

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**NATALY AYUMI TOMA**

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO FLEXÍVEL COM REDUZIDO CONSUMO  
DE CIMENTO (*GREEN ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE*)**

**São Leopoldo**

**2021**

NATALY AYUMI TOMA

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO FLEXÍVEL COM REDUZIDO CONSUMO  
DE CIMENTO (*GREEN ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE*)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, pelo Curso de  
Engenharia Civil da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Seiti e Kimie, por estarem sempre presentes na minha vida, por todo o incentivo e confiança depositados em mim, e por nunca medir esforços para oferecer educação e conforto a seus filhos. Agradeço também a Hikaru e o Shinji, meus queridos irmãos, por me fazerem rir nas horas mais difíceis, e um agradecimento especial para a minha irmã por corrigir meus erros de concordância e revisar os textos. Ao Ramon, meu muito obrigada, pelo apoio, carinho e companheirismo, até mesmo nas moldagens e ensaios.

Gratidão a todos professores que tive contato durante a graduação pelos ensinamentos e conhecimentos. É um agradecimento especial à minha orientadora Profa. Dra. Fernanda Pacheco por todo o auxílio, conselhos, por me introduzir no meio acadêmico e ao itt Performance. Você foi e continua sendo uma grande inspiração para mim!

Agradeço imensamente aos muitos colegas e ex-colegas do itt Performance, por me proporcionarem uma das experiências mais agregadoras, que guardo com muito carinho no meu coração, e por contribuírem na minha evolução profissional. Um agradecimento em especial à Simone por toda ajuda na realização dos ensaios e ao Hinoel por esclarecer muitas dúvidas que tive em relação ao mundo do ECC. Obrigada aos amigos que construí nessa caminhada dentro da Unisinos, por me acompanharem, ensinarem e por estarem presentes nos momentos mais importantes da minha vida. Obrigada, Bruna, Camila, Cris, Júlio, Lucas e Nicholas!

Sou grata aos laboratoristas André, Bianca, Igor e Leonardo do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) por todo o auxílio durante as moldagens e pelas palavras de encorajamento.

Agradeço também a todos da equipe da Evanir Nunes Arquitetura onde tive o privilégio de ser estagiária e aprender sobre esse universo que ainda não conhecia. Sou muito grata também a FGS Geotecnia pela confiança, apoio e por serem extremamente compreensíveis com as inúmeras mudanças de horário que foram necessários por conta dos ensaios.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que permaneceram e estiveram presentes ao longo da minha vida, por todo o companheirismo e amizade.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, porém sua cadeia produtiva envolve muitos desperdícios e emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, faz-se necessário desenvolver compósitos com melhores propriedades mecânicas e de maior expectativa em relação à durabilidade, buscando minimizar o impacto ambiental e se possível, majorar seu tempo em uso. Assim, surgiu um compósito cimentício com elevada ductilidade e que apresenta comportamento *strain-hardening*, que é o *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Este compósito tem como principal característica a capacidade de deformação sob tração e a formação de múltiplas microfissuras. Além disso, apresenta resistência mecânica muito superior aos materiais convencionalmente empregados. Porém, por não utilizar agregado graúdo em sua composição, apresenta um elevado teor de cimento, o que causa maior retração, calor de hidratação e maior emissão de CO<sub>2</sub>. Além do mais, este compósito foi projetado originalmente com materiais de elevado custo como fibra de PVA, o que acaba inviabilizando o uso deste compósito em larga escala. Considerando esse cenário, este estudo abordou a possibilidade de desenvolver um ECC mais sustentável que atenda os desempenhos mecânicos e de durabilidade requeridos, com incorporação de pozolanas e utilizando materiais locais em substituição ao elevado consumo de cimento tradicional na sua composição. Para tal, os ensaios foram realizados conforme as diretrizes das normas NBR 13279 (ABNT, 2005), NBR 5739 (ABNT, 2018), NBR 8522 (ABNT, 2017) e JSCE 82 (2008), avaliando dois traços distintos com teores diferentes de pozolanas com variações nas quantidades utilizadas de cinza volante e de sílica ativa. Após a avaliação das matrizes, analisou-se ainda a incorporação de 2,4% de fibra de polipropileno e seu impacto no comportamento mecânico. Os resultados obtidos nessa pesquisa indicam que a utilização de 30% de sílica ativa e 70% de cinza volante como pozolana apresentaram melhores resultados na avaliação da matriz e a inserção do reforço polimérico, alcançou resistência de até 8 MPa e deflexão maior que 8 mm, promovendo resultados satisfatórios quanto à resistência à tração na flexão e de ductilidade.

**Palavras-chave:** ECC. Pozolana. Sustentabilidade. Desempenho Mecânico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Instrumentação do ensaio de flexão por 4 pontos.....	31
Figura 2 - Fluxograma do programa experimental .....	32
Figura 3 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado .....	35
Figura 4 – Distribuição granulométrica da cinza volante .....	36
Figura 5 – Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada .....	37
Figura 6 – Curva granulométrica da areia fina utilizada .....	38
Figura 7 – Fibra de polipropileno utilizado na pesquisa .....	39
Figura 8 – Prensa utilizada para a realização dos ensaios mecânicos .....	41
Figura 9 – Medição das diagonais.....	42
Figura 10 - Instrumentação adotada para o ensaio de tração na flexão por 3 pontos .....	43
Figura 11 - Instrumentação adotada para o ensaio de tração na flexão por 4 pontos .....	44
Figura 12 – Instrumentação adotada para o ensaio de módulo de elasticidade .....	46
Figura 13 – Média e desvio padrão dos valores de resistência à tração na flexão da Etapa 1.....	49
Figura 14 – Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da Etapa 1.....	51
Figura 15 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 1 .....	53
Figura 16 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à tração na flexão da Etapa 2.....	55
Figura 17 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da Etapa 2.....	58
Figura 18 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 2 .....	60
Figura 19 – Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 1 e da Etapa 2 .	61
Figura 20 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 1 e da Etapa 2 .....	62
Figura 21 – Resultados do módulo de elasticidade da Etapa 1 e da Etapa 2 .....	63
Figura 22 – Curvas de tensão-deflexão de todas as amostras analisadas .....	67
Figura 23 – Variação da relação entre resistência máxima e resistência à primeira fissura nos compósitos estudados .....	69

Figura 24 – Curvas de tensão-deflexão potenciais aos 7 e 28 dias .....	70
Figura 25 – Padrão de fissuração das amostras laminares após o ensaio de tração na flexão.....	71
Figura 26 – Interferência dos vazios no processo de formação das fissuras .....	72
Figura 27 - Curvas tensão-deflexão das amostras prismáticas.....	73
Figura 28 – Padrão de fissuração observado no ensaio de tração na flexão por 3 pontos .....	75
Figura 29 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da Etapa 3.....	77
Figura 30 – Formas de ruptura sem e com adição de fibras .....	78
Figura 31 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 3 .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais pesquisas realizadas de ECC com incorporação de materiais pozolânicos .....	27
Tabela 2 - Programa experimental da primeira etapa .....	33
Tabela 3 - Programa experimental da segunda etapa .....	34
Tabela 4 - Programa experimental da terceira etapa .....	35
Tabela 5 – Composição granulométrica da areia e suas propriedades.....	38
Tabela 6 – Propriedades da fibra polimérica .....	39
Tabela 7 – Dosagem dos traços utilizados na pesquisa .....	40
Tabela 8 – Proporção de pozolana utilizado em cada mistura .....	40
Tabela 9 – Resultados de consistência obtido na Etapa 1 .....	47
Tabela 10 – Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 1 .....	48
Tabela 11 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 1.....	50
Tabela 12 - Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 1.....	52
Tabela 13 - Resultados de consistência obtido na Etapa 2.....	54
Tabela 14 - Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 2.....	55
Tabela 15 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 2.....	57
Tabela 16 - Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 2.....	59
Tabela 17 – Resultados médios de resistência à tração na flexão.....	64
Tabela 18 - Resultados de consistência obtido na Etapa 3.....	65
Tabela 19 - Resultados dos compósitos à tração na flexão - placas.....	66
Tabela 20 – Resultados dos compósitos à tração na flexão – prismas.....	72
Tabela 21 – Resultados da resistência à compressão da Etapa 3.....	76
Tabela 22 – Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 3.....	79

## LISTA DE SIGLAS

A/C	Relação Água/Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Concreto Autoadensável
CV	Cinza volante
ECC	<i>Engineered Cementitious Composite</i>
EDCC	<i>Eco-friendly Ductile Cementitious Composite</i>
FRC	<i>Fiber Reinforced Concrete</i>
HPFRCC	<i>High Performance Fiber Reinforced Cement Composite</i>
HVFA-ECC	<i>High Volume Fly Ash - ECC</i>
IPC	<i>IPC Science and Technology Press</i>
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differencial Transformer</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PE	Poliétileno
POL	Poliéster
PP	Polipropileno
PVA	Álcool Polivinílico
SA	Sílica ativa
TA	Traço Areia
TP	Traço Pozolana
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEMA .....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.3 OBJETIVOS .....	15
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
1.4 JUSTIFICATIVA .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 CONCRETO CONVENCIONAL .....	17
<b>2.1.1 Concreto convencional: composição e características</b> .....	<b>17</b>
2.2 INDÚSTRIA DO CIMENTO E DO CONCRETO .....	18
2.3 ECC.....	19
<b>2.3.1 Histórico</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2 Composição</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3.3 Características</b> .....	<b>21</b>
2.3.3.1 Resistência mecânica.....	22
2.3.3.2 Índice de vazios.....	23
2.3.3.3 Absorção de água .....	23
2.3.3.4 Impacto ambiental .....	24
<b>2.3.4 Aplicação</b> .....	<b>25</b>
2.4 ESTUDOS DESENVOLVIDOS .....	25
<b>2.4.1 Inserção de materiais pozolânicos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.2 Inserção de resíduos</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4.3 Percentuais e natureza das fibras</b> .....	<b>29</b>
2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ECC .....	30
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ANÁLISE .....	32
<b>3.1.1 Primeira etapa</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.2 Segunda etapa</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.3 Terceira etapa</b> .....	<b>34</b>
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	35
<b>3.2.1 Cimento</b> .....	<b>35</b>

<b>3.2.2 Pozolanas.....</b>	<b>36</b>
3.2.2.1 Cinza volante.....	36
3.2.2.2 Sílica ativa.....	36
<b>3.2.3 Areia .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.4 Fibras poliméricas.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.5 Aditivo .....</b>	<b>39</b>
3.3 DOSAGEM.....	39
3.4 PROCESSO DE MISTURA E CURA.....	40
3.5 ENSAIOS .....	41
<b>3.5.1 Índice de consistência .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.2 Resistência à tração na flexão .....</b>	<b>42</b>
3.5.2.1 Prismático.....	42
3.5.2.2 Laminar .....	44
<b>3.5.3 Resistência à compressão axial .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.4 Módulo de elasticidade .....</b>	<b>45</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1 ETAPA 1.....	47
<b>4.1.1 Índice de consistência .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.2 Tração na flexão (prisma).....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.3 Compressão.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.4 Módulo de elasticidade .....</b>	<b>52</b>
4.2 ETAPA 2.....	53
<b>4.2.1 Índice de consistência .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2 Tração na flexão (prisma).....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.3 Compressão.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.4 Módulo de elasticidade .....</b>	<b>59</b>
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA E DEFINIÇÕES DA ETAPA 3 .....	61
4.4 ETAPA 3.....	64
<b>4.4.1 Índice de consistência .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4.2 Tração na flexão .....</b>	<b>66</b>
4.4.2.1 Amostras laminares.....	66
4.4.2.2. Amostras prismáticas .....	72
<b>4.4.3 Compressão.....</b>	<b>76</b>
<b>4.4.4 Módulo de elasticidade .....</b>	<b>78</b>

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>81</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo de construção mais disseminado no mundo e pode ser encontrado em residências, rodovias, pontes, edifícios e até mesmo em usinas hidrelétricas. O seu consumo só é inferior ao da água no mundo como destacaram Mehta e Monteiro (2014). A indústria de cimento foi responsável por 4,65 bilhões de toneladas de produção de cimento no mundo em 2016 (CEMBUREAL, 2017) e esse valor supera o consumo de alimentos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

Porém, a cada ano que passa a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera está aumentando e a construção civil é responsável pela grande emissão de gás carbônico na sua cadeia produtiva (SANTORO; KRIPKA, 2016; ALVES, 2019). No Brasil, o processo industrial do cimento foi responsável por 24,9% das emissões de CO<sub>2</sub> do setor industrial em 2015 (BRASIL, 2018).

De acordo com Mehta (2009), para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e o consumo de cimento, deve ocorrer uma redução no consumo de concreto, o qual é alcançado através de projetos arquitetônicos e projetos estruturais inovadores buscando uma maior vida útil nas estruturas. Também deve ser utilizado menor quantidade de cimento no concreto e por fim limitar o consumo de clínquer no cimento através da adoção de maiores quantidades de materiais cimentício suplementares, assim formando as três ferramentas que podem ser utilizados para obter uma melhor eficiência ambiental dentro da construção civil.

Uma forma de diminuir esses níveis de emissão de CO<sub>2</sub> é construir prezando a durabilidade e o melhor desempenho das estruturas, portanto deve-se escolher os materiais a serem empregados e o método construtivo de forma adequada conforme salientam Tutikian, Isaia e Helene (2011), ampliando assim, a vida útil dos elementos e conseqüentemente das edificações. Deste modo, a sustentabilidade ganha um enfoque também no desenvolvimento de concreto e de compósitos cimentícios, no quais deve-se buscar atender o âmbito ambiental, mas também a esfera econômica e social, o que foi denominado como eco-eficiência de acordo com Kim *et al.* (2016).

Por este motivo, são realizadas diversas pesquisas para o aprimoramento nas propriedades e o desenvolvimento de novos tipos de concreto, como por exemplo, o concreto autoadensável (CAA) que tem como características a fluidez, habilidade passante e resistência à segregação conforme destacado por Tutikian e Dal Molin

(2008), Rissardi, (2017) e Pradhan (2020). Também foi desenvolvido o concreto de ultra alto desempenho que apresenta excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade, apresentando desempenho superior ao do concreto convencional (KIM; WANG, 2019; CHRIST, 2019). Para amenizar os problemas que possam ocorrer pela fissuração, foi desenvolvido o concreto auto-cicatrizante, que tem a capacidade de regenerar as fissuras, como é possível perceber nos estudos realizados por Huynh, Imamoto e Kiyohara (2019) e Rong *et al.* (2020).

Por fim, para adquirir mais segurança e ductilidade, foi desenvolvido o *engineered cementitious composite* (ECC) que pode ser classificado como uma nova geração do compósito cimentício reforçado com fibras. Tal material tem como característica o desenvolvimento de múltiplas pequenas fissuras o que proporciona maior flexibilidade e ductilidade (LI, 2003; WANG; LI, 2007; WU *et al.*, 2020). Esse comportamento apresentado pelo ECC é chamado internacionalmente de *strain-hardening*, no qual a resistência de pós-fissuração na tração é maior ou igual à resistência de tração, assim criando múltiplas microfissuras em vez de uma única fissura no elemento estrutural (RIGHI *et al.*, 2017).

## 1.1 TEMA

Para modificar o comportamento frágil do concreto convencional e da mesma forma os transtornos que podem ser gerados pelo crescimento das fissuras relacionados à durabilidade, foi desenvolvido o concreto reforçado com fibras, também denominado de FRC (*Fiber Reinforced Concrete*). Ao adicionar fibras na matriz, diminuem os tamanhos das aberturas das fissuras (COSTA, 2015) e conseqüentemente seu potencial de dano, proporcionando ainda melhorias nas propriedades mecânicas dos materiais.

O *engineered cementitious composite* (ECC) foi desenvolvido em 1993 pelo pesquisador Victor C. Li na Universidade de Michigan e esta descoberta aconteceu devido ao estudo realizado desde 1971 pelo grupo IPC que foram os primeiros a aplicarem o conceito de mecânica da fratura para analisar o compósito cimentício reforçado com fibras (LI, 2003; SINGH; SAINI; CHALAK, 2019).

O ECC é considerado uma família do compósito cimentício de ultra desempenho reforçado com fibras que foi baseado no princípio de micro-mecânica e tem como principal característica a ductilidade de acordo com Wang e Li (2007).

Conforme apresentado por Zhang *et al.* (2020) este material apresenta um comportamento *strain-hardening* ou endurecimento sob deformação, no qual ocorre a formação de múltiplas fissuras finas em vez de uma única fissura que vai crescendo a medida em que se incrementa a tensão de tração. De acordo com Zhao *et al.* (2020), por ter essa habilidade de controlar as espessuras das fissuras, o compósito dificulta a entrada de agentes agressivos, melhorando significativamente a durabilidade da estrutura.

Outra característica importante do ECC é a capacidade de deformação sob tração uniaxial que pode ser de 3 a 5%, o que é 300 vezes superior ao concreto convencional como mostrado pelo estudo de Li (2003).

A composição do ECC é semelhante aos compósitos cimentícios reforçados com fibras, onde são utilizados cimento, agregado, água, fibra e aditivo químico. O que difere é o teor de fibra utilizado, em que não supera o valor de 2% em volume (LIU *et al.*, 2017). Segundo Wang e Li (2007) este material apresenta um elevado teor de cimento na matriz, na ordem de 830 a 1200 kg/m<sup>3</sup>, por não utilizar agregado graúdo. O alto teor de cimento auxilia na melhor dispersão das fibras e no controle da tenacidade da matriz.

Não obstante, por causa do elevado teor de cimento acaba apresentando um elevado custo e causa um impacto ambiental superior (ALTWAIR; JOHARI; HASHIM, 2012). Por este motivo, vem sendo realizados diversos estudos incorporando materiais pozolânicos e resíduos gerados na indústria como cinza volante, escória de alto forno e cinza de casca de arroz, entre outros.

Wang e Li (2007) estudaram a incorporação de cinza volante na matriz do ECC, o qual obteve uma capacidade de deformação de 3 a 4% e uma resistência à tração superior a 4,5 MPa. Na pesquisa realizada por Ammasi e Ragul (2018) com substituição de 60% do cimento por cinza volante classe F utilizando a fibra de aço e fibra de polipropileno, foi possível obter resultado satisfatório quanto a propriedade mecânica e de durabilidade.

O material denominado de *eco-friendly ductile cementitious composite* (EDCC) que é um material similar ao ECC foi desenvolvido recentemente, apresentando baixo teor de cimento e um alto volume de cinza volante, demonstrando elevada ductilidade e um comportamento elastoplástico (SOLEIMANI-DASHTAKI *et al.*, 2017). Wang, Qiannan *et al.* (2020) utilizaram um volume grande de cinza volante e uma pequena quantidade de sílica ativa e obtiveram uma capacidade de deformação próxima de

4%, também foi observado que o EDCC é um material mais durável sob o carregamento.

Wang, Qing *et al.* (2020), testaram 15 traços com substituição parcial do cimento com sílica ativa, escória granulada de alto forno e cinza volante e obteve como melhor proporção a utilização de 10% de cada tipo de pozolana simultaneamente. Também estudaram o comportamento de dois tipos de fibras de álcool polivinílico (PVA), o convencional (com tratamento de superfície) e o mais econômico (que não possui revestimento de óleo na superfície). A partir da pesquisa, os autores constataram que o desempenho obtido é satisfatório com o uso da fibra mais acessível.

No Brasil, vem sendo realizados estudos para desenvolver o ECC com material local. Costa (2015) estudou os aspectos ligados a durabilidade do compósito com fibras de polipropileno e de cinza de casca de arroz e evidenciou a viabilidade do uso desta pozolona em termo de durabilidade. Já Pasinato (2018) avaliou o uso de ECC com substituição de 50% de cinza de casca de arroz também utilizando fibra de polipropileno, como material de reparo de vigas de concreto armado. O compósito apresentou uma boa aderência com o substrato, porém apresenta um elevado custo comparado com a argamassa de reparo.

Na instituição em que essa pesquisa foi desenvolvida contou-se também com o estudo de Ehrenbring (2020) que estudou o desenvolvimento de ECC autocicatrizantes com inserção de três tipos de fibras, sendo de álcool polivinílico (PVA), polipropileno (PP) e recicladas de poliéster (POL). Foi utilizado a sílica ativa na composição do ECC e os ensaios realizados até os 84 dias mostram que é possível o desenvolvimento do compósito com o comportamento de *strain-hardening* e *deflection-hardening* com 2,0% de fibra de PVA e 2,3% de fibra de POL. Já com o uso de 2,4% de PP não atingiu os requisitos mínimos para ser classificado como ECC e isso ocorreu devido a não compatibilização entre a matriz e o reforço adotado, que apresentou valores superiores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do que encontrados em outras bibliografias.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho dedica-se ao estudo do compósito cimentício de ultra desempenho reforçado com fibras, especificamente o ECC, buscando utilizar material

encontrado na região sul do país e que possa ser substituído pelo cimento para obter um compósito mais sustentável. Foram analisados diferentes teores de substituição de pozolana na mistura, buscando obter o melhor desempenho mecânico avaliando a resistência à tração na flexão, compressão e módulo de elasticidade da matriz.

Ainda, avaliou-se a utilização de fibra de polipropileno no compósito para avaliar o comportamento mecânico do compósito, a fim de obter um compósito mais viável economicamente.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um traço de *Engineered Cementitious Composite* com menor impacto ambiental, utilizando material local como substituição parcial ao cimento.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- a) analisar as diferentes misturas desenvolvidas e encontrar o teor ideal de utilização de sílica ativa e de cinza volante como material cimentício suplementar;
- b) analisar a relação entre a distribuição granulométrica do cimento e das substituições pozolânicas e as propriedades mecânicas do compósito estudado;
- c) comparar os valores obtidos de resistência tração na flexão, compressão e módulo de elasticidade nas idades de 7, 28 e 56 dias;
- d) comparar os valores obtidos de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias com utilização de fibras de polipropileno com teor de 2,4%.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

No processo de produção do concreto, o cimento Portland é responsável por mais de 80% das emissões totais de CO<sub>2</sub>, sendo que esse número considera a

eletricidade e os combustíveis utilizados na produção e para o transporte (MATOS *et al.*, 2018). Por consequência, de acordo com Celik *et al.* (2015), devem ser desempenhados estudos para uma construção eco eficiente para que ocorra redução na emissão de gases nocivos.

Por não conter agregado graúdo, o ECC possui um alto consumo de cimento e isso introduz uma maior retração, calor de hidratação e custo, além de não ser ambientalmente correto (ALTWAIR, JOHARI, HASHIM, 2012). Originalmente, este compósito foi pesquisado com a fibra de PVA com tratamento de superfície, porém este material tem um elevado custo de importação e uma reduzida quantidade para aplicações comerciais, o que acaba inviabilizando o uso desta fibra (RIGHI *et al.*, 2017; WANG, Qing *et al.*, 2020). O estudo de Turk e Demirhan (2013) salientou a importância de utilizar materiais locais para o desenvolvimento de um ECC mais econômico.

Desta forma, para que esse novo compósito que apresenta excelentes propriedades possa ser difundido localmente e no território nacional, faz-se necessário o estudo de um traço do ECC mais sustentável e que apresente um bom desempenho, utilizando os materiais locais para que sua aplicação seja viabilizada.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema abordado neste trabalho, abrangendo os conceitos relacionados ao concreto convencional e ao *Engineered Cementitious Composite* (ECC), citando as características, composições, estudos desenvolvidos e métodos de avaliação do comportamento mecânico.

### 2.1 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil do mundo e isso se deve por ser um material resistente à ação da água, versátil, durável e econômico (NEVILLE; BROOKS, 2010). Além disso, conforme Mehta e Monteiro (2014) não requer tanta manutenção, devendo ser dosado adequadamente para resistir à corrosão. Ainda, o material apresenta uma boa resistência ao fogo se for bem projetado e tem uma resistência a cargas cíclicas adequada quando comparado com outros materiais. Com a necessidade de um elemento que possa ser aplicado em diversos ambientes e aplicações, foram desenvolvidas pesquisas sobre diversos tipos de concreto, que são estudadas até hoje (LI, 2012).

