0$

Fonte: Autora (2021).

O material empregado em questão apresentou um índice de desempenho aos 28 dias em relação a argamassa de referência de 125,14%. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), o índice mínimo necessário para ser considerado um material pozolânico é de 75%. Portanto, a escória alto-forno utilizada apresenta atende os requisitos mínimos da norma, sendo considerado um material pozolânico.

### 3.1.6 Aditivo Superplastificante

Tornou-se necessário o uso de aditivos superplastificante para conseguir chegar a uma consistência de mistura onde fosse possível moldar os corpos de prova. As especificações do fabricante podem ser observadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Informações do aditivo superplastificante

<b>Identificação</b>	<b>Aditivo Superplastificante</b>
<b>Descrição</b>	aditivo orgânico à base de policarboxilatos de última geração, proporcionando elevado poder de dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água e ganho de resistência mecânica.
<b>Aspecto</b>	Aspecto físico/ Líquido viscoso / Cor mel a castanho
<b>Dosagem recomendada</b>	0,2 a 2,0% sobre o peso de cimento.
<b>Densidade</b>	1,03-1,07 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Fabricante (2021).

### 3.1.7 Fibra

Optou-se pelo uso de fibra de vidro de 12mm. As mesmas serão adicionadas no concreto em uma proporção de 900 g/m<sup>3</sup> levando em consideração o trabalho de TAKAGI (2013). As especificações do material informadas pelo fabricante podem ser vistas no Quadro 5.

Quadro 5 - Informações sobre a fibra de vidro

<b>Identificação</b>	<b>Fibra de Vidro</b>
<b>Comprimento</b>	12mm
<b>Densidade</b>	2,75 g/cm <sup>3</sup>
<b>Diâmetro</b>	14 µm
<b>Resistência à Ruptura</b>	1700MPa

Fonte: Fabricante (2021).

## 3.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Nos itens a seguir, está descrito todo o processo de execução das amostras e das fissuras. Além disso, também se apresentam os ensaios realizados tanto no estado fresco quando endurecido.

### 3.2.1 Confecção dos Traços de Concreto, Cura e Pré-Fissuração

As amostras foram moldadas de acordo com os traços definidos e seguindo a quantidade de material descrita na Tabela 2 (pg 39). Porém, devido a quantidade de corpos prova necessários e moldes disponíveis, foi preciso dividir o processo de execução em dois dias.

O processo de mistura dos materiais foi feito com o auxílio de uma betoneira de eixo horizontal, onde os materiais foram colocados na seguinte ordem: brita, fibra, dois terços de água, cimento, mineral, areia, um terço de água e o superplastificante. O aditivo superplastificante foi utilizado apenas nas misturas com menor relação água/cimento onde a quantidade máxima utilizável era de 2,0% da massa de cimento. Portanto, nas misturas com relação água/cimento de 0,40 foi necessária a adição de 0,1% de superplastificante e na relação de água/cimento de 0,3 foi adicionado 0,6%. Em contrapartida, nas amostras com relação água/cimento de 0,50 não foi necessária a utilização já que a mesma apresentou comportamento no estado fresco dentro dos padrões definido nas variáveis fixas deste trabalho.

Mesmo com o processo de execução dos corpos de prova divididos em dois dias, todas as amostras com as mesmas relações de água/cimento foram moldadas nos mesmos dias com o intuito de diminuir a interferência dos resultados. Cada uma das amostras recebeu uma nomenclatura de acordo com a ordem de execução dos traços com o intuito de conseguir controlar a data em que as mesmas foram feitas. As amostras foram identificadas, de acordo com o que está descrito no Quadro 6, onde as amostras 0,5CP à 0,4CPE50 foram moldadas primeiro e as demais 7 dias depois.



Quadro 6 - Nomenclatura das amostras de acordo com a execução

<b>Nomenclatura</b>	<b>Data de Execução</b>
0,5CP	16/06/2021
0,5CP25E	16/06/2021
0,5CP50E	16/06/2021
0,4CP	16/06/2021
0,4CP25E	16/06/2021
0,4CP50E	16/06/2021
0,3CP	24/06/2021
0,3CP25E	24/06/2021
0,3CP50E	24/06/2021

Fonte: Autora (2021).

Em cada uma das composições geradas, foram executados 10 corpos de prova cilíndricos de tamanho 10x20cm e moldados de acordo com o processo demonstrado na NBR NM 5738 (ABNT, 2015). Anterior a esse processo, os moldes foram untados com óleo mineral com o intuito de facilitar a desmolda das amostras após 7 dias.

Depois de moldados, os corpos de prova foram colocados em uma superfície lisa e em um ambiente livre da ação de intempéries, durante os primeiros 7 dias. Após este período, os mesmos foram desmoldados.

Quando todos estavam devidamente desmoldados e identificados, todos os corpos de prova passaram por esforços de compressão correspondentes da 90% da sua carga de ruptura com o intuito de criar as fissuras para a análise posterior do processo de autocicatrização. Essa carga de ruptura foi definida a partir da carga média de rompimento total de dois corpos de prova aos 7 dias. Com o valor dessas cargas, foi feita a média entre os dois valores e aplicou-se 90% do valor de média obtidos nas demais amostras. Depois de serem pré-fissurados, todos foram armazenados em tanques de com água, ficando totalmente submersos até as idades dos ensaios de 28 e 63 dias.

### **3.2.2 Ensaio no Estado Fresco**

A análise da consistência no estado fresco foi baseada e realizada de acordo com o método descrito na NBR NM 67 (ANBT, 2020). Para a execução

do ensaio é necessário um molde na forma de tronco de cone oco, uma haste de compactação com diâmetro de 16mm e uma placa de base metálica.

O ensaio foi realizado respeitando os números de camadas, golpes e tempo para a sua execução. O abatimento da mistura foi determinado a partir da diferença de altura do molde e do ponto médio da mistura.

### 3.2.3 Ensaio no Estado Endurecido

As verificações realizadas nas amostras no estado endurecido contemplam os seguintes ensaios: resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e análise de microscopia eletrônica de varredura. Os mesmos serão realizados nas datas descritas no Quadro 7.

Quadro 7 - Ensaio realizados ao longo da pesquisa

Ensaio	Norma	Idade	Número de Amostras
Resistência à Compressão	NBR 5730 (ABNT, 2018)	28 e 63 dias	2/idade
Absorção de Água por Capilaridade	NBR 9779 (ABNT,2021)	28 e 63 dias	2/idade
Microscópica Óptica	-	28 e 63 dias	1/idade

Fonte: Autora (2021).

### 3.2.4 Resistência a compressão

O ensaio de maior incidência realizado no concreto no estado endurecido é o de resistência à compressão. Isso acontece devido a sua facilidade de execução, por várias características, estarem correlacionadas diretamente a resistência, mas, principalmente, devido à importância intrínseca da resistência a compressão do concreto em projetos estruturais (NEVILLE, 2016).

