

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ALTERNATIVAS  
DE ECC – VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS**

Danielle Airão Barros

Porto Alegre  
2023

DANIELLE AIRÃO BARROS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ALTERNATIVAS  
DE ECC – VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS**

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutorado

Porto Alegre

2023

Barros, Danielle Airão

Estudo das propriedades mecânicas de misturas alternativas de ECC - variação das características dos agregados / Danielle Airão Barros. -- 2023.

169 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Concreto. 2. ECC. 3. Ductilidade. 4. Agregado.  
I. Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da, orient. II.  
Título.

DANIELLE AIRÃO BARROS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ALTERNATIVAS  
DE ECC– VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS**

Esta tese de Doutorado foi julgada adequada para aprovação na Defesa de Doutorado,  
aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de janeiro de 2023

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Phd, University of Leeds  
Orientador

Prof. Lucas Festugato  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)**  
Dr. Universidade de São Paulo

**Prof<sup>ª</sup>. Monica Regina Garcez (UFRGS)**  
Dr<sup>ª</sup>. Universidade Federal do Rio do Grande do Sul

**Prof<sup>ª</sup>. Bernardo Tutikian (UNISINOS)**  
Dr. Universidade Federal do Rio do Grande do Sul



*À minha família, dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Nenhum trabalho neste mundo é feito sozinho, sendo que a minha vitória também é a vitória de várias pessoas. Por mais que a Pós-Graduação seja uma escolha solitária, também é um movimento de união de pessoas. São várias as mãos que trabalham incansavelmente para que um sonho individual seja alcançado. E este texto é a representação física de todo esse processo. Portanto, gostaria de aproveitar este espaço para agradecer a todos que de alguma forma estiveram envolvidos com este trabalho, seja com um simples sorriso, palavra de apoio ou colocando a “mão na massa”. Todos vocês, de alguma forma, contribuíram tanto para o meu crescimento pessoal quanto profissional. Só tenho a dizer, OBRIGADA!

Porém, também não posso deixar de fazer alguns agradecimentos especiais:

Agradeço, em primeiro lugar à Deus pelo dom da Vida;

À minha família, em especial aos meus pais, por todo apoio, suporte financeiro e, principalmente, por acreditarem em mim;

À todas as amigas que fiz em Porto Alegre;

À D. Mena, Glaucia, Luisa e Laís por me acolherem em suas casas durante o período que morei em Porto Alegre;

Aos funcionários do LEME, e em especial ao Sr. Fontes, Sr. Edgar e Sr. Zé. Sem eles nada disso teria se concretizado. Vocês foram fundamentais para a condução deste trabalho;

Aos bolsistas de Iniciação Científica (Gabriel e Ronaldo, especialmente) e aos pesquisadores do LEME que de alguma forma me ensinaram e me ajudaram durante a pesquisa;

Ao LAPOL, em especial o Prof. Sandro Amico, o Jeferson, a Kadyne e o Ícaro, por me ajudarem com a realização dos meus ensaios;

Um agradecimento especial para os meus colegas e amigos formados no LEME: Adriano, Carine, Débora, Leonardo, Luiz Henrique, Paola e Tobias que tornaram essa jornada mais alegre e divertida, mesmo no momento de maior adversidade, que foram os dois anos de pandemia do COVID19, devido às incertezas e restrições de uso do LEME;

Aos meus amigos de Vitória, por entenderem a minha ausência;

Aos colegas do CEMACOM, em especial a Rose por me auxiliar no início da minha pesquisa e ao Felipe Quevedo, por toda ajuda, em especial com o Ansys;

Aos professores que participaram desse processo e por todo o ensinamento, orientações e contribuições para este trabalho;

Às empresas que doaram material para a realização desta pesquisa: Arcelor Mittal Tubarão (escória), Brasilit (Fibras de polipropileno), Silcca Nobre (cinza de casca de arroz) e GCP (superplastificante).

*"Mesmo as noites totalmente sem estrelas  
podem anunciar a aurora de uma grande  
realização."*

**Martin Luther King**

## RESUMO

BARROS, D. A. Estudo das propriedades mecânicas de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Brasil.

Com o avanço da tecnologia na construção civil, atualmente busca-se desenvolver novos materiais que apresentem um bom desempenho mecânico e que atendam aos requisitos de durabilidade. Com isso, os concretos com elevado desempenho mecânico, representado pelo ECC (*Engineered Cementitious Composite*), cumprem esse papel. O ECC é um concreto reforçado com fibras e que apresenta um comportamento dúctil quando submetido a tensões de tração e com conseqüente microfissuração, com fissuras menores que 100µm. Essas características o tornam um material interessante para aplicações específicas de engenharia. Porém, quando é analisada a sua composição original, percebe-se que este material apresenta um elevado consumo de cimento Portland e areia fina, a fim de manter as suas propriedades. Tal fato gera impactos tanto ambiental quanto econômico, o que muitas vezes impede a utilização do ECC em escala comercial. Portanto, este trabalho visa estudar como a variação da quantidade, da origem e da dimensão do agregado impactam nas propriedades deste material, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. Com isso, espera-se desenvolver misturas alternativas de ECC, utilizando materiais locais, que sejam ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis, mantendo o seu comportamento característico. Para tal, foi desenvolvido um programa experimental para investigar o efeito da substituição parcial da areia fina, por agregados naturais e artificiais, nos estados fresco e endurecido, por meio dos ensaios de *mini-slump*, resistência à compressão, tração, e flexão de quatro pontos. Além disso, foi desenvolvido um estudo analítico e numérico para permitir a validação do comportamento do material. Como conclusão, percebeu-se que é possível o uso de misturas alternativas de ECC, com menor quantidade de areia fina em sua dosagem e manter o comportamento dúctil do material, desde que as fibras sejam corretamente distribuídas na matriz cimentícia. Este é o maior ponto de preocupação, pois as fibras apresentam um papel fundamental na garantia do comportamento dúctil deste material, por serem responsáveis pelo processo de transferência de tensões.

**Palavras-chave:** ECC, ductilidade, agregado.

## ABSTRACT

BARROS, D. A. Study of the mechanical properties of alternative mixtures of ECC – variation of aggregate characteristics. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Brasil.

With the development of technology in civil construction, new materials are being developed that have good mechanical performance and meet durability requirements. Concretes with high mechanical performance, represented by the ECC (Engineered Cementitious Composite), are well suited to fulfill this role. ECC is a fiber reinforced concrete that presents a ductile behavior when subjected to tensile stresses and with consequent microcracking, with cracks smaller than 100µm. Those characteristics make it an attractive material for specific engineering applications. However, when analyzing its original composition, it is noticed that this material requires a high consumption of Portland cement and fine sand to maintain its properties. This fact causes both environmental and economic impacts, which prevents the use of ECC on a commercial scale. Therefore, this work aims to investigate the impact of the quantity, origin, and size of the aggregate on the properties of this material, both in its fresh and hardened state. It is expected to develop alternative dosages of ECC, using local materials which are sustainable and economically viable, maintaining their characteristic behavior. An experimental program was developed to investigate the effect of partial replacement of fine sand by natural and artificial aggregates in the fresh and hardened states, through the tests of mini-slump, compressive strength, traction, and four-point bending. Furthermore, an analytical and numerical study was developed to allow the validation of the behavior of the material. It was found that it is possible to use alternative dosages of ECC, with a smaller amount of fine sand in its dosage and maintain the ductile behavior of the material, provided that the fibers are correctly distributed in the cementitious matrix.

**Keywords:** ECC, ductility, aggregate.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	4
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
<b>1.2 Estrutura da tese.....</b>	<b>4</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Concreto reforçado com fibras e suas classificações .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Aspectos gerais do ECC .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Micromecânica do ECC .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Sustentabilidade na indústria do concreto .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5 Material Cimentício Suplementar (MCS) .....</b>	<b>30</b>
2.5.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA).....	33
<b>2.6 Influência do agregado na composição do ECC .....</b>	<b>35</b>
<b>2.7 Estudos sobre ECC no LEME – UFRGS .....</b>	<b>40</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Processos de mistura e cura do ECC .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Caracterização dos materiais .....</b>	<b>47</b>
3.2.1 CIMENTO PORTLAND.....	47
3.2.2 ÁGUA DE AMASSAMENTO .....	48
3.2.3 AGREGADO.....	48
3.2.4 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	52
3.2.5 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) .....	53
3.2.6 FIBRA DE POLIPROPILENO .....	54
<b>3.3 Teste de Traço.....</b>	<b>56</b>
<b>3.4 Caracterização mecânica do ECC .....</b>	<b>58</b>
3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ( $f_{ck}$ ).....	59

3.4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA ( $f_t$ ) .....	60
3.4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO ( $f_t, f$ ) .....	64
3.4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	70
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>73</b>
4.1 Teste de traço .....	73
4.2 Resistência à compressão .....	81
4.3 Tração direta ( $f_t$ ).....	84
4.4 Resistência à tração na flexão ( $f_t, f$ ) .....	93
4.5 Módulo de Elasticidade.....	101
4.6 Comentários finais.....	104
<b>5. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS .....</b>	<b>108</b>
5.1 Modelo teórico de vigas de ECC à tração na flexão (Maaleji e Li, 1994).....	109
5.2 Modelo inverso simplificado (Qian e Li, 2007) .....	116
5.3 Simulação numérica - Ansys.....	122
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>135</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>148</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possíveis comportamentos do concreto reforçado com fibras .....	6
Figura 2 – Gráfico tensão x deformação de concreto reforçado com fibras.....	7
Figura 3 – Classificação do FRC adotada por Wille, El-Tawil e Naaman, (2014) .....	9
Figura 4 – Classes de concreto reforçado com fibras .....	11
Figura 5 – Classificação dos diferentes tipos de ECC.....	12
Figura 6 – Curva de comportamento do ECC .....	13
Figura 7– Gráfico tensão x deformação do ECC.....	14
Figura 8 – Pilares ensaiados submetidos à carga cíclica .....	15
Figura 9 – Recuperação da barragem Mitaka -Japão .....	16
Figura 10 – Recuperação do túnel Ten-Nou JR - Japão .....	17
Figura 11 – Ponte estaiada Mihara - Japão.....	18
Figura 12 – Curva tensão x abertura de fissura para material com comportamento dúctil .....	21
Figura 13 – Micromecânica do ECC .....	21
Figura 14 – Evolução do comportamento das fibras .....	22
Figura 15 – Características das fibras .....	23
Figura 16 – Análise do ciclo de vida do ECC .....	28
Figura 17 – Sistema de construção sustentável .....	29
Figura 18 – Matriz de desenvolvimento de ECC de menor impacto ambiental.....	30
Figura 19 – Materiais substituintes no concreto .....	32
Figura 20 – Influência da dimensão do agregado na orientação e distribuição das fibras .....	36
Figura 21 – Fluxograma da terceira etapa do programa experimental .....	44
Figura 22 – Etapas para a produção do ECC.....	46
Figura 23 – Processo de mistura do ECC.....	46
Figura 24 – Distribuição granulométrica do Cimento Portland .....	48
Figura 25 – Distribuição granulométrica dos agregados retida individual $D_{max}=0,3mm$ .....	50
Figura 26 – Distribuição granulométrica retida acumulada dos agregados.....	50
Figura 27 – Agregados naturais.....	51
Figura 28 – Fotos dos agregados artificiais (GGBF).....	51
Figura 29 – Picnometria a gás de hélio.....	52
Figura 30 – Distribuição granulométrica da CCA.....	54
Figura 31 – Distribuição granulométrica da CCA.....	55
Figura 32 – Ensaio do índice de consistência do ECC .....	58