Porém, apesar de ser o material estrutural mais consumido do mundo, o concreto apresenta uma série de limitações. Segundo Figueiredo (2011) a baixa resistência à tração em comparação com sua resistência à compressão, faz com que apresente comportamento frágil, tendo uma baixa capacidade de deformação o que torna o material suscetível ao aparecimento de fissuras (RANJITH; VENKATASUBRAMANI; SREEVIDYA, 2017).

Tal deficiência frente à essa solicitação configura-se como um dano mecânico e que impacta na vida útil do concreto, o que fomentou o desenvolvimento de materiais tais como o objeto de estudo do presente trabalho.

#### 2.1.1 Concreto convencional: composição e características

O concreto pode ser definido como um material compósito formado por agregados de formas e tamanhos variados envolvidos em um meio ligante, que pode ser constituído por uma matriz de pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Geralmente é constituído basicamente de cimento, água e agregados, podendo ser

composto também por aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, conforme Helene e Andrade (2010).

Segundo Ferreira e Hanai (2010), o concreto convencional é considerado um material não linear, pois é um material formado por múltiplas fases, sendo que cada fase possui suas características distintas e que esse conjunto formado influencia a propriedade do material. Essas fases são formadas pela pasta de cimento, agregados e vazios. Conforme Almeida (2017), a interface formada pela pasta de cimento e o agregado é denominado como zona de transição e apresenta características distintas, o qual é considerado como uma outra fase do concreto, apresentando uma região mais porosa e heterogênea em relação à matriz da pasta.

Por não obedecer ao comportamento da Lei de Hooke, a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão é mais complexa, podendo ser influenciada pelas propriedades dos materiais empregados na composição do concreto conforme destacado por Girardi (2018).

Apesar de ser o material mais utilizado na construção civil, apresenta algumas limitações como a retração, variações volumétricas sob condições térmicas e a baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando o material sofre esforço de tração (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Ainda sobre à tração, o concreto tem uma reduzida capacidade de resistir a tais esforços, tendo resistência geralmente em torno de 7% a 11% em relação à resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014). De acordo com Figueiredo (2011) e Li (2012), essa reduzida capacidade de resistência à tração ocorre pela dificuldade em interromper uma propagação das fissuras quando submetidas aos esforços de tração direta, assim levando a ruptura do material.

## 2.2 INDÚSTRIA DO CIMENTO E DO CONCRETO

De acordo com Scrivener e Kirkpatrick (2008), a utilização em larga escala de material cimentício pode ser explicado pela facilidade de obter um produto altamente funcional, que pode ser manipulado em temperatura ambiente. Percebe-se o elevado consumo desse material, ao observar os seguintes dados. Todos os anos são produzidos mais de 1 m<sup>3</sup> de concreto por pessoa em todo o mundo. No Brasil, entre 2005 e 2012 o consumo de concreto aumentou 180% (ABCP, 2013). Em 2009, o concreto produzido em centrais dosadoras foi responsável por 30 milhões de metros cúbicos no Brasil (PEDROSO, 2009). Segundo Mehta e Monteiro (2014), o consumo

do concreto no mundo em 2014 foi em torno de 33 bilhões de toneladas, perdendo somente para o consumo da água.

O consumo aparente per capita de cimento Portland no Brasil segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013), no ano de 1950 era 34 quilogramas por habitante e no ano de 2013 esse valor passou para 353 kg/hab. O consumo de cimento em 2013 alcançou 71,0 milhões de toneladas em todo o território nacional. De acordo com *The European Cement Association - CEMBUREAU* (2018) a produção global de cimento em 2017 foi de 4,1 bilhões de toneladas.

Porém, a produção de cimento é responsável por grande emissão de gases de efeito estufa, o que apresenta um impacto elevado, principalmente em relação ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2019), cerca de 7% de todo o CO<sub>2</sub> emitido no planeta é originado pela indústria cimenteira. No Brasil, a indústria de cimento foi responsável por 29,7% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2012 (BRASIL, 2014). Aproximadamente 90% das emissões de carbono que ocorre na produção de cimento é resultante da etapa onde o calcário por meio de uma reação química, libera carbono para a produção do clínquer (ABDI, 2012).

## 2.3 ECC

De acordo com Li (2003), o ECC pertence à família do *high performance fiber reinforced cement composite* (HPFRCC) ou compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras, que tem como característica a elevada ductilidade à tração, em que pode ser até 300 vezes superior que o do concreto convencional, apresentando uma curva de tensão e deformação mais parecida com a do aço do que do concreto (YU; LI, 2009).

### 2.3.1 Histórico

Os estudos envolvendo o uso de fibras de aço no concreto foram iniciados no começo dos anos 60 e, no final da década foram publicadas pesquisas revelando o uso de fibras de vidro em matrizes cimentícias de comportamento frágil (NAAMAN, 2007). Conforme Li (2007), a partir dos anos 70, o concreto reforçado com fibras, conhecido também como *fiber reinforced concrete* (FRC) ganhou destaque, tendo sido

desenvolvidas pesquisas com incorporação de fibras de vidro, carbono, sintéticos e naturais.

Desde o princípio havia um interesse em desenvolver um compósito reforçado com fibras com ductilidade à tração e as primeiras pesquisas só conseguiram o aumento da tenacidade do material (SAHMARAN *et al.*, 2009). O FRC tem um comportamento *strain-softening* em que ao ocorrer uma abertura de uma fissura, ou seja, ao atingir a tensão de fissuração, o material perde a capacidade de carga, pois a transferência de carga entre as fibras não é o suficiente para suportar o carregamento (GARCEZ, 2009).

Foram aplicados os conceitos de mecânica das fraturas para analisar o FRC, o qual mostrou que com as fibras alinhadas de forma contínua, consegue-se atingir uma ductilidade à tração elevada em relação ao concreto convencional (LI, 2003). Assim, surgiu uma nova classe de FRC que foi denominado como *high performance fiber reinforced cement composite* (HPFRCC) ou compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras em que a resistência pós-fissuração sob esforço de tração é maior ou igual à resistência de fissuração. Este comportamento ficou conhecido como *strain-hardening* (NAAMAN, 2007).

Apesar do HPFRCC apresentar excelentes propriedades de tração que não é possível obter no FRC, a aplicação do material era limitada em laboratórios de pesquisa ou aplicações especializadas, não tendo viabilidade para ser empregado na indústria devido ao alto teor de fibras. Deste modo, foi desenvolvido um novo material denominado ECC (*engineered cementitious composite*) na década de 90, pelo pesquisador Victor C. Li na Universidade de Michigan (LI, 2007).

Segundo Li e Kanda (1998) e Li (2012), para o desenvolvimento do ECC foi levado em consideração a micromecânica da estrutura, ou seja, era necessário criar uma interação sinérgica entre a fibra e a matriz cimentícia, com uma interface correta para se atingir o comportamento desejado, minimizando o teor de fibra (em torno de 2% ou menos em volume).

### **2.3.2 Composição**

Como destacado por Sahmaran e Li (2009) e Ma *et al.* (2015), os materiais utilizados no ECC são semelhantes ao do FRC, que é composto por cimento, areia fina (normalmente diâmetro máximo de 0,15mm), água, uma pequena quantidade de

aditivo e fibras (volume de fibra não superior a 2% em relação à volume total de material); diferindo somente por não conter agregado graúdo.

O ECC possui um alto teor de cimento em sua composição por não conter agregado graúdo e esse valor varia entre 830 e 1200 kg/m<sup>3</sup> (WANG; LI, 2007). Já segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o consumo mínimo de cimento varia de 260 a 360 kg/m<sup>3</sup> em concreto armado. Isto acaba ocasionando alto calor de hidratação e apresenta um elevado custo. Por estes motivos, também estão sendo incorporadas adições minerais na composição (PAN *et al.*, 2015).

A largura máxima das fissuras pode ser controlada modificando-se o tipo e a forma da fibra, além da relação água cimento (a/c) da matriz. Geralmente a relação a/c adotada está entre 0,27 e 0,60 (JSCE, 2008; MAALEJ; LI, 1994; WANG; LI, 2007).

Um dos primeiros estudos realizados por Li (1998) utilizou as fibras de polietileno (PE) de alto módulo na composição do ECC, apresentando um compósito com uma capacidade de deformação perto de 6% com um pequeno teor de fibra. Mais tarde, foram desenvolvidos ECC com a utilização de fibras de álcool polivinílico (PVA) por Kanda e Li (1998). A fibra de PVA por meio de reações químicas consegue estabelecer uma ligação na zona de interface entre a matriz e o reforço, apresentando um ótimo desempenho (JUAREZ *et al.*, 2015).

Recentemente foi desenvolvido um estudo para verificar o efeito de diferentes teores de fibras de polietileno na propriedade mecânica e física do ECC, variando-se os teores entre 0,25% até 2,0%, o resultado demonstrou que o uso de 1,5% apresenta o melhor desempenho (mais eficaz que o uso de 2,0%), constatando que a redução do volume de fibras pode trazer vantagens no custo, mas também na propriedade mecânica (WANG, Y. *et al.*, 2020). Ranjith, Venkatasunbramani e Sreevidya (2017) realizaram um estudo comparativo do ECC com fibra de polipropileno (PP) e fibra de vidro, com variação da proporção de 0,5% a 2,0%. Ao avaliar a durabilidade, comprovaram que 1,5% de teor é o que apresenta desempenho satisfatório em todos os ensaios realizados.

### **2.3.3 Características**

Como já mencionado anteriormente, o ECC é um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras e que é caracterizado pela elevada ductilidade à tração (MAGALHÃES, 2010). Este compósito é baseado na

teoria da micromecânica, com um volume de 2% de fibras apresenta uma alta capacidade de deformação à tração que pode exceder 3% e ainda apresenta o desenvolvimento de múltiplas microfissuras com larguras menores que 100  $\mu\text{m}$  (LI, 2003; YU *et al.*, 2017).

### 2.3.3.1 Resistência mecânica

O ECC não apresenta valores muito distintos do concreto convencional ou concreto de alto desempenho quando se trata da resistência à compressão, atingindo tensão de 30 MPa a 90 MPa (LI, 2008). Entretanto, o módulo de elasticidade, geralmente atinge valores menores que o concreto convencional, em torno de 20 a 25 GPa e essa diferença é explicada pela ausência de agregado graúdo na composição. A deformação sob esforço compressivo é na ordem de 0,45% a 0,60% (XU; CAI, 2010). O ECC apresenta uma boa resistência à tração e de resistência à flexão quando comparado ao concreto convencional (QIAN *et al.*, 2013).

Já a capacidade de deformação sob tração uniaxial pode alcançar valores superiores a 4%, fazendo com que a ductilidade do ECC seja centenas de vezes maior do que o concreto convencional (MAALEJ *et al.*, 2012). Além disso, a abertura das fissuras é controlada, possibilitando a existência de aberturas menores que 100  $\mu\text{m}$ , de forma que fiquem espaçados a alguns milímetros de distância devido ao comportamento de endurecimento sob deformação ou *strain-hardening* (LI, 2012; YANG *et al.*, 2008).

O comportamento *strain-hardening* está associado a estabilização na capacidade de carga do compósito mesmo após a fissuração. De acordo com Li e Wu (1992) e Li (2003), ocorre a formação da primeira fissura devido ao esforço de tração uniaxial na matriz. Portanto, o carregamento passa a ser transferido para as fibras, que por sua vez transferem o esforço para outro ponto da matriz, provocando a formação de novas fissuras. O desenvolvimento de múltiplas microfissuras é ocasionado pela repetição deste mecanismo, que ocorre ao longo do compósito sem perder a integridade e evitando a ruptura do material. Quando este comportamento ocorre sob ação de um carregamento de flexão, é denominado de *deflection-hardening* (LI, 2019).

Em relação à fadiga, o ECC apresenta um desempenho melhor que o concreto convencional, sustentando mais ciclos de carga de fadiga no mesmo nível de tensão

(QIAN *et al.*, 2013; QIU; AW-YON; YANG, 2018). Na pesquisa realizada por Wu, Pan e Ueda (2018) foi constatado que, com uma fração de 2% de volume da fibra de PVA é possível obter uma resistência à abrasão semelhante com a do concreto convencional.

#### 2.3.3.2 Índice de vazios

De acordo com Borges, Motta e Pinto (2019) e Costa (2015), o concreto com adição de fibras tende a apresentar uma maior porosidade e absorção, por incorporar ar durante a mistura e por apresentar uma zona de transição entre fibra e matriz mais frágil. Por outro lado, com a incorporação de adições minerais como a cinza volante, pode ocorrer redução da porosidade que pode ser explicado pelo refinamento da mistura causado pelo material cimentício suplementar que pode modificar os poros (MAGALHÃES, 2010).

Foi realizada uma pesquisa variando a concentração de fibras de PVA no ECC, de 1 até 5%. E nesse estudo foi realizado uma comparação do índice de vazios do compósito e do concreto convencional com resistência semelhante. Ao final, observou-se que ocorre um aumento do índice de vazios na medida que há maior presença de fibras na matriz (WU; PAN; UEDA, 2018).

Ao substituir 30% de cimento por cinza de casca de arroz que foi moído por 8h, obteve-se um índice de vazios menor do que o ECC sem adição de cinzas, com valor menor que 25%, apresentando ainda uma resistência mecânica satisfatória para aplicação real (RIGHI *et al.*, 2017).

#### 2.3.3.3 Absorção de água

De acordo com a pesquisa realizada por Costa (2015), comparando a durabilidade do ECC com concreto estrutural e concreto utilizado para pavimento rígido, mostrou-se que o ECC apresenta um valor de absorção superior do que o concreto estrutural de 25 MPa, sendo que o último material citado anteriormente apresenta absorção de água em torno de 6% e o ECC obteve valor superior a 10%.

Ao substituir 30% de cimento por cinza de casca de arroz no ECC, obteve-se uma absorção de água menor que 15%, apresentando valores semelhantes ao ECC

utilizado como referência (sem adição de cinzas), que é composto por cimento, areia, fibra, superplastificante e água (RIGHI *et al.*, 2017).

Como visto anteriormente, a formação de múltiplas fissuras com larguras pequenas na ordem de 60  $\mu\text{m}$  é uma característica intrínseca do ECC. Devido a esta característica, se torna essencial analisar a absorção de água durante o carregamento, ou seja, após a formação das microfissuras (WANG, Qiannan *et al.*, 2020). O estudo realizado por Lepech e Li (2009b) mostrou que a permeabilidade a água tem um aumento significativo após a abertura de fissuras maiores que 100  $\mu\text{m}$ , assim sendo considerado um material resistente às ações de intempéries.

#### 2.3.3.4 Impacto ambiental

De acordo com Magalhães (2010), em relação ao concreto convencional, o ECC apresenta um elevado teor de cimento e isto ocorre devido a necessidade de ter uma fácil dispersão das fibras e essencialmente por requerer controlar a tenacidade a fratura da matriz, o que explica a ausência de agregado graúdo na sua composição. Porém, estas matrizes com altos teores de cimento acabam gerando um impacto ambiental negativo (HUANG *et al.*, 2013).

Ao introduzir cinza volante no ECC, segundo Wang e Li (2007), ocorre uma melhora na trabalhabilidade da mistura, no comportamento de tração direta por reduzir a aderência química da interface fibra-matriz e, também, da tenacidade da matriz, ao mesmo tempo que aumenta a aderência friccional. Já no estudo realizado por Yang, Yang e Li (2007) onde realizou-se incorporação de altos teores de cinza volante, que variou entre 1,2 a 5,6 vezes a massa de cimento, obteve-se como resultado uma redução na abertura das fissuras e da retração por secagem.

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos incorporando diversos materiais no ECC para tentar minimizar o seu impacto ambiental. Esses materiais são: cinza volante, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, sílica ativa, pó de calcário, rejeito de minério de ferro e entre outros (HUANG *et al.*, 2013; RIGHI *et al.*, 2017; WANG, Qing *et al.*, 2020; YANG; YANG; LI, 2007; ZHOU *et al.*, 2010).

### 2.3.4 Aplicação

O ECC é considerado ideal para diversas aplicações estruturais, por apresentar alta capacidade de deformação à tração e de energia de fratura (MAALEJ *et al.*, 2012). O estudo realizado por Zhang, Maalej e Quek (2007) avaliou o ECC com carga de impacto e confirmou que este compósito pode ser utilizado em estruturas de proteção, como por exemplo, painéis resistentes a explosões ou impactos. Quando submetida a cargas cíclicas, apresenta reduzido dano na estrutura e menor abertura de fissuras, destacando a aplicabilidade em elementos submetidos a efeitos de sismos, como a viga de ligação para amortecimento (KUNIEDA; ROKUGO, 2015).

O controle de fissuras é uma propriedade intrínseca ao ECC, garantindo assim o atendimento aos requisitos de resiliência e de durabilidade que são necessários para a aplicação em infraestruturas (MA *et al.*, 2015). Além da aplicação como recapeamento de pavimento (GARCEZ, 2009; QIAN *et al.*, 2013), o material apresenta uma boa performance quando utilizado como laje de ligação em tabuleiro de pontes, como mostra o estudo de Lepech e Li (2009a).

Este compósito pode ser aplicado como material de reforço em estruturas. Jin e Li (2019) propuseram o uso de ECC leve como camada protetora da torre eólica de concreto, evidenciando menor custo e necessidade de manutenção em relação ao concreto convencional, pois o primeiro material citado apresenta maior durabilidade. Já no estudo de Pasinato (2018), evidenciou-se a possibilidade de utilizar o ECC como material de reparo em vigas de concreto armado deteriorado pela corrosão, porém, este acaba sendo inviabilizado pelo elevado custo que apresenta em relação às argamassas de reparo convencionais.

## 2.4 ESTUDOS DESENVOLVIDOS

Segundo Li (2012), apesar da característica fundamental do ECC ser a ductilidade à tração, uma variedade de atributos vem sendo desenvolvidas para este compósito, tais como alta resistência, baixa densidade, autorregeneração e pegada baixa de carbono. Assim, destaca-se a importância dos estudos realizados onde inserem materiais pozolânicos e resíduos para tentar criar o ECC verde.

### 2.4.1 Inserção de materiais pozolânicos

Devido ao alto consumo de cimento que o ECC apresenta, há um impacto negativo ambientalmente e isto pode ser amenizado utilizando materiais oriundos da indústria como a cinza volante que é um dos tipos de material cimentício suplementar (WANG; LI, 2007).

Conforme destacados por Kosmatka e Wilson (2011), os materiais cimentícios suplementares são elementos que contribuem na propriedade do concreto através de reações hidráulicas ou pozolânicas. As adições minerais hidráulicas reagem quimicamente com água, formando produtos cimentantes. Os materiais pozolânicos apresentam alto teor de alumina ( $Al_2O_3$ ) ou sílica ( $SiO_2$ ), que na presença de água reage com o hidróxido de cálcio formando compostos com características aglomerantes (DAL MOLIN, 2011).

O comportamento *strain-hardening* de tração do ECC são influenciados pelas características da fibra, da matriz e da interface entre matriz e fibra (MA *et al.*, 2015). A cinza volante pode diminuir a tenacidade à fratura da matriz, melhorar a trabalhabilidade e a dispersão das fibras, modificando a interação fibra/matriz (WANG; LI, 2007). Além disso, com o aumento do teor de cinza volante ocorre a redução da ligação interfacial entre fibra e matriz, evitando rupturas excessivas das fibras e aumentando a ductilidade à tração do ECC (MA *et al.*, 2015).

O estudo realizado por Yang, Yang e Li (2007) observou o comportamento do ECC com altos teores de cinza volante - também denominado como *high-volume fly ash* ECC (HVFA-ECC) - variando a relação cinza volante e cimento entre 1,2 a 5,6. Apesar de ocorrer uma diminuição na resistência à compressão com a maior incorporação de cinza volante, foi possível obter um ECC com menor retração a secagem, menor largura de fissuras e com capacidade de deformação superior a 2,5% aos 28 dias.

Em uma outra pesquisa foi utilizado pó de calcário e escória de alto forno para desenvolver um ECC de menor impacto, onde se conseguiu obter com apenas 15% de cimento Portland uma resistência à compressão de 38 MPa, capacidade de deformação sob tração de 3,3% e uma abertura de fissuras de 57  $\mu m$  (ZHOU *et al.*, 2010). De acordo com Wang, Qing *et al.* (2020), é possível produzir um ECC mais sustentável com um custo menor substituindo o cimento por 10% de sílica ativa, 10% de escória de alto forno e 10% de cinza volante, resultando em ECC com resistência

a compressão superior a 40 MPa e resistência à tração superior a 3,5 MPa aos 28 dias utilizando uma fibra de PVA local sem tratamento de superfície.

Um estudo local realizado por Righi *et al.* (2017) utilizou a cinza de casca de arroz como substituição ao cimento e utilizou fibras de polipropileno para desenvolver um ECC com menor impacto ambiental e obtiveram um resultado satisfatório, apresentando ser um material viável de ser adotado no Brasil.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais pesquisas realizadas com inserção de pozolanas mostrando os materiais e os teores utilizados.

Tabela 1 - Principais pesquisas realizadas de ECC com incorporação de materiais pozolânicos

Fonte	Objetivo da pesquisa	Materiais pozolânicos	Teor utilizado
WANG; LI, 2007	Criação de ECC verde incorporando CV com mesma ductilidade	Cinza volante (CV)	Relação CV/C 0,10 até 1,50
ZHOU <i>et al.</i> , 2010	Desenvolvimento de ECC com PC e EAF	Pó de calcário (PC)	Relação PC/C 0,8 até 3,0
		Escória de alto forno (EAF)	Relação EAF/C 1,0 até 1,4
RIGHI <i>et al.</i> , 2017	Avaliação comportamento mecânico e de durabilidade do ECC com CCA	Cinza de casca de arroz (CCA)	10%, 20% e 30% (substituição)
YU; LEUNG, 2017	Desenvolvimento de um ECC com alto teor de CV para aplicação estrutural	Cinza volante (CV)	Relação CV/C 4,4
LIU <i>et al.</i> , 2018	Avaliação da resistência ao congelamento com SA e EGAF	Cinza volante (CV)	50% e 70% (substituição)
		Escória granulada de alto forno (EGAF)	40% (substituição)
		Sílica ativa (SA)	5% (substituição)
WANG, Qing <i>et al.</i> , 2020	Utilizar filers pozolânicos e fibra de PVA sem tratamento	Sílica ativa (SA)	5% até 20% (substituição)
		Escória de alto forno (EAF)	10% até 40% (substituição)
		Cinza volante (CV)	5% até 20% (substituição)

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme percebe-se pela Tabela 1, há uma presença importante de misturas contendo cinza volante, pois alta quantidade desta pozolana melhora as propriedades mecânicas e de durabilidade, e ainda reduz a retração por secagem (SAHMARAN; LI, 2009; WANG; LI, 2007). Misturas híbridas também apresentam destaque, pois por apresentar diversas distribuições granulométricas podem contribuir para o melhor empacotamento da mistura, assim contribuindo no comportamento mecânico, na durabilidade e na trabalhabilidade (WANG, Qing *et al.*, 2020).

#### **2.4.2 Inserção de resíduos**

Considerando que em muitos países a disponibilidade do agregado de qualidade está diminuindo, utilizar os resíduos e os agregados reciclados no compósito cimentício com o intuito de minimizar os impactos ambientais é uma boa alternativa (LEPECH *et al.*, 2008).

No estudo realizado por Zhang, Ma e Qian (2015), os autores avaliaram o comportamento mecânico do ECC com substituição parcial de areia por agregado de borracha; obtendo como resultado a melhoria da capacidade de deflexão à flexão e menores aberturas de fissuras. Porém, ocorre uma redução na resistência a compressão e na resistência à tração na flexão.

Li e Yang (2017) avaliaram a propriedade macroscópica e micromecânica do ECC com substituição de areia de microssílica por finos de concreto reciclado e obtiveram como resultado uma capacidade de deformação de 2%, resistência a tração na flexão de quase 7 MPa e resistência à compressão superior a 40 MPa.