Portanto, o ensaio de resistência a compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018) em corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm. Os ensaios foram realizados no laboratório LBTEC da Universidade de Caxias do Sul e tem como objetivo a análise da recuperação da resistência a compressão das amostras após serem pré-fissuradas e passarem pelo processo autocicatrizante.

### 3.2.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água foi feito levando consideração a NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade (ABNT, 2012). Os corpos de prova foram moldados com as dimensões de 10 x 20 cm e os ensaios foram feitos em 28 e 63 dias e tem como objetivo a análise da diminuição ou não da capacidade de absorção das amostras após passar pelo processo do pré-fissuração e autocicatrização.

Em cada uma das idades determinadas para os ensaios, duas amostras foram retiradas do tanque onde estavam em cura submersa e foram colocadas em uma estufa a  $105 \pm 5$  °C até que se obtivesse a constância de massa. Essa constância é obtida quando a diferença de massa dentro de 24 horas não passa de 0,5%. Após resfriadas em temperatura ambiente, foram pesadas em uma balança analítica. Determinadas as massas das amostras secas, as mesmas foram postas em uma bandeja parte do corpo de prova ficaram em contato com uma fina camada de água com o nível constante em  $5 \pm 1$  mm.

Após isso, foi realizada as medidas de massa nos períodos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h contadas a partir da colocação das amostras em contato com a água. Com os resultados da absorção por capilaridade foi calculado a partir da diferença da massa após a absorção de água com a massa seca dividido pela área de contato como mostrado na Equação 8 (ABNT, 2012).

$$C = \frac{A - B (g)}{S (cm^2)} \quad (8)$$

Onde C é a absorção de água por capilaridade em g/cm<sup>2</sup>, A é a massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado em g, B é a massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de  $(23 \pm 2)$ °C em g e S é a área da seção transversal em cm<sup>2</sup>.

### 3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi feito com o intuito de analisar visualmente a autocatrização das amostras, sendo realizado na Universidade de Caxias do Sul (UCS) no Laboratório de MEV com o auxílio do microscópio Shimadzu.

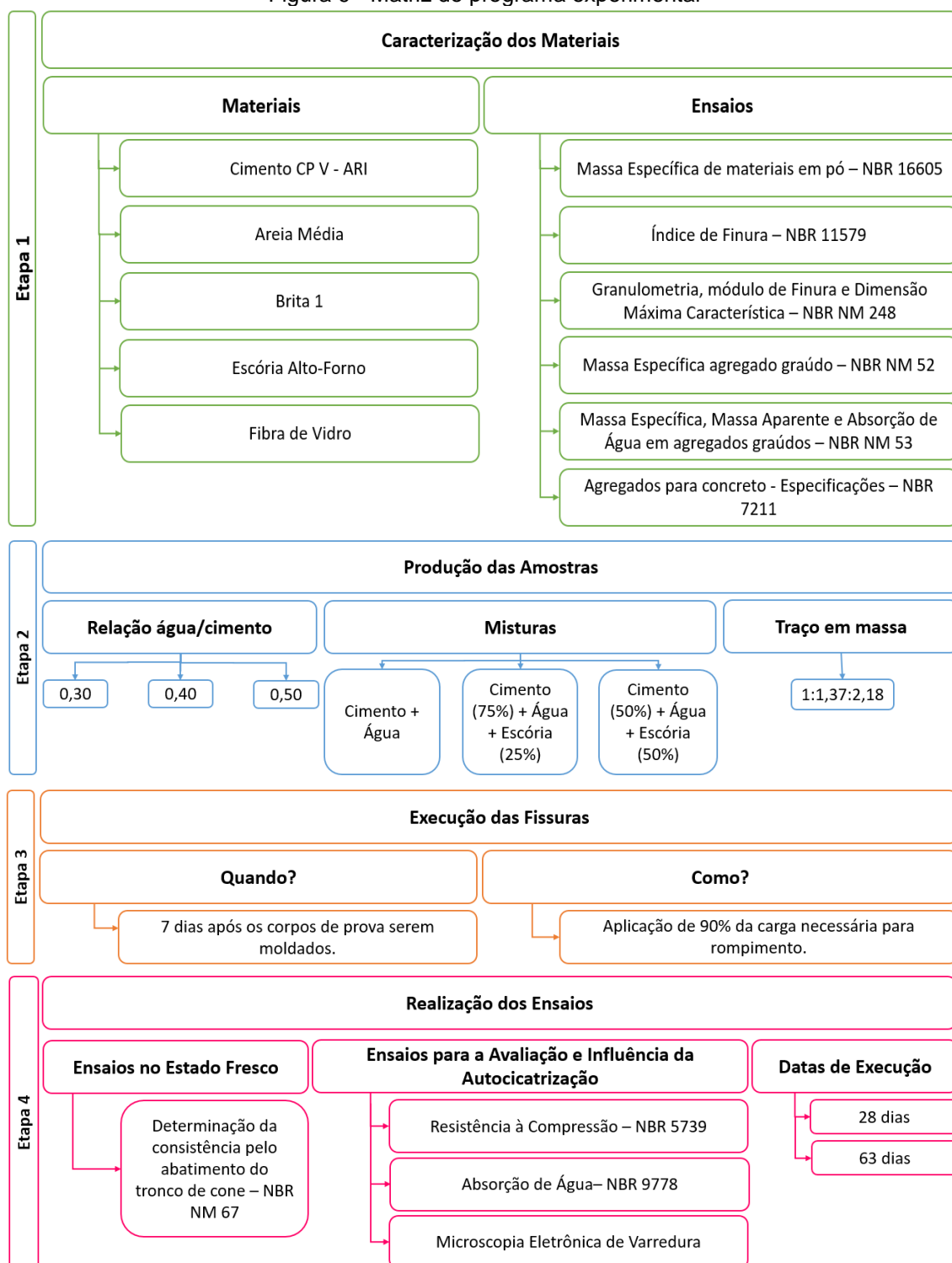
Para a realização deste ensaio, foi necessário fazer a preparação das amostras. Após serem retiradas dos tanques de cura, as amostras passaram por um processo de secagem em estufa e depois foram cortadas. Isso foi feito a partir do auxílio de uma pequena serra circular para que fosse possível fazer as amostras no tamanho desejado de no máximo 2x2cm e com altura de 2,5cm. A dimensão da amostra é importante, pois para realizar esse ensaio é preciso que o microscópio consiga obter o vácuo, e com amostrar com tamanho grande não se consegue impossibilitando a realização do mesmo.

Após cortadas, as amostras passaram por um processo de ionização, onde é aplicado sobre a superfície que será analisada uma camada fina de iodo. Após essa aplicação, a amostra é colocada dentro do microscópio eletrônico de varredura, passa pelo processo de vácuo e são geradas as imagens.

Essa análise foi feita apenas aos 63 dias com amostras com substituição parcial do cimento por 50% de escória alto-forno devido à restrição de quantidades de amostras que poderiam ser ensaiadas. Todas as imagens foram capturadas com a mesma escala buscando analisar o selamento das fissuras a partir da cristalização dos grãos de anidro em diferentes datas.