Figura 33 – Corpos de prova preparados.....	59
Figura 34 – Ensaio de resistência à compressão.....	60
Figura 35 – Dimensões do dogbone (cm).....	60
Figura 36 – Forma para moldagem dos dogbones.....	61
Figura 37 – Corpo de prova preparado para ensaio.....	61
Figura 38 – Ensaio de tração direta .....	62
Figura 39 – Padrão de pintura.....	63
Figura 40 – Layout para a captura de imagem .....	64
Figura 41 – Formas e corpos de prova .....	65
Figura 42 – Esquema do ensaio de flexão .....	66
Figura 43 – Ensaio de flexão 4 pontos com LVDT's.....	67
Figura 44 – Padrão de pintura dos corpos de prova .....	67
Figura 45 – Esquema para captura da imagem.....	68
Figura 46 – Comportamento esperado para o ensaio de flexão a 4 pontos .....	69
Figura 47 – Ensaio de módulo de elasticidade .....	72
Figura 48 – Resultados do índice de consistência (Aditivo Superplastificante) .....	73
Figura 49 – Evolução do índice de consistência (Agregado) .....	74
Figura 50 – Comparação dos índices de consistência para as dosagens selecionadas .....	78
Figura 51 – Avaliação visual do teste de índice de consistência – Areia natural.....	78
Figura 52 – Avaliação visual do teste de índice de consistência – GGBF $D_{max}=1,2mm$ .....	79
Figura 53 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo .....	81
Figura 54 – Resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias .....	82
Figura 55 – Corpos de prova rompido à compressão .....	84
Figura 56 – Resultados do ensaio de tração direta .....	85
Figura 57 – Corpos de prova ensaiados à tração .....	89
Figura 58 – Padrão de fissuração.....	89
Figura 59 – Comparação dos resultados LVDT x DIC .....	90
Figura 60 – Mapa de deformação na direção y ( $\epsilon_y$ ) .....	91
Figura 61 – Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos.....	93
Figura 62 – Evolução da força.....	96
Figura 63 – Corpos de prova ensaiados.....	96
Figura 64 – Comparação resultados LVDT's x DIC.....	99
Figura 65 – Mapas de calor – Análise DIC .....	100
Figura 66 – Módulo de Elasticidade médio das dosagens estudadas .....	101

Figura 67 – Comparação dos resultados LVDT's x DIC .....	103
Figura 68 – Representação dos modelos de tração e compressão .....	110
Figura 69 – Distribuição de tensões e deformações na viga.....	111
Figura 70 – Aplicação do modelo teórico de Maalej e Li (1994).....	114
Figura 71 – Desenvolvimento modelo inverso simplificado.....	117
Figura 72 – Distribuição de tensões e deformações na viga.....	117
Figura 73 – Distribuição de tensões e deformações na viga.....	118
Figura 74 – Curvatura da viga .....	119
Figura 75 – Distribuição de tensões e deformações na viga.....	120
Figura 76 – Esquema do ensaio de flexão a 4 pontos.....	123
Figura 77 – Modelo numérico construído .....	123
Figura 78 – Configuração do SOLID185 .....	124
Figura 79 – Modelo numérico (Traço REF.).....	127
Figura 80 – Modelo numérico (Traço 1.01) .....	128
Figura 81 – Modelo numérico (Traço 1.05) .....	129
Figura 82 – Modelo numérico (Traço 1.08) .....	130
Figura 83 – Modelo numérico (Traço 1.09) .....	131
Figura 84 – Modelo numérico (Traço 2.01) .....	132
Figura 85 – Modelo numérico (Traço 2.09) .....	133

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Propriedades físico – químicas do cimento Portland.....	47
Tabela 2 – Composição química da GGBF (Valores de referência) .....	49
Tabela 3 – Massa específica dos agregados .....	52
Tabela 4 – Propriedades da CCA .....	53
Tabela 5 – Propriedades da fibra de PP .....	55
Tabela 6 – Dosagem do ECC (kg/m <sup>3</sup> ) .....	57
Tabela 7 – Combinação de traços: Alteração da proporção do agregado .....	57
Tabela 8 – Combinação de traços: Origem do agregado.....	57
Tabela 9 – Índice de consistência (Areia natural) .....	75
Tabela 10– Índice de consistência (GGBF).....	75
Tabela 11 – Dosagem do ECC (kg/m <sup>3</sup> ) – Areia quartzoza .....	76
Tabela 12 – Dosagem do ECC (kg/m <sup>3</sup> ) – GGBF.....	76
Tabela 13 – Ensaio de caracterização mecânica .....	76
Tabela 14 – Resultados ensaio de compressão .....	82
Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração direta por dosagem .....	87
Tabela 16 - Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos .....	95
Tabela 17 – Resultados do Módulo de Elasticidade ( <i>E<sub>ci</sub></i> ) .....	101
Tabela 18 – Resumo dos resultados por dosagem estudada.....	105
Tabela 19 – Dados de entrada do modelo.....	115
Tabela 20 – Resultados da análise inversa .....	121
Tabela 21 – Dados de entrada - Compressão .....	126
Tabela 22 – Dados de entrada – Tração .....	126

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações do UHP-ECC .....	18
Quadro 2 - Relação das propriedades das fibras com os parâmetros $\sigma_0$ e $Jb'$ .....	24
Quadro 3 - Características necessárias das fibras para compor o ECC .....	25
Quadro 4 – Estudos sobre a incorporação de CCA no ECC .....	34
Quadro 5 – Pesquisas sobre a influência do agregado.....	38
Quadro 6 – Resumo das análises .....	106

## LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASMT: *American Society for Testing and Materials*

CAST: *Cast Iron Plasticity*

CCA: Cinza de casca de arroz

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CP: Corpo de prova

CPV – ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CV: Coeficiente de variação

DIC: *Digital Image Correlate*

ECC: *Eniengineered Cementitious Composite*

FRC: Concreto Reforçado com Fibras (*Fiber Reinforced Concrete*)

GGBF: Escória granulada de alto forno

HPFRCC: Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras (*High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite*)

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LAPOL: Laboratório de Polímeros

LAPROM: Laboratório de Processamento Mineral

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT: Transdutor de Deslocamento Variável Linear

MCS: Material Cimentício Suplementar

MEF: Método dos Elementos Finitos

NBR: Norma Brasileira

NM: Norma Mercosul

PE: Polietileno

PP: Polipropileno

PSH: *Pseudo – Strain- Hardening*

PVA: Polivinil-Álcool

RS: Rio Grande do Sul

SHCC: *Strain – Hardening Cementitious Composite*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHPC: *Ultra-High-Performance Concrete*

UHP-ECC: *Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composite*

UHP-FRC: Concretos de alto desempenho reforçado com fibras

UHPFRCC: *Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite*

UHTCC: *Ultra-High Toughness Cementitious Composite*





## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, na construção civil, há a preocupação com o desenvolvimento e uso de materiais que apresentem um bom desempenho mecânico e que sejam duráveis. Por isso, ao longo dos anos, vem sendo desenvolvidos compósitos cimentícios que apresentam tais características, denominadas de alto desempenho. Melhorar o comportamento mecânico e a capacidade de resistir aos ataques físicos, químicos e biológicos do ambiente se tornaram medidas essenciais para esses materiais.

O concreto, quando comparado com outros materiais de construção, apresenta uma série de vantagens como a facilidade de preparação e manuseio e o baixo custo de execução. Porém, tem como desvantagem o comportamento frágil, relacionado com a baixa resistência e rigidez à tração, com conseqüente formação e propagação de fissuras. Tal fato impacta na vida útil, nos custos de manutenção e no ciclo de vida das estruturas.

Neste cenário, busca-se uma maior interação entre os processos do projeto estrutural e sistemas construtivos, com a escolha adequada dos materiais, definição das propriedades mecânicas, avaliação da durabilidade e necessidade de manutenção das estruturas ao longo da sua vida útil.

Dentro desse contexto, nos anos de 1990, foi desenvolvido por Li e outros pesquisadores da Universidade de Michigan - USA o ECC<sup>1</sup> (*Engineered Cementitious Composite*), que pertence a uma classe de concreto reforçado com fibras (FRC). Este material representa uma evolução no desempenho mecânico do concreto, por apresentar um comportamento dúctil quando submetido a tensões de tração, sendo desenvolvido com base nos princípios da micromecânica do concreto e da mecânica da fratura.

Devido ao seu comportamento mecânico e conseqüente múltipla fissuração, com fissuras menores que  $100\mu\text{m}$ , o ECC se torna um material interessante para o uso em algumas aplicações específicas da engenharia, além de apresentar potencial para reduzir os problemas relacionados com a durabilidade de estruturas de concreto.

---

<sup>1</sup> Outras denominações para o ECC que podem ser encontradas na literatura, como o SHCC (*Strain - Hardening Cementitious Composites*) e UHTCC (*Ultra-high Toughness Cementitious Composites*).

Na sua composição original utilizam-se materiais comumente empregados na dosagem do concreto convencional (cimento, água, agregado miúdo, aditivos e fibras) tendo como ponto de destaque o baixo volume de fibras utilizado, que é cerca de 2% do volume de concreto ou menos. As fibras, neste caso, são os elementos responsáveis por controlar o processo de propagação e abertura de fissuras, garantindo o comportamento dúctil característico do ECC.

Sob a ótica ambiental, a indústria da construção civil vem passando por um grande processo de transformação e, um desses desafios é como construir estruturas de concreto que gerem um menor impacto ambiental e que sejam mais duráveis. Melhorar a conservação das estruturas, aumentando a sua durabilidade torna-se um dos possíveis caminhos (MEHTA, BURROWS, 2001).

Um dos maiores problemas ambientais da indústria da construção civil é a grande emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, que ocorre desde o processo de fabricação do cimento Portland, passando pela exploração de recursos naturais, como a água e agregados, até o final do ciclo de vida de uma edificação. Um dos vários caminhos existentes para diminuir o impacto ambiental da produção de concreto é a substituição de componentes tradicionais do concreto por materiais que até então são considerados rejeitos de processos industriais.

Analisando a composição inicial do ECC, para obter as suas principais características, é necessário um alto consumo de cimento Portland, na ordem de 1000 kg/m<sup>3</sup>, que acontece devido à não utilização de agregado graúdo em sua composição. O consumo de cimento é considerado de duas a três vezes maior que o concreto convencional (WU et al., 2019, ANDREW, 2018; WANG, LI, 2007).

Considerando os possíveis impactos ambientais e a viabilidade econômica para o uso desse material, ao longo dos anos foram desenvolvidas várias pesquisas para analisar a substituição de parte do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS), principalmente por aqueles que são subprodutos de processos industriais ou agroindustriais.

Além do cimento Portland, o agregado é mais um material que gera grande impacto ambiental na produção de concreto. Os processos de exploração mineral, processamento e transporte do agregado consomem elevada quantidade de energia, gerando um efeito adverso considerável para o meio ambiente, não abstando do alto custo de produção do material, em especial a areia fina.

Sabe-se que o agregado, na matriz do ECC, tem uma grande importância nas suas propriedades mecânicas. Considerando o princípio da micromecânica utilizado para a sua dosagem, entende-se que grande quantidade e alta dimensão máxima característica do agregado tende a aumentar a rigidez da fratura da matriz cimentícia e diminuir a aderência interfacial, o que não é favorável para a obtenção do comportamento dúctil do ECC (GUAN et al., 2019). O ECC tradicional, em sua composição, utiliza agregados muito finos com dimensão característica máxima igual a 0,3mm, o que inviabiliza ambientalmente e economicamente o seu uso.

Por isso, ao longo dos anos também estão sendo desenvolvidas pesquisas para avaliar a possibilidade utilização de agregados com maior dimensão característica na composição do ECC, assim como a sua substituição por agregados artificiais, de modo que possa manter as suas características essenciais e permitir seu uso em escala comercial.

Neste contexto, existe a necessidade de se desenvolver de concretos que tenham maior vida útil, que gerem menor impacto ambiental e que sejam economicamente viáveis, sendo o ECC uma dessas opções. O LEME – UFRGS é pioneiro no Brasil nesse aspecto e, desde 2009, vem desenvolvendo trabalhos de caracterização do ECC adaptado à essa nova realidade, utilizando materiais existentes no Brasil.

O primeiro trabalho foi o de Garcez (2009), que desenvolveu uma dosagem de ECC com materiais locais para serem utilizados como camada de recapeamento de pavimento de concreto asfáltico. Posteriormente, Righi (2015) verificou a viabilidade de utilização de CCA (Cinza de Casca de Arroz) como substituição parcial do cimento Portland, Costa (2015) estudou sobre a durabilidade do ECC produzido com CCA e fibras de polipropileno e Rodríguez (2018) analisou a aplicabilidade do ECC estudado no LEME-UFRGS no processo de recapeamento de pavimentos.