Outro resíduo que apresenta um bom potencial de ser utilizado no ECC é o rejeito do minério de ferro, que, ao ser substituído por agregado miúdo ou cimento apresenta as características necessárias ao compósito estudado (HUANG *et al.*, 2013; HUANG; RANADE; LI, 2013).

A inserção de pozolanas e resíduos no ECC para tentar minimizar o impacto ambiental vem ganhando enfoque nesses últimos anos conforme foi observado nas pesquisas apresentadas, e materiais locais devem ser pesquisados, dada a variação em sua composição e conseqüentemente sua contribuição efetiva nas misturas.

### 2.4.3 Percentuais e natureza das fibras

Predominantemente, o tipo de fibra e o percentual adotado no ECC são a fibra de PVA e o teor de 2% ou menos em relação à massa total do compósito, conforme apresentados em diversas pesquisas realizadas (LI, 2007; MAGALHÃES, 2010; WANG; LI, 2007; YANG; YANG; LI, 2007). De acordo com Yu e Leung (2017), a fibra de PVA pode representar 75% do custo da produção do ECC e por ser uma fibra importada apresenta um custo elevado.

Para diminuir o custo, foram desenvolvidas pesquisas como a de Pan *et al.* (2015) e Wang, Qing *et al.* (2020) com percentual menor de adição de fibras de PVA, desde 1,0% até 1,5%. Também foi estudada a possibilidade de utilizar adição polimérica de PVA sem o revestimento de óleo, custando cerca de 1/8 do custo que teria se aplicado o revestimento. (PAN *et al.*, 2015; WANG, Qing *et al.*, 2020; ZHANG; ZHANG, 2018).

O reforço polimérico, contendo fibras como as de polipropileno e as recicladas de poliéster, também foram estudadas como uma alternativa para tornar mais viável a aplicação do ECC. Nos estudos realizados por Garcez (2009) e Righi *et al.* (2017), foram utilizados 2% de fibra de polipropileno (PP) para o estudo do ECC. Já no estudo realizado por Ehrenbring (2020) foram realizados estudos utilizando teores de 2,2%, 2,4% e 2,6% de fibra de PP e aos 7 dias o único teor que apresentou o comportamento compatível com o *deflection-hardening* foi de 2,4%. Nesse mesmo estudo realizado, também foram analisados os teores de incorporação de 2,3%, 2,5% e 2,7% de fibras recicladas de poliéster que apresentaram resultados satisfatórios quanto às propriedades de tração.

Também foram realizadas a hibridização entre diferentes fibras, com o objetivo de tornar o ECC mais viável economicamente. Pakravan, Jamshidi e Latifi (2016) utilizaram a fibra de PP em substituição a fibra de PVA e o teor total de fibra adotado foi de 2%, sendo estudado a proporção de 1,5%+0,5% e 1,2%+0,8%. Os resultados obtidos mostraram-se promissores para produção de um ECC com reduzido custo. Outros autores como Krishnaraja *et al.* (2019) e Pourfalah (2018) realizaram a hibridização de fibras de PVA e fibras metálicas, com teor total de 2% e 2,5%.

Além das fibras apresentadas, existem pesquisas que estudaram o desenvolvimento do ECC com aplicação de: fibra de vidro, fibra de polietileno e fibra

de poliolefina (RANJITH; VENKATASUBRAMANI; SREEVIDYA, 2017; ZAROUDI; MADANDOUST; AGHAEI, 2020; ZHOU *et al.*, 2018).

## 2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ECC

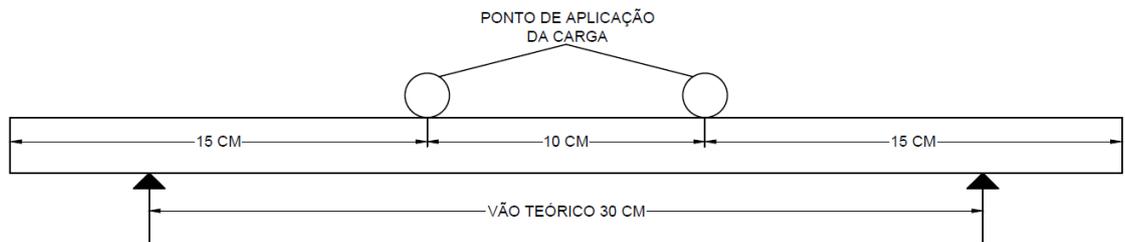
Pelo fato de o ECC apresentar um melhor comportamento à tração e elevada ductilidade, que normalmente não estão presentes nos concretos convencionais, necessita de novas metodologias para caracterizar as suas propriedades mecânicas (LI, 2019).

Um dos critérios mais importantes a ser analisado no ECC é em relação aos esforços de tração uniaxial e, por ainda não existirem normativas, normalmente são utilizadas as recomendações dos comitês como a JSCE- *Japan Society of Civil Engineers* 82:2008 (EHRENBRING, 2020). Para o ensaio de tração direta, existem duas formas geométricas recomendadas que são os corpos de prova em formato de placas, que possuem seção uniforme e a do tipo *dogbone* que apresenta variação na seção transversal (JSCE, 2008; LI, 2019).

Segundo Li (2009), os ensaios de flexão podem trazer maior confiabilidade quanto a resposta do ECC para aplicações estruturais por serem avaliados corpos de prova em placas ou vigas, e também por ser a ação mais comum de ser encontrada em peças estruturais. As geometrias dos exemplares adotados são em formato de placas, ainda sem normativa ou de vigas, sendo normalmente utilizada a normativa americana ASTM C1609: 2019. Nas pesquisas de Ehrenbring (2020) e Wang, Qing *et al.* (2020) foram adotados prismas de 40x40x160 mm e vinculação por 3 pontos para avaliação do ECC.

Nos ensaios de tração na flexão de placas podem ser adotadas também as vinculações por 4 pontos e foram identificadas várias geometrias e taxa de carregamento. No estudo de Magalhães (2010) foram utilizadas dimensões de 12,5x60x400 mm (espessura x largura x comprimento) com velocidade de 0,3 mm/min. Já Pasinato (2018) utilizou geometria de 15x70x300 mm com carregamento de 1,2 mm/min. Também foram utilizados dimensão de 38x76x305 mm com velocidade de 0,5 mm/min (ZHANG; ZHANG; LI, 2019). Ehrenbring (2020) adotou dimensões de 20x70x400 mm, com o vão teórico de 300 mm como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Instrumentação do ensaio de flexão por 4 pontos



Fonte: Elaborado pela autora.

Porém, como destacado por Li (2019) o ensaio de flexão por si só não garante que o material apresente o comportamento de *strain-hardening*, pois mesmo que mostre a propriedade de *deflection-hardening*, na flexão não é garantido que o material apresente o comportamento desejado à tração uniaxial.

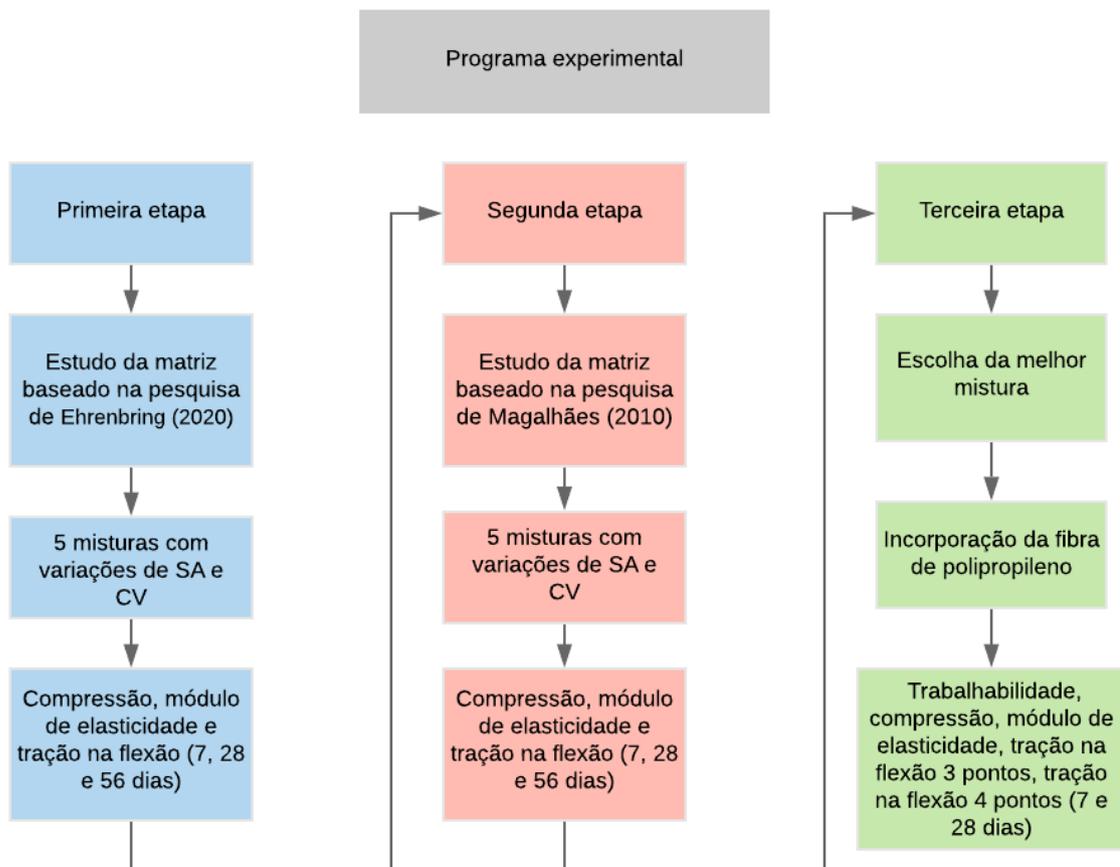
### 3 METODOLOGIA

Considerando os objetivos propostos para a realização desse estudo, a seguir serão apresentadas as etapas adotadas para o programa experimental, composto pelo planejamento das variáveis de análise, seguido de caracterização dos materiais utilizados, definição dos traços a ser estudados e por fim os ensaios realizados para a avaliação do ECC.

#### 3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ANÁLISE

A Figura 2 apresenta o fluxograma do programa experimental, com as variáveis analisadas e os ensaios executados em cada etapa.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente foi realizado o estudo apenas da matriz do compósito cimentício, sem a adição de fibras para determinação da melhor proporção de materiais. Esta parte foi composta pela primeira e segunda etapa do estudo e foram avaliadas cinco misturas com variação dos teores de cinza volante e de sílica ativa em cada etapa.

Após a análise dos resultados da primeira e segunda etapa, foi escolhida a melhor mistura de todos os traços em relação aos ensaios mecânicos e estudada a mistura com a mesma proporção de fibras adicionada, avaliando seu impacto no comportamento do ECC.

### 3.1.1 Primeira etapa

Na primeira etapa da pesquisa o traço escolhido foi o mesmo utilizado na pesquisa de Ehrenbring (2020), com a proporção de 1,00: 0,80: 1,20 (cimento: pozolana: areia fina), em massa. Basear-se nesse estudo é possível considerando a mesma origem do cimento e da cinza volante, ambos da região do estudo.

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão, módulo de elasticidade e de tração na flexão por três pontos para a caracterização dos traços, com idades de 7, 28 e 56 dias de cura, sendo três amostras por idade de análise. A Tabela 2 apresenta o programa experimental desta etapa.

Tabela 2 - Programa experimental da primeira etapa

<b>Mistura</b>	<b>Teor de sílica ativa</b>	<b>Teor de cinza volante</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Idade</b>
TA 100S	100%	0%		
TA 70S30C	70%	30%	Tração na flexão	7 dias
TA 50S50C	50%	50%	Compressão	28 dias
TA 30S70C	30%	70%	Módulo de elasticidade	56 dias
TA 100C	0%	100%		

Fonte: Elaborado pela autora.

A nomenclatura adotada para o traço foi a junção de maior quantidade na mistura, neste caso a areia, com o percentual de pozolana, assim formando TA (Traço Areia) e “70S30C” representando 70% de sílica ativa e 30% de cinza volante.

### 3.1.2 Segunda etapa

Na segunda etapa o traço escolhido foi baseado na pesquisa de Magalhães (2010), sendo o traço 1,00: 1,20: 0,80 (cimento: pozolana: areia fina), em massa. Como comentado anteriormente, também foram avaliadas cinco diferentes variações de cinza volante e de sílica ativa. O uso desse traço visou aumentar a utilização de pozolanas para verificar sua viabilidade de utilização nos ECCs.

Os ensaios de caracterização foram os mesmos adotados na primeira etapa e foram avaliadas três amostras para cada ensaio em cada idade. A Tabela 3 apresenta o programa experimental da segunda etapa da pesquisa.

Tabela 3 - Programa experimental da segunda etapa

Mistura	Teor de sílica ativa	Teor de cinza volante	Ensaio	Idade
TP 100S	100%	0%		
TP 70S30C	70%	30%	Tração na flexão	7 dias
TP 50S50C	50%	50%	Compressão	28 dias
TP 30S70C	30%	70%	Módulo de elasticidade	56 dias
TP 100C	0%	100%		

Fonte: Elaborado pela autora.

Foi escolhido TP, por possuir maior quantidade de pozolana na mistura, significando Traço Pozolana. A segunda parte do nome representa o percentual de sílica ativa e de cinza volante adotados.

### 3.1.3 Terceira etapa

Após o ensaio de caracterização da matriz foi escolhida a melhor mistura com o melhor resultado e a mistura do outro traço que apresenta a mesma variação de sílica ativa (SA) e de cinza volante (CV), assim, totalizando em duas misturas para a realização do estudo na terceira etapa. Nesta fase foram adicionadas a fibra de polipropileno, assim realizando-se o estudo do ECC.

O teor adotado foi de 2,4% para a fibra de PP, baseando-se na pesquisa de Ehrenbring (2020). Nesta etapa foram realizados os ensaios de tração na flexão aos 7 dias e 28 dias de cura, tanto na forma prismática como na forma laminar, com o

intuito de avariar a resposta do ECC em aplicações estruturais. Também foram realizados os ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias de idade. A Tabela 4 apresenta o programa experimental desta parte.

Tabela 4 - Programa experimental da terceira etapa

Mistura	Tipo de fibra	Teor de fibra	Ensaio	Idade
TA escolhido	PP	2,40%	Tração na flexão (prismas)	7 dias
TP escolhido			Tração na flexão (placas) Compressão Módulo de elasticidade	

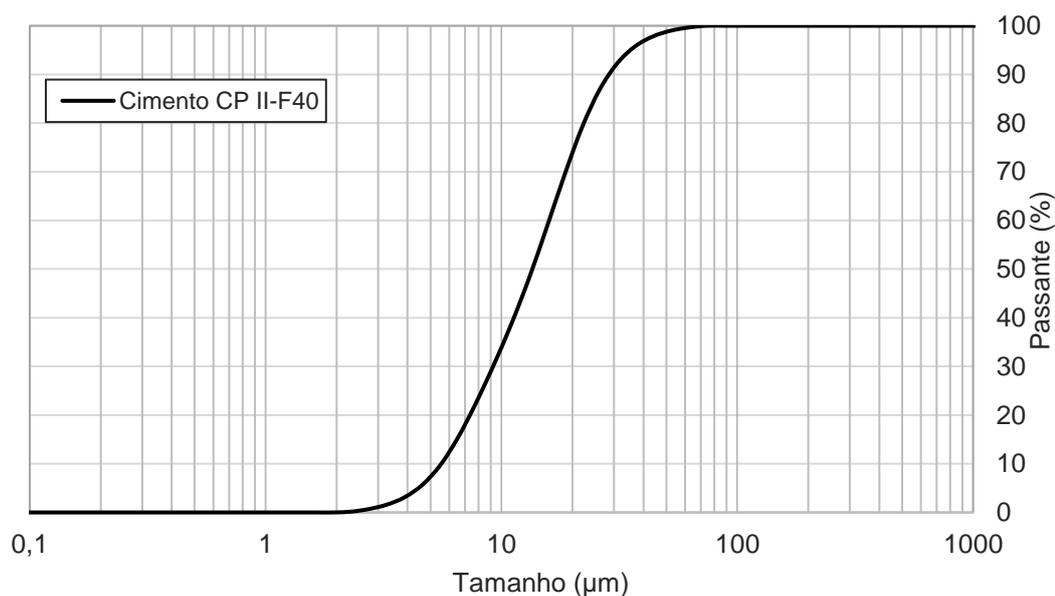
Fonte: Elaborado pela autora.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o cimento CP II-F40 com massa específica de  $3,005 \text{ g/cm}^3$ . A composição granulométrica foi realizada através da granulometria a laser e foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCVmat – UNISINOS), sendo a curva granulométrica apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado



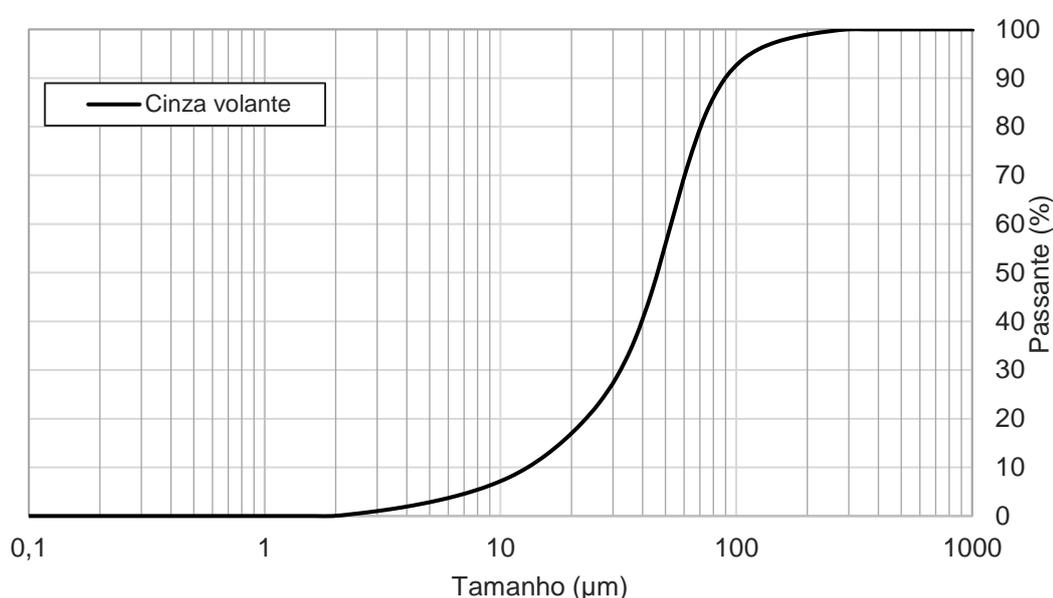
Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.2 Pozolanas

#### 3.2.2.1 Cinza volante

A CV utilizada neste estudo foi gerada nas usinas termoeletricas do Rio Grande do Sul, através da queima do carvão. A massa específica do material foi de 2,0018 g/cm<sup>3</sup> e uma área superficial de 0,4737 m<sup>2</sup>/g. A distribuição granulométrica, a qual foi analisada à laser, é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição granulométrica da cinza volante

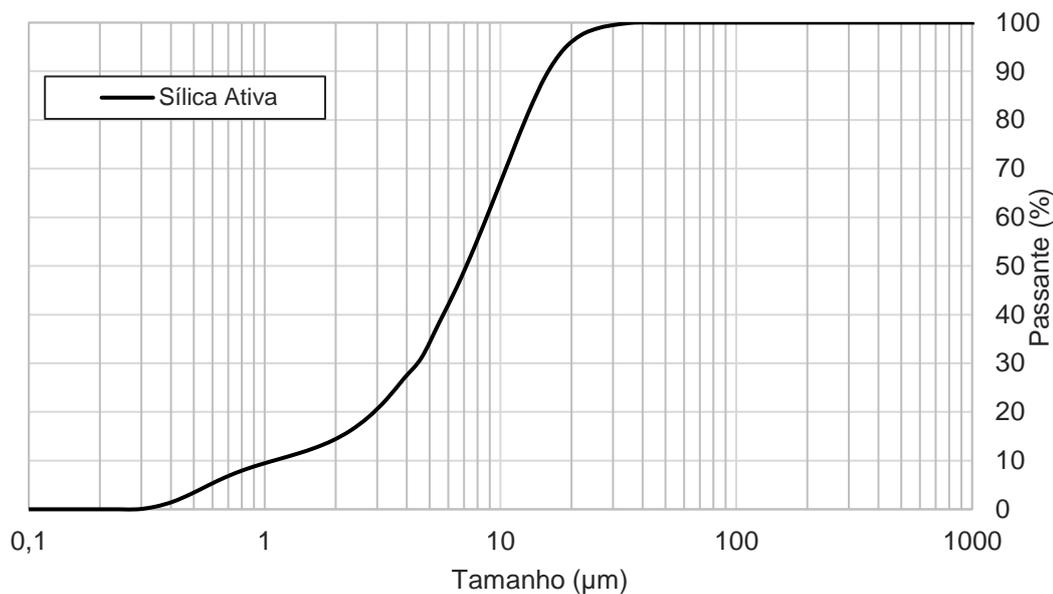


Fonte: Elaborado pela autora.

#### 3.2.2.2 Sílica ativa

Foi utilizada a SA como um dos materiais pozolânicos, fornecida pela empresa Tecnosil. A massa específica do material foi de 2,220 g/cm<sup>3</sup> e a área superficial específica deste material foi de 27,5332 m<sup>2</sup>/g, de acordo com as informações obtidas pelo fabricante do produto. A caracterização granulométrica foi realizada no LCV mat – UNISINOS através da análise à laser. A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica da SA.

Figura 5 – Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.3 Areia

O agregado miúdo utilizado no estudo foi a areia fina natural de rio, normalmente utilizada pelo setor da construção civil na região do estudo. O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248: 2003 e a determinação da massa específica seguiu o método prescrito na ABNT NBR NM 52:2009.

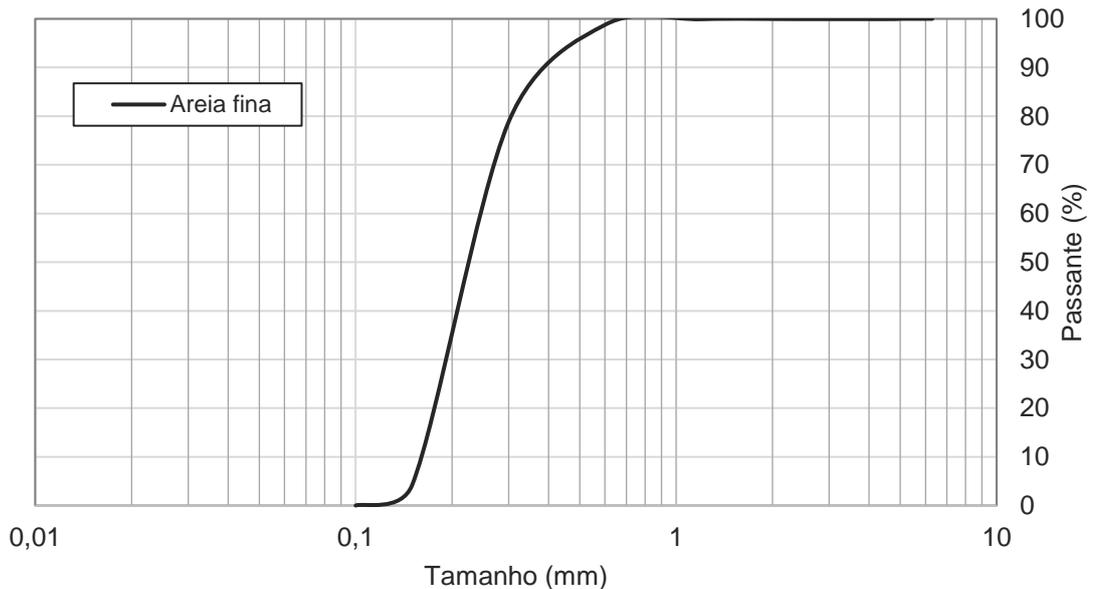
Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UNISINOS. A caracterização e a curva granulométrica da área fina são apresentadas nas Tabela 5 e Figura 6.