Após a explicação de todo o método desenvolvido ao longo do trabalho, na Figura 9 é possível observar a matriz de todo o programa experimental.

Figura 9 - Matriz do programa experimental



Fonte: Autora (2021).

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho e suas análises. Além disso, realizou-se a verificação estatística com relação à significância dos resultados encontrados para o ensaio de resistência à compressão.

### 4.1 ESTADO FRESCO

O controle de abatimento do concreto no estado fresco foi realizado de acordo com a NBR NM 67 (ANBT, 1998). Ao longo da execução dos mesmos não houve em nenhuma das amostras com segregação de material, onde a mesma foi analisada de forma visual. Esses resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio no estado fresco.

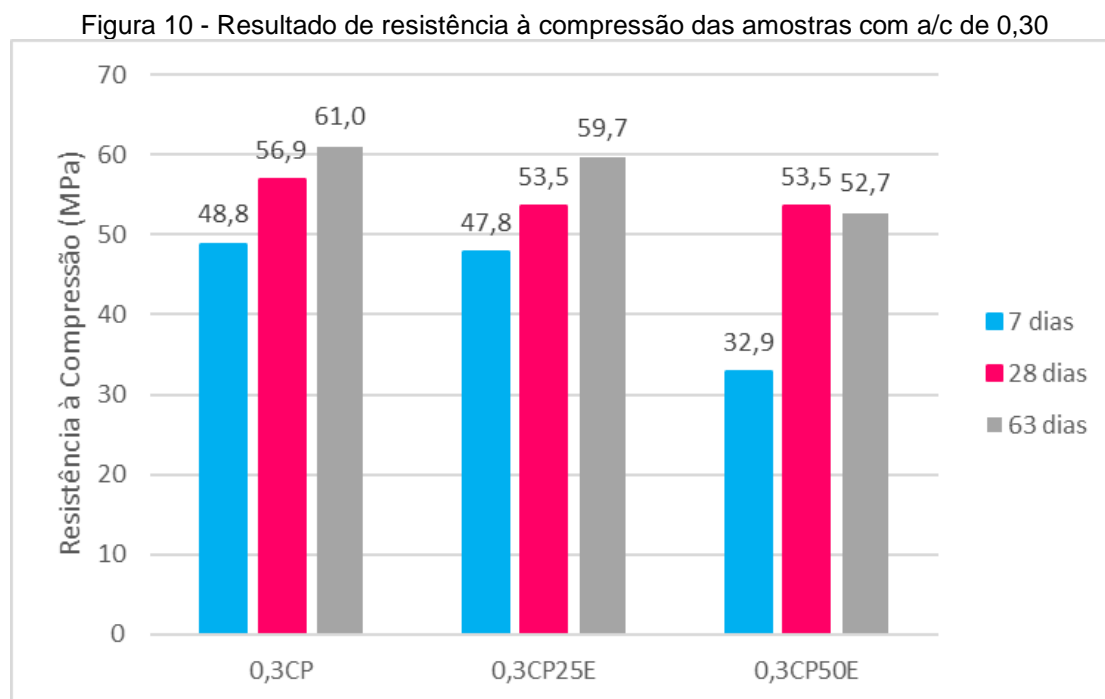
<b>Amostra</b>	<b>a/c</b>	<b>Abatimento(mm)</b>
0,3CP	0,30	250
0,3CP25E	0,30	250
0,3CP50E	0,30	260
0,4CP	0,40	210
0,4CP25E	0,40	200
0,4CP50E	0,40	190
0,5CP	0,50	180
0,5CP25E	0,50	180
0,5CP50E	0,50	180

Fonte: Autora (2021).

Com os resultados obtidos, é possível observar que o abatimento de  $200 \pm 20$ mm foi mantido nas amostras com relação água/cimento de 0,40 e 0,50. Nas amostras de 0,30 não foi possível, pois a os valores obtidos foram muito baixos e a mistura não apresentava trabalhabilidade suficiente para moldar os corpos de prova com o abatimento dentro dos parâmetros estipulados. Por isso, optou-se por adicionar um pouco mais de aditivo químico na mistura para que a moldagem das amostras fossem executas de forma satisfatória evitando os nichos de concretagem e espaços vazios.

## 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nos concretos moldados com relação água/cimento de 0,30 observou-se que independentemente da idade, houve um melhor desempenho nas amostras que não receberam nenhuma adição de escória alto-forno com pode ser visto na Figura 10.

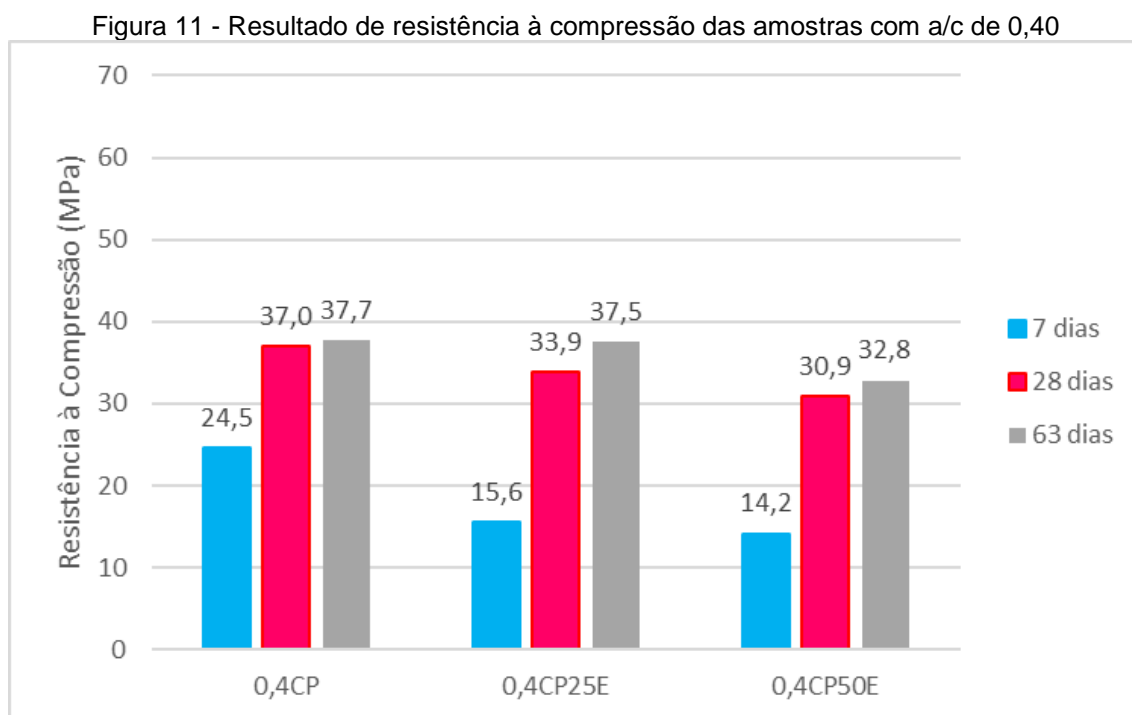


Fonte: Autora (2021).