Dentre os trabalhos mais recentes, tem-se os de Molz (2021) que avaliou a aplicabilidade do ECC como pavimento de tabuleiros metálicos, verificando o comportamento do material em termos de cura, aderência e retração. Righi (2022) estudou dosagens de ECC com fibras de polipropileno e elevados teores de CCA, sob aspectos reológicos, mecânicos e de durabilidade.

Refletir sobre os impactos ambientais oriundos da construção civil torna-se necessário, devido tanto à urgência desse tema quanto pelas mudanças e questionamentos impostos pela

---

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

sociedade. Um dos maiores desafios atuais para os engenheiros é pensar e implementar uma indústria da construção sustentável. Então, novas pesquisas sobre durabilidade, utilização de materiais alternativos e desenvolvimento novas tecnologias de fabricação de concreto torna-se mandatório para os dias atuais, sendo este mais um passo importante para atingir tal objetivo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho visa a continuidade dos estudos sobre misturas alternativas de ECC desenvolvidos no LEME-UFRGS, cujo objetivo é estudar como a variação da quantidade, da origem e da dimensão do agregado impactam nas propriedades do material, tanto em seu estado fresco quanto endurecido.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Verificar a possibilidade de se manter as propriedades mecânicas do ECC com a substituição parcial da areia fina por agregados com maior dimensão característica e de origem diversa;
2. Avaliar a trabalhabilidade e o comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC por meio da substituição parcial da areia fina por agregados com maior dimensão característica;
3. Avaliar a trabalhabilidade e o comportamento mecânico de misturas de ECC com substituição parcial da areia fina por escória granulada de alto forno (GGBF) com maior dimensão característica;
4. Estudar o comportamento do ECC com dosagens alternativas usando modelos analíticos e simulação numérica por meio do método de elementos finitos;

## **1.2 Estrutura da tese**

Para fins de organização e melhor entendimento das etapas da pesquisa, o texto foi dividido da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução ao tema a ser desenvolvido em conjunto com a definição do problema e especificação dos objetivos.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os principais aspectos envolvidos com a produção do ECC. Este capítulo inicia com o histórico do desenvolvimento dos FRC até se obter o ECC como é conhecido atualmente. É explicado como os materiais constituintes da dosagem deste material podem influenciar no seu comportamento mecânico. Também é comentada sobre as tendências mais atuais de pesquisa e como as questões ambientais influenciam no desenvolvimento de novos compósitos cimentícios. Finalmente são apresentados alguns trabalhos que foram desenvolvidos no LEME-UFRGS, que serão as referências desta pesquisa.

Capítulo 3: Explica a metodologia utilizada para o desenvolvimento da etapa experimental deste trabalho, sendo definidas as variáveis de controle, as propriedades dos materiais utilizados e os procedimentos de ensaio adotados.

Capítulo 4: Análise e discussão dos resultados experimentais.

Capítulo 5: Desenvolvimento dos modelos numérico e discussão dos resultados.

Capítulo 6: Considerações finais e recomendações de novas pesquisas.

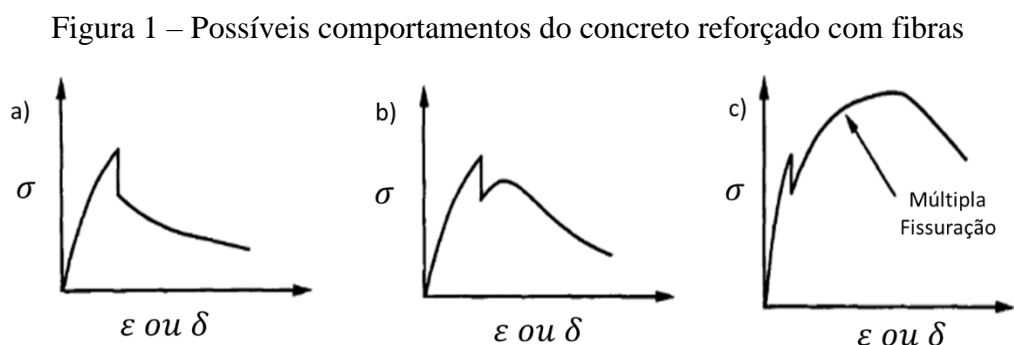
## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é descrito, de uma forma geral, os aspectos relacionados com o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras, com destaque para os compósitos de alta ductilidade, no qual se enquadra o *Engineered Cementitious Composite* - ECC.

### 2.1 Concreto reforçado com fibras e suas classificações

O desenvolvimento de novos tipos de concreto vem crescendo devido às atuais necessidades de aumentar a durabilidade, diminuir os custos de manutenção e melhorar a performance e desempenho das estruturas e, dentre os exemplos desta evolução, cita-se o desenvolvimento do FRC (*Fiber Reinforced Concrete*). Esse material é composto pela matriz cimentícia e por fibras, que são descontínuas e distribuídas aleatoriamente em todo volume de concreto, assumindo-se que os dois elementos trabalham em conjunto (NAAMAN, 2009).

Observando o comportamento mecânico desse material, os compósitos cimentícios reforçado com fibras podem apresentar dois tipos de ruptura, a frágil (*strain-softening*) ou a dúctil (*strain-hardening*), que ocorrem em função da resposta do material quando submetido à esforços de tração, conforme representado na Figura 1. Nesta figura, os gráficos das letras a e b, retratam o comportamento frágil enquanto a letra c representa o comportamento dúctil, respectivamente.



Adaptado de Leung (1996)

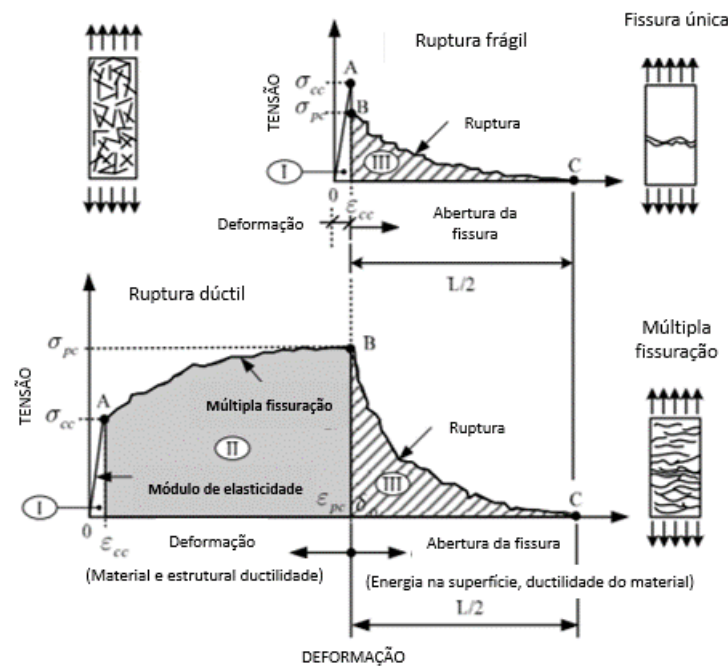
Analisando os gráficos, a ruptura frágil ou quase-frágil de um material é caracterizada por uma relação linear na curva tensão x deformação e uma queda na tensão após o

aparecimento da primeira fissura, sendo este o ponto de ruptura e de tensão máxima de tração, para ambos os casos. Este é o comportamento típico de concretos convencionais (letra a) e de concretos reforçado com fibras (letra b). Nas duas situações a fissura é única e localizada.

Na ruptura dúctil, o material não perde a capacidade de carga após o aparecimento da primeira fissura, apresentando elevada deformação quando submetido à esforços de tração, que é caracterizada pela múltipla fissuração.

Neste último caso podem ser identificados, graficamente, dois pontos de interesse: o da ocorrência da primeira fissura e o de tensão máxima. Após atingir a tensão máxima, uma fissura localizada se torna crítica e a resistência do concreto diminui até o compósito perder toda a capacidade de carga. Esta é a representação típica do comportamento do HPFRCC<sup>2</sup> (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composite*) (NAAMAN, REINHARDT, 2006). Os gráficos da Figura 2 mostram, separadamente, dois tipos de ruptura da matriz cimentícia associada ao estado de fissuração do concreto, a do tipo frágil e a do tipo dúctil.

Figura 2 – Gráfico tensão x deformação de concreto reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de Naaman (2007)

<sup>2</sup> O termo alta performance, utilizado por Naaman (2009), significa o comportamento *strain-hardening* dos concretos reforçados com fibras. Atualmente, por questões de interpretação do termo alto desempenho, que pode estar relacionado com alta resistência ou durabilidade, utiliza-se o termo *strain-hardening* para designar o comportamento dúctil acompanhado de múltipla fissuração e altas deformações.

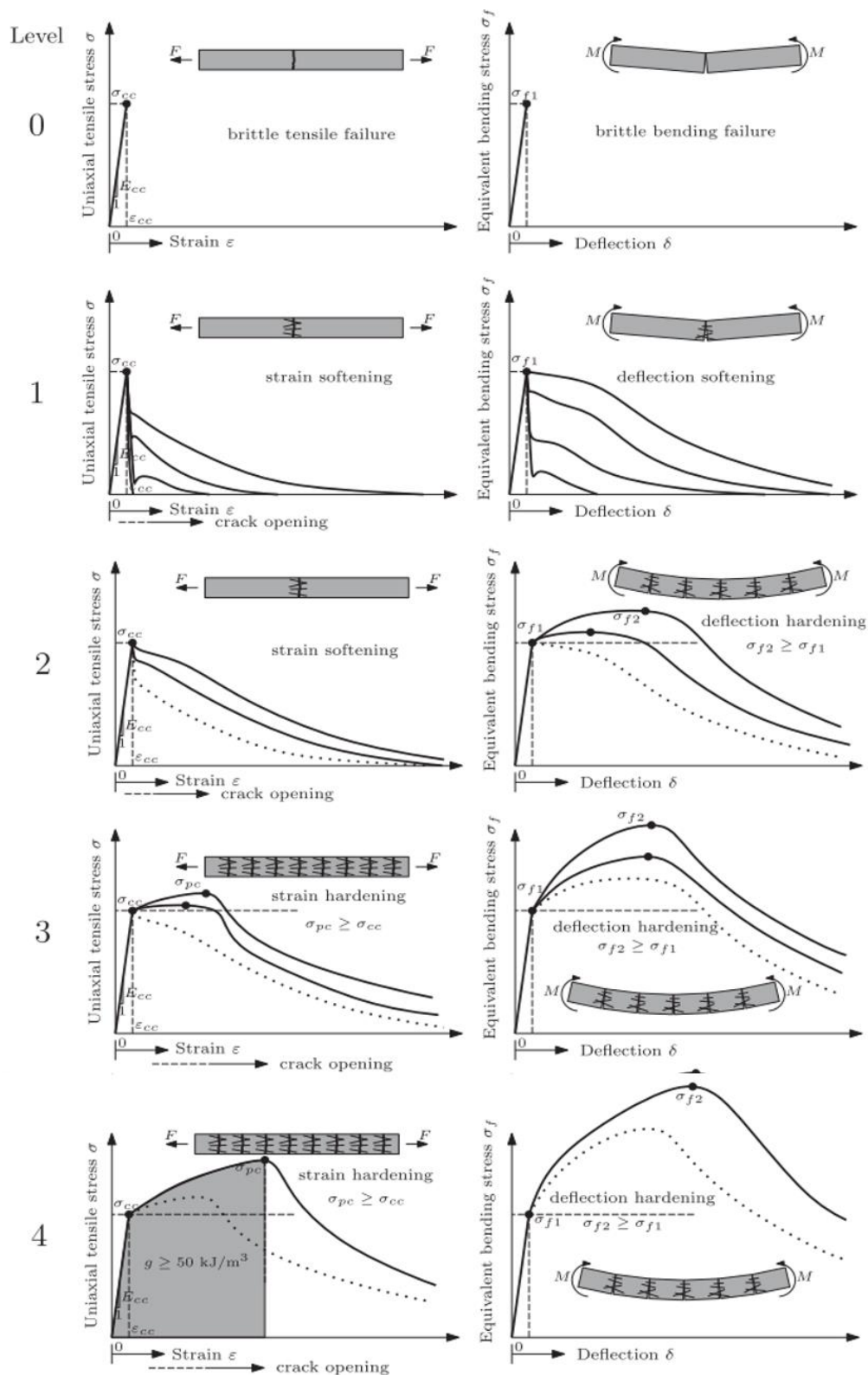
O estudo do concreto reforçado com fibras iniciou-se na década de 1960 com Romauldi e Batson. Nesse tempo, esses pesquisadores conseguiram demonstrar a efetividade do uso de fibras de aço curtas no concreto para reduzir a sua fragilidade, surgindo então o FRC - Concreto Reforçado com Fibras. Esse desenvolvimento continuou com pesquisas para a utilização de outros tipos de fibras no concreto, como as de vidro, carbono, sintéticas, naturais e combinações de fibras de diferentes materiais e tamanhos. No início dos anos de 1980, aumentou-se o interesse em desenvolver um concreto reforçado com fibras que apresentasse comportamento dúctil quando submetido à esforços de tração. Nessa época, a utilização das fibras no concreto permitiu o aumento da rigidez do material, mas sem melhora na ductilidade, sendo essa, até então, uma propriedade mecânica associada ao aço e não ao concreto (LI, 2007).