Tabela 5 – Composição granulométrica da areia e suas propriedades

Peneira (mm)	Areia Fina	
	Retida (%)	Acumulada (%)
6,3	0,0	0,0
4,8	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0
0,6	1,2	1,2
0,3	20,0	21,2
0,15	74,6	95,8
Fundo (< 0,15)	4,2	100,0
Dimensão máxima		0,6 mm
Módulo de Finura		1,18
Massa Unitária		1,58 g/cm <sup>3</sup>
Massa Específica		2,63 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6 – Curva granulométrica da areia fina utilizada



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.4 Fibras poliméricas

Foi adotada a fibra de polipropileno (PP) nesta pesquisa, por ter uma ampla disponibilidade e um custo menor em comparação com os reforços de PVA, que são normalmente utilizadas nas pesquisas envolvendo o ECC. Os reforços de PP utilizados nesta pesquisa conforme a Figura 7, possuem 12 mm de comprimento, superfície lisa e sem ancoragem nas extremidades.

A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas da fibra de polipropileno produzida pela empresa Neomatex Ltda.

Figura 7 – Fibra de polipropileno utilizado na pesquisa



Fonte: Registrada pela autora.

Tabela 6 – Propriedades da fibra polimérica

<b>Propriedade</b>	<b>PP</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,91
Diâmetro (µm)	15
Comprimento (mm)	12
Fator de forma (l/d)	800
Resistência à tração (MPa)	400
Módulo de elasticidade (GPa)	5
Alongamento (%)	25

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.5 Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado nesta pesquisa foi o Powerflow 4001, fabricado pela empresa MC Bauchmie. A densidade do aditivo foi de 1,12 g/cm<sup>3</sup>, pH de 6,72 e à base de policarboxilatos com teor de sólidos de 42%.

### 3.3 DOSAGEM

Foram adotadas duas proporções para a pesquisa, tanto na fase dos estudos das matrizes como do ECC. Os traços utilizados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dosagem dos traços utilizados na pesquisa

Materiais	Proporção	
	Traço A	Traço P
Cimento	1,00	1,00
Pozolana	0,80	1,20
Areia fina	1,20	0,80
Água/agl.	0,29	0,29

Fonte: Elaborado pela autora.

A relação água/aglomerante adotada foi de 0,29 e o aditivo superplastificante foi adicionado até atingir o índice de consistência desejada em percentual em relação à massa total de aglomerantes. Para cada traço foi realizada a variação do percentual de pozolana, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Proporção de pozolana utilizado em cada mistura

Percentual		TA		TP	
SA	CV	SA	CV	SA	CV
100%	0%	0,80	0,00	1,20	0,00
70%	30%	0,56	0,24	0,84	0,36
50%	50%	0,40	0,40	0,60	0,60
30%	70%	0,24	0,56	0,36	0,84
0%	100%	0,00	0,80	0,00	1,20

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o estudo do ECC foram utilizados os mesmos traços apresentados, porém com a adição do reforço polimérico. O teor adotado foi de 2,40% de fibras de PP, baseado na pesquisa de Ehrenbring (2020).

### 3.4 PROCESSO DE MISTURA E CURA

A preparação da matriz foi iniciada com a mistura do cimento, materiais pozolânicos e areia por 30 segundos em velocidade baixa. Após este tempo foi adicionado a água e após 1 minuto de mistura foi introduzido o superplastificante, realizando então a homogeneização até 5 minutos. Realizou-se uma mistura por 60 segundos na velocidade alta e por fim mais 1 minuto e 30 segundos na velocidade baixa.

Para a mistura do ECC, primeiramente foi realizada a mescla dos materiais secos (cimento, pozolana e areia) por 3 minutos em uma argamassadeira com capacidade de até 5 litros. Após esse tempo foi adicionada a água e o

superplastificante, os quais foram misturados por 8 minutos até atingir a trabalhabilidade adequada da matriz. Por último foram colocadas as fibras manualmente e misturadas por mais 5 minutos. Esta sequência de mistura foi baseada na pesquisa de Ehrenbring (2020).

Tanto na produção da matriz, como no do ECC foi necessário realizar o adensamento mecânico, utilizando-se a mesa vibratória devido à consistência apresentada após a homogeneização. Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos durante 24 horas em ambiente protegido de intempéries. Passado este período, as amostras foram desmoldadas e armazenadas na sala de cura úmida, com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade de  $98 \pm 2\%$  até a idade do ensaio.

### 3.5 ENSAIOS

Em todas as etapas foram realizados os ensaios de trabalhabilidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e de módulo de elasticidade. O ensaio de trabalhabilidade no estado fresco foi executado logo após a mistura do material, no Laboratório de Engenharia Civil da UNISINOS. Já os ensaios no estado endurecido foram realizados aos 7, 28 e 56 dias de cura, variando conforme a etapa da pesquisa. Utilizou-se prensa universal hidráulica da marca EMIC-Inston com capacidade para 300 kN e 2000 kN localizado no ITT Performance – Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Prensa utilizada para a realização dos ensaios mecânicos



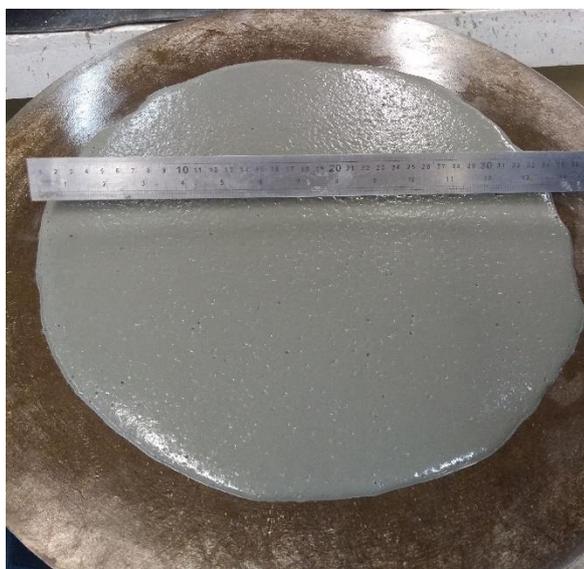
Fonte: Registrada pela autora.

### 3.5.1 Índice de consistência

A determinação do índice de consistência da matriz e do ECC foi realizada através do método da mesa de consistência, conforme prescrito na NBR 13276 (ABNT, 2016). Realiza-se a moldagem da mistura na forma de um cone padrão, e após a aplicação de 30 impactos sucessivos são realizadas as medições das medidas de três diagonais, assim determinado o índice de consistência.

Para o estudo das matrizes, o teor de aditivo químico foi dosado de forma que atingisse uma consistência de  $330 \pm 15$  mm, conforme observado no estudo de Ehrenbring (2020).

Figura 9 – Medição das diagonais



Fonte: Registrada pela autora.

### 3.5.2 Resistência à tração na flexão

Foram adotadas duas geometrias para a avaliação do comportamento à tração na flexão, sendo os prismáticos e os laminares.

#### 3.5.2.1 Prismático

O ensaio de resistência à tração na flexão prismático foi realizado de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), por meio de três pontos e utilizando 3 corpos de

prova para cada traço com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm. A Figura 10 apresenta os dispositivos utilizados para a realização do ensaio.

Figura 10 - Instrumentação adotada para o ensaio de tração na flexão por 3 pontos



Fonte: Registrada pela autora.

Para os ensaios realizados na matriz do compósito da etapa 1 e 2 desta pesquisa, a velocidade de aplicação de carga adotada foi de 50 N/s conforme a NBR 13279. As idades de ensaio adotadas foram de 7, 28 e 56 dias de cura.

Para a avaliação do ECC, adotou-se a taxa de deslocamento conforme a JSCE 82: 2008, de 0,5 mm/min, baseado no estudo de Ehrenbring (2020). Foram realizados ensaios aos 7 e 28 dias de cura.

A determinação da resistência à tração na flexão foi realizada utilizando a Equação 1, apresentado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

$$\text{Resistência à tração na flexão} = \frac{1,5 \times F \times L}{b \times d^2} \quad \text{Equação 1}$$

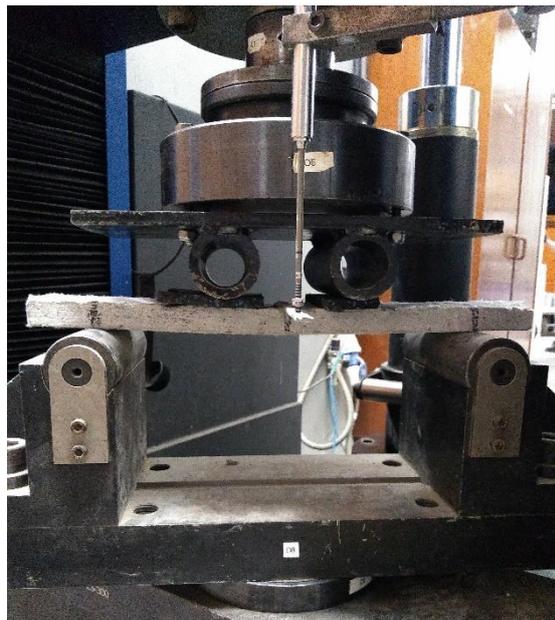
A resistência à tração na flexão é expressa em MPa, F representa a carga em Newton, L é o vão teórico das placas que nesse ensaio é de 100 mm, b e d representam a seção transversal da placa, sendo largura e altura, respectivamente, em mm.

### 3.5.2.2 Laminar

Para a avaliação do desempenho dos compósitos na flexão das amostras laminares foi realizado o ensaio de flexão em quatro pontos baseado nos estudos realizados por Ehrenbring (2020), que segue a instrução apresentada pela JSCE 82: 2008. Os corpos de prova apresentam dimensões de 70 mm x 20 mm x 400 mm (largura x espessura x comprimento) e com vão teórico entre os apoios igual a 300 mm. Também foi utilizado LVDT para a medição do deslocamento do corpo de prova e a velocidade adotado foi de 0,5 mm/min e a instrumentação adotada é apresentada na Figura 11.

Foram moldados 3 corpos de prova para cada traço de ECC e foram ensaiados aos 7 e 28 dias.

Figura 11 - Instrumentação adotada para o ensaio de tração na flexão por 4 pontos



Fonte: Registrada pela autora.

A determinação da resistência à tração na flexão foi realizada utilizando a Equação 2, conforme apresentado na pesquisa de Ehrenbring (2020).

$$\text{Resistência à tração na flexão} = \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad \text{Equação 2}$$

A resistência à tração na flexão é expressa em MPa, F representa a carga em Newton, L é o vão teórico das placas, que nesse ensaio é de 300 mm, b e d

representam a seção transversal da placa, sendo largura e altura, respectivamente, em mm.

### **3.5.3 Resistência à compressão axial**

A determinação da resistência à compressão foi realizada em corpos de prova com dimensões de 50 mm x 100 mm, que geralmente são utilizadas em testes de cimentos e argamassas. O procedimento adotado para o ensaio de resistência à compressão seguiu os parâmetros da NBR 5739 (ABNT, 2018). A velocidade de carregamento para os ensaios de compressão foi de 0,45 MPa/s.

Anteriormente ao ensaio de compressão, as superfícies de contato das amostras foram retificadas, de modo a garantir a distribuição uniforme da carga na superfície.

Foram moldados 3 corpos de prova para cada traço e foram realizados os ensaios com idade de cura aos 7, 28 e 56 dias, no estudo da matriz. Já para os ensaios do ECC, foram adotadas as idades de 7 e 28 dias.

### **3.5.4 Módulo de elasticidade**

Para a determinação do módulo de elasticidade foram moldados 3 corpos de prova com a dimensão de 50 mm x 100 mm para cada traço. O procedimento de ensaio foi baseado na NBR 8522 (ABNT, 2017), adotando a metodologia A em que adota-se a tensão básica de 0,5 MPa como fixa. A instrumentação utilizada para a realização do ensaio de módulo de elasticidade é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Instrumentação adotada para o ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Registrada pela autora.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante o programa experimental.

### 4.1 ETAPA 1

A seguir serão apresentados os resultados observados na primeira etapa da pesquisa, que consistiu no estudo da matriz composta pelo traço denominado TA, 1,00: 0,80: 1,20 (cimento: pozolana: areia fina).

Ressalta-se que devido à escassez de estudos realizados somente nas propriedades das matrizes de ECC (sem a adição de fibra), os resultados obtidos tanto na primeira como na segunda etapa desta pesquisa serão comparados com o UHPC (*Ultra High Performance Concrete*) por possuir uma matriz densa e compacta devido a eliminação do agregado graúdo como adotado neste estudo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

#### 4.1.1 Índice de consistência

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos na Etapa 1 referente ao ensaio de consistência.

Tabela 9 – Resultados de consistência obtido na Etapa 1

Mistura	D (mm)			Dm (mm)	Aditivo (%)
	D1	D2	D3		
TA 100S	340	340	330	336,7	2,704%
TA 70S30C	315	310	325	316,7	1,066%
TA 50S50C	335	345	340	340,0	1,000%
TA 30S70C	340	350	335	341,7	0,669%
TA 100C	340	340	345	341,7	0,399%

Fonte: Elaborado pela autora.

Como destacado anteriormente, a consistência desejada foi de  $330 \pm 15$  mm. No estudo realizado por Ehrenbring (2020) foi utilizado o teor de 3% de aditivo e obteve-se 325 mm de índice de consistência com 100% de SA. Observa-se que à medida em que ocorre o aumento da CV na mistura, diminui-se o teor de aditivo necessário para o alcance do abatimento.

Essa diminuição nos teores de aditivo pode ser explicada pelo formato esférico da CV que proporciona um menor atrito interno e promovendo maior movimento e rolamento entre as partículas, assim podendo reduzir ou eliminar o uso de aditivo químico (ABDELAZIZ *et al.*, 2019; WANG, Qing *et al.*, 2020). Como a substituição foi realizada em relação à massa e devido ao menor peso específico da CV, a matriz pode ter apresentado uma maior quantidade de pasta, assim influenciando na consistência final. Já a mistura com SA pode demandar maior quantidade de água e de aditivo devido à maior área superficial comparado com o cimento e CV (WU; KHAYAT; SHI, 2019). De modo geral foi possível manter uma mesma faixa de abatimento nas diferentes misturas.

#### 4.1.2 Tração na flexão (prisma)

Os resultados obtidos através do ensaio de tração na flexão por 3 pontos são apresentados na Tabela 10. Os valores em destaques são os valores potenciais observados de resistência à tração na flexão.

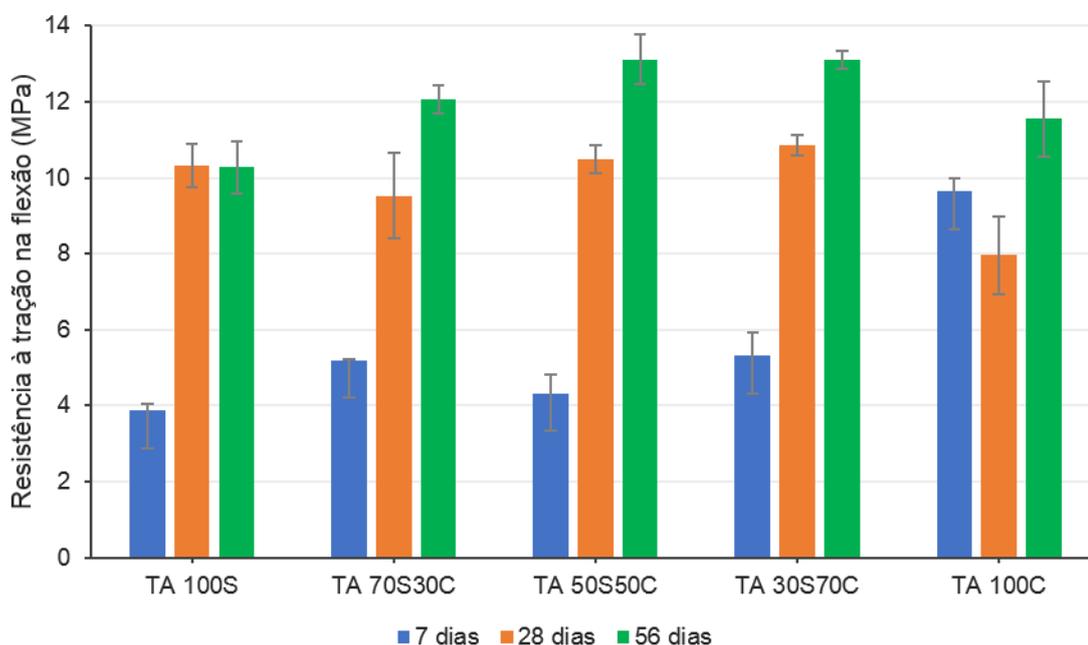
Tabela 10 – Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 1

Mistura	Corpo de prova	$f_t$ (MPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 100S	1	3,87		<b>11,10</b>		10,09	
	2	<b>4,07</b>	3,87	10,04	10,32	<b>11,20</b>	10,28
	3	3,67		9,82		9,55	
TA 70S30C	1	-		9,99		12,13	
	2	5,19	5,20	<b>10,62</b>	9,53	<b>12,50</b>	12,06
	3	<b>5,21</b>		7,97		11,57	
TA 50S50C	1	<b>5,00</b>		10,00		12,20	
	2	4,16	4,33	10,61	10,49	<b>13,72</b>	13,11
	3	3,83		<b>10,85</b>		13,43	
TA 30S70C	1	5,32		10,88		13,23	
	2	4,55	5,31	10,51	10,85	12,77	13,11
	3	<b>6,05</b>		<b>11,15</b>		<b>13,33</b>	
TA 100C	1	<b>10,13</b>		6,51		<b>12,43</b>	
	2	9,43	9,64	8,61	7,96	12,04	11,55
	3	9,37		<b>8,78</b>		10,18	

Fonte: Elaborado pela autora.

Salienta-se que não foi possível obter o resultado do corpo de prova 1 do ensaio de 7 dias da mistura TA 70S30C, por adversidade do ensaio. Na Figura 13 são apresentados os valores médios da resistência à tração na flexão e o desvio padrão.

Figura 13 – Média e desvio padrão dos valores de resistência à tração na flexão da  
Etapa 1



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que nas misturas 70S30C, 50S50C e 30S70C os valores de resistência à tração na flexão foram aumentando conforme o avanço da idade de cura. Já na mistura com a presença apenas de SA, não ocorreu um aumento significativo entre as idades de 28 e 56 dias. Na mistura com 100% de CV, ocorreu uma diminuição no valor de resistência à tração na flexão dos 7 aos 28 dias.

Os valores de resistência à tração na flexão das misturas 50S50C e 30S70C apresentaram valores próximos em todas as idades avaliadas. A mistura com 70% de CV apresenta um menor desvio padrão aos 28 e 56 dias, quando comparada a mistura com 50% de CV.

Percebeu-se uma maior contribuição no incremento de resistência entre os 7 e 28 dias, ao comparar-se com o período entre 28 e 56 dias.

Wu, Khayat e Shi *et al.* (2019) estudaram o comportamento à tração na flexão do UHPC com substituição de cimento por SA e aos 28 dias encontrou uma resistência à tração máxima de 7,5 MPa. Nesse estudo, a única mistura que apresentou resistência próxima, foi o TA 100C, com média de 7,96 MPa.

Já Chen, Gao e Ren (2018) encontraram valores de resistência à tração na flexão de 15 e 20 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente. Este valor encontrado é

superior ao encontrado nesta pesquisa, mas destaca-se que os autores estudaram UHPC com resistência à compressão de 125 MPa.

Os resultados de tração na flexão aos 28 dias equivalem ao percentual de 9,7% a 12,7% do resultado de compressão (apresentado no próximo item). Yalçinkaya e Yazici (2017) encontraram uma relação de 14,5% em UHPC com 30% de substituição de cimento.

Na pesquisa realizada por Wang, Qing *et al.* (2020) com a matriz do ECC contendo adições de SA, escória de alto forno e CV, o maior valor de resistência à tração na flexão obtido aos 7 dias foi de 6,30 MPa, sendo superior ao valor encontrado nesta pesquisa, exceto pela mistura com 100% de CV. Já aos 28 dias os pesquisadores encontraram 7,70 MPa, sendo inferior aos valores obtidos.

#### 4.1.3 Compressão

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão da Etapa 1 com 7, 28 e 56 dias de idade.

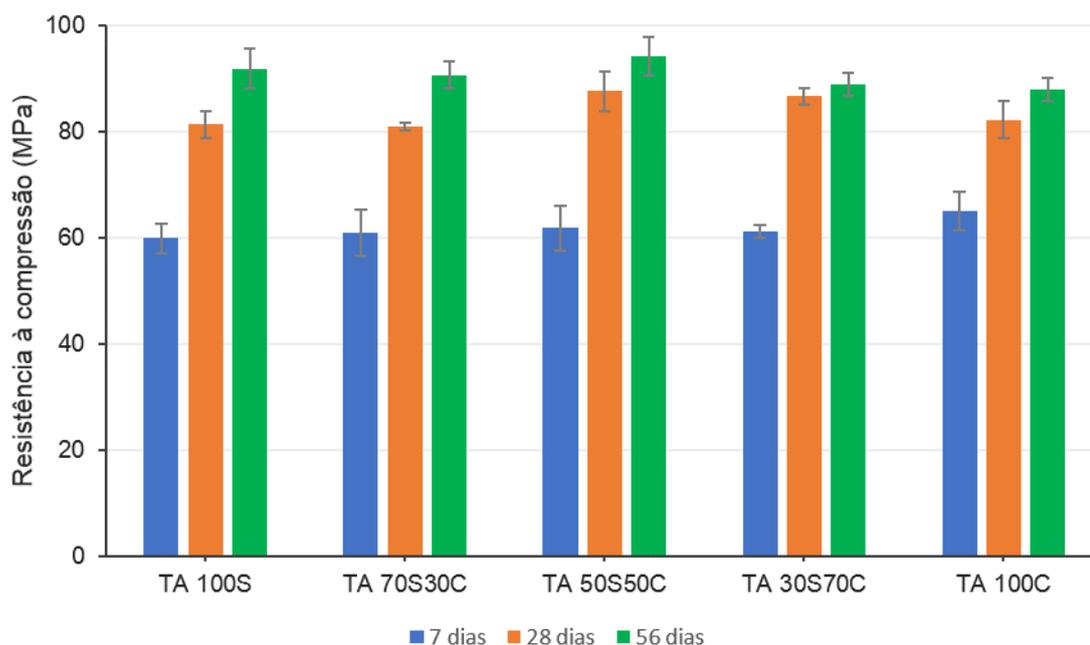
Tabela 11 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 1

Mistura	Corpo de prova	fc (MPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 100S	1	<b>63,62</b>		<b>84,61</b>		<b>97,03</b>	
	2	59,05	59,87	81,16	81,37	88,72	91,84
	3	56,95		78,33		89,75	
TA 70S30C	1	56,74		<b>81,88</b>		87,85	
	2	<b>66,89</b>	60,85	79,85	80,92	<b>93,87</b>	90,61
	3	58,91		81,04		90,11	
TA 50S50C	1	61,50		82,47		91,63	
	2	56,88	61,80	90,92	87,61	91,52	94,11
	3	<b>67,03</b>		<b>89,44</b>		<b>99,19</b>	
TA 30S70C	1	59,53		86,78		86,35	
	2	<b>62,71</b>	61,18	84,68	86,65	<b>91,56</b>	88,88
	3	61,29		<b>88,49</b>		88,72	
TA 100C	1	61,33		<b>86,57</b>		<b>89,82</b>	
	2	64,00	65,09	81,87	82,22	89,09	87,96
	3	<b>69,94</b>		78,22		84,96	

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 14 apresenta o gráfico com os valores médios e o desvio padrão do resultado de resistência à compressão do traço com maior quantidade de areia.

Figura 14 – Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da  
Etapa 1



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que todas as misturas apresentaram comportamento semelhante, apresentando crescimento da resistência conforme as idades de cura. Aos 7 dias de idade, a mistura composta somente por CV apresentou o melhor resultado médio com 65,09 MPa. Na pesquisa de Ozturk *et al.* (2020) foi encontrado um comportamento diferente aos 7 dias de cura, onde a substituição de SA apresentou valores elevados de resistência à compressão do que somente com CV, podendo ser ocasionado pela maior área superficial da SA que favorece a reação pozolânica nas idades iniciais.