O comportamento observado de queda de resistência quando substituído o cimento por material pozolânico já era esperado, uma vez que as pozolanas retardam o processo de hidratação do concreto, diminuindo a resistência à compressão nas primeiras idades (ALMEIDA, 2014). Porém, mesmo com menor índice de cimento na mistura, as amostras que tiveram uma substituição de 25% de cimento por escória alto-forno, ainda apresentou resultados dos ensaios bem próximos quando comparados as amostras sem adição. Mesmo assim, todas as amostras analisadas apresentaram um comportamento de crescimento da resistência à compressão com o avanço da idade.

As amostras com relação água/cimento de 0,40 obtiveram as mesmas características nos resultados obtidos, porém com valores de resistência à

compressão menores quando comparado as amostras com relação água/cimento de 0,30. Os resultados podem ser vistos da Figura 11 a seguir.



Fonte: Autora (2021).

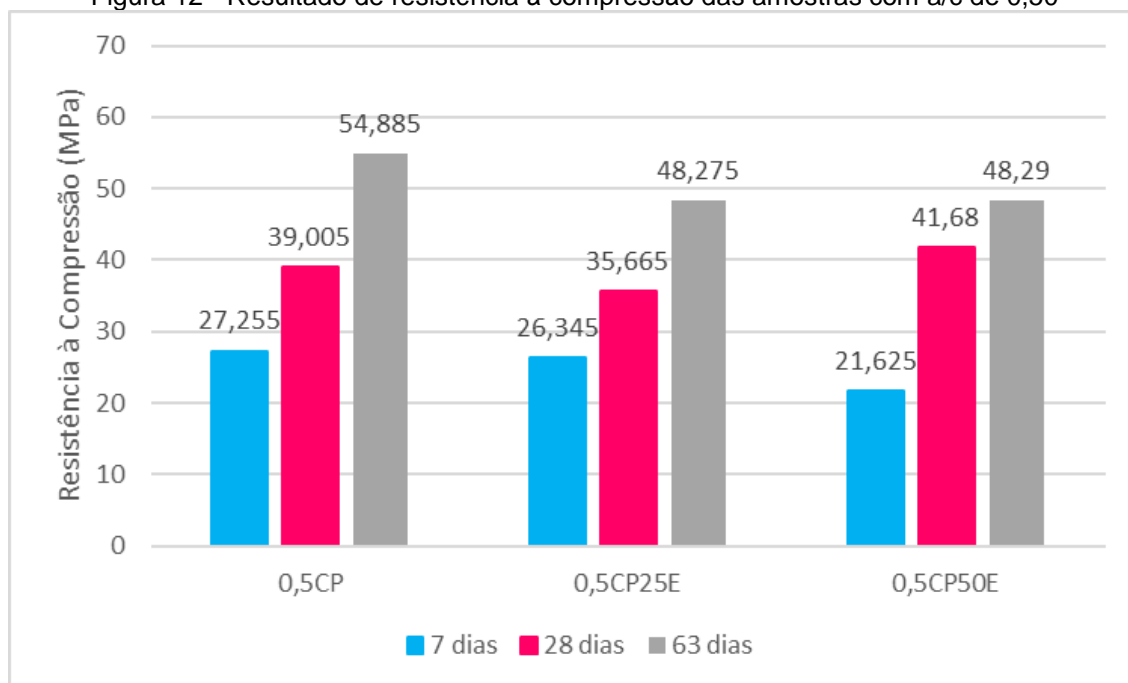
Essa queda na resistência à compressão pode ser justificada pelo aumento da relação água/cimento. A mesma comprova que essas duas variáveis são inversamente proporcionais tendo em vista que quanto maior for o teor de água da mistura, maior será a porosidade do concreto, diminuindo a resistência à compressão da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Nesta análise também se observou uma queda na resistência à compressão quando comparado a amostra referência com as que tiveram substituição do cimento por escória. Ao longo do tempo, todas a recuperação da resistência à compressão também foi visível. Porém as amostras com substituição parcial do cimento por escória em 25% apresentaram valores mais próximos da amostra de referência quando comparado com as que tiveram substituição de 50%.

Já as amostras compostas com relação água/cimento de 0,50 apresentaram comportamento similar as demais como pode ser visto na Figura 12. Porém aos 28 dias as amostras com 50% de substituição do cimento por escória alto-forno apresentaram maior resistência do que a amostra referência. Esse mesmo comportamento foi encontrado no experimento de Madrid et al.



(2016), onde aos 28 dias algumas amostras com substituição de 50% do cimento por escória apresentaram resistência à compressão superior do que o concreto referência. Ainda de acordo com o autor, o mesmo fala que isso aconteceu apenas em algumas amostras pontuais e que podem estar relacionadas a outros fatores, como por exemplo, o processo de moldagem das amostras e número de vazios. Porém, aos 63 dias, o acréscimo de resistência para o traço de 0,5CP50E não superou a amostra de referência como já observado nos demais casos, mas sim ficou muito próximo a resistência do traço com substituição do cimento por 25% de escória.

Figura 12 - Resultado de resistência à compressão das amostras com a/c de 0,50



Fonte: Autora (2021).

Esse processo de recuperação da resistência à compressão ao longo do tempo pode estar ligado também à um efeito causado pelo pré-carregamento das amostras por dois diferentes efeitos. Devido ao pré-carregamento, pode ter acontecido uma compactação da estrutura das amostras, quebrando os grãos mais frágeis gerando uma redução de espaços vazios e exposição dos grãos anidros ainda não hidratados. Além disso, ocorreu também a criação de microfissuras deixando os grãos anidros, deixando-os ainda mais amostra. Por outro lado, a cura por imersão em água possibilitou a continuidade da hidratação dos grãos auxiliando na criação de novos produtos de C-S-H e

consequentemente auxiliou no processo da autocicatrização das microfissuras geradas. Esses dois efeitos, tanto a compactação da matriz como a cicatrização tardia, auxiliam para que as amostras ficassem mais densas, contribuindo para o aumento da resistência frente aos esforços de compressão (DA SILVA, 2016).