No início dos estudos do concreto reforçado com fibras não existia uma distinção entre as propriedades de resistência e rigidez do material, sendo as fibras inicialmente incorporadas no concreto para aumentar a resistência do material. Com o desenvolvimento das pesquisas, percebeu-se que o grande ganho da adição de fibras na matriz cimentícia seria o aumento da rigidez de um material que apresenta uma ruptura frágil. Inicialmente, a melhora da rigidez do compósito se dava de duas formas: ou pelo uso de um grande volume de fibras, da ordem 10% a 20% do volume de concreto, que gerava altos custos de fabricação ou, pelo uso de fibras longas e contínuas, que dificultava o processo de mistura do concreto. Tais características inviabilizavam o uso comercial desse material (LI, 2002).

Wille, El-Tawil e Naaman (2014) classificam os concretos reforçados com fibra de alto desempenho (UHP-FRC) de acordo com o seu comportamento mecânico, que é dividida em diferentes níveis. O nível 0, corresponde a um concreto não reforçado com fibras, apresentando uma ruptura frágil quando submetido à tração. No nível 1 o controle das fissuras não impacta significativamente o comportamento mecânico do material e, no nível 2, observa-se melhora no comportamento do compósito à flexão. Nos níveis 3 e 4 é que se consegue observar o comportamento dúctil do concreto reforçado com fibras, sendo que a diferença entre eles é a capacidade de absorção de energia do último nível. Os gráficos de Figura 3 mostram a evolução do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras em todos esses níveis, tanto à tração (lado esquerdo) quanto à flexão (lado direito).



Figura 3 – Classificação do FRC adotada por Wille, El-Tawil e Naaman, (2014)



Fonte: Wille, El-Tawil e Naaman, (2014)

Após essas observações sobre o comportamento dos FRC, o ECC (*Engineered Cementitious Composite*) foi desenvolvido em 1992, no Laboratório avançado de Pesquisa de Materiais de Engenharia Civil da Universidade de Michigan, grupo de pesquisa liderado pelo professor Victor Li (ZHANG, 2021). O que diferencia o ECC dos outros tipos de FRC é o fato de sua composição conter um baixo volume de fibras distribuídas aleatoriamente na sua matriz cimentícia, na ordem de 2% do volume de concreto, sendo a sua dosagem governada pelos princípios da micromecânica e da mecânica da fratura, com capacidade de deformação maior que cem vezes à de um concreto convencional (LI, 2003).

Sobre o comportamento mecânico, a principal diferença entre o ECC e o FRC convencional é o comportamento dúctil à tração após o aparecimento da primeira fissura. No FRC tradicional a capacidade de carga diminui com abertura da primeira fissura, enquanto no ECC essa capacidade de carga aumenta, apresentando uma curva tensão x deformação semelhante a de um metal. Além disso apresenta alta tenacidade à fratura e resiste à altas tensões de tração e de cisalhamento (LI; KANDA, 1998). O comportamento dúctil do ECC impacta diretamente na durabilidade do compósito, trazendo vantagens para a sua utilização. Mesmo sendo submetido à grandes deformações, as larguras das fissuras do ECC são muitas vezes menores que 60µm (ŞAHMARAN; LI, 2009).

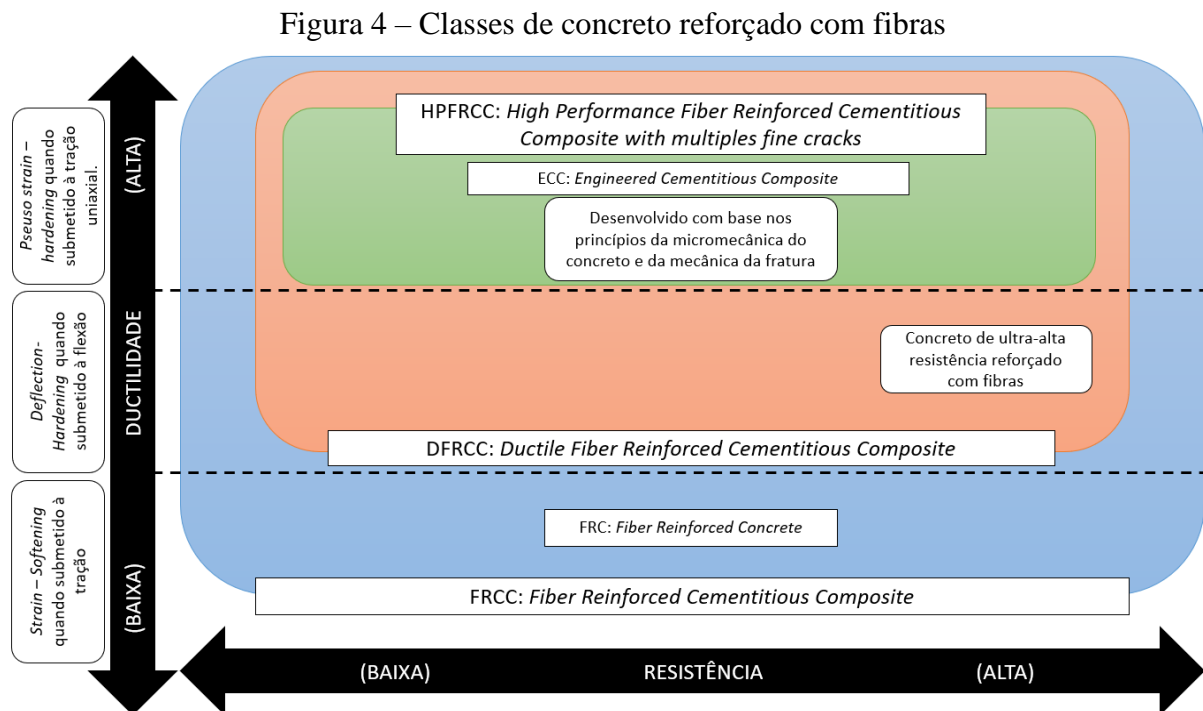
Dentre as classificações de FRC existentes, o ECC pode ser especificado como um concreto da classe HPFRCC – *High Performance Fiber Reinforced Cementitious*, por ser um compósito cimentício reforçado com fibras curtas e que apresenta um comportamento dúctil ou *pseudo-strain-hardening*<sup>3</sup> quando submetido tanto aos esforços de tração quanto à flexão, acompanhado de múltipla microfissuração (MATSUMOTO e MIHASHI, 2002).

A múltipla microfissuração melhora o seu comportamento mecânico, tendo como referência as seguintes propriedades: alta ductilidade, rigidez, energia de fratura, tensão de ruptura, capacidade de deformação sobre tração, compressão e flexão. Contrariamente, os FRC's tradicionais têm uma diminuição na tensão de tração após o aparecimento da primeira fissura, apresentando um comportamento frágil ou *strain-softening*, que é referente ao da pasta de cimento, argamassa e concretos convencionais (MATSUMOTO e MIHASHI, 2002). A

---

<sup>3</sup> Alguns autores consideram que o ECC possui um comportamento *pseudo-strain-hardening*, pois o mecanismo de deformação é diferente do apresentado por materiais metálicos após atingir a tensão de plastificação. Esse comportamento é atribuído pela alta quantidade de finos presente na matriz cimentícia e múltipla microfissuração (MATSUMOTO e MIHASHI, 2002).

Figura 4 mostra, resumidamente, a classificação dos FRC's com relação à resistência e a ductilidade do material.<sup>4</sup>



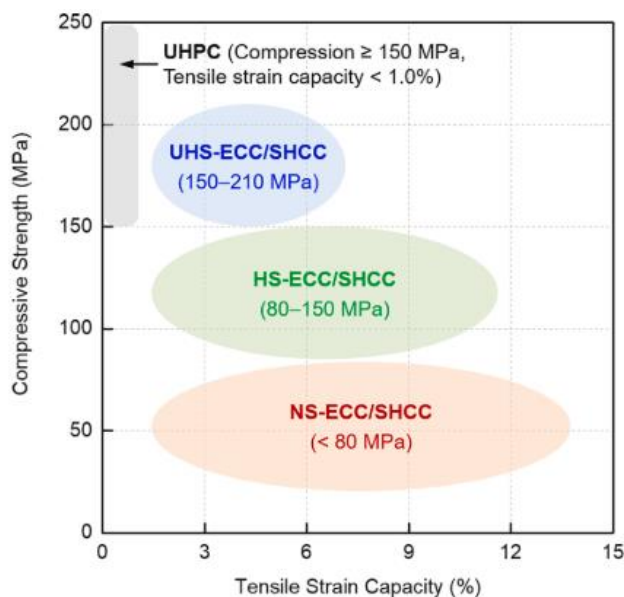
Fonte: Adaptado de Matsumoto e Mihashi (2002)

Com o avanço das pesquisas, percebe-se uma evolução nas propriedades mecânicas do ECC, em especial a resistência à compressão. As primeiras versões do ECC apresentavam uma resistência à compressão próxima a dos concretos convencionais, entre 20MPa e 80MPa, com capacidade de deformação à tração entre 2% e 10% e fissuras menores que 100  $\mu\text{m}$ . (ZHU et al., 2022). Recentemente, com o entendimento do comportamento do material, observa-se o desenvolvimento de compósitos cimentícios com alta resistência à compressão e que mantém a alta ductilidade à tração característica do ECC, formando os concretos reforçado com fibras de ultra alto desempenho, os UHPFRCC's (*Ultra-high Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite*). Tanto o UHPC (*Ultra-High Performance Concrete*) quanto o UHP-ECC (*Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composite*) geralmente apresentam uma resistência à compressão acima de 120 MPa e uma resistência à tração acima de 7 MPa (PAN et al., 2022).

<sup>4</sup> Com relação à classificação do ECC adotadas na literatura, também podem ser encontradas outras denominações, como o SHCC (*Strain Hardening Cementitious Composite*) e UHTCC (*Ultra-high Toughness Cementitious Composite*). Observa-se que todas elas estão relacionadas com a sua alta ductilidade à tração.

Esta nova concepção do ECC foi apresentada inicialmente por Ranade et al. (2011), que combinou as principais propriedades mecânicas desejáveis do concreto, a elevada resistência à compressão do UHPC e a alta ductilidade à tração do ECC. A Figura 5 mostra os diferentes tipos de ECC conforme pode ser encontrado na literatura.

Figura 5 – Classificação dos diferentes tipos de ECC



Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2022)

Para a união desses dois compósitos de características complementares, foram utilizados os princípios do empacotamento referentes ao UHPC e o da micromecânica relacionado com o ECC (RANADE et al., 2011). Na dosagem do UHP-ECC, a relação água/cimento da mistura é mantida mais baixa que o normal e vários materiais cimentícios suplementares são utilizados para garantir a alta resistência. A ductilidade tração é mantida devido à alta energia complementar resultante do processo de transferência de tensões desenvolvido pelas fibras. Com o avanço tecnológico do ECC, este material pode atender tanto aos requisitos de força quanto os de ductilidade, garantindo assim a segurança e confiabilidade das estruturas (WU et al., 2022).