Na pesquisa realizada com UHPC por Ghafari *et al.* (2016) constatou-se que o resultado de compressão com adição de SA foi maior do que adição somente com CV. Aos 56 dias de idade de cura, a mistura TA 100S apresentou 3,88 MPa a mais de resistência à compressão do que a mistura com 100% de CV, apresentando o comportamento observado pelos mesmos autores. Esse aumento da resistência pode ocorrer devido à grande área superficial da SA em comparação com o cimento, ocorrendo o preenchimento dos microporos que aumentam a densidade da mistura e consequentemente melhoram as propriedades mecânicas como a resistência à compressão (MOSTOFINEJAD; NIKOO; HOSSEINI, 2016).

Aos 28 e 56 dias de idade, o melhor resultado foi observado na mistura com 50% de SA e 50% de CV, com 87,61 MPa e 94,11 MPa, respectivamente. Zhu *et al.*

(2014) também observaram o aumento na resistência nas misturas híbridas compostas por CV e SA no estudo realizado com a matriz do ECC, do que mistura com 100% de CV.

Wang, Qing *et al.* (2020) obtiveram um crescimento parecido entre as idades de 7 dias e 28 dias entre os resultados de compressão e de resistência à tração na flexão nas matrizes dos ECC, com 22% de crescimento aproximadamente. Já nesta pesquisa, encontrou-se valores diferentes de crescimento, observando um crescimento maior no resultado de resistência à tração na flexão, com misturas com mais de 100% de crescimento de 7 dias para os 28 dias.

#### 4.1.4 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 12.

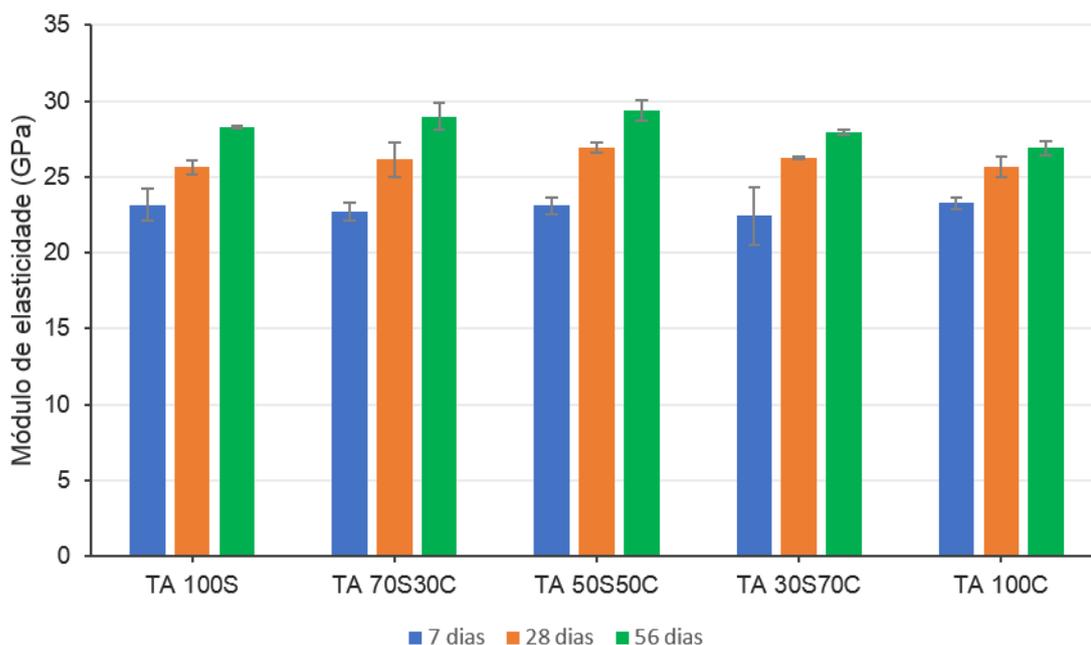
Tabela 12 - Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 1

Mistura	Corpo de prova	E (GPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 100S	1	22,81		25,27		28,15	
	2	22,08	23,15	<b>26,27</b>	25,63	28,29	28,25
	3	<b>24,56</b>		25,36		<b>28,32</b>	
TA 70S30C	1	21,92		26,15		27,83	
	2	<b>23,20</b>	22,71	24,77	26,16	<b>30,01</b>	28,97
	3	23,02		<b>27,55</b>		29,07	
TA 50S50C	1	23,09		26,99		28,65	
	2	<b>23,78</b>	23,10	26,49	26,92	<b>30,27</b>	29,40
	3	22,44		<b>27,28</b>		29,29	
TA 30S70C	1	23,48		26,15		28,08	
	2	19,80	22,43	26,28	26,24	27,70	27,96
	3	<b>24,01</b>		<b>26,30</b>		<b>28,10</b>	
TA 100C	1	22,76		25,05		<b>27,26</b>	
	2	<b>23,71</b>	23,28	25,37	25,67	27,22	26,90
	3	23,38		<b>26,58</b>		26,21	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de módulo de elasticidade variaram de 19,8 GPa a 30,3 GPa e os valores médios e o desvio padrão são apresentados no gráfico da Figura 15.

Figura 15 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 1



Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado nos resultados de resistência à compressão, ocorreu o aumento do módulo de elasticidade ao longo das idades e todas as misturas apresentaram comportamentos semelhantes. Aos 7 dias de idade, o valor de módulo apresentou menor variabilidade entre os valores médios em todas as misturas, apresentando em torno de 23 GPa. Entretanto aos 28 e 56 dias, o traço composto por 50% de SA e 50% de CV apresentou os maiores valores de módulo de elasticidade.

Pyo e Kim (2017) encontraram valor de módulo de elasticidade aos 28 dias de 44,7 GPa no UHPC desenvolvido com SA e CV e a resistência à compressão foi de 152 MPa, valor bem superior ao encontrado nesta pesquisa.

Wang, Qing *et al.* (2020) encontraram valores de módulo da matriz do ECC aos 7 e 28 dias de 14,4 GPa e 17,2 GPa, respectivamente, sendo valores inferiores aos encontrados nesta pesquisa.

## 4.2 ETAPA 2

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na segunda etapa da pesquisa, que consistiu no estudo do traço denominado de TP (Traço Pozolana) com o seguinte proporcionamento 1,00: 1,20: 0,80 (cimento: pozolana: areia fina).

#### 4.2.1 Índice de consistência

A consistência foi fixada em  $330 \pm 15$  mm e os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados de consistência obtido na Etapa 2

Mistura	D (mm)			Dm (mm)	Aditivo (%)
	D1	D2	D3		
TP 100S	325	330	325	326,7	4,559%
TP 70S30C	325	325	330	326,7	1,474%
TP 50S50C	330	325	325	326,7	0,748%
TP 30S70C	325	330	325	326,7	0,373%
TP 100C	330	330	330	330,0	0,201%

Fonte: Elaborado pela autora.

Também se observou a necessidade de maior quantidade do teor de aditivo nas misturas com SA, como apresentado na primeira etapa da pesquisa. Este comportamento foi observado na pesquisa de Fallah e Nematzadeh (2017), e pode ser justificado pela maior absorção de água da SA por ter uma área específica maior e dimensões mais finas que o cimento.

Nas misturas com a presença de mais 50% de CV, necessitou-se de uma menor quantidade de aditivo para atingir a consistência desejada em comparação com os valores obtidos na primeira etapa da pesquisa, sendo necessários até 50% a menos de aditivo. Sherir, Hossain e Lachemi (2018) constataram que o aumento da quantidade de CV melhora a fluidez do compósito e isto pode ser atribuído ao formato esférico da CV que reduz a força de atrito entre as partículas de cimento, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

#### 4.2.2 Tração na flexão (prisma)

Os resultados obtidos para cada corpo de prova quanto as resistências à tração na flexão ( $f_t$ ) por 3 pontos são apresentadas na Tabela 14.

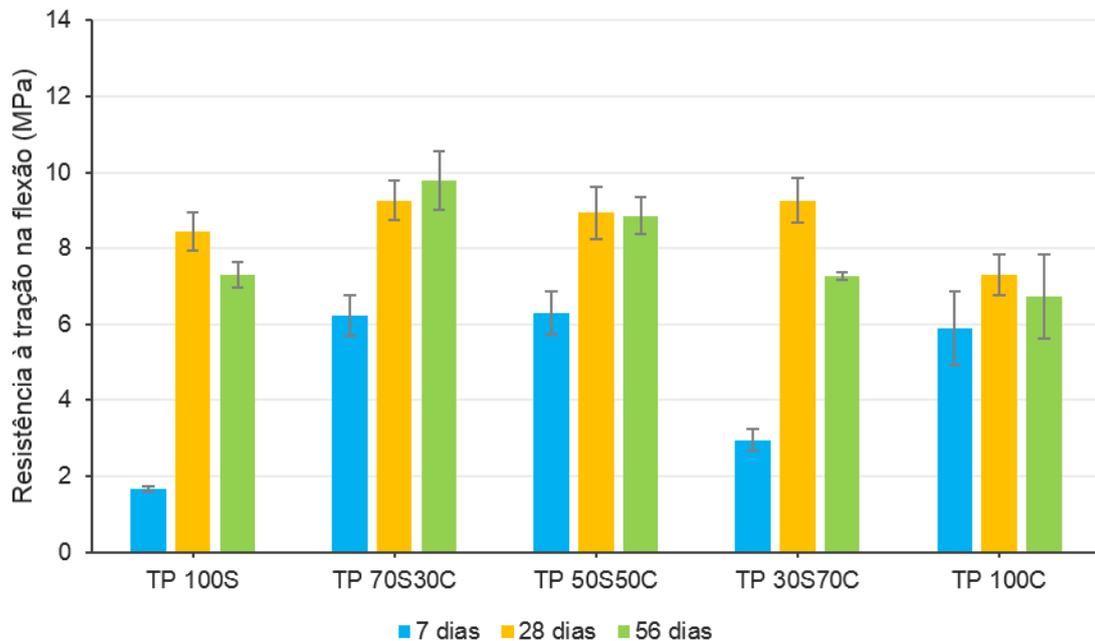
Tabela 14 - Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 2

Mistura	Corpo de prova	$f_t$ (MPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TP 100S	1	1,57		<b>8,95</b>		6,85	
	2	<b>1,74</b>	1,66	8,64	8,44	7,48	7,30
	3	1,69		7,74		<b>7,57</b>	
TP 70S30C	1	5,48		9,22		<b>10,85</b>	
	2	6,41	6,22	<b>9,92</b>	9,26	9,06	9,78
	3	<b>6,75</b>		8,63		9,43	
TP 50S50C	1	<b>6,73</b>		8,15		8,91	
	2	6,66	6,28	<b>9,82</b>	8,94	<b>9,43</b>	8,86
	3	5,47		8,86		8,25	
TP 30S70C	1	<b>3,35</b>		9,41		7,34	
	2	2,85	2,95	<b>9,90</b>	9,26	<b>7,35</b>	7,28
	3	2,66		8,48		7,14	
TP 100C	1	4,63		6,78		<b>8,16</b>	
	2	6,09	5,90	7,04	7,29	6,55	6,72
	3	<b>6,98</b>		<b>8,04</b>		5,45	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados com os valores médios e o desvio padrão são apresentados no gráfico da Figura 16.

Figura 16 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à tração na flexão da Etapa 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Em todas as idades, as resistências de tração na flexão são menores do que obtidos na Etapa 1 e apresentaram maior variabilidade nos resultados. Em muitas misturas, não houve o aumento da resistência e até mesmo ocorreu o decréscimo da resistência entre 28 e 56 dias.

Na pesquisa de Sherir, Hossain e Lachemi (2018) realizada com ECC com utilização de CV e fibra de PVA foi observado que o aumento do teor da pozolana não favoreceu no resultado de tração na flexão. Os mesmos autores relataram que este comportamento pode ter ocorrido devido à redução na ligação química da matriz devido ao alto volume de pozolana adicionado, que acaba atuando como material de enchimento.

Outra explicação para a redução na resistência à tração na flexão com o uso de maior quantidade de pozolana pode ser devido à baixa relação água/aglomerante, o que limita a reação pozolânica. Termkhajornkit *et al.* (2005) relataram este comportamento com relação água/aglomerante de 0,22 a 0,30, sendo que nesta pesquisa foi adotado o valor de 0,29, sendo assim, condizente.

#### **4.2.3 Compressão**

A resistência à compressão obtida aos 7, 28 e 56 dias de idades são apresentadas na Tabela 15.

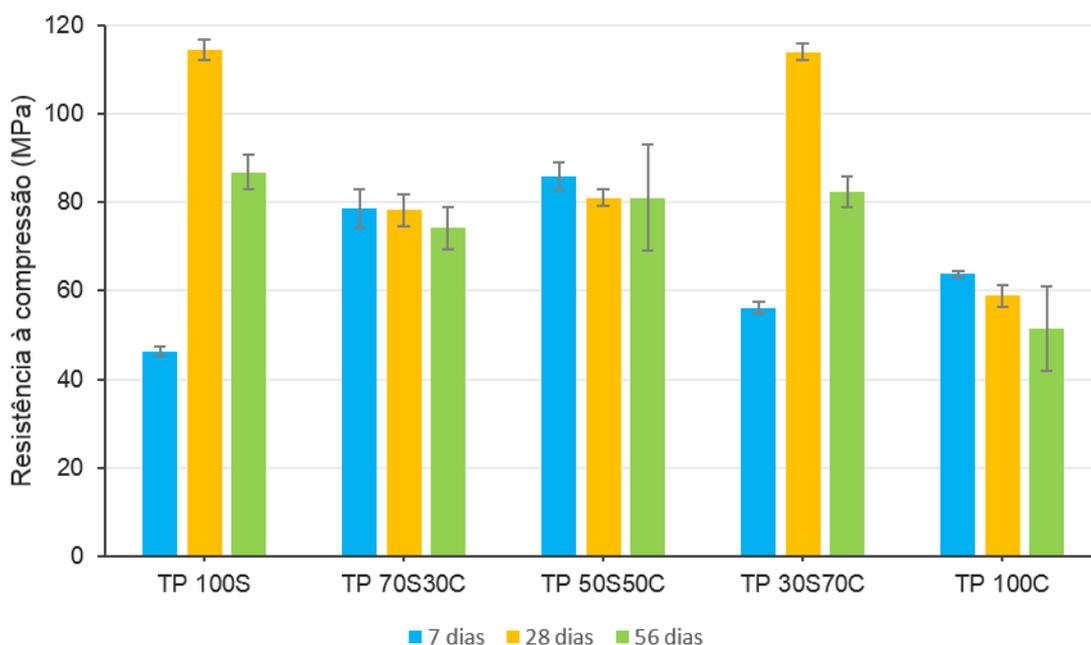
Tabela 15 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 2

Mistura	Corpo de prova	fc (MPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TP 100S	1	44,87		113,87		<b>90,10</b>	
	2	<b>47,51</b>	46,32	<b>117,49</b>	114,39	88,95	86,75
	3	46,58		111,80		81,22	
TP 70S30C	1	<b>84,32</b>		75,39		68,92	
	2	78,00	78,72	75,96	78,26	<b>80,42</b>	74,23
	3	73,85		<b>83,44</b>		73,35	
TP 50S50C	1	<b>88,93</b>		<b>83,05</b>		68,27	
	2	86,94	85,83	81,33	80,95	<b>96,92</b>	81,03
	3	81,61		78,49		77,91	
TP 30S70C	1	<b>57,86</b>		<b>116,35</b>		<b>86,31</b>	
	2	55,44	56,17	113,81	113,97	77,79	82,32
	3	55,21		111,73		82,85	
TP 100C	1	<b>64,53</b>		<b>61,25</b>		40,72	
	2	64,16	63,82	59,89	58,89	49,77	51,45
	3	62,78		55,53		<b>63,85</b>	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados das misturas TP 100S e TP 30S70C aos 28 dias apresentaram resultados discrepantes quando comparados às demais misturas e idades, podendo ter ocorrido alguma falha na amostra ou no ensaio. Essas disparidades podem ser observadas também na Figura 17, onde são apresentados os valores médios e o desvio padrão.

Figura 17 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da  
Etapa 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Os melhores resultados foram observados na mistura com 50% de SA e 50% de CV, apresentando os maiores resultados em quase todas as idades em torno de 80 MPa. Também ocorreu uma variabilidade nos resultados, apresentando queda nas resistências ao longo das idades e grandes valores de desvio padrão.

Percebe-se que a maior adição de pozolanas não foi favorável para as propriedades da matriz do ECC. Isto pode ter ocorrido por haver quantidade excessiva de CV e SA, uma parte da pozolana permanece não hidratada, assim não podendo contribuir para o ganho de resistência, atuando somente como material de preenchimento (FALLAH; NEMATZADEH, 2017; NASRIN; IBRAHIM, 2021).

Cabe levantar também a hipótese já citada de reduzida relação água/aglomerante, que pode ter impactado nesse aspecto. Segundo Yu, Spiesz e Brouwers (2015), uma baixa relação água/aglomerante faz com que a quantidades de produtos gerados pela hidratação do cimento seja limitada, pois a água adicionada é absorvida e adsorvida pelos pós, assim apresentando uma resistência à compressão restrita.

Aos 56 dias de idade, as misturas com presença de SA apresentaram resistências superiores do que a mistura com 100% de CV. Na pesquisa de Ghafari *et al.* (2016), a resistência à compressão de UHPC com substituição de CV foi inferior

do que com SA e uma das justificativas foi uma baixa reação pozolânica do que o esperado. Segundo Fallah e Nematzadeh (2017), a maior área superficial da SA em comparação ao cimento e CV, pode ter melhorado a ligação entre a pasta de cimento e o agregado, e também ter ocorrido o melhor empacotamento, diminuindo a porosidade do compósito.

Na pesquisa de Huang *et al.* (2013) observou-se a diminuição da resistência à compressão com o aumento da relação de CV e cimento, e isto pode ser ocasionado pela reação de hidratação secundária relativamente mais lenta da CV em comparação com a hidratação primária do cimento.

#### 4.2.4 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 2

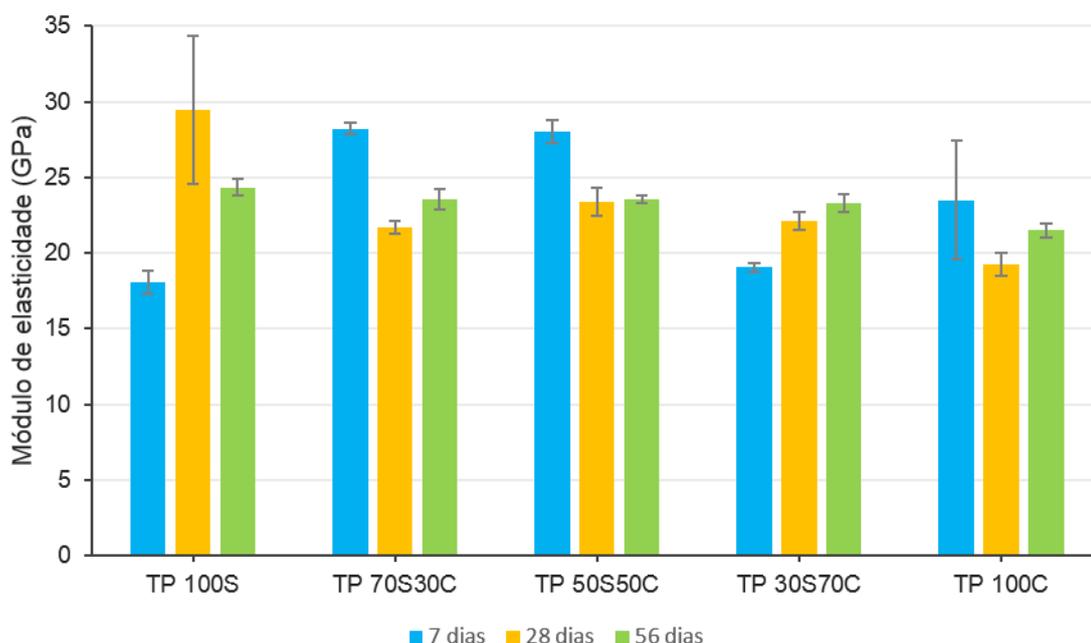
Mistura	Corpo de prova	E (GPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TP 100S	1	<b>19,00</b>		32,13		23,98	
	2	17,07	18,07	<b>33,69</b>	29,48	23,89	24,33
	3	18,15		22,61		<b>25,11</b>	
TP 70S30C	1	28,50		<b>22,08</b>		<b>24,45</b>	
	2	<b>28,52</b>	28,23	21,13	21,70	22,84	23,58
	3	27,68		21,89		23,46	
TP 50S50C	1	26,98		22,35		23,71	
	2	<b>28,63</b>	28,03	<b>24,55</b>	23,37	23,17	23,56
	3	28,49		23,20		<b>23,80</b>	
TP 30S70C	1	18,63		<b>22,97</b>		<b>23,80</b>	
	2	19,10	19,05	21,76	22,12	23,64	23,32
	3	<b>19,42</b>		21,62		22,52	
TP 100C	1	17,92		18,82		21,75	
	2	26,21	23,49	<b>20,28</b>	19,22	20,86	21,51
	3	<b>26,35</b>		18,57		<b>21,92</b>	

Fonte: Elaborado pela autora.

A mistura TP 100S, apresentou valor potencial, valor médio e desvio padrão de módulo de elasticidade divergentes em relação às demais misturas aos 28 dias de idade. Isto pode ter ocorrido devido ao aproveitamento do resultado de resistência à

compressão no ensaio de módulo de elasticidade, sendo que aos 28 dias as misturas TP 100S e TP30S70C apresentaram valores de compressão em desarmonia com as demais misturas e as demais idades de análise, como já citado. Já a mistura TP30S70C apresentou resultados similares aos demais para o módulo de elasticidade. Esse comportamento também pode ser observado na Figura 18, no gráfico com os valores médios e desvio padrão.

Figura 18 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Aos 7 dias de idade, as misturas TP 70S30C e TP 50S50C apresentaram módulo de elasticidade em torno de 28 GPa, sendo os maiores valores observados. Salienta-se que os resultados de resistência à compressão também foram os maiores na mesma idade e nas mesmas misturas.

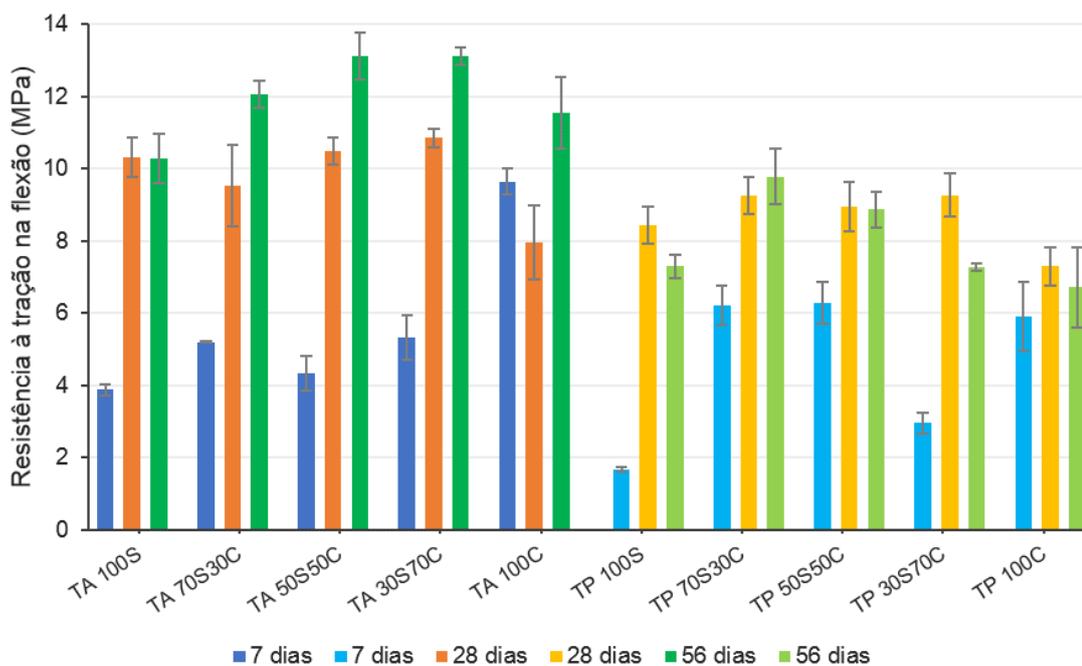
Nos estudos de Nassif *et al.* (2005) foi observado que nas idades iniciais o módulo de elasticidade contendo SA era maior do que os traços contendo CV, podendo ser atribuído ao alto índice de hidratação do compósito cimentício contendo SA. Este comportamento foi observado nas misturas que contem maior quantidade SA aos 7 dias de idade.