Foi feito a análise de variância da relação entre a quantidade de escória e a teor de água nas amostras nos três períodos de análise de resistência. A partir da ANOVA foi possível observar que a quantidade de escória influenciou nos resultados em todas as idades. Por outro lado, a relação água/cimento teve significância apenas nos 7 dias e as interações entre os resultados não apresentou nenhuma relevância nas três idades analisadas como visto na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA das amostras nos três períodos de cura

Tempo de Cura	Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico	Significância
7 dias	% escória	2010,95	2	1005,48	329,31	4E-09	4,26	Sim
	Relação a/c	351,63	2	175,82	57,58	7E-06	4,26	Sim
	Interações	129,97	4	32,49	10,64	0,0018	3,63	Não
28 dias	% escória	1794,22	2	897,11	34,07	6E-05	4,26	Sim
	Relação a/c	16,14	2	8,07	0,31	0,7434	4,26	Não
	Interações	113,81	4	28,45	1,08	0,4212	3,63	Não
63 dias	% escória	1482,08	2	741,04	35,18	6E-05	4,26	Sim
	Relação a/c	131,79	2	65,89	3,13	0,093	4,26	Não
	Interações	36,59	4	9,15	0,43	0,781	3,63	Não

Quando comparado os resultados obtidos em todas as amostras produzidas, é possível observar que na maioria das amostras os resultados de resistência à compressão foram mais satisfatórios nas amostras que não tiveram substituição de escória em sua amostra. Esse resultado já era esperado, visto que o material pozolânico retarda a hidratação do concreto nas primeiras idades. Porém, mesmo com os menores valores de resistência iniciais nas primeiras idades, segundo Madrid et al. (2016) essa resistência à compressão é recuperada ao longo do tempo.

Levando em consideração as relações água/cimento, as amostras que obtiveram melhor desempenho foram as com 0,30 visto que quanto menor for a relação de a/c, maior será a resistência do concreto. Isso acontece pois, segundo Vieira e Dal Molin (2011), com menores relações água/cimento há uma maior concentração de grãos de anidros disponíveis para a o processo de hidratação

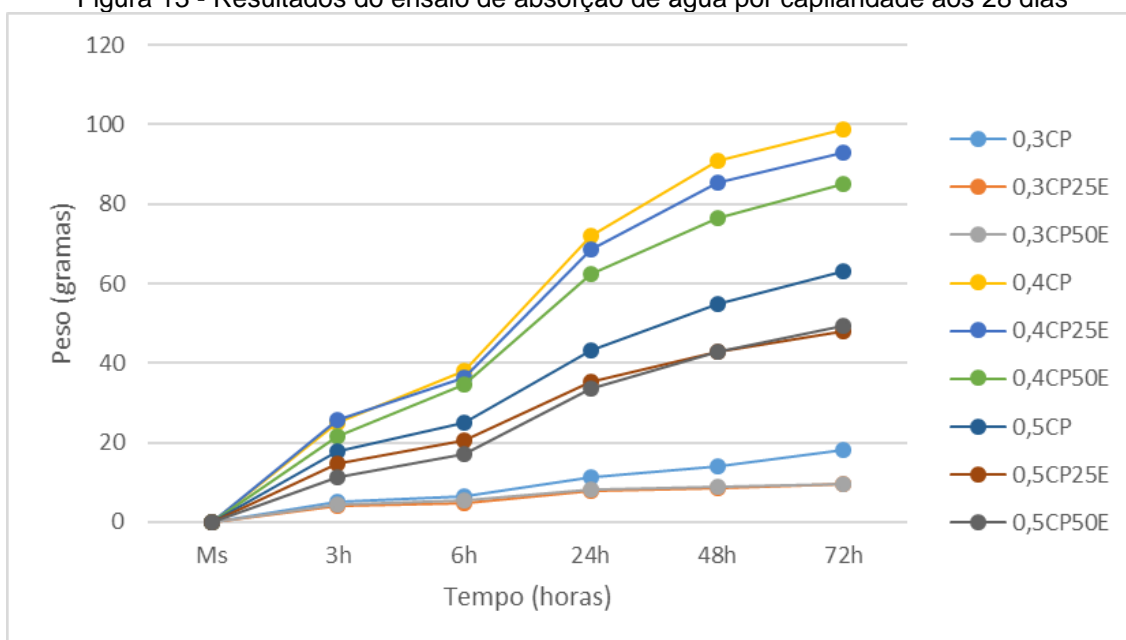
tardia, aumentando a densidade do material e conseqüentemente sua resistência.

### 4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9779 (ABNT,2012) nas idades de 28 e 63 dias após a moldagem dos corpos de prova. Os resultados foram analisados a partir de um gráfico de linhas onde foram plotados os valores de peso das amostras ao longo do tempo em que a amostra ficou em contato com a água.

Com os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias, foi possível observar que as amostras que tiveram um maior ganho de massa ao longo do tempo foram as 0,4CP, 0,4CP25E e 0,4CP50E com relação água/cimento de 0,40. Já as amostras com relação água/cimento de 0,30 apresentaram maior peso inicial, porém menor ganho de massa ao longo do tempo podendo concluir que ele é menos poroso quando comparado com os demais. Quando analisado as amostras com 0,50 de relação de água/cimento, também foi possível observar que as mesmas apresentaram um ganho de massa considerável ao longo do tempo, porém ainda menor quando comparados as amostras 0,4CP, 0,4CP25E e 0,4CP50E. Os resultados podem ser vistos na Figura 13.

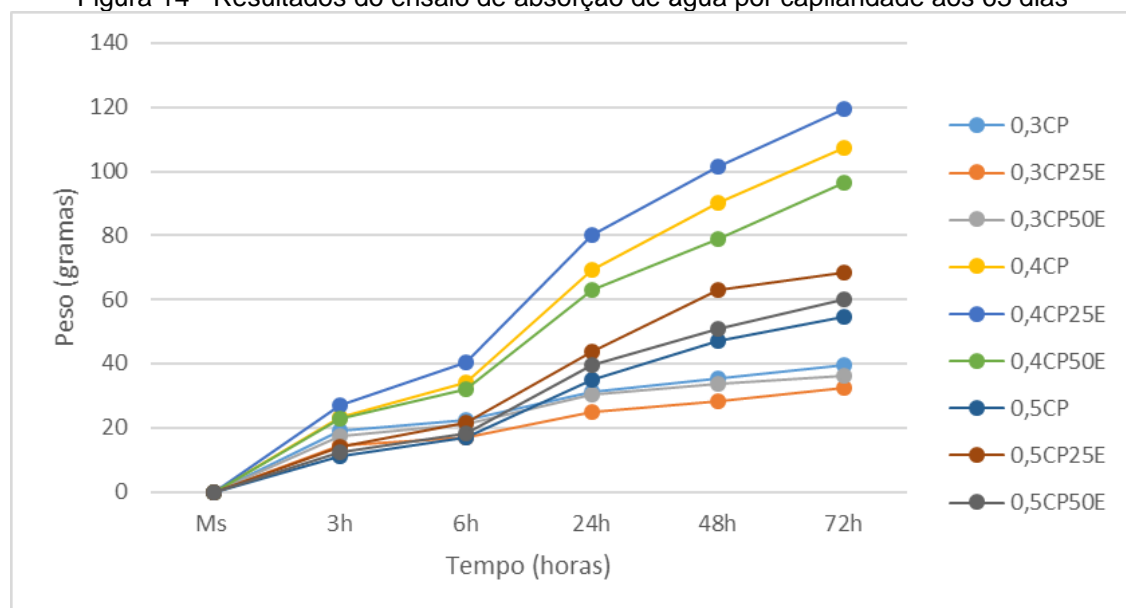
Figura 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias



Fonte: Autora (2021).