## 2.2 Aspectos gerais do ECC

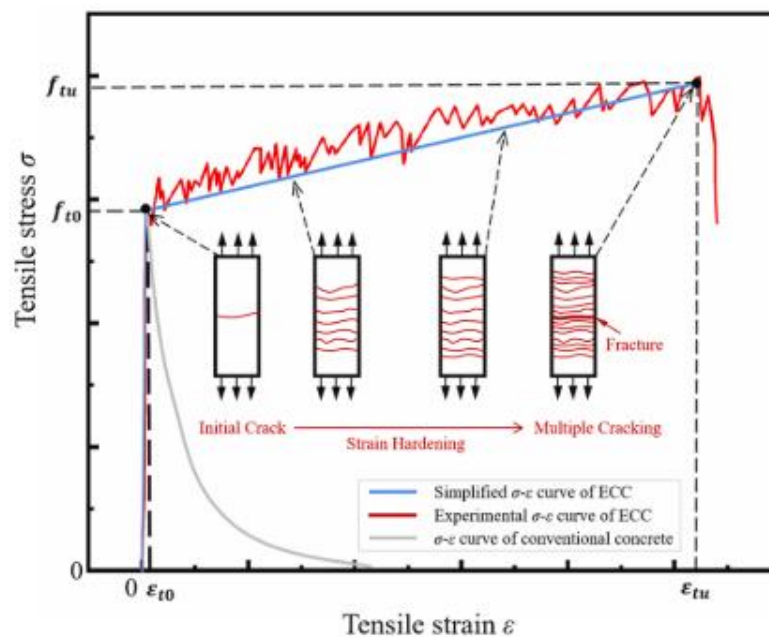
Conforme descrito no item anterior, o ECC é um concreto reforçado com fibras que apresenta comportamento dúctil à tração. Sua dosagem, com base nos princípios da

micromecânica e mecânica da fratura, permite que ele possua esse comportamento diferenciado em relação aos concretos convencionais (XU et al., 2022).

Ao longo de sua vida útil, o concreto convencional está sujeito ao aparecimento de várias fissuras, que podem comprometer a durabilidade das estruturas, levando-as a falhas prematuras. A múltipla microfissuração à tração do ECC, possibilita que os desafios relacionados com a fragilidade do concreto à tração sejam superados, garantindo assim um aumento da vida útil das estruturas (FU et al., 2022). O pequeno tamanho das fissuras permite que ocorra a redução da permeabilidade da água, da difusão de íons cloreto e do ataque de sulfato, diminuindo assim a exposição das estruturas à agentes agressivos (LI, 2019; SHOJI, OGWEZI, LI, 2022).

Sobre o comportamento mecânico do ECC, a Figura 6 mostra a curva tensão x deformação típica. Percebe-se que o seu formato é parecido com a curva tensão x deformação característica de um material metálico. A tensão de plastificação ocorre no final do comportamento elástico, quando aparece a primeira microfissura no concreto e, o aumento subsequente de carga, indica o comportamento *strain-hardening* acompanhado do acréscimo da deformação. A falha do material ocorre quando a múltipla fissuração forma o plano de fratura. Após o pico de carga, o comportamento do ECC não difere do comportamento de um concreto comum (LI, 2007).

Figura 6 – Curva de comportamento do ECC

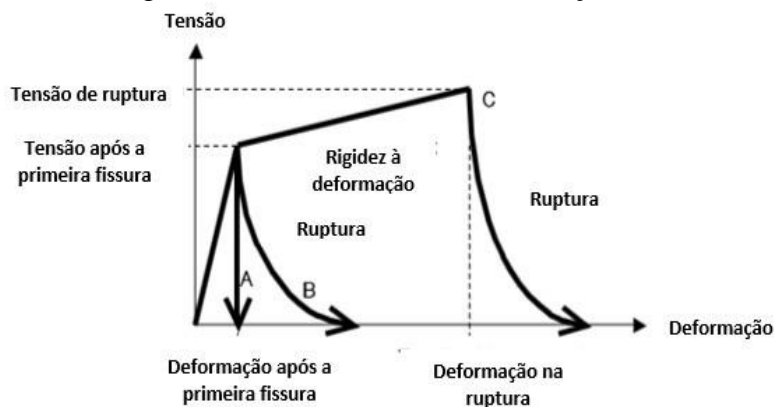


Fonte: Pan et al., (2022)

Na ocorrência do comportamento *strain-hardening* tem-se um aumento ou a manutenção da tensão após o aparecimento da primeira fissura, com as fibras desempenhando um papel fundamental para garantir esse comportamento. Elas cruzam as fissuras e permitem que ocorra a redistribuição dos esforços no compósito, com o aumento da tensão interna na matriz, e surgimento de novas fissuras, em um processo de múltipla fissuração. A deformação máxima ocorre quando as fibras são arrancadas da matriz (RIBEIRO, 2021). Portanto, a alta capacidade de deformação pós-pico de carregamento e o desenvolvimento de múltipla fissuração, resulta em um compósito cimentício de comportamento dúctil, devido ao processo de transferência de tensões entre as fibras.

No gráfico da Figura 7, é possível observar, simultaneamente, as curvas de tensão x deformação para concretos convencionais e o do tipo ECC. As letras A e B representam o comportamento frágil, com a diminuição da tensão após o aparecimento da primeira fissura. A letra C representa o comportamento dúctil do ECC, com rigidez à deformação após a ocorrência da primeira fissura até a atingir a tensão de ruptura, com elevada deformação específica (MATSUMOTO e MIHASHI, 2002).

Figura 7– Gráfico tensão x deformação do ECC



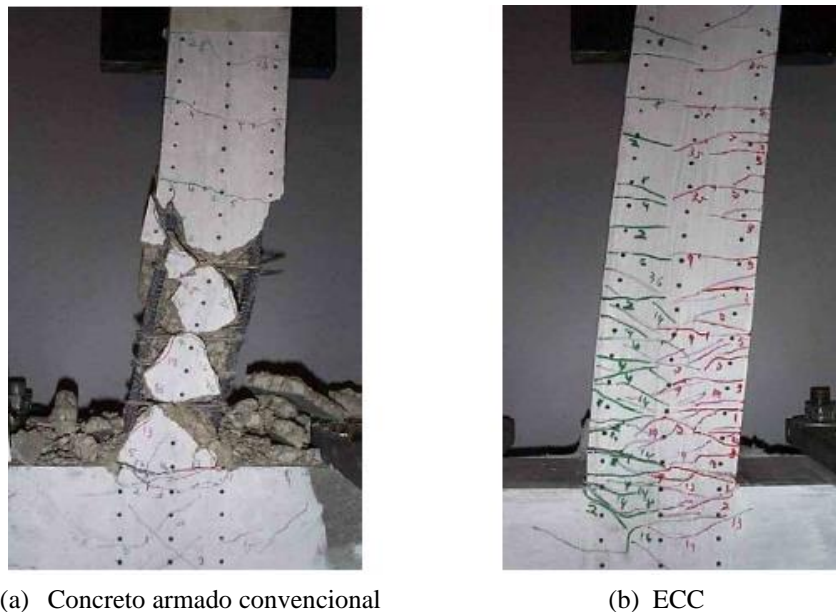
Fonte: Adaptado de Matsumoto e Mihashi (2002)

Analisando o comportamento mecânico do ECC, observa-se que alguns aspectos devem ser esclarecidos. Nos projetos de estruturas de concreto armado, o parâmetro mais importante é a resistência à compressão. Logo, o desempenho estrutural é percebido por esta propriedade. Porém, caso a falha da estrutura ocorra devido à fratura à tração, um material com alta resistência à compressão não necessariamente apresenta maior resistência estrutural (LI, 2003). Portanto, conforme abordado no item 2.1, o ECC também pode ser projetado para ter alta

resistência à compressão, entre 150 – 200 MPa porém, deve ser entendido que a propriedade mecânica mais importante e única é a sua alta ductilidade à tração (SHOJI, OGWEZI, LI, 2022). Outra característica importante sobre o ECC é que ele possui excelente capacidade resistente ao cisalhamento. Sob essas tensões, este material desenvolve múltipla fissuração, com as fissuras alinhadas perpendicularmente ao plano principal de tensão. Por causa de seu comportamento dúctil à tração a resposta ao cisalhamento também é dúctil. Como resultado prático, os elementos de concreto armado com ECC podem precisar de menor quantidade de reforço transversal (LI, 2003).

A Figura 8 mostra, visualmente, a diferença de comportamento entre o concreto convencional (armado) e o ECC submetidos a um carregamento cíclico, confirmando que a capacidade de carga e a absorção de energia de um ECC sem estribos é maior do que a de um concreto armado padrão.

Figura 8 – Pilares ensaiados submetidos à carga cíclica



Fonte: Li, (2003)

Como de costume, a implementação de qualquer nova tecnologia ou produto deve ser justificada pela sua relação custo-benefício. Devido às características do ECC, percebe-se que este material possui elevado potencial para várias aplicações, sendo desde material de reforço e recuperação de estruturas existentes até na construção de elementos de infraestrutura predial,

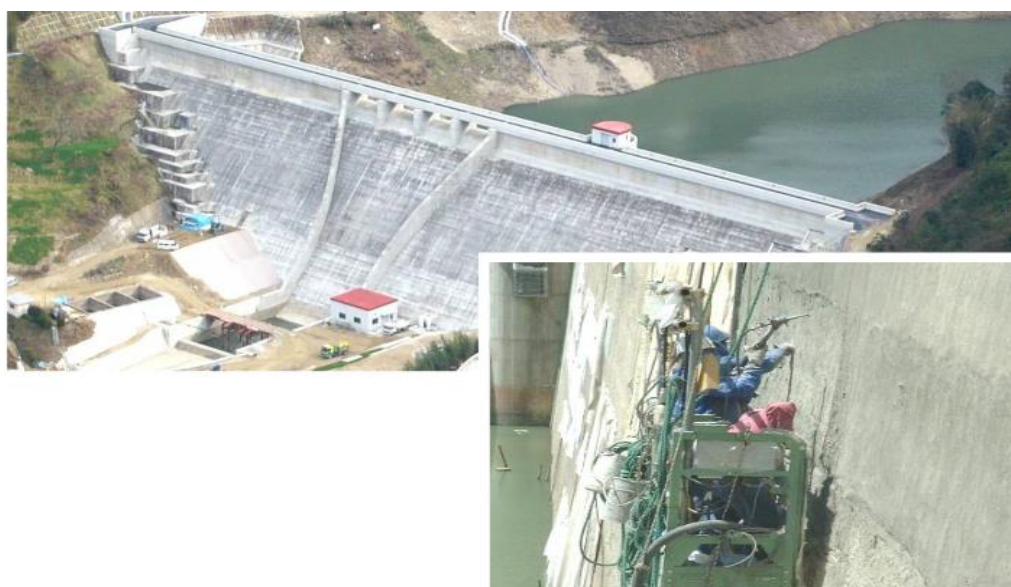


transporte, obras subterrâneas, hidráulicas e marítimas, presentes em ambientes propensos à alto grau de contaminação e sujeitas a condições de carregamento complexas.

A alta ductilidade do ECC em conjunto com a microfissuração contribuem para a melhoria do desempenho dos elementos estruturais e na diminuição dos custos de manutenção das estruturas. O ECC também mostra características consideradas como únicas na proteção de estruturas de concreto armado. Assim, espera-se que este material apresente uma maior vida útil devido à sua capacidade de proteção contra a degradação do concreto induzida pela corrosão da armadura e outras ações ambientais (ROKUGO et al., 2009).

A recuperação de estruturas é um dos exemplos mais correntes para a aplicação do ECC, e a microfissuração foi a característica que permitiu o seu uso para *retrofit* da barragem de concreto gravitacional de Mitaka, na província de Hiroshima, no Japão. Sua superfície de concreto foi severamente danificada pela abrasão da água, existindo preocupações por causa das rachaduras e lascamento do concreto (*spalling*) na superfície da barragem. Em 2003, além da altura dessa barragem ter sido elevada de 33m para 44m, uma superfície de 500m<sup>2</sup>, severamente danificada, foi protegida com a pulverização de uma camada de 30mm de ECC (KOJIMA, 2004, apud KUNIEDA e ROKUGO, 2006; LI, 2019). A Figura 9 mostra como foi a recuperação dessa barragem.