Aos 56 dias de idade, os valores de módulo foram semelhantes em todas as misturas variando em torno de 23 a 24 GPa, distinguindo-se apenas da mistura somente com CV, que apresentou valor médio de 21,5 GPa.

### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA E DEFINIÇÕES DA ETAPA 3

Os resultados obtidos na primeira e na segunda etapa desta pesquisa serão apresentados de forma comparativa nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

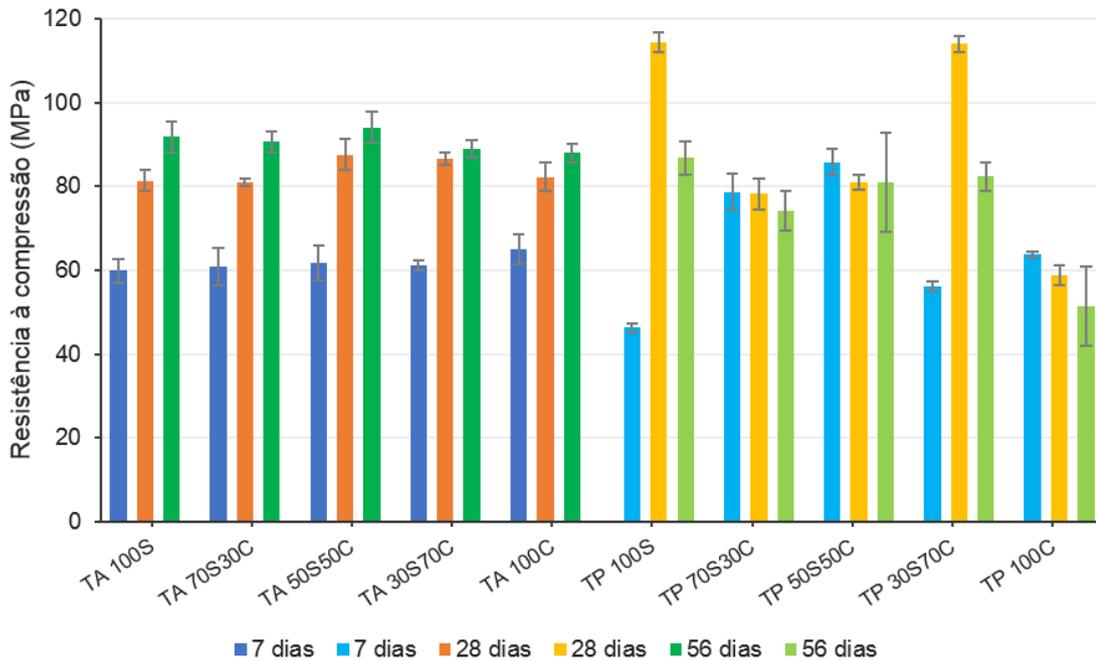
Figura 19 – Resultados da resistência à tração na flexão da Etapa 1 e da Etapa 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 19 são apresentados os resultados médios e o desvio padrão obtido no ensaio de resistência à tração na flexão. Observa-se que na primeira etapa da pesquisa algumas misturas apresentaram resistência à tração na flexão superior a 13 MPa, enquanto que na segunda etapa este valor não chegou a 10 MPa. Cabe ser destacado ainda que houve variação nas amostras da segunda etapa em relação ao período em que a resistência se desenvolveu. Por exemplo, nos traços TP100S e TP30S70C o acréscimo foi bastante acentuado entre os 7 e os 28 dias, com valores mais expressivos do que nas demais composições.

Figura 20 - Resultados da resistência à compressão da Etapa 1 e da Etapa 2

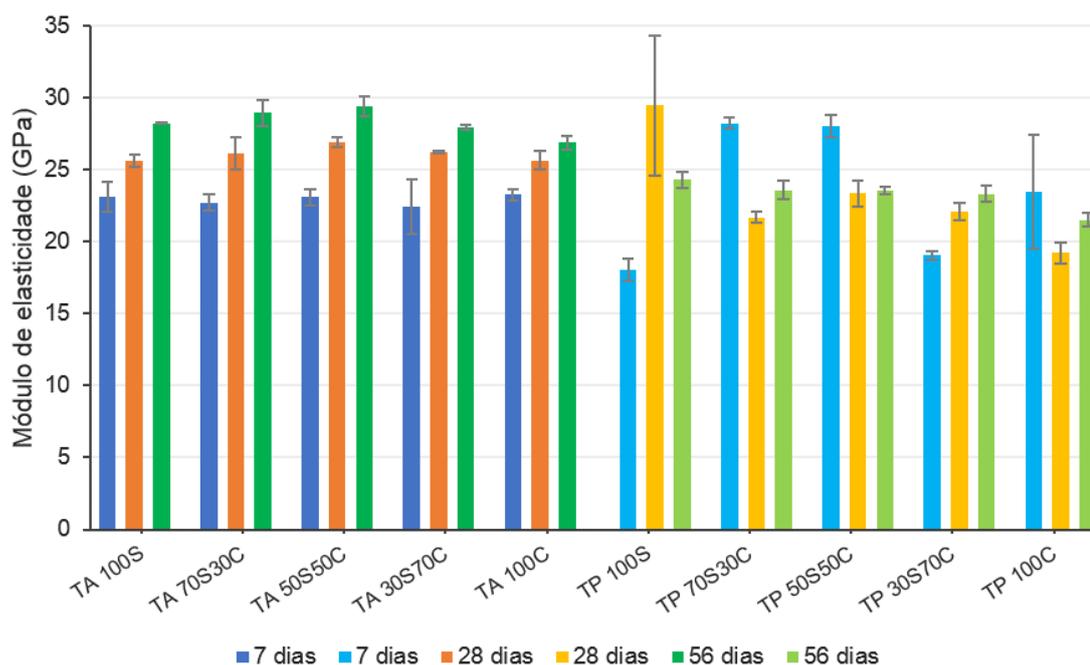


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 20 apresenta os resultados comparativos de resistência à compressão da Etapa 1 e 2. Em comparação com os resultados da primeira parte da pesquisa, os valores obtidos de resistência à compressão foram inferiores. O maior resultado médio da Etapa 1 foi de 94,1 MPa. Já na Etapa 2 este valor foi de 114,4 MPa, porém como apresentado anteriormente, este resultado pode ter ocorrido devido a algum problema na instrumentação do ensaio. Desconsiderando estes resultados, o maior valor é de 86,8 MPa. E também, na segunda parte da pesquisa ocorreu uma oscilação maior nos resultados do que na Etapa 1.

A Figura 21 apresenta o gráfico com os valores médio e o desvio padrão obtidos no ensaio de módulo de elasticidade na primeira e na segunda parte desta pesquisa.

Figura 21 – Resultados do módulo de elasticidade da Etapa 1 e da Etapa 2



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da Figura 21, observa-se que comparativamente com os resultados da Etapa 1, os valores de módulo apresentaram maior variabilidade na segunda parte da pesquisa. Considerando apenas os resultados de 56 dias, em que não ocorreu tanta oscilação nos valores, os valores de módulo de elasticidade encontrados na segunda etapa foram inferiores aos da primeira parte da pesquisa, também observados nos resultados de resistência à compressão.

Após a realização dos ensaios e análise dos corpos de prova da primeira e segunda parte da pesquisa, foi realizada a escolha da melhor mistura. Para isso, primeiramente foi analisado o comportamento a flexão, por ser uma característica importante a ser observado no ECC.

Foram realizadas as escolhas a partir dos resultados médios, em vez dos valores potenciais, por ter maior segurança dos dados analisados.

Analisando os resultados da Figura 19 e Tabela 17, observa-se que as misturas TA 50S50C e TA 30S70C são os que apresentam os melhores resultados de resistência à tração na flexão com 13,11 MPa.

Tabela 17 – Resultados médios de resistência à tração na flexão

Mistura	$f_t$ (MPa)		
	7 dias	28 dias	56 dias
TA 100S	3,87 (0,16)	10,32 (0,56)	10,28 (0,69)
TA 70S30C	5,2 (0,01)	9,53 (1,13)	12,06 (0,38)
TA 50S50C	4,33 (0,49)	10,49 (0,36)	13,11 (0,66)
TA 30S70C	5,31 (0,61)	10,85 (0,27)	13,11 (0,24)
TA 100C	9,64 (0,35)	7,96 (1,03)	11,55 (0,98)
TP 100S	1,66 (0,07)	8,44 (0,51)	7,3 (0,32)
TP 70S30C	6,22 (0,54)	9,26 (0,53)	9,78 (0,77)
TP 50S50C	6,28 (0,58)	8,94 (0,69)	8,86 (0,49)
TP 30S70C	2,95 (0,29)	9,26 (0,59)	7,28 (0,1)
TP 100C	5,9 (0,97)	7,29 (0,54)	6,72 (1,11)

Desvio padrão encontra-se entre parênteses

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao avaliar os resultados de compressão, o TA 50S50C é a mistura que apresenta os melhores resultados, com resistência à compressão média de 87,6 MPa aos 28 dias, seguido pela mistura T 30S70C com aproximadamente 86,7 MPa. No resultado de módulo de elasticidade foi observado o mesmo comportamento aos 28 dias.

Apesar da mistura TA 50S50C apresentar os melhores resultados de compressão, de módulo de elasticidade e o mesmo resultado médio de tração na flexão, para a realização do estudo da terceira parte foi escolhido a mistura TA 30S70C. Esta escolha é justificada pela maior quantidade de CV utilizada do que o TA 50S50C, pois na região onde está sendo desenvolvida a pesquisa há maior disponibilidade e menor custo da CV, evidenciado na pesquisa do Abrão (2019).

Portanto, para a realização da Etapa 3 foram escolhidas as duas misturas com 30% de SA e 70% de CV, denominados como TA 30S70C e TP 30S70C. Saliencia-se que a mistura TP 30S70C não foi o que apresentou os melhores resultados, mas para manter a mesma proporção de SA e CV foi mantido a escolha dessa mistura.

#### 4.4 ETAPA 3

Na última etapa da pesquisa, foram realizados os ensaios para averiguar o comportamento mecânico das misturas TA 30S70C e TP 30S70C com incorporação de 2,4% de fibras de polipropileno em relação a massa total.

#### 4.4.1 Índice de consistência

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de índice de consistência das misturas com 30% de SA e 70% de CV. Salienta-se que o percentual de aditivo foi mantido o mesmo das etapas iniciais.

Tabela 18 - Resultados de consistência obtido na Etapa 3

Mistura		D (mm)			Dm (mm)	Aditivo (%)
		D1	D2	D3		
TA 30S70C	Sem Fibra	340	350	335	341,7	0,669%
	Com Fibra	190	190	185	188,3	
TP 30S70C	Sem Fibra	325	330	325	326,7	0,373%
	Com Fibra	190	190	190	190,0	

Fonte: Elaborado pela autora.

O ECC desenvolvido com SA por Ehrenbring (2020) apresentou índice de consistência de 245 mm com 2,4% de fibra de PP com 3% de aditivo, valor superior ao encontrado nesta pesquisa. Na pesquisa de Magalhães (2010) também foi obtido um valor maior de índice de consistência, com 290 mm.

Com o mesmo teor de aditivo utilizado nas Etapas 1 e 2 o índice de consistência obtido com a adição dos reforços foi menor, que era um comportamento já esperado conforme a literatura (FELEKOGLU *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2018). Isso pode ser justificado pela área superficial e teor adicionado da fibra que absorve mais água ocorrendo um aumento da viscosidade (FALLAH; NEMATZADEH, 2017). A natureza das fibras e das pozolanas impactam nesse comportamento, sendo necessária a análise com os materiais a serem empregados.

Na pesquisa de Wang, Qing *et al.* (2020) foi observado que ao adicionar os reforços poliméricos necessita-se de maior quantidade de aditivo para atingir a mesma consistência da matriz. Este comportamento pode ser justificado pela diminuição do excesso de água para lubrificação devido à maior absorção de água ocasionado pela adição da fibra.

Yang *et al.* (2009) relataram que a viscosidade plástica da matriz do ECC no estado fresco tem um grande impacto nas propriedades de tração, onde quanto maior a viscosidade maior é a deformação e a resistência à tração do ECC devido à melhor distribuição das fibras, assim podendo influenciar nos resultados apresentados posteriormente.

#### 4.4.2 Tração na flexão

##### 4.4.2.1 Amostras laminares

Na Tabela 19 são apresentados os resultados referentes a resistência à primeira fissura, resistência máxima e a deflexão máxima obtidos a partir do ensaio de tração na flexão em amostras laminares.

Tabela 19 - Resultados dos compósitos à tração na flexão - placas

Mistura	Idade	CP	Resistência à primeira fissura (MPa)		Resistência máxima (MPa)		Deflexão máxima (mm)	
			Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 30S70C	7 dias	1	<b>5,33</b>		5,79		4,729	
		2	4,67	4,78	5,62	5,94	3,651	4,950
		3	4,34		<b>6,42</b>		<b>6,470</b>	
	28 dias	1	<b>6,05</b>		<b>8,00</b>		<b>4,692</b>	
		2	5,99	5,43	6,12	6,15	1,977	3,031
		3	4,26		4,31		2,424	
TP 30S70C	7 dias	1	3,09		3,51		3,440	
		2	4,10	3,94	5,10	5,00	5,358	6,127
		3	<b>4,65</b>		<b>6,40</b>		<b>9,584</b>	
	28 dias	1	4,12		<b>4,78</b>		3,729	
		2	4,01	4,09	4,52	4,61	<b>9,117</b>	5,756
		3	<b>4,14</b>		4,54		4,422	

Fonte: Elaborado pela autora.

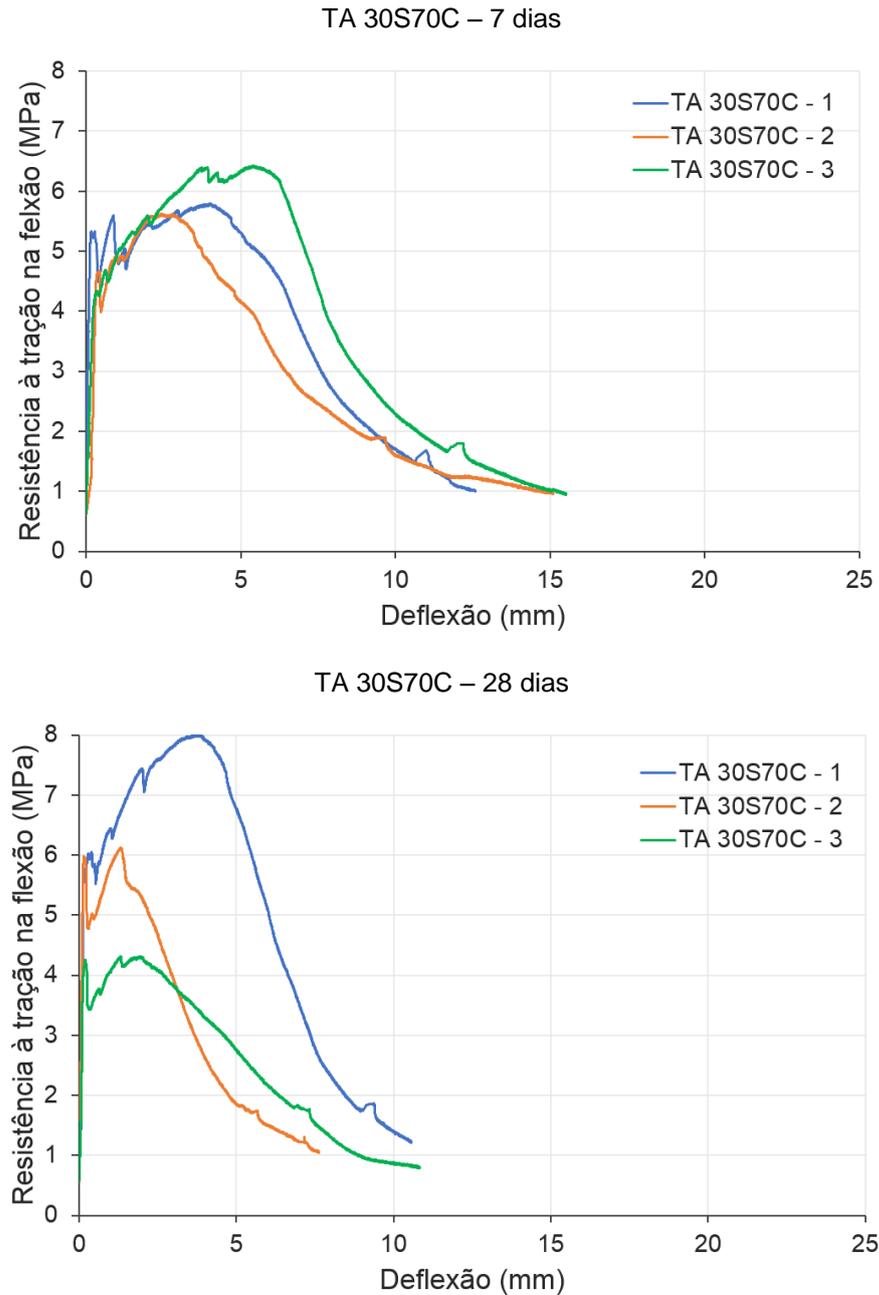
De acordo com a Tabela 19 observa-se que a mistura com maior quantidade de pozolana (TP 30S70C) apresentam resistências menores do que a mistura TA 30S70C. Já nos resultados de deflexão é observado o comportamento inverso.

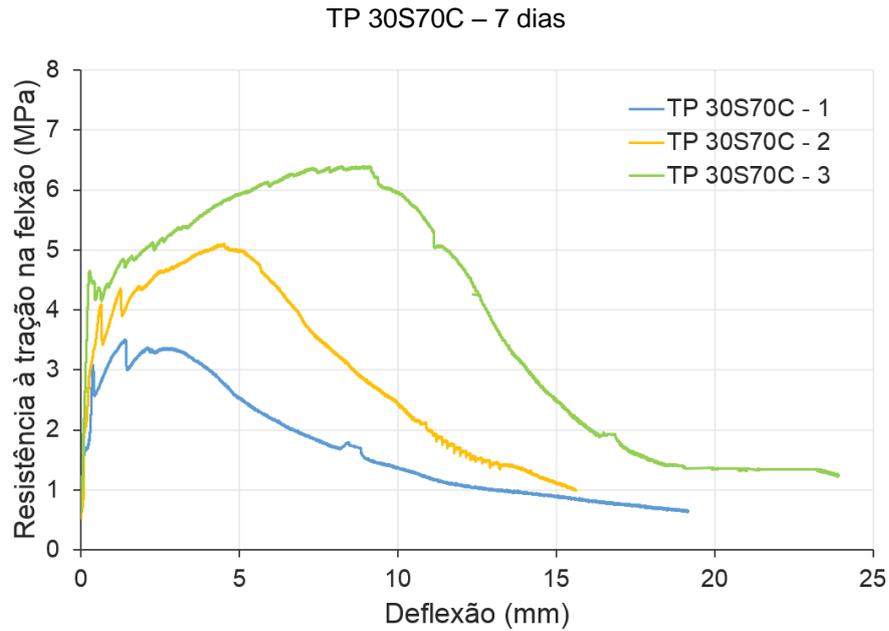
A média dos resultados de resistência à primeira fissura do TA 30S70C aos 7 e 28 dias foram de 4,78 MPa e 5,43 MPa, sendo valores próximos aos registrados por Righi (2015) e Ehrenbring (2020). Já no estudo de Rodrigues (2018) foi encontrado valor de resistência à primeira fissura de 4,0 MPa aos 28 dias de idade, sendo próximo ao encontrado nesta pesquisa para a mistura TP 30S70C.

Na pesquisa de Zhu *et al.* (2014) foi observado que a resistência a primeira fissura diminui com o aumento do teor de CV, evidenciando o comportamento observado nesta pesquisa, em que a mistura com maior quantidade de pozolana e consequentemente de CV, apresentaram menores resistências.

As resistências máximas encontradas em diversos estudos com uso de fibra de PP variaram de 5,2 MPa até 9,0 MPa aos 28 dias de idade (EHRENBRING, 2020; GARCEZ, 2009; RIGHI, 2015; RODRÍGUEZ, 2018). Assim, os valores encontrados neste trabalho, de 4,61 MPa e 6,15 MPa estão dentro da faixa de valores identificados na bibliografia.

Figura 22 – Curvas de tensão-deflexão de todas as amostras analisadas



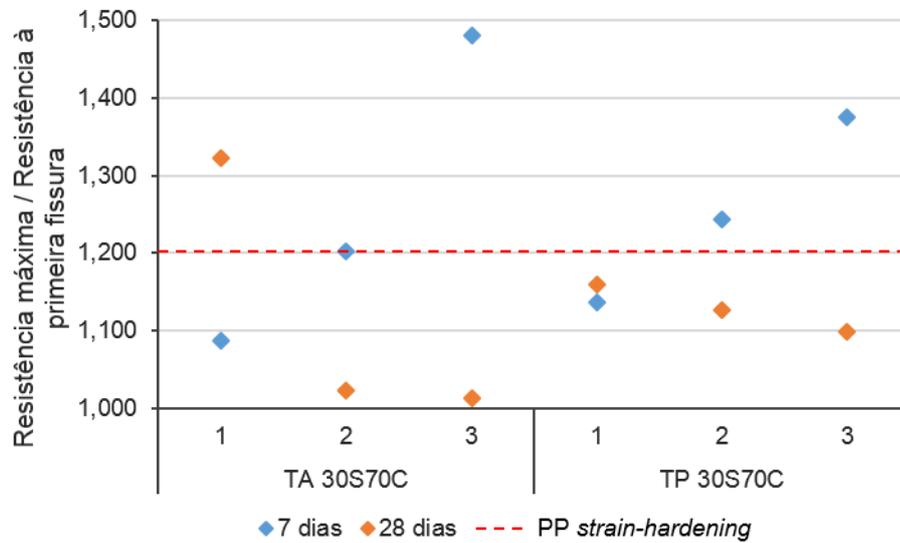


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 22 estão apresentadas todas as curvas de tensão-deflexão obtidas nos ensaios de tração na flexão por 4 pontos dos exemplares laminares, sendo o mesmo apresentado até o final do ensaio, quando ocorre uma queda de 80% da carga máxima. Observa-se que nem todos os corpos de prova apresentaram o comportamento *deflection-hardening*, que é caracterizado pelo ganho de tensão mesmo após as formações das fissuras.

A Figura 23 visa apresentar uma análise comparativa entre a resistência máxima e o valor obtido quando do surgimento da primeira fissura.