Comportamento similar as amostras testadas aos 28 dias, foram observadas aos 63 dias, como pode ser visto na Figura 14. As amostras com maior ganho foram as compostas por uma relação água/cimento de 0,40 e os menores as de 0,30. Porém, todas as amostras observadas tiveram uma redução dos valores de massa obtidos quando comparados as amostras anteriores.

Figura 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 63 dias



Fonte: Autora (2021).

Mesmo com valores de massa iniciais menores quando comparados aos 28 dias, aos 63 dias foi observado um ganho de capacidade de absorção de

água ao longo do tempo. Ou seja, as amostras absorveram mais água ao longo do tempo do que quando comparado aos resultados na idade anterior, como pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da capacidade de absorção de água por capilaridade

Amostra	Resultado 28 dias	Resultado 63 dias
	C (Abs por cap. g/cm <sup>2</sup> )	C (Abs por cap. g/cm <sup>2</sup> )
0,3CP	0,23	0,50
0,3CP25E	0,12	0,41
0,3CP50E	0,12	0,46
0,4CP	1,26	1,37
0,4CP25E	1,18	1,52
0,4CP50E	1,08	0,85
0,5CP	0,80	0,70
0,5CP25E	0,61	0,87
0,5CP50E	0,63	0,76

Fonte: Autora (2021).

Esse comportamento pode ter sido resultado da maior cicatrização das amostras aos 63 dias, o que influencia na microestrutura do concreto melhorando a capilaridade e influenciando na absorção de água. Resultados similares a esses foram encontrados nos trabalhos de Cascudo (1997) e Ferreira (2003). Segundo os autores, esse acréscimo está relacionado ao nível de sucção capilar que se torna mais intensa a partir da diminuição dos poros aumentando a absorção por capilaridade. Portanto, quando menor forem os espaços vazios, maior será a resistência hidráulica aumentando a absorção de água ao longo do tempo.

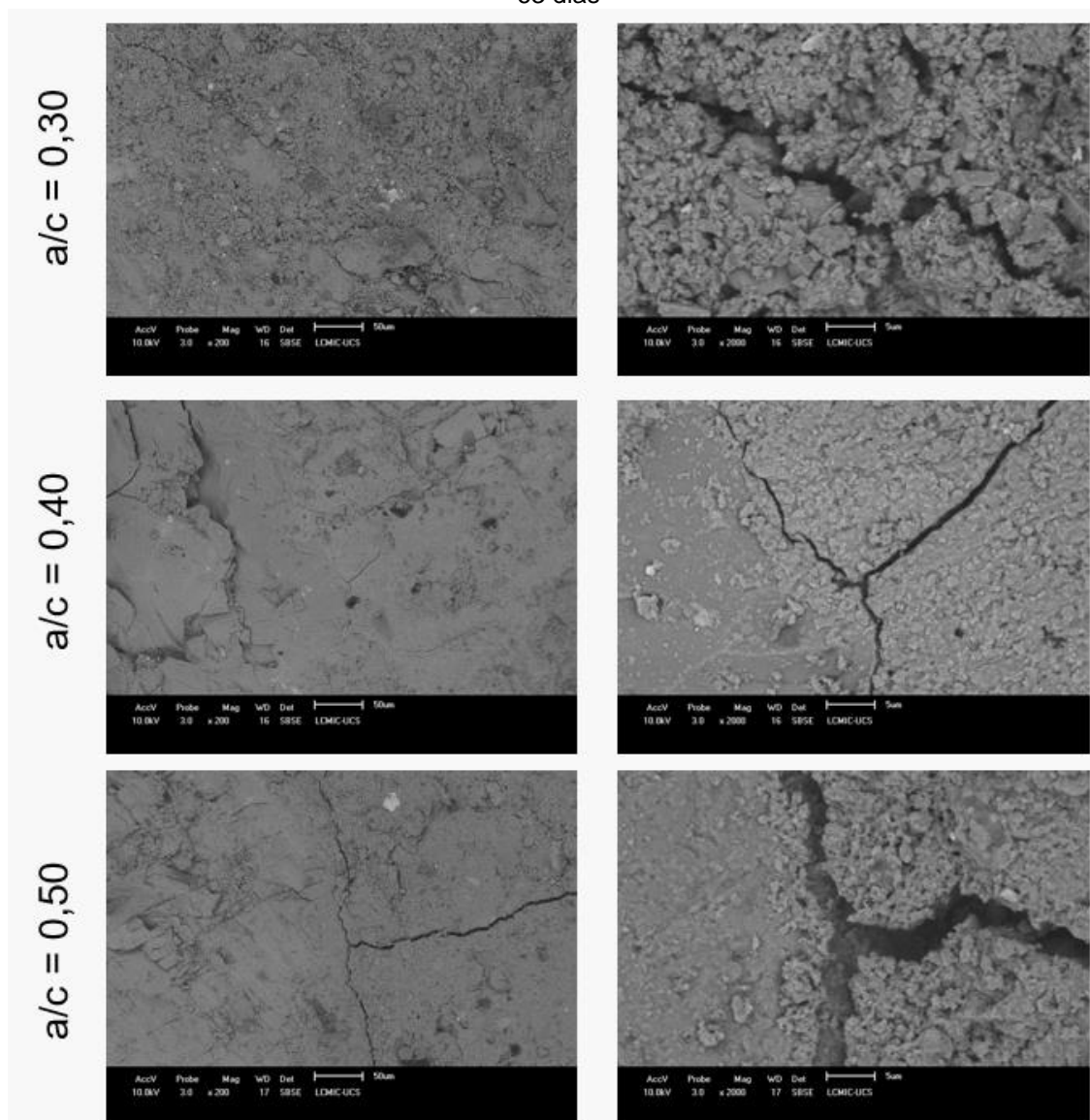
#### 4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise da autocicatrização das amostras foi avaliada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, nos mesmos corpos de prova que foram utilizados para fazer os ensaios de absorção de água por capilaridade.

Na Figura 15 é possível observar os resultados obtidos nas amostras com substituição parcial do cimento por 50% de escória e com cura submersa de 63 dias. Para uma melhor análise dos resultados, optou-se por padronizar as ampliações das imagens nos valores de 50µm e 5 µm. Em todas as amostras é possível observar o início da autocicatrização das amostras podendo ser a partir

da criação de C-S-H e também de  $\text{CaCO}_3$ . Além disso, em algumas das imagens também é possível ver grãos de escória e grãos de anidro que ainda não passaram pelo processo de hidratação.

Figura 15 - Análise de MEV das amostras com 50% de substituição de cimento por escória aos 63 dias



Fonte: Autora (2021).