Figura 9 – Recuperação da barragem Mitaka -Japão

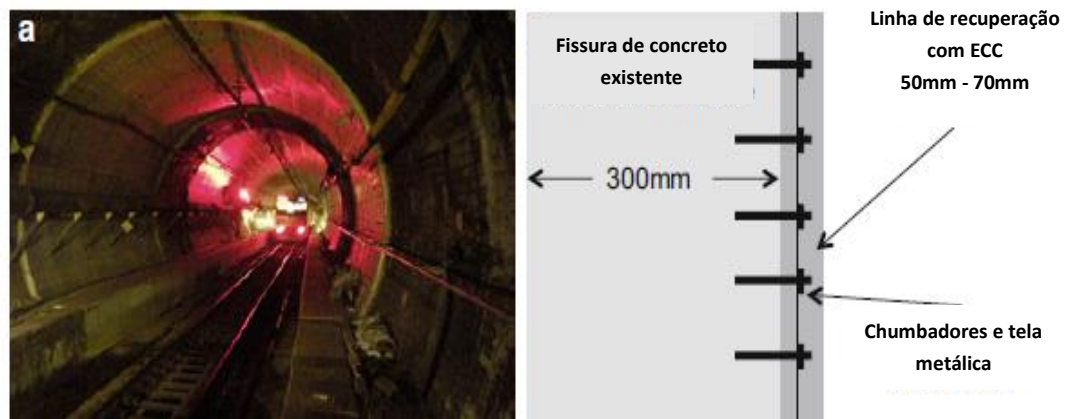


Fonte: Li, (2019)



Para a construção de túneis, necessita-se utilizar materiais que consigam se adequar às superfícies irregulares de seu contorno, sem que ocorra uma ruptura frágil. Portanto, torna-se necessário um material que possa ser pulverizado, que apresente alta deformabilidade quando submetido à tração e que tenha baixa fissuração. O ECC, por apresentar essas propriedades, é um material que pode ser utilizado para recuperação de túneis. A Figura 10 mostra o *retôfit* do túnel Ten-Nou JR, após o terremoto de Niigagta Chuetsu, em 2004. O túnel ferroviário de 8,6 m de diâmetro sofria de rachaduras e superfície e lascamento no forro de concreto. A espessura do forro de ECC foi 50-70 mm, cobrindo 37m de comprimento de túnel e superfície de 500m<sup>2</sup>, totalizando 25m<sup>3</sup> de ECC (LI, 2019).

Figura 10 – Recuperação do túnel Ten-Nou JR - Japão



Fonte: Adaptada de Li (2019)

Entre os anos de 2004-2005 aconteceu uma das primeiras aplicações do ECC para construção, que foi a ponte metálica estaiada Mihara, em Hokkaido, no Japão, com o pavimento composto de um tabuleiro metálico e ECC, conforme pode ser visto na Figura 11. O uso desses dois materiais, em conjunto, resultou na redução de 40% do peso próprio e 50% dos custos. A escolha do ECC ocorreu para melhorar a rigidez e aumentar a resistência do tabuleiro. Foi produzido um total de 800m<sup>3</sup> de ECC, sendo concretada uma área de tabuleiro de aproximadamente 200m<sup>2</sup> com uma espessura de 38mm. (KUNIEDA e ROKUGO, 2006; LI, 2019)

Figura 11 – Ponte estaiada Mihara - Japão



Fonte: Li (2019)

Com isso observa-se que o ECC pode ser aplicado em condições distintas, tanto para novas estruturas quanto para recuperação e reforço de estruturas existentes. Wu et al. (2022) listou algumas aplicações do UHP-ECC, relacionando com as suas vantagens, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Aplicações do UHP-ECC

<b>Aplicação</b>	<b>Vantagem</b>
Estruturas de concreto com formas permanentes	Flexibilidade na montagem e ausência de reforço metálico.
Recuperação de estruturas de concreto com barras de aço corroídas	Recuperação da capacidade de carga da estrutura.
Regiões de ligação de pórtico sem reforço metálico	Ausência de barras de aço e capacidade de suporte a cargas oriundas de sismo
Viga de UHP-ECC	Maior capacidade de carga à flexão e alta ductilidade e maior durabilidade em ambientes agressivos.
Reforço de estruturas de concreto armado	Prevenção da corrosão nas barras de aço.

Fonte: Adaptado de Wu et al. (2022)

A falta de normas técnicas específicas sobre este material e dados sobre desempenho das estruturas são limitações existentes para a aplicação mais efetiva do ECC. De acordo com Rokugo (2018), o caminho do progresso da utilização de novos compósitos cimentícios passa pelo desenvolvimento de pesquisas para o estabelecimento de métodos de produção, construção, avaliação de desempenho e recomendações de projeto. Posteriormente, devem ser avaliadas a performance do material com aplicação em casos reais.

Neste cenário, embora o custo inicial de fabricação do ECC seja maior do que o concreto convencional, devido à sua composição, caracterizada pelo elevado consumo de cimento e

ausência de agregado graúdo, os benefícios obtidos em longo prazo justificam a utilização desta tecnologia. Além das vantagens relacionadas com as suas características físicas e mecânicas, a utilização do ECC apresenta outros benefícios como o aumento da segurança e da durabilidade das estruturas e diminuição dos custos de manutenção das construções. Porém, deve-se ter em mente sempre a necessidade de aperfeiçoar o uso dos materiais utilizados na dosagem do ECC para diminuir o impacto ambiental e os custos de fabricação.

### 2.3 Micromecânica do ECC

Para os FRC's, a extensão das fissuras e a interação entre a matriz cimentícia e as fibras representam os principais mecanismos de deformação, enquanto as propriedades macroscópicas do material se relacionam com os princípios da micromecânica e com o comportamento estrutural requerido. Portanto, a partir da otimização da microestrutura do compósito, alcança-se a alta ductilidade à tração requerida.

Para se atingir tal comportamento, são analisadas as propriedades da matriz cimentícia, (módulo de elasticidade, porosidade, distribuição e abertura das fissuras e energia de fratura), as propriedades da fibra (módulo de elasticidade, resistência à tração, comprimento, diâmetro e forma) e a interface fibra/matriz. Todos estes parâmetros são influenciados pela escolha dos materiais, como o tipo de cimento, adições, aditivos, agregados, tipo e volume de fibras e o processo de mistura (LI, 1994).

Para a obtenção do comportamento *strain-hardening* do ECC existem dois critérios: o da resistência, relacionado com a tensão de tração quando começa a ruptura, a partir de uma fissura pré-existente; e o da energia, que descreve como ocorre a abertura e a propagação das fissuras, com o objetivo de preservar a integridade da ligação das fibras com a matriz cimentícia.

O primeiro critério está relacionado com o início da fissuração, onde a tensão tração de ruptura da matriz cimentícia não deve exceder a tensão de transferência de carga das fibras. Caso esse critério não seja atendido o material terá um comportamento frágil. O segundo critério, também conhecido como *steady state cracking*, controla o processo de propagação das fissuras. Atingido esse critério, a fissura inicial se propagará com uma tensão constante e igual à tensão de propagação estável das fibras, exceto na ponta da fissura. Logo, o balanço energético na matriz fornecerá uma estimativa do valor dessa tensão.

Nesses dois critérios a ligação fibra/matriz tem um papel importante, sendo que o comportamento dúctil do ECC está relacionado com a forma da curva tensão x abertura de fissura ( $\sigma$  x  $\delta$ ). Conforme Li (2019), quando um desses critérios não é atendido a matriz cimentícia tem um comportamento *strain-softening*, correspondente ao de um FRC tradicional.

Um requisito fundamental para que ocorra o comportamento *strain-hardening* e múltipla fissuração na matriz cimentícia é a propagação estável das fissuras. Utilizando a propriedade do caminho independente da integral J e subtraindo a tensão remota  $\sigma_{SS}$ , para a obtenção da propagação estável da fissura e, com base nas Figuras 12, e 13, conforme Li (1994) tem-se:

$$J_{TIP} = \sigma_{SS}\delta_{SS} - \int_0^{\delta_{SS}} \sigma(\delta)d\delta \quad (1)$$

$$J_{TIP} \leq \sigma_0\delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta)d\delta \equiv J'_b \quad (2)$$

$$J_{TIP} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (3)$$

$$\sigma_c \leq \sigma_0 \quad (4)$$

$\sigma$ : Tensão de transferência da fibra (*crack bridging stress*);

$\sigma_c$ : Tensão de abertura da primeira fissura;

$\sigma_{SS}$ : Tensão de propagação estável da fissura (*steady-state cracking*);

$\sigma_0$ : Máxima tensão de transferência das fibras;

$\delta$ : Abertura da fissura (*crack opening*);

$\delta_0$ : Abertura da fissura para a máxima tensão  $\sigma_0$ ;

$\delta_{SS}$ : Abertura da fissura relativa à tensão  $\sigma_{SS}$ ;

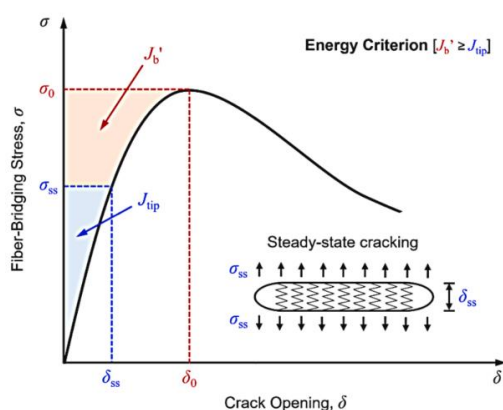
$J'_b$ : Energia complementar da curva  $\sigma$  x  $\delta$ ;

$J_{TIP}$ : Tenacidade na ponta da trinca;

$K_m$ : Resistência à fratura da matriz;

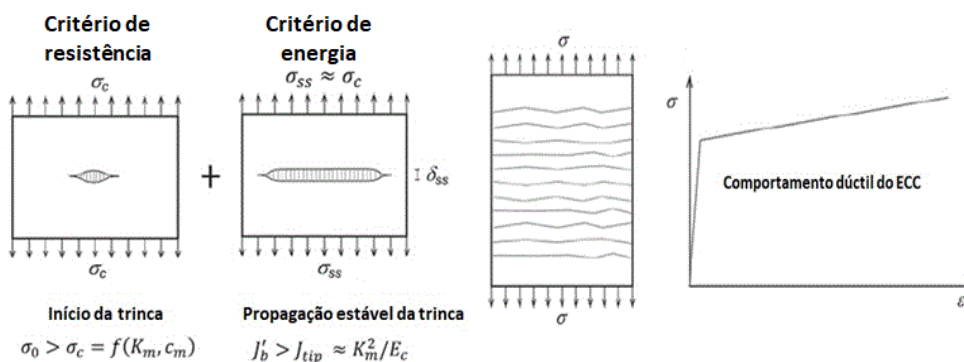
$E_c$ : Módulo de elasticidade do concreto;

Figura 12 – Curva tensão x abertura de fissura para material com comportamento dúctil



Fonte: Adaptado de (ZHU et al., 2022)

Figura 13 – Micromecânica do ECC



Fonte: Adaptado de Li (2019)

As Equações 1, 2 e 3 representam o critério de energia, que descreve como ocorre a propagação da fissura; enquanto a Equação 4 representa o critério de resistência, indicando que a tensão de ruptura da matriz cimentícia (incluindo a tensão associada com a primeira fissura) não deve exceder a tensão de transferência das fibras.

A Equação 2 descreve o balanço energético necessário para garantir a propagação estável da fissura. O lado direito dessa equação representa a energia complementar ( $J'_b$ ) da curva tensão x abertura de fissura ( $\sigma \times \delta$ ), destacada pela região em laranja na Figura 12. Segundo Li (2019), a energia complementar é uma função da quantidade, das propriedades físicas, da orientação das fibras na matriz cimentícia e da interface fibra/matriz. Logo, para que o critério de energia ocorra, basta que esta equação seja atendida.