Figura 23 – Variação da relação entre resistência máxima e resistência à primeira fissura nos compósitos estudados

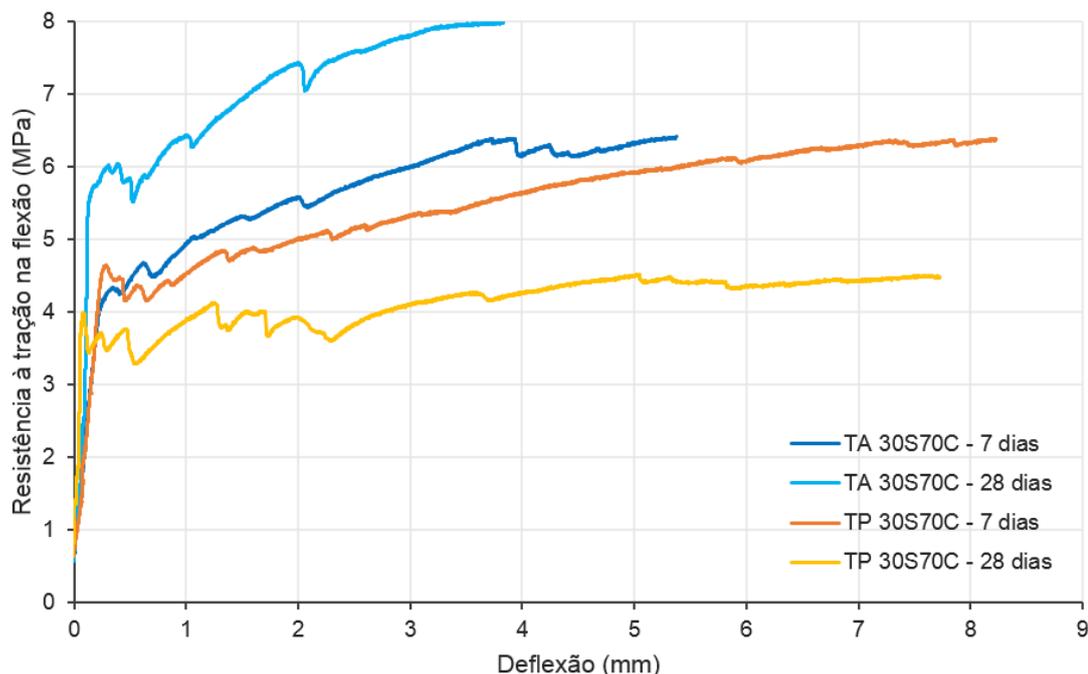


Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme Kanda e Li (1998), para apresentar um comportamento *strain-hardening* e *deflection-hardening*, a relação entre a resistência máxima e a resistência à primeira fissura obtida no ensaio de tração na flexão deve ser superior a 1,2 para fibras de PP. Na Figura 23 é apresentado o gráfico com esses valores e observa-se que os corpos de prova que apresentaram a relação superior a 1,2 são os mesmos que apresentaram as ondulações nas curvas de tensão-deflexão, que é um comportamento característico do ECC (RODRÍGUES, 2018).

Na Figura 24 são apresentados somente as curvas tensão-deflexão até o ponto de resistência à tração na flexão máxima com os valores potenciais e observa-se que as deflexões obtidas no TP 30S70C foram maiores do que no TA 30S70C.

Figura 24 – Curvas de tensão-deflexão potenciais aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaborado pela autora.

Aos 7 dias de idade, a deflexão máxima média registrada foi de 4,95 mm e 6,13 mm. Considerando o valor potencial de deflexão máxima, o máximo valor obtido foi de 9,584 mm, sendo o valor encontrado também na pesquisa de Ehrenbring (2020). Porém no mesmo estudo, a deflexão registrada aos 28 dias foi de 3,3 mm, acontecendo diminuição na deflexão, que também foi um comportamento observado nesta pesquisa.

Conforme Zhu *et al.* (2014), a deflexão e a resistência à compressão apresentam uma relação inversamente proporcional, assim quanto menor é a resistência à compressão, maior a deflexão. O valor de compressão obtidos no TP30S70C foram inferiores ao TA 30S70C, comprovando esta relação. Este comportamento pode ter ocorrido devido ao alto teor de cinzas que pode reduzir a ligação entre a interface da fibra e matriz, evitando assim ruptura excessiva da fibra e facilitando a alta ductilidade do ECC (MA *et al.*, 2015; SHERIR; HOSSAIN; LACHEMI, 2018).

A Figura 25 visa apresentar características relacionadas as fissuras observadas nos materiais.

Figura 25 – Padrão de fissuração das amostras laminares após o ensaio de tração na flexão



a) amostra com múltipla fissuração b) amostra sem múltipla fissuração

Fonte: Registrada pela autora.

Conforme observado na Figura 25, os exemplares que apresentaram a múltipla fissuração exibem uma concentração de fissuras mais finas, e uma fissura mais espessa e predominante, padrão também observado no estudo de Ehrenbring (2020). Já algumas amostras não exibiram as microfissuras, apresentando somente uma ou duas fissuras, não apresentando o comportamento de multifissuração controlada. Este comportamento também foi constatado por Ehrenbring (2020) e Garcez (2009).

A variação nas curvas de tensão-deflexão é um comportamento esperado e pode ocorrer por não apresentar uniformidade na dispersão das fibras (LI, 2019). A inserção da fibra modifica a propriedade física e a reologia da mistura, o que pode estimular a criação de vazios, formando pontos frágeis e assim afetando o processo de formação das fissuras, comportamento apontados por Li e Li (2013) e Wang e Li (2007) e também observado na Figura 26.

Figura 26 – Interferência dos vazios no processo de formação das fissuras



Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de terem apresentado um comportamento de *deflection-hardening* à ação de flexão, não é garantido que os mesmos apresentem o comportamento de *strain-hardening* quando submetidos à tração direta, assim destacando a importância da realização de ensaio de tração direta para a validação dessa propriedade, conforme destacado por Li (2019).

#### 4.4.2.2. Amostras prismáticas

Na Tabela 20 são apresentados os resultados de resistência à primeira fissura na flexão, resistência máxima à tração na flexão e a deflexão máxima obtidos no ensaio de tração na flexão por 3 pontos.

Tabela 20 – Resultados dos compósitos à tração na flexão – prismas

Mistura	Idade	CP	Resistência à primeira fissura (MPa)		Resistência máxima (MPa)		Deflexão máxima (mm)	
			Indiv.	Média	Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 30S70C	7 dias	1	6,68		11,91		1,079	
		2	5,50	6,69	11,04	12,26	<b>1,207</b>	1,13
		3	<b>7,87</b>		<b>13,83</b>		1,097	
	28 dias	1	5,97		<b>11,78</b>		0,999	
		2	<b>8,07</b>	6,62	10,77	10,48	1,086	1,10
		3	5,83		8,90		<b>1,221</b>	
TP 30S70C	7 dias	1	4,83		9,56		1,059	
		2	<b>5,55</b>	5,16	<b>12,47</b>	10,85	<b>2,165</b>	1,64
		3	5,10		10,53		1,706	
	28 dias	1	<b>5,90</b>		<b>11,33</b>		1,175	
		2	5,40	5,73	10,33	10,99	1,000	1,25
		3	5,88		11,30		<b>1,577</b>	

Fonte: Elaborado pela autora.

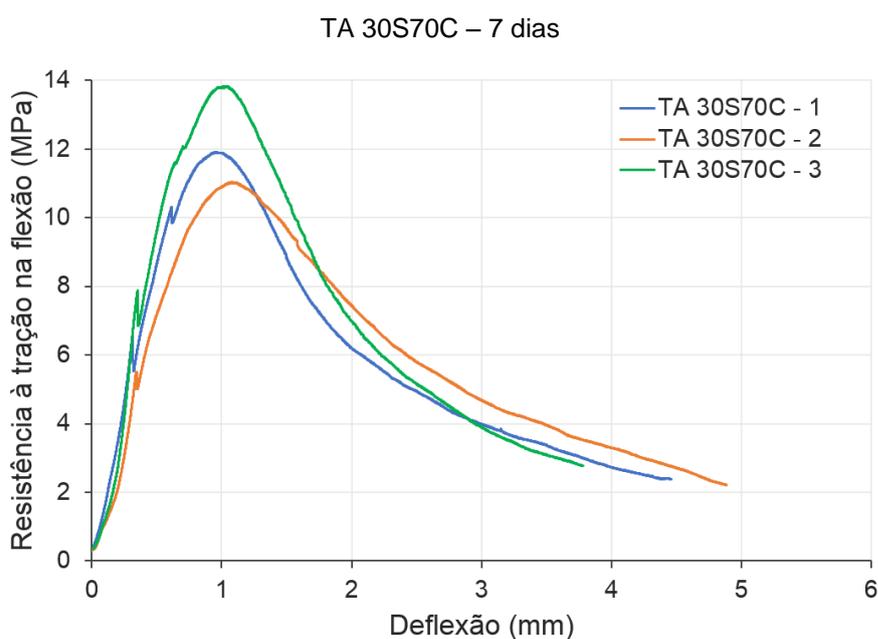
A partir da Tabela 20 percebe-se que os valores de resistência à primeira fissura decaíram ao longo da idade de análise. No estudo de Ehrenbring (2020) foi encontrado um comportamento diferente, em que ocorreu o aumento da resistência à primeira fissura com o avanço da idade de cura. O autor citado encontrou 4,9 MPa e 9,4 MPa de resistência à primeira fissura aos 7 e 28 dias, com mesma quantidade de fibra PP, valores superiores aos encontrados nesta pesquisa.

A diminuição da tensão ao longo da idade também foi percebida na resistência máxima. Wang, Qing *et al.* (2020) obtiveram 12,4 MPa aos 7 dias e 13,81 MPa aos 28 dias, ocorrendo um aumento no valor da tensão. Este estudo foi realizado utilizando CV, SA e escória, e a fibra utilizada foi de PVA. Já Ehrenbring (2020) encontrou resistência máxima à tração na flexão inferior aos 7 dias de idade utilizando fibra de PP, com 9,9 MPa.

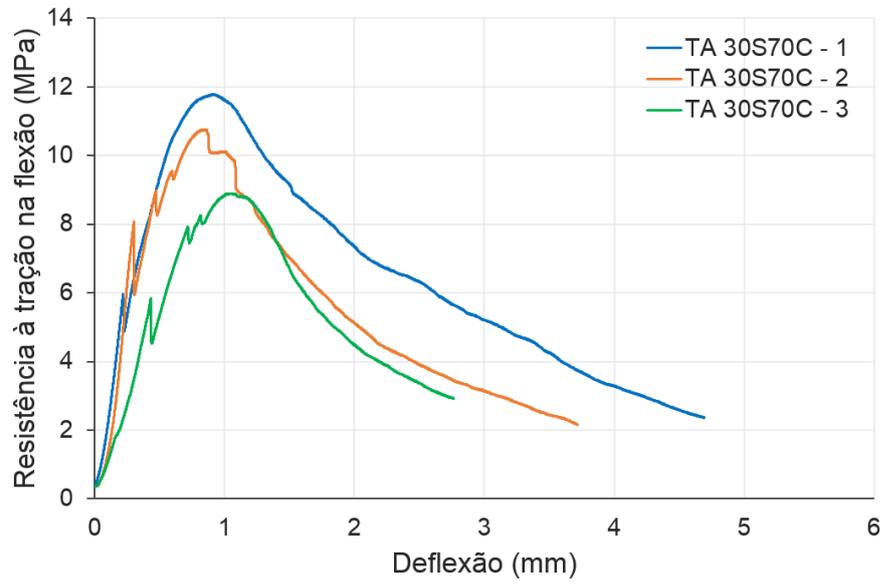
Em comparação com os resultados obtidos nos exemplares laminares, as resistências registradas foram maiores e isto ocorre devido à seção transversal da peça, que é um comportamento verificado também por Ehrenbring (2020) e Li (2019). Os mesmos autores citados, relataram a diminuição da deflexão em comparação com os exemplares laminares, devido ao aumento da inércia da peça, também verificado nesta pesquisa.

Na Figura 27 são apresentadas as curvas individuais de tensão-deflexão obtidas no ensaio aos 7 dias e 28 dias de idade.

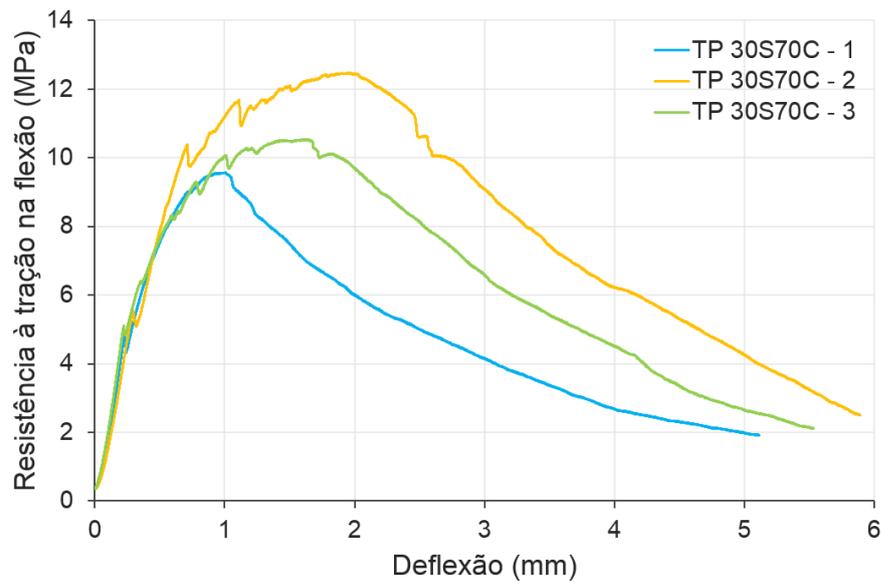
Figura 27 - Curvas tensão-deflexão das amostras prismáticas

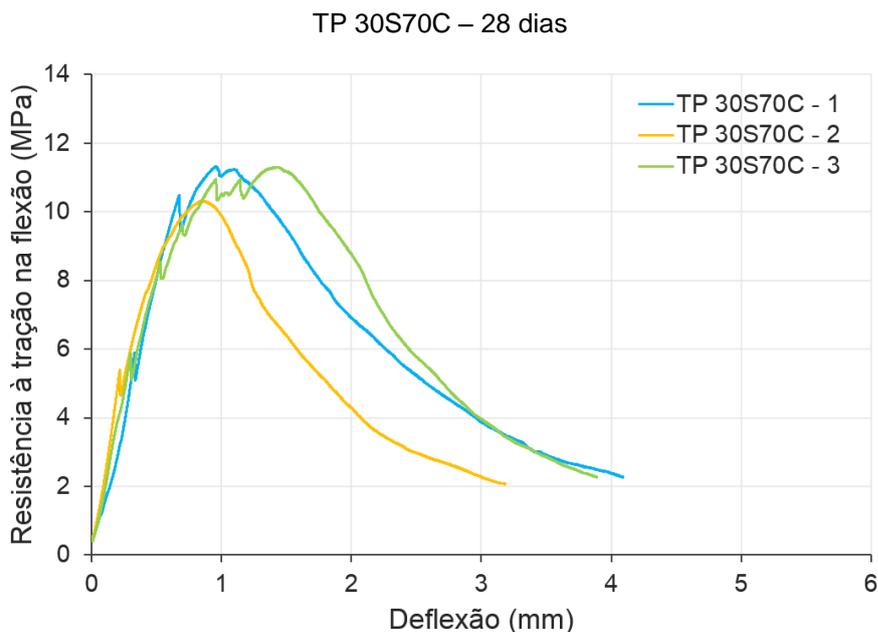


TA 30S70C – 28 dias



TP 30S70C – 7 dias

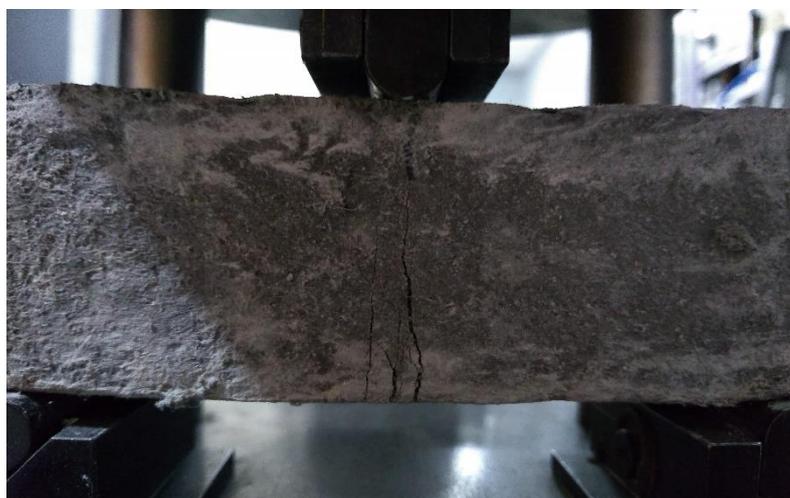




Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado na Figura 27 alguns corpos de prova apresentaram o comportamento *deflection-hardening*, sendo evidenciado pelo ganho de resistência contínuo após a primeira fissuração e demais fissurações ocorridas. Segundo Kanda e Li (1998), para atingir um comportamento de *deflection-hardening* com fibras hidrofóbicas que é o caso da fibra de PP, a relação entre resistência máxima e resistência à primeira fissura deve ser superior a 1,2, requisito atendido por todos os corpos de prova ensaiados neste estudo.

Figura 28 – Padrão de fissuração observado no ensaio de tração na flexão por 3 pontos



Fonte: Registrada pela autora.

Conforme observado na Figura 28, as fissuras formadas no ensaio de tração na flexão dos prismas por 3 pontos foram formadas logo abaixo do ponto de aplicação de carga, no centro do vão teórico do corpo de prova, relatado também na pesquisa de Keskinates e Felekoglu (2018).

#### 4.4.3 Compressão

Os resultados de resistência à compressão com a incorporação de 2,4% de fibra de polipropileno aos 7 e 28 dias serão apresentados na Tabela 21. Os valores potenciais obtidos estão apresentados em destaque.

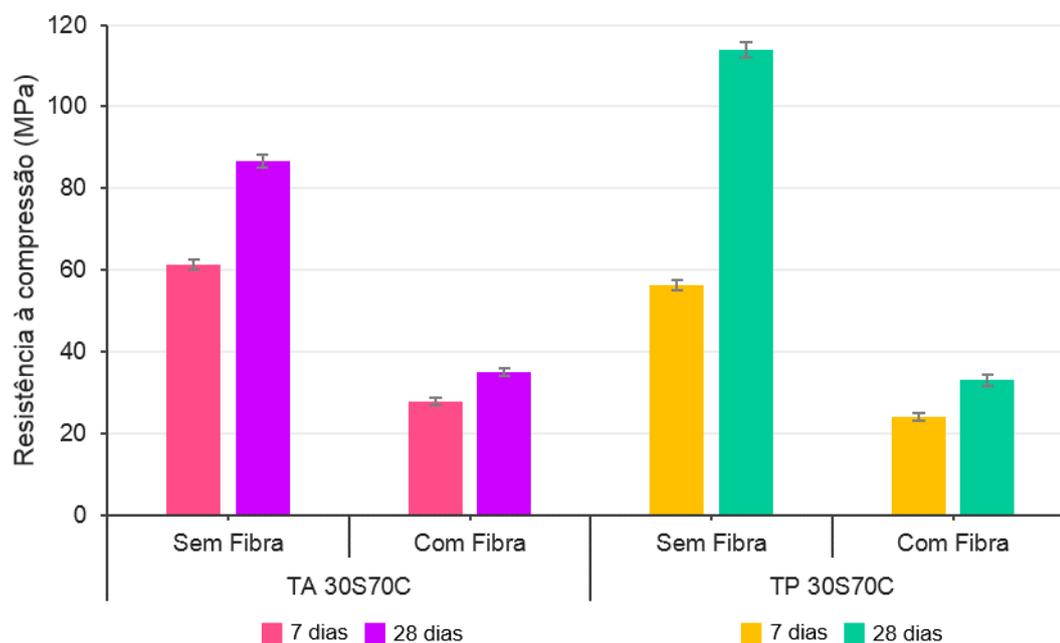
Tabela 21 – Resultados da resistência à compressão da Etapa 3

Mistura	Corpo de prova	$f_c$ (MPa)				
		7 dias		28 dias		
		Indiv.	Média	Indiv.	Média	
TA 30S70C	Sem Fibra	1	59,53		86,78	
		2	<b>62,71</b>	61,18	84,68	
		3	61,29		<b>88,49</b>	
	Com Fibra	1	28,32		34,59	
		2	26,55	27,85	<b>36,34</b>	35,08
		3	<b>28,67</b>		34,30	
TP 30S70C	Sem Fibra	1	<b>57,86</b>		<b>116,35</b>	
		2	55,44	56,17	113,81	113,97
		3	55,21		111,73	
	Com Fibra	1	<b>25,01</b>		30,96	
		2	24,35	24,05	34,00	32,99
		3	22,79		<b>34,01</b>	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores médios obtidos serão apresentados na Figura 29, com os resultados comparativos entre as misturas sem ou com presença de fibras.

Figura 29 - Média e desvio padrão dos valores de resistência à compressão da  
Etapa 3



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que ocorreu uma diminuição na resistência à compressão com a incorporação da fibra de polipropileno. Como apresentado anteriormente, não foi possível obter os resultados aos 28 dias da matriz do TP 30S70C, mas a mistura com maior adição de pozolana apresentou resistência inferior do que a mistura TA 30S70C.

Wang, Qing *et al.* (2020) estudaram a matriz do ECC com SA, CV e escória e obtiveram resultados próximos de 37 MPa e 44 MPa, aos 7 e 28 dias respectivamente. Com a incorporação de 1,5% de fibra de PVA não ocorreram variações na resistência, sendo um comportamento distinto ao obtido neste estudo.

A utilização de alto teor de fibra, pode acarretar na diminuição da resistência à compressão e isto pode ser explicado pela possível formação de aglomerado de fibras e formação de poros que acarreta na diminuição da resistência (FALLAH; NEMATZADEH, 2017).

Na pesquisa de Ehrenbring (2020), a resistência à compressão do ECC com o mesmo teor de fibra de PP adotado nesta pesquisa, porém somente com a utilização de SA apresentou valores bem superiores, atingindo mais de 60 MPa aos 28 dias. Já nas pesquisas de Garcez (2009) e Magalhães (2010), os valores de resistência foram semelhantes ao encontrado nesta pesquisa, na ordem de 30 a 36 MPa aos 28 dias de idade.

Segundo Li (2019), para ser classificado como Normal-ECC, a resistência à compressão deve estar compreendida entre 30 a 80 MPa. Outra característica importante é a forma de ruptura que é por esmagamento onde ao ser comprimido aumenta o diâmetro sem se desintegrar, diferindo do compósito sem a adição de fibra em que a ruptura ocorre de forma explosiva como pode ser observado na Figura 30. Este comportamento também foi observado no estudo de Ehrenbring (2020), Magalhães (2010) e Righi (2015).

Figura 30 – Formas de ruptura sem e com adição de fibras



Sem adição de fibra



Com adição de fibra

Fonte: Registrada pela autora.

#### 4.4.4 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade serão apresentados na Tabela 22 e os resultados potenciais estão em destaque.