Quando comparado os resultados obtidos para as diferentes relações água/cimento, é possível observar que as amostras com  $a/c = 0,30$  apresentaram maior quantidade de grãos hidratados próximo das faces as fissuras do que as demais. Segundo Zhang et al. (2020) e Qian et al. (2009) isso se deve pois quanto menor for a quantidade de água adicionada na mistura,

maior será o número de grãos disponíveis para a hidratação tardia, aprimorando o processo de autocicatrização das fissuras.

De modo geral, nenhuma das amostras analisadas apresentaram o fechamento total das fissuras após os 63 dias e isso pode estar ligado a alguns fatores. Primeiro, pode estar relacionado a espessura da fissura, pois segundo Reinhardt et al. (2013) quanto mais próximo forem as faces uma das outras o processo será cicatrizado mais rápido devido ao processo de hidratação dos grãos ser um pouco lento. Além disso, o método escolhido de cura as amostras também pode estar relacionado a esse processo de cicatrização. De acordo com Sisomphon et al. (2013), quando a cura é feita em ciclos de molhagem e secagem, a autocicatrização pode acontecer mais rápida do que quando em cura submersa contínua, devido à um maior contato com o  $\text{CO}_2$  que auxilia no processo de formação do  $\text{CaCO}_3$ .

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos ao longo do trabalho, é possível concluir que escória alto-forno apresentou comportamento satisfatório na autocicatrização das fissuras. Para os ensaios de resistência à compressão, as amostras com substituição do cimento por 25% de escória alto-forno apresentaram valores mais aproximados das amostras de referência. Porém, todas as amostras analisadas apresentaram recuperação das resistências ao longo do tempo podendo estar ligado a outros efeitos além da autocicatrização, como a reestruturação da microestrutura da matriz.

Percebe-se também que para os ensaios de absorção de água por capilaridade, as amostras com relação água/cimento de 0,30 apresentaram valores menor de infiltração de água ao longo do tempo devido ao menor número de capilares e poros. Além disso, essas mesmas amostras apresentaram valores mais satisfatórios de autocicatrização aos 63 dias comparados com as demais, mas superior a idade anterior de análise.

A partir dos resultados obtidos ao longo do trabalho e as análises estatísticas, é possível fazer as seguintes considerações:

- a) O percentual de substituição do cimento por escória alto-forno tem influência direta nos resultados de resistência à compressão nas primeiras idades;
- b) Conforme se aumenta a quantidade de escória alto-forno substituindo o cimento da mistura, a resistência à compressão sofre uma queda devido ao retardo na hidratação causado pela escória alto-forno nas primeiras idades;
- c) Todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios de resistência à compressão, onde os mesmos são recuperados ao longo do tempo;
- d) O tempo de cura tem influência significativa na resistência à compressão e na autocicatrização;
- e) A relação água/cimento apresenta influência direta na resistência à compressão;



- f) Para composições com relação água/cimento consideradas baixas, a quantidade de água absorvida ao longo do tempo é inferior quando comparado às composições com maior quantidade de água na mistura;
- g) Para as mesmas condições de cura e composição, as relações água/cimento menores apresentaram melhores resultados na autocicatrização da matriz;
- h) A escória alto-forno apresentou um bom desempenho na autocicatrização das amostras, podendo ser um material com grande potencial para auxiliar neste processo desde que substitua o cimento em proporções adequadas.

Tento em vista o trabalho desenvolvido, as dificuldades encontradas e as restrições ao longo do mesmo, ficam algumas sugestões para se dar andamento em trabalhos futuros:

- a) Realização das amostras em formato prismático para que consiga ver a criação das fissuras e cicatrização de forma mais fácil e prática;
- b) Uso de diferentes materiais com sílica na composição para ser possível fazer a análise comparativa do desempenho dos diferentes materiais;
- c) Análise de uma variedade maior de amostras com diferentes idades e composições com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura ou microscópio óptico facilitando o entendimento;
- d) Execução dos ensaios com tempo de cura superior aos 63 dias para a análise dos resultados;
- e) Diversificar mais os teores de substituição do cimento pelo material pozolânico com o intuito de analisar melhor a influência do material;
- f) Utilizar outras relações água/cimento já que água tem influência direta na autocicatrização;

- g) Possibilidade de utilização do cimento CP II-E no lugar do CP-V ARI, visto que o mesmo já possui escória na composição e pode ser estudado o seu efeito na autocicatrização.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NRB 7211**: Agregados para concreto – especificações. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NRB 7215**: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NRB 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NRB 11579**: Cimento Portland – determinação do índice de finura por meio da peneira 75µM. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NRB 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NRB 14656**: Cimento Portland e Matérias-Primas – análise química por espectrometria de raio-X – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NRB 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NRB 16697**: Cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 15**: Cimento Portland – análise química – determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 18**: Cimento Portland – análise química – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 45**: Agregados – determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 52:** Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 53:** Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 67:** Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NRB NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ARRUDA, F.F.; Da SILVA, D.L.; BENTO, A.J.; Da FONSECA, J.M.M. **Absorção por capilaridade em concreto produzido com adição de sílica ativa.** Maceió, 2018.

BATISTA, L. S.; Dos SANTOS, B. S.; PERÔNICA, D. S.; RODRIGUES, I. G.; SANTOS, P. K. **Estudo da utilização de resíduos de quartzo em concreto alternativo.** São Bernardo do Campo, 2018. Disponível em: <<https://www.ibecas.org.br/congresso/Trabalhos2018/XI-016.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades.** 2018. 102f. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** 2018. 295f. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini, 1997.

COELHO, Maria Antonina Magalhães. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória alto-forno.** 2002. 207f. Dissertação – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2002.

DARQUENNES, A.; OLIVIER, K.; BENBOUDJEMA, F.; GAGNÉ, R. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. In: **Construction and Building Materials.** v. 113, p. 1017-1028, Mar. 2016.

DA SILVA, L. M. B. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto.** 2016. 393f. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

DE ALMEIDA, G. M. **Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para o concreto.** 2014. 135f. Monografia – Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; ALĞTABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T.; LITINA, C.; MILJEVIC, B.; OTLEWSKA, A.; RANOGAJEC, J.; ROIG-FLORES, M.; PAINE, K.; LUKOWSKI, P.; SERNA, P.; TULLIANI, J.; VUCETIC, S.; WANG, J.; JONKERS, H. M. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, p. 1800074, 2018.

DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v. 11.

DRY, C. Development of a self-repairing durable concrete. In: **Natural Process Design Inc.** Winona, Minnesota. Jun. 2008.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobertura e seu efeito na corrosão de armaduras introduzidas por cloretos.** 2003. 244f. Dissertação – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003.

FILHO, A. C.; CARMONA, T. **Grietas em estruturas de hormigón.** México. 2013. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/Boletim-t%C3%A9cnico-3.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

FOLETTO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMAN, R. S.; PORTUGAL, U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas de casca de arroz. Em: **Química Nova.** v. 28, n. 6, p. 1055-1060, ago. 2005.