Portanto, o processo de transferência de carga entre as fibras e a matriz cimentícia é o que define essa relação. Analizando o critério de resistência, à medida que a carga de tração Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

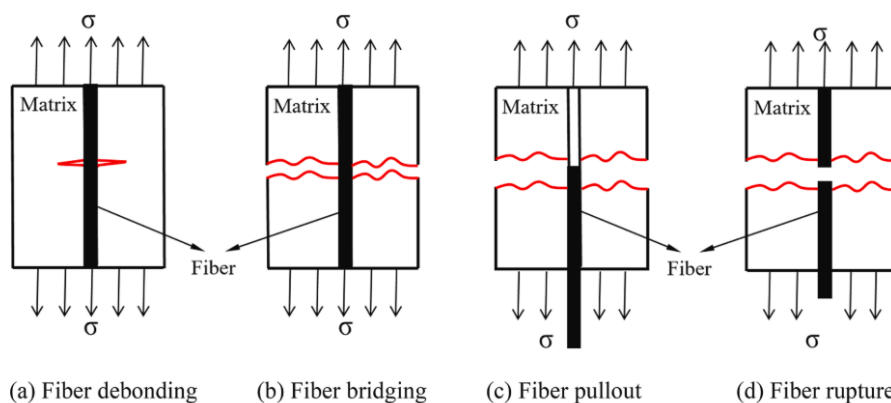
aumenta, novas fissuras iniciarão a partir de fissuras existentes. Se a tensão necessária para iniciar uma nova fissura ( $\sigma_c$ ) exceder tensão de transferência de carga da fibra ( $\sigma_0$ ) de fissuras pré-existent, ocorrerá a fratura (LI, 2019).

O atendimento deste critério pode ser interpretado como o potencial que o compósito possui de não perder a sua capacidade de carga abruptamente (ZHANG et al., 2020). Quando essa relação não é atendida na ocorrência da primeira fissura, somente uma única fissura é formada e, conseqüentemente, o compósito não apresentará o comportamento dúctil característico do ECC.

Conforme a Figura 13, a múltipla fissuração se inicia quando se atinge a tensão de abertura da primeira fissura ( $\sigma_c$ ) que se desenvolvem até uma tensão de propagação estável das fissuras ( $\sigma_{ss}$ ) e, quando os dois critérios são atendidos, prevalece o comportamento *strain-hardening* do ECC. A tensão para que ocorra a microfissuração da matriz é uma função da resistência da matriz ( $K_m$ ) e do tamanho da fissura ( $c$ ), que também pode depender da capacidade de transferência de carga da fibra. Para este caso, a tensão de transferência de carga da fibra ( $\sigma_0$ ) deve exceder a tensão de início da fissuração ( $\sigma_c$ ).

Resumindo, quando uma carga atua, a tensão na matriz cimentícia é transferida para as fibras através da interface matriz/fibra (Figura 14 (a)), até o aparecimento da primeira fissura. À medida que essa tensão aumenta, o tamanho da fissura também aumenta e inicia-se o processo de transferência de tensões das fibras (Figura 14(b)). Nessa etapa pode ocorrer ou o arrancamento das fibras, caso a resistência de aderência entre a matriz cimentícia e a fibra seja baixa (Figura 14(c)), ou a ruptura das fibras, caso essa resistência de aderência seja suficientemente alta (Figura 14(d)).

Figura 14 – Evolução do comportamento das fibras

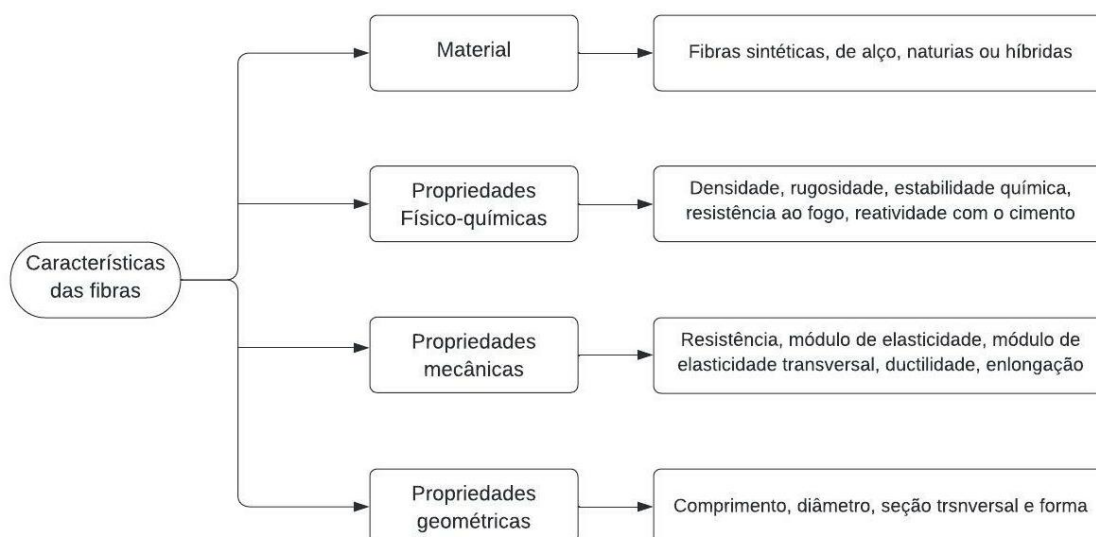


Fonte: Adaptado de Pan et al. (2022)

Analisando os conceitos descritos da micromecânica para a dosagem do ECC, observa-se que as fibras apresentam um papel fundamental na busca das propriedades mecânicas que caracterizam este material. A adição de um baixo volume de fibras, distribuídas aleatoriamente podem melhorar o comportamento frágil do concreto, com repercussão na ductilidade e na resistência à fadiga e ao impacto, por exemplo.

Portanto, entende-se que a performance do concreto reforçado com fibras está diretamente relacionada com várias características das fibras como: tipo, propriedades mecânicas, geometria, tamanho, volume e a interface fibra e matriz cimentícia. Consequentemente, o volume de fibras utilizado e o material escolhido também impactará no custo final do material. A Figura 15 detalha as principais características das fibras.

Figura 15 – Características das fibras



Fonte: Adaptado de Naaman (2009)

De acordo com Zhang et al. (2020a), para se elevar o valor da tensão de transferência de carga da fibra ( $\sigma_0$ ), algumas opções podem ser adotadas, como: aumentar o teor de fibras na dosagem, melhorar a ligação da fibra com a matriz cimentícia ou utilizar uma fibra com alta resistência. Porém essas ações podem trazer consequências indesejáveis. Com o aumento do teor de fibras há a diminuição da trabalhabilidade, aumento na dificuldade da dispersão e homogeneização das fibras além do impacto no custo de produção do ECC. Analisando a energia complementar ( $J'_b$ ), ela pode ser incrementada com a utilização de fibras com baixo módulo e alta razão comprimento/diâmetro. Porém um baixo módulo da fibra pode dificultar o

controle da abertura das fissuras. O Quadro 2 resume como as propriedades das fibras podem impactar esses dois parâmetros.

Quadro 2 - Relação das propriedades das fibras com os parâmetros  $\sigma_0$  e  $J'_b$

Parâmetro	Propriedade da fibra	Desvantagem
$\sigma_0$	Alto volume	Redução da trabalhabilidade, dispersão das fibras e aumento do custo de produção do ECC.
	Interface fibra/matriz	Aumento da tensão de ruptura da fibra, pode necessitar de tratamento adicional para as fibras.
	Alta resistência	Aumento do custo de produção do ECC.
$J'_b$	Baixo módulo	Aumento da largura da fissura.
	Relação comprimento/diâmetro	Redução da trabalhabilidade, dispersão das fibras e aumento da tensão ruptura da fibra.
	Interface fibra/matriz	Aumento da tensão de ruptura da fibra, pode necessitar de tratamento adicional para as fibras.

Fonte: Adaptado de Zhang et al., (2020a)

Segundo Wu et al. (2022), a fibra de PE (polietileno) é a mais utilizada na dosagem do ECC, devido à sua alta resistência à tração e ao elevado módulo de elasticidade. No teste de tração uniaxial, essa fibra pode ser retirada da matriz sem quebrar, o que faz com que ela apresente alta capacidade de absorção de energia e alta tensão de tração. O baixo teor de fibras adotado garante a sua dispersão uniforme além da redução de custos.

Além das fibras de PE, na composição do ECC são utilizados outros tipos de fibras sintéticas, como as PVA (polivinil álcool) ou PP (polipropileno). Com o desenvolvimento das propriedades mecânicas do ECC, as fibras de aço passaram a ser incorporadas em sua composição, sendo utilizada em conjunto com fibras sintéticas, com o objetivo de avaliar a sinergia do efeito híbrido das diferentes propriedades mecânicas das fibras no comportamento dúctil do ECC.

Zhang et al. (2020a) descreve como as características da fibra podem impactar no comportamento mecânico e no processo de produção ECC e o Quadro 3 resume essas principais características.

**Geometria:** Um fator de forma das fibras alto, que é a relação entre o comprimento e o diâmetro da circunferência com área equivalente a seção transversal, reduz a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e dificulta o processo de dispersão das fibras. A reologia da mistura impacta na escolha do diâmetro da fibra.



**Resistência e módulo de elasticidade:** A resistência à tração está ligada com a máxima tensão de transferência ( $\sigma_0$ ) e a tensão de ruptura das fibras, enquanto o módulo de elasticidade interfere na largura das fissuras.

**Interface fibra/matriz:** É o fundamento para garantir o desempenho mecânico do ECC. Caso a tensão de ligação entre a fibra e a matriz cimentícia não seja suficiente, as fibras não conseguem fazer o processo de transferência de tensões e, conseqüentemente, deslizam facilmente, levando à ocorrência de grandes fissuras na matriz cimentícia. Porém, se essa tensão de ligação for muito alta, a fibra tende a quebrar, levando à perda na capacidade de absorção de energia.

**Densidade:** A densidade da fibra não é um fator crítico dado que a fração de volume de fibra utilizada no ECC é pequena, porém ela é um fator determinante para o custo de produção e viabilidade econômica do compósito.

Quadro 3 - Características necessárias das fibras para compor o ECC

Propriedade	Característica
Volume	2% ou menos
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	20 - 50
Comprimento (mm)	6 - 12
Resistência à tração (MPa)	$\geq 800$
Módulo de Elasticidade (GPa)	$\geq 10$
Alongamento (%)	$\geq 3$
Outras	Resistência à corrosão e estabilidade química

Fonte Zhang et al., 2020a

Sobre as pesquisas desenvolvidas no LEME-UFRGS, todas elas utilizaram a fibra de PP de alto desempenho, por ser um material comercialmente disponível no Brasil, em substituição às fibras de PVA. A análise da viabilidade de substituição do tipo de fibra justificou-se pelo custo de aquisição deste material, o que pode inviabilizar futuras aplicações práticas do ECC.

O trabalho pioneiro no LEME-UFRGS foi o desenvolvido por Garcez (2009), que justamente avaliou a possibilidade de utilização de fibras de PP no lugar das fibras de PVA na manutenção das propriedades mecânicas características do ECC. Como resultado ela observou que as fibras de PP foram capazes de garantir o comportamento dúctil do ECC através do processo de múltipla fissuração.

---

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

Com base em todos esses fatos, percebe-se a importância das fibras e como elas podem influenciar no comportamento mecânico do ECC e como a interface fibra/matriz cimentícia afeta nas propriedades mecânicas, na resistência à fratura, resistência à tração e flexão, na capacidade de deformação, na trabalhabilidade, na resistência à compressão e durabilidade do concreto (LIN, KANDA, LI, 1999; YANG et al., 2008; ZHANG et al., 2020a). Observa-se também que a sua escolha é impulsionada tanto por pelo custo quanto pela disponibilidade e propriedades do material.

Com isso, Li (2019) e Zhang et al. (2020a) afirmam que o maior desafio na utilização da fibra na composição do ECC está na adaptação adequada das suas propriedades, que vão desde as suas características mecânicas e físicas até a durabilidade, sustentabilidade e custo de execução do ECC.

#### **2.4 Sustentabilidade na indústria do concreto**

O concreto é considerado o material mais importante da construção civil, porém, durante o processo de produção do cimento Portland, elevada quantidade de CO<sub>2</sub> é emitida na atmosfera, que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa e consequente aquecimento global. Estima-se que para cada tonelada produzida de cimento é emitida pelo menos uma tonelada de CO<sub>2</sub> na atmosfera (MEYER, 2009). Além disso, uma grande quantidade de energia e água são necessárias para a produção de cimento. As previsões atuais preveem um aumento no consumo de cimento em todo o mundo, do atual número anual de cerca de 4,2 bilhões de toneladas para cerca de 5,2 bilhões de toneladas até 2050 (EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY, 2019).