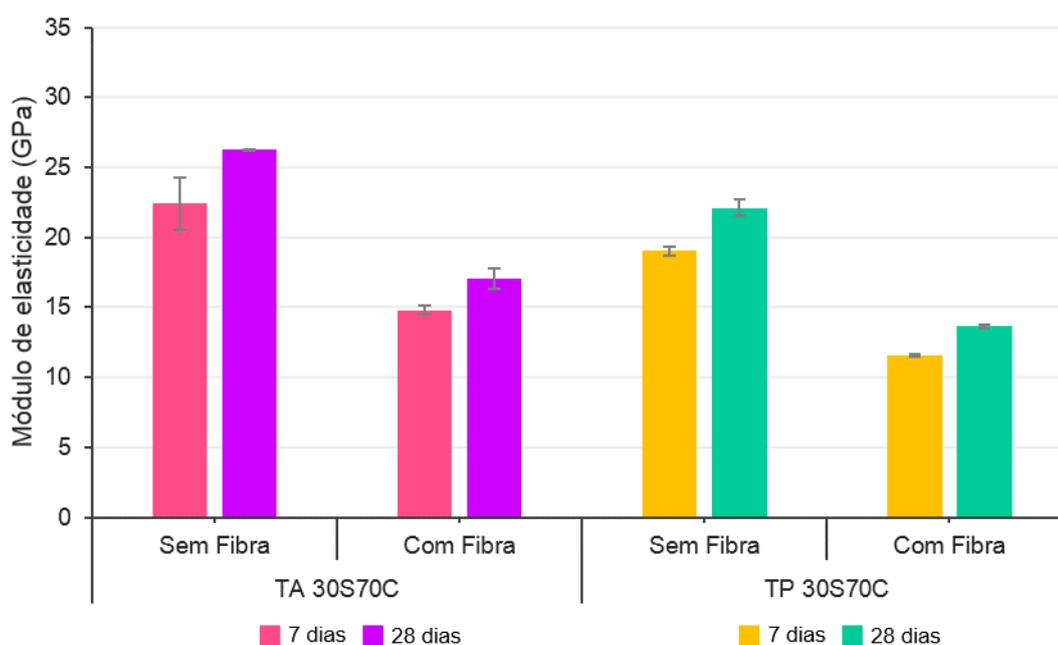
Tabela 22 – Resultados de módulo de elasticidade da Etapa 3

Mistura	Corpo de prova	E (GPa)			
		7 dias		28 dias	
		Indiv.	Média	Indiv.	Média
TA 30S70C	Sem Fibra	1	23,48		26,15
		2	19,80	22,43	26,28
		3	<b>24,01</b>		<b>26,30</b>
	Com Fibra	1	<b>15,17</b>		<b>18,12</b>
		2	14,39	14,77	16,52
		3	14,75		16,55
TP 30S70C	Sem Fibra	1	18,63		<b>22,97</b>
		2	19,10	19,05	21,76
		3	<b>19,42</b>		21,62
	Com Fibra	1	11,38		13,53
		2	<b>11,65</b>	11,56	13,54
		3	<b>11,65</b>		<b>13,83</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

Estão apresentados os resultados dos compósitos com a adição do reforço e também os resultados obtidos na primeira e na segunda etapa desta pesquisa. Salienta-se que não foi possível obter os resultados de 28 dias da mistura TP 30S70C. Os valores médios e de desvio padrão estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Média e desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade da Etapa 3



Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado nos resultados de resistência à compressão, ocorreu uma redução no valor de módulo com a incorporação da fibra de PP. A mistura com maior quantidade de areia (TA 30S70C) apresentou valores superiores do que o traço com maior quantidade de pozolana.

Na pesquisa realizada por Fallah e Nematzadeh (2017) com UHPC com fibras de polipropileno foi observado que a adição de fibra aumenta o módulo de elasticidade em relação ao concreto sem adição de reforços poliméricos. O aumento do módulo de elasticidade com a inserção de 1,5% de fibra em comparação com o compósito sem adição de fibra também foi observado no estudo de Wang, Qing *et al.* (2020). Mas com altos teores de fibras, pode ocorrer uma diminuição no módulo de elasticidade devido a formação dos poros e redução da resistência à compressão como observado neste estudo.

No estudo de Ehrenbring (2020) foram registrados valores de módulos superiores do que encontrados nesta pesquisa. Com o mesmo teor de 2,4% de fibra foi encontrado valor de 21,8 e 24,0 GPa aos 7 e 28 dias.

Magalhães (2010) encontrou resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias de 19 GPa, com ECC de mesma proporção de cimento, areia e CV utilizado no TP 30S70C, sendo valores mais próximos ao encontrado nesta pesquisa. Na pesquisa de Garcez (2009) com utilização de CV e fibra de PP também se obteve módulo próximo a 19 GPa. Já valores de módulos baixos, na ordem de 14 GPa também foram registrados por Pasinato (2018). Segundo Li (2019) módulo de elasticidade entre 15 a 23 GPa recebe a classificação como Normal ECC, tendo indicação para aplicação estrutural.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas através do desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente serão apresentadas as conclusões referentes aos objetivos específicos determinados.

- Em relação ao objetivo específico A de encontrar o teor ideal de pozolana (CV e SA), verificou-se que:

As misturas híbridas compostas por 50% de sílica ativa e de cinza volante e 30% de sílica ativa e 70% de cinza volante no traço de 1,00: 0,80: 1,20 (cimento: pozolana: areia fina) apresentaram os melhores resultados quanto aos ensaios de tração na flexão por 3 pontos, resistência à compressão e de módulo de elasticidade. As misturas contendo os dois tipos de materiais suplementar cimentício obtiveram resultados superiores do que misturas com a utilização de somente sílica ativa ou cinza volante.

- O objetivo específico B visava analisar a relação entre a distribuição granulométrica do cimento e das substituições pozolânicas e as propriedades mecânicas do compósito estudado, percebeu-se que:

Através do resultado de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, observou-se que o traço com 50% de CV e SA apresentou os melhores resultados, tanto aos 28 dias e 56 dias de idade, superando 94 MPa. Este resultado pode ser justificado pelo melhor empacotamento entre os materiais.

No ensaio de tração na flexão, tanto aos 28 dias como em 56 dias, a mistura com 50% de cada pozolana e a outra mistura com 30% de SA e 70% de CV apresentaram os melhores resultados.

A maior adição de materiais suplementares, que correspondeu ao traço denominado de TP com 1,00: 1,20: 0,80 (cimento: pozolana: areia fina), apresentou resultados inferiores comparado com o traço TA e pode ser justificado pela não ocorrência da reação pozolânica, servindo apenas como material de enchimento e também pela reduzida quantidade de água disponível.

- Em relação ao objetivo específico C que consistiu na comparação dos valores obtidos de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade nas idades de 7, 28 e 56 dias, pondera-se que:

Em relação aos resultados obtidos no ensaio de tração na flexão, o traço denominado TA apresentou os melhores resultados, sendo observado a influência da pozolana também nas idades mais avançadas de 56 dias. Neste traço, as misturas híbridas com utilização tanto de SA como de CV demonstraram os melhores resultados quando submetidas à ação de flexão. Já no traço com maior quantidade de pozolana, os resultados foram inferiores ao encontrados no traço TA.

- No que tange ao objetivo específico D, referente a comparação dos valores obtidos de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias, com utilização de 2,4% de fibra de polipropileno, verificou-se que:

A utilização de reforço polimérico aumentou a capacidade de resistência à tração na flexão nos dois traços estudados e também foi possível observar o comportamento *deflection-hardening* que é característico do ECC.

Quanto a resistência à primeira fissura e de resistência máxima, o traço com maior quantidade de areia denominado de TA apresentaram os melhores resultados, chegando a 6,15 MPa aos 28 dias de idade. Já em relação à deflexão máxima, foi observado que o traço com maior quantidade de pozolana e que apresentou a menor resistência à compressão desenvolveu a melhor ductilidade.

Em relação aos ensaios realizados, com a utilização de amostras prismáticas apresentam valores de resistência à tração na flexão maiores do que comparado com as amostras laminares devido à seção transversal da peça. Já a deflexão registrada é menor nos exemplares prismáticos, por apresentarem maior rigidez do que os corpos de prova em placas.

Diante das considerações apresentadas para os objetivos específicos, pode-se concluir em relação ao objetivo geral desta pesquisa que é o desenvolvimento de um traço de *Engineered Cementitious Composite* com utilização de material local e de menor consumo de cimento, verificou-se que:

Foi possível desenvolver compósitos com maior quantidade de CV na mistura, que é o material pozolânico mais disponível na região do estudo com utilização de 2,4% de fibra de polipropileno, que atendessem a classificação de ECC.

Ressalta-se que é importante analisar também as amostras quanto ao ensaio de tração direta, pois mesmo que tenha apresentado o comportamento de *deflection-hardening*, não é garantido que o mesmo apresente a propriedade de *strain-hardening* à tração uniaxial.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das análises realizadas neste estudo, verificaram-se possíveis melhorias que podem ser aplicadas e novos pontos foram levantados para complementar o estudo de ECC com uso de material local, a fim de minimizar o custo desse compósito. Como citado anteriormente, é importante realizar a análise do comportamento do compósito à ação de tração uniaxial para verificação do comportamento *strain-hardening*. Também necessita-se de estudo para avaliar as questões relacionadas à durabilidade, devido às microfissurações e as pozolanas empregadas, podendo conter maior teor de adições minerais, para minimizar ainda mais o consumo de cimento. Outro estudo relevante seria estudar a relação água/aglomerante ou o teor de aditivo para verificar a influência na consistência e no comportamento mecânico do material.

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, Gamal E. *et al.* Investigation on fresh properties of engineered cementitious composites. **Civil Engineering Research Magazine (CERM)**, v. 41, p. 165-172, 2019.
- ABRÃO, Pedro Cesar Rodrigues Alves. **O uso de pozolanas como materiais cimentício suplementares**: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. 2019. Dissertação (Mestre em Ciências) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Subsídios para elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono: caderno 3: nota técnica cimento. São Paulo, 2012.
- ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes. **Comportamento em altas temperatura e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- ALTWAIR, Nurdeen M.; JOHARI, M. A. Megat; HASHIM, S. F. Saiyid. Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 518-525, Dec. 2012.
- ALVES, Jose Eustaquio Diniz. Aumenta concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera em 2018. **EcoDebate**, 2019. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2019/02/11/aumenta-a-concentracao-de-co2-na-atmosfera-em-2018-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves>. Acesso em: 10 de maio 2020.
- AMASSI, Arun Kumar; RAGUL. Strength and durability of high volume fly ash in engineered cementitious composites. **Materials Today: Proceedings**, v.5, n. 11, p. 24050-24058, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro do concreto. **ABCP**, 2013. Disponível em: <https://abcp.org.br/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Redução na emissão de CO<sub>2</sub> é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento. **ABCP**, 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/imprensa/reducao-na-emissao-de-co2-e-sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1609**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). West Conshohocken: ASTM International, 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/C1609>. Acesso em: 20 set. 2020.

BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. C; PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concreto com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2 ed, Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 4 ed, Brasília, 2018.

CELIK, Kemal *et al.* Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59-72, Feb. 2015.

CEMBUREAU. **Activity Report 2017**. Brussels: European Cement Association, 2018. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/1716/activity-report-2017.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2020.

CEMBUREAU. **Activity Report 2018**. Brussels: European Cement Association, 2019. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/1818/activity-report-2018.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2020.

CHEN, Tiefeng; GAO, Xiaojian; REN, Miao. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 864-872, 2018.

CHRIST, Roberto. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

EHRENBRING, Hinoel Zamis. **Desenvolvimento de Engineered Cementitious Composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

FALLAH, Saber; NEMATZADEH, Mahdi. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and sílica fume. **Construction and Building Materials**, v. 132, p.170-187, Feb. 2017.

FELEKOGLU, Burak *et al.* Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. **Composites Part B: Engineering**, v. 60, p. 359-370, Apr. 2014.

FERREIRA, Luiz Eduardo Teixeira; HANAI, João Bento. Mecânica da Fratura. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v.1, p. 241-279.  
Olhar na biblioteca

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com Fibras. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1327-1365.

GARCEZ, Estela Oliari. **Investigação do comportamento de engineered cementitious composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GHAFFARI, Ehsan *et al.* Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 43-48, 30 Nov. 2016.

GIRARDI, Ricardo. **Avaliação da influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto de Cimento Portland**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v.2, p. 945-984.

HUANG, Xiaoyan *et al.* Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 757-764, July 2013.

HUANG, Xiaoyan; RANADE, Ravi; LI, Victor C. Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 7, p. 923-932, July 2013.

HUYNH, N. N. T.; IMAMOTO, K.; KIYOHARA, C. A study on biomineralization using *Bacillus Subtilis* natto for repeatability of self-healing concrete and strenght improvement. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 17, n. 12, p. 700-714, 2019.

JIN, Qingxu; LI, Victor C. Development of lightweight engineered cementitious composite for durability enhancement of tall concrete wind towers. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 87-94, Feb. 2019.

JSCE. Reccomendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC). **Concrete Engineering Series**, v. 82, 2008.

JUAREZ, C. A. *et al.* Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cemet-based composite. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 164-170, 30 Aug. 2015.

KANDA, T.; VICTOR C. LI. Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites. **Concrete Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 19–33, 1998.

KANDA, Tetsushi; LI, Victor C. Interface property and apparent strength of high-strength hydropolic fiber in cement matrix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 10, n. 1, p. 5-13, 1998.

KESKINATES, Muhammer; FELEKOGLU, Burak. The influence of mineral additive type and water/binder ratio on matrix phase rheology and multiple cracking potential of HTPP-ECC. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 508-519, 10 June 2018.

KIM, Taehyoung *et al.* Proposal for the evaluation of eco-efficient concrete. **Sustainability**, v.8, n. 705, 2016.

KIM, Yail J.; WANG, Jun. Development of ultra-high-performance concrete with various sílica admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 2, p. 33-44, 03 Jan. 2019.

KOSMATIKA, Steven H.; WILSON, Michelle L. **Design and control of concrete mixtures**. 15. ed. Illinois: Portland Cement Association, 2011.

KRISHNARAJA, Ammapalyam Ramasamy *et al.* Study on impact of fiber hybridization in material properties of engineered cementitious composites. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

KUNIEDA, Minoru; ROKUGO, Keitetsu. Recent progress of HPFRCC in Japan required performance and applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 4, n. 1, p. 19-33, Feb. 2006.

LEPECH, Michael D. *et al.* Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 567-575, 11 Jan. 2008.

LEPECH, Michael D.; LI, Victor C. Application of ECC for bridge deck link slabs. **Materials and Structures**, v. 42, p. 1185-1195, 30 July 2009a.

LEPECH, Michael D.; LI, Victor C. Water permeability of engineered cementitious composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 744-753, Nov. 2009b.

LI, Junxia; YANG, En-Hua. Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 33-42, Apr. 2017.

LI, Mo; LI, Victor C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of Engineered Cementitious Composites. **Materials and Structures**, v. 46, p. 405-420, 2013.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure**. Germany,: Springer Nature, 2019.

LI, V. C. On engineered cementitious composites – a review of the material and its applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 215-230, 2003.

LI, Victor C. Engineered Cementitious Composites (ECC) - Tailored Composites Through Micromechanical Modeling. In: N. Banthia, A. Bentur, A. and A. Mufti. **Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future**. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1998. p. 64-97.

LI, Victor C. Engineered Cementitious Composites (ECC) - Material, Structural, and Durability Performance. In: NAWY, Edward G. **Concrete Construction Engineering Handbook**. 2. ed. CRC Press, 2008. cap. 24.

LI, Victor C. Tailoring ECC for special attributes: a review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 6, n. 3, p.135-144, 18 Sept. 2012.

- LI, Victor C.; KANDA, Tetsushi. Engineered cementitious composites for structural applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 10, n. 2, p. 66-69, 1998.
- LI, Victor C.; WU, Hwai-Chung. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. **Appl. Mech. Rev.**, v. 45, n. 8, p. 390-398, Aug. 1992.
- LIU, Hezhi *et al.* Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 171-181, 15 Feb. 2017.
- LIU, Yushi *et al.* Use of sílica fume and GGBS to improve frost resistance of ECC with high-volume fly ash. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 19 Apr. 2018.
- MA, Hui *et al.* Tailoring Engineered Cementitious Composites with local ingredients. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 584-595, 30 Dec. 2015.
- MAALEJ, M *et al.* Review of potencial structural applications of hybrid fiber Engineered Cementitious Composites. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 216-227, Nov. 2012.
- MAALEJ, Mohamed; LI, Victor C. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 6, n. 4, p. 513-528, Nov. 1994.
- MAGALHÃES, Margareth da Silva. **Caracterização experimental de compósitos cimentício reforçados com fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- MATOS, Paulo Ricardo *et al.* Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 623-630, 30 Dec. 2018.
- MEHTA, P. Kumar. Global Concrete Industry Sustainability. **Concrete International**, v. 31, n.2, p. 45-48, Feb. 2009.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2<sup>o</sup> ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MOSTOFINEJAD, Davood; NIKOO, Mojtaba Rostami; HOSSEINI, Seyed Arman. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 754-767, Oct. 2016.
- NAAMAN, A. E. Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960. In: GROSSE, C. U. (ed). **Advances in Construction Materials 2007**, Berlin: Springer, 2007. p. 181-202.

NASRIN, Sabreena; IBRAHIM, Ahmed. Flexural response of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) hybrid bridge deck connections made with local materials. **Construction and Building Materials**, v. 270, 08 Feb. 2021.

NASSIF, Hani H.; NAJM, Husam; SUKSAWANG, Nakin. Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 6, p. 661-670, July 2005.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2.ed. Pearson Education Limited, 2010.

OZTURK, Murat *et al.* Mechanical and electromagnetic performance of cement based composites containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume and rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 136, Oct. 2020.

PAKRAVAN, H.R.; JAMSHIDI, M.; LATIFI M. The effect of hybridization and geometry of polypropylene fibers on engineered cementitious composites reinforced by polyvinyl alcohol fibers. **Journal of Composite Materials**, v. 50, p. 1007-1020, 2016.

PAN, Zuanfeng *et al.* Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 397-404, 01 Mar. 2015.

PASINATTO, Vanessa. **Avaliação experimental do potencial do ECC (engineered cementitious composites) como reparo de vigas de concreto armado deterioradas pela corrosão da armadura**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PEDROSO, Fabio Luis. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**. n. 53, p. 14-19, 2009.

POURFALAH, S. Behaviour of engineered cementitious composites and hybrid engineered cementitious composites at high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 921-937, 15 Jan. 2018.

PRADHAN, B. Fresh, mechanical, and corrosion performance of self-compacting concrete in the presence of chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 247, 30 June 2020.

PYO, Sukhoon; KIM, Hyeong-Ki. Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 459-466, 30 June 2017.

QIAN, S. Z. *et al.* Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 78-88, Jan. 2013.

QIU, Jishen; AW-YONG, Wei Li; YANG, En-Hua. Effect of self-healing on fatigue of engineered cementitious composites (ECCs). **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 145-152, Nov. 2018.

RANJITH, S.; VENKATASUBRAMANI, R.; SCREEVIDYA, V. S. Comparative study on durability properties of engineered cementitious composites with polypropylene fiber and glass fiber. **Archives of Civil Engineering**, v. 63, n.4, p. 83-101, 2017.

RIGHI, Debora Pedroso *et al.* Tensile Behaviour and durability issues of engineered cementitious composites with rice husk ash. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 2017.

RIGHI, Débora Pedroso. **Caracterização do comportamento de compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RISSARDI, Cristyan Zenato. **Proposição de um método para avaliação da robustez do concreto autoadensável**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

RODRÍGUEZ, Camilo Andrés Munõz. **Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (*Engineered Cementitious Composites*) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RONG, H. *et al.* Influence of bacterial concentration on crack self-healing of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 244, 30 May 2020.

SAHMARAN, Mustafa *et al.* Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, v.106, n. 3, p. 308-316, 05 Jan. 2009.

SAHMARAN, Mustafa; LI, Victor C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 11, p. 1033-1043, Nov. 2009.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./ jun. 2016.

SCRIVENER, Karen L.; KIRKPATRICK, R. James. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 128-136, Feb. 2008.

SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, Dec. 2018.

SHERIR, Mohamed A. A.; HOSSAIN, Khandaker M. A.; LACHEMI, Mohamed. Fresh state, mechanical & durability properties of strain hardening cementitious composite produced with locally available aggregates and high volume of fly ash. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 253-264, 20 Nov. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual de 2013**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2013.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf). Acesso em: 18 abr. 2020.

SINGH, Maninder; SAINI, Babita; CHALAK, H. D. Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC) – a review. **Journal of Building Engineering**, v. 26, Nov. 2019.

SOLEIMANI-DASHTAKI, Salman *et al.* Effect of high strain-hardening on tensile constitutive response of ecofriendly ductile cementitious composite (EDCC). **Procedia Engineering**, v. 210, p. 93-104, 2017.

TERMKHAJORNKIT, Pipat *et al.* Effect of fly ash on autogenous shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 473-482, Mar. 2005.

TURK, Kazim; DAMIRHAN, Serhat. The mechanical properties of engineered cementitious composites containing limestone powder replaced by microsilica sand. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 40, n. 2, p. 151-157, Feb. 2013.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 415-451.

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. Concreto de alto e ultra-auto desempenho. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v.2, p.1283-1325.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

WANG, Qiannan *et al.* Water permeability of eco-friendly ductile cementitious composites (EDCC) under na applied compressive stress. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, Mar. 2020.

WANG, Qing *et al.* Greener engineered cementitious composite (ECC) - The use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers. **Construction and Building Materials**, v. 247, 30 June 2020.

WANG, S.; LI, V. C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 3, p. 233-241, 05 Jan. 2007.

WANG, Yichao *et al.* Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 251, 10 Aug. 2020.

WU, Chao; PAN, Yang; UEDA, Tamon. Characterization of the abrasion resistance and the acoustic wave attenuation of the engineered cementitious composites for runway pavement. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 537-546, 20 June 2018.

WU, H. *et al.* Durability of engineered cementitious composite exposed to acid mine drainage. **Cement and Concrete Composites**, v. 108, Apr. 2020.

WU, Zemei; KHAYAT, Kamal H.; SHI, Caijun. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. **Cement and Concrete Research**, v. 123, Sept. 2019.

XU, Shi-Lang; CAI, Xiang-Rong. Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultrahigh toughness cementitious composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 10, p. 1067-1077, Oct. 2010.

YALÇINKAYA, Çağlar; YAZICI, Halit. Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 252-259, 30 July 2017.

YANG, En-Hua *et al.* Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 6, n. 1, p.181-193, Feb. 2008.

YANG, En-Hua *et al.* Rheological control in production of engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 4, p. 357-366, 07 Jan. 2009.

YANG, En-Hua; YANG, Yingzi; LI, Victor C. Use of high volume of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 6, p. 620-628, 11 Jan. 2007.

YU, J. H.; LI, V. C. Research on production, performance and fibre dispersion of PVA engineering cementitious composites. **Materials Science and Technology**, v. 25, n. 5, p. 651-656, 2009.

YU, Jing; LEUNG, Christopher K. Y. Strength improvement of strain-hardening cementitious composites with ultrahigh-Volume fly ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, Sept. 2017.

YU, Kequan *et al.* A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 410-419, 15 Apr. 2017.

YU, Ke-Quan *et al.* Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 217-227, 15 Jan. 2018.

YU, Kequan *et al.* Energy dissipation characteristics of all-grade polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC). **Cement and Concrete Composites**, v. 106, Feb. 2020.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383-394, Jan. 2015.

ZAROUDI, Mostafa; MADANDOUST, Rahmat; AGHAEI, Kamran. Fresh and hardened properties of an eco-friendly fiber reinforced self-consolidated concrete composed of polyolefin fiber and natural zeolite. **Construction and Building Materials**, v. 241, 30 Apr. 2020.

ZHANG, Duo *et al.* Autogenous healing of engineered cementitious composites (ECC) based on MgO-fly ash binary system activated by carbonation curing. **Construction and Building Materials**, v. 238, 30 Mar. 2020.

ZHANG, Jing; MAALEJ, Mohamed; QUEK, Ser Tong. Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 10, p. 855-863, Oct. 2007.

ZHANG, Zhigang; MA, Hui; QIAN, Shunzhi. Investigation on properties of ECC incorporating crumb rubber of different sizes. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 5, p. 241-251, 2015.

ZHANG, Zhigang; ZHANG, Qian. Matrix tailoring of engineered cementitious composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 420-431, 10 Feb. 2018.

ZHANG, Zhigang; ZHANG, Qian; LI, Victor C. Multiple-scale investigations on self-healing induced mechanical property recovery of ECC. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 292-302, Oct. 2019.

ZHAO, Nan *et al.* Study on the durability of engineered cementitious composites (ECCs) containing high-volume fly ash and bentonite against the combined attack of sulfate and freezing-thawing (F-T). **Construction and Building Materials**, v. 233, 10 Feb. 2020.

ZHOU, Jian *et al.* Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. **Materials and Structures**, v. 43, p. 803-814, 2010.

ZHOU, Yingwu *et al.* Mechanical properties of hybrid ultra-high performance engineered cementitious composites incorporating steel and polyethylene fibers. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1448, 16 Aug. 2018.

ZHU, Yu *et al.* Measurement and correlation of ductility and compressive strength for engineered cementitious composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 192-198, Oct. 2014.