FREITAS, I. R.; VALADÃO, J. T. R.; NOGUEIRA, J. M.; VASCONCELLOS, J. A.; BITTENCOURT, J. C. **Produção de pó de quartzo de alta pureza a partir de lascas de quartzo.** Águas de São Pedro. Ago. 1998.

GRUYAERT, E.; ROBEYST, N.; DE BELIE, N. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. In: **Journal of thermal analysis and calorimetry.** v. 102, no. 3, p. 941-951, Apr. 2010.

GUZZO, P. L. **Quartzo.** Em: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 681-721.

HELENE, P.; GUIGNONE, G.; VIEIRA, G.; ROCENTTI, L.; MORONI, F. Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. Em: **Revista IBRACON de Estruturas de Materiais.** v.11, n.3, jun. 2018.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concretos com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 148f. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. In: **Cement and Concrete Research**. v. 60, p. 68-82, Dec. 2014.

HUANG, H.; YE, G.; QIAN, C.; SCHLANGEN, E. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. In: **Materials and Design**. v. 92, p. 499-511, Jan. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. Concreto: material construtivo mais consumido no mundo. **Concreto e Construções**. N. 53. Jan-Mar, 2009. Disponível em: <[http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/revista\\_concreto\\_53.pdf](http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 20.

JENSEN, O.; HANSEN, P.F.; Water-entrainerd cement-based materials: I. Principles as theoretical background. In: **Cement and Concrete Research**. v.31, n.4, p.674-654, Jan. 2001.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. In: **Cement and Concrete Research**. v. 57, p. 116-127, Jun. 2014.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. In: **Heron Journal**. v. 56, p. 5-16, 2011.

KANELLOPOULOS, A.; QURESHI, T. S.; AL-TABBAA, A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement base composites. In: **Construction and Building Materials**. v. 98, p. 780-791, Jun. 2015.

KUMMER, L. M. **Resistência à compressão e modulo de elasticidade dos concretos de uma central dosadora de concreto de Lajeado/RS**. 2016. 67f. Monografia – Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2016.

LI, V. C., HERBERT, E. **Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure**. USA. 2012.

LI, V.C.; SAKULICH, A.R.; REINHARDT, H.W.; SCHLANGEN, E.; VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; De BELIE, N.; JOSEPH, C.; GARDNER, D.R.; LARK, R.J.; MIAHSHI, H.; NISHIWAKI, T. **Recovery against mechanical actions**. USA. 2013.

MAES, M.; SNOECK, D.; DE BELIE, N. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. In: **Construction and Building Materials**. v. 115, p. 114–124, Jul. 2016.

MADRID, J. A. C.; GARCÍA, J. I. E.; BORGES, P. C. Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Em: **Revista ALCONPAT**. v. 6, n. 1, p. 64-83, abr. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. O. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo, SP: IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, 2008.

MOREIRA, T. N. C.; **Investigação do fenômeno de autocicatrização de fissuras em microconcretos de alta performance reforçado com fibra de aço e sisal**. 2017. 181f. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

NAVARRO, G. R. B.; ZANARSO, A. MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. **Livro de referência de minerais comuns e economicamente relevantes: Tectossilicatos**. São Paulo. 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2016.

PACHECO, A. A. L.; SOARES, M. C. P.; DOS SANTOS, M. F. M.; SCHENKEL, E. A.; MENDES, B. F.; FUJIWARA, E.; SUZUKI, C. K. **Efeito da adição de pó fino de quartzo na trabalhabilidade, resistência e microestrutura do concreto convencional**. São Paulo. 2016.

PIMENTEL, M. G.; VASCONCELOS, A. L. R.; PICANÇO, M. S.; De SOUZA, J. V. B.; MACEDO, A. N. **Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil**. Belém. 2017. OLIVER, K.; DARQUENNES, A.; BENBOUDJEMA, F.; GAGNÉ, R. Early-Age Self-Healing of Cementitious Materials Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag under Water Curing. In: **Journal of Advanced Concrete Technology**. v. 14, p. 717 – 727, Nov. 2016.

QIAN, S.; ZHOU, J.; ROOJI, M.R.; SCHLANGEN, E.; YE, G.; BREUGEL, K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. In: **Cement and Concrete Composites**. v. 31, p. 613-621, Mar. 2009.

QIAN, S.Z.; ZHOU, J.; SCHLANGEN, E. Influence of curing condition and pre-cracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites. In: **Cement and Concrete Composites**. v.32, n.9, p. 686-693, Jul. 2010.

REINHARDT, H. W.; JONKERS, H.; VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; DE BELIE, N.; DE MUYNCK, W.; VERSTRAETE, W.; WANG, J.;

MECHTCHERINE, V. Recovery against environmental action. In: **Self-healing phenomena in cement-based materials**: state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, vol. 11, p. 65-117. Springer: 2013.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E.A.B. Effect of exposure conditions on self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. In: **Construction and Building Materials**. v.42, p.217-224, Nov. 2013.

SNOECK, D. Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials. In: **Rilem Technical Letters**. v. 3, p. 32-38, Nov. 2018.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória alto-forno ativados por catalizador cristalino**. 2013. 130f. Dissertação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Paulo, 2013.

VAN TITTELBOOM, K.; GRUYAERT, E.; RAHIER, H.; DE BELIE, N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. In: **Construction and Building Material**. v. 37, p. 349 – 359, Jul. 2012.

VAN TITTELBOOM, K.; De BELIE, N. Self-healing in cementitious material – a review. In: **Material**. v. 6, n.6, p. 2182 – 2217, May 2013.

VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; WANG, J.; De BELIE, N. **Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials**. Universidade de Gante. Bélgica. 2013.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. Em: **Ambiente Construído**. v. 11, n. 1, Maio, 2011.

WANG, J. **Self-Healing Concrete by Means of Immobilized Carbonate Precipitating Bacteria**. 2013. 332 f. Tese (Doutor em engenharia: arquitetura) – Universidade de Gante, Bélgica, 2013.

YANG, Y.; YANG, E. H.; LI, V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composite at early age. In: **Cement and Concrete Research**. v. 41, n.2, p.176-183, Apr. 2011.

YANG, Y.; LEPECH, M. D.; YANG, E. H.; LI, V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. In: **Cement and Concrete Research**. v. 39, p. 382-390, Jan. 2009.

YILDIRIM, G.; KHIAMI, A. H.; YESILMEN, S.; SAHMARAM, M. Self-healing performance of aged cementitious composites. In: **Cement and Concrete Composites**. v. 87, p. 172-186, Jan. 2018.



ZHANG, W.; ZHENG, Q.; ASHOUR, A.; HAN B. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. **Composites Part B: Engineering**. 2020.

ZHONG, W.; YAO, W. Influence of damage degree on self-healing of concrete. In: **Construction and Building Materials**. v. 22, n.6, p.1137-1142, Apr. 2008.

ZWAAG, van der S. **Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science**. 1. ed. Netherlands: Springer, 2007.