A emissão de CO<sub>2</sub> devido à produção do cimento ocorre de duas formas, sendo a primeira devido às reações químicas necessárias para a produção do clínquer, com a estimativa que somente esse processo contribua com cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> antropogênicas, excluindo a mudança de uso da terra. A segunda é devido à combustão de combustíveis fósseis durante o processo de aquecimento. Com isso as emissões totais de cimento poderiam, portanto, contribuir com até 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (ANDREW, 2018).

Diante desse cenário de alta de consumo de cimento, Ferrara (2019) afirma que a sustentabilidade na construção civil pode ser alcançada pela combinação de ações voltadas tanto para o desenvolvimento de concretos e cimentos ambientalmente sustentáveis, quanto para o desenvolvimento de novos conceitos de materiais, de melhores processos de construção

e produção. Com isso, destaca-se também a necessidade de atualizações das normas técnicas para que incorporem esses avanços e assim, permitam o uso dessas novas tecnologias.

Sob a ótica do desenvolvimento de materiais que causam menor impacto ambiental, estes podem ser obtidos pela incorporação de material cimentício suplementar (MCS) para a redução da demanda do uso de cimento para produção de concreto. O MCS pode ser natural ou subprodutos de algum processo industrial, como a cinza volante, a escória granulada de alto forno (GGBF) ou a cinza de casa de arroz (CCA), por exemplo. Isto também é válido para a substituição de agregados naturais por reciclados pois, esta ação, diminui a demanda de novas jazidas de areia. Um ponto de atenção sobre essas substituições é que elas devem ser cuidadosamente consideradas, com avaliação criteriosa das propriedades físicas, químicas e mecânica dos constituintes.

Segundo Li, Lepech e Wang (2004), torna-se imprescindível entender como se processa o impacto ambiental do concreto, de forma a otimizar o desempenho geral de um novo material, por meio do projeto e da aplicação inteligente. A durabilidade limitada do concreto armado é responsável por grandes quantidades de reparos na infraestrutura e, o uso de tecnologias alternativas, tendem a melhorar o desempenho das novas construções. Apesar do alto consumo de cimento, o ECC e o UHP-ECC, apresentam a alta durabilidade como sua maior vantagem, quando comparado com concretos convencionais.

A preocupação com a durabilidade, tanto as novas quanto as existentes, são fatores que estão relacionados com a deterioração das estruturas e os aspectos ambientais da construção. Para tanto, novos compósitos cimentícios, que mitiguem esses efeitos, precisam ser desenvolvidos. Segundo Ferrara (2019), um dos maiores problemas da construção civil está relacionado com a durabilidade das estruturas.

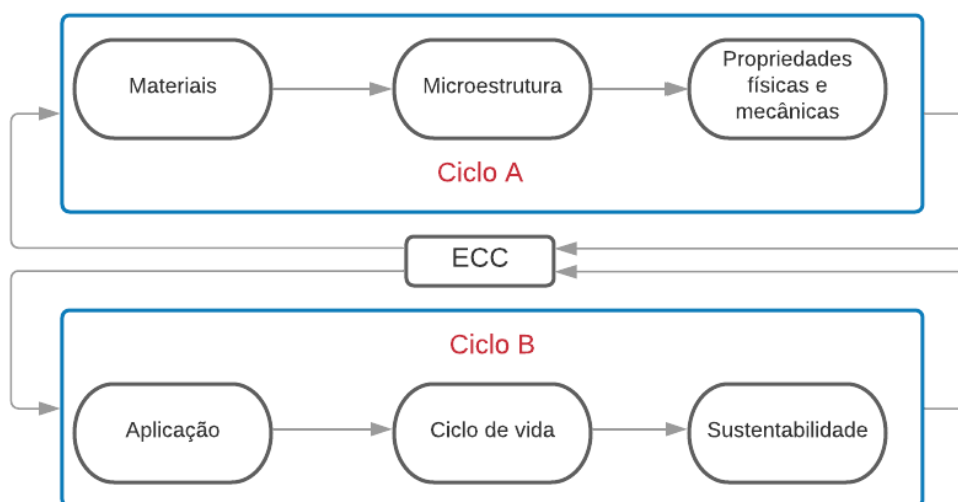
O uso do ECC e o UHP-ECC nessas condições se justifica pela melhora da operacionalidade e da durabilidade das estruturas, devido a elevada ductilidade à tração e a microfissuração, que o torna resistente ao ataque dos principais agentes de degradação do concreto, como os cloretos, ácidos, sulfatos que afetam a vida útil das estruturas. (ŞAHMARAN; LI, 2009).

Contudo, o atual conceito de sustentabilidade na construção civil vai além da produção de materiais que causam menor impacto ambiental. Deve-se pensar no ciclo de vida da construção como um todo, partindo do desenvolvimento do material, projeto, construção até o uso, operação e manutenção e gerenciamento do fim de vida das construções, especialmente

para as obras de infraestrutura urbana. Melhorar o desempenho das edificações, com o aumento da vida útil e redução da necessidade de manutenção, torna-se imprescindível.

De acordo com Li, Lepech e Wang (2004), Lepech et al. (2008) e Li (2019) a insustentabilidade dos atuais sistemas de infraestrutura leva à necessidade de substituir o uso do concreto convencional por compósitos cimentícios avançados, que apresentem desempenho mecânico superior, trazendo impactos positivos para o ciclo de vida do sistema. A Figura 16 mostra como funciona o ciclo de vida do ECC, que relaciona o desenvolvimento da dosagem com o seu uso.

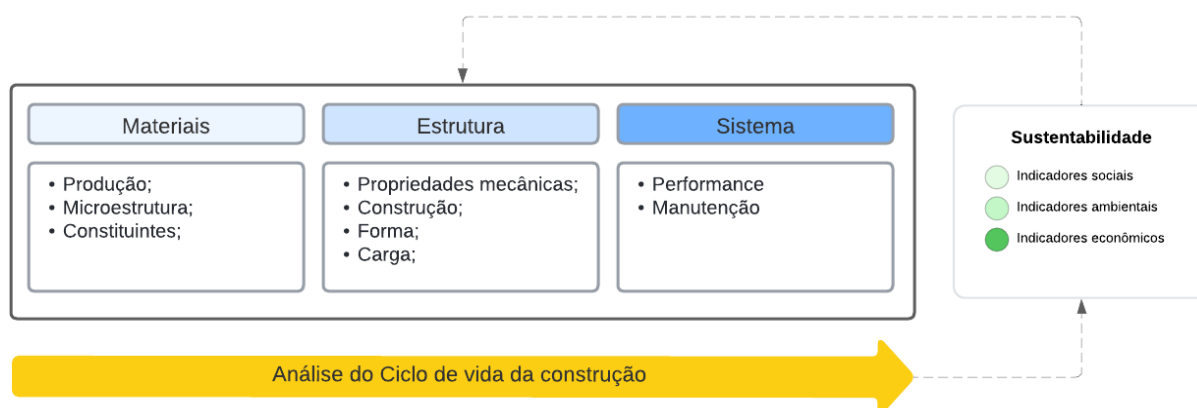
Figura 16 – Análise do ciclo de vida do ECC



Fonte: Adaptado de Li (2019) e Lepech et al. (2008)

O desenvolvimento de materiais e a avaliação do desempenho estrutural gera uma integração entre os processos de engenharia e a análise do ciclo de vida da construção. A concepção do ECC relaciona a microestrutura e propriedades dos materiais, performance e ciclo de vida, sendo que este último leva em consideração os indicadores sociais, ambientais e econômicos (LI, LEPECH e WANG, 2004). Essa integração enfatiza as interdependências das diferentes fases do ciclo de vida de uma estrutura e suas contribuições para os indicadores de sustentabilidade e incentiva uma abordagem mais holística de uma estrutura (LI, 2019). A Figura 17 mostra como funciona essa relação sustentável.

Figura 17 – Sistema de construção sustentável



Fonte: Adaptado de Li (2019) e Lepech et al. (2008)

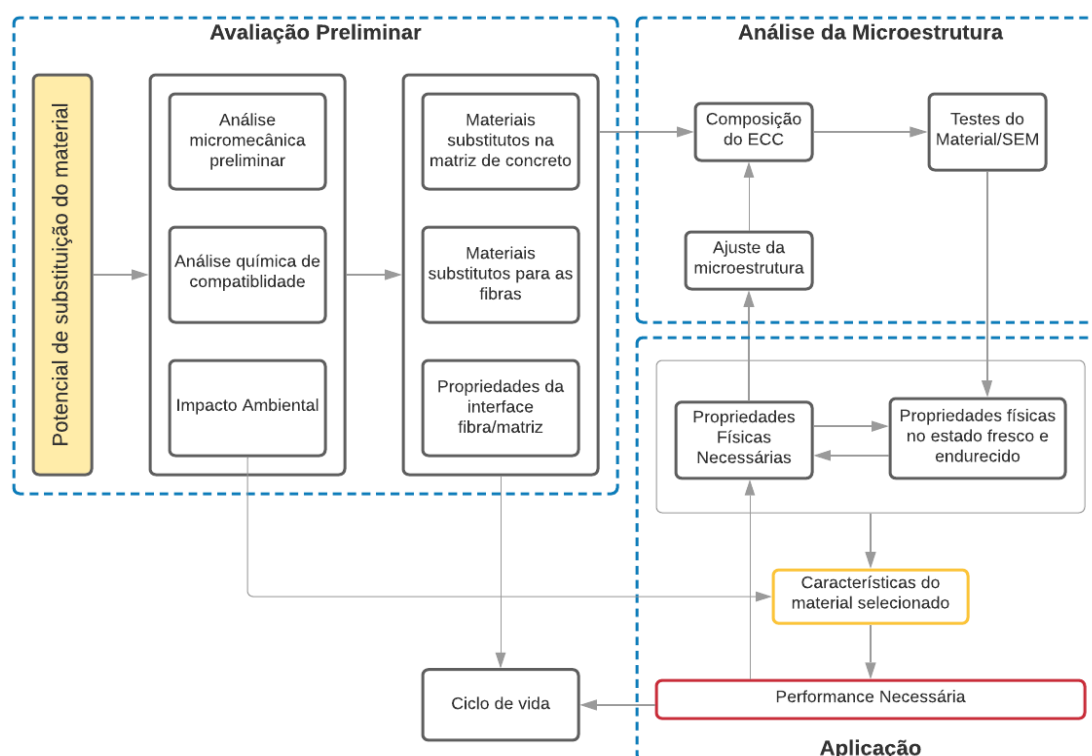
Com isso, entende-se que negligenciar a relação existente entre o desenvolvimento de novos materiais, o projeto estrutural e a necessidade de edificações mais sustentáveis pode levar construção de estruturas como menor vida útil, com maior custo de manutenção e com menor eficiência ambiental (LEPECH et al., 2008).

Nessa urgência de diminuir o impacto ambiental do processo produtivo do concreto, o LEME – UFRGS, desde 2015 trabalha com o desenvolvimento de misturas de ECC com o uso de materiais locais e que gerem menor impacto ambiental, com destaque para as pesquisas desenvolvidas por Righi (2015) e Costa (2015), que foram pioneiras nessa abordagem.

Na primeira pesquisa verificou-se a viabilidade de utilização de CCA como substituição parcial do cimento Portland na dosagem do ECC, enquanto o segundo estudo foi sobre a durabilidade desse compósito produzido com CCA e fibras de polipropileno, estando ambos os trabalhos consoantes com o princípio da sustentabilidade.

Concluindo, o processo de desenvolvimento de concretos que gerem menor impacto ambiental passa por diversas etapas, sendo parte de um modelo de infraestrutura sustentável que foi inicialmente proposto por Keoleian et al. (2006), que integra a análise do ciclo de vida do material. Esta representação detalha os processos de engenharia, partindo da avaliação do material e a análise da microestrutura até a aplicação e desempenho estrutural, que se relacionam com a análise do ciclo de vida. A Figura 18 resume esquematicamente como deve ser analisado e quais parâmetros devem ser levados em consideração para a elaboração de uma matriz cimentícia do ECC que produza menor impacto ambiental.

Figura 18 – Matriz de desenvolvimento de ECC de menor impacto ambiental



Fonte: Adaptado de Keoleian et al. (2006) e Lepech et al. (2008)

## 2.5 Material Cimentício Suplementar (MCS)

O uso pozolanas, adições ou material cimentício suplementar (MCS) é uma tendência cada vez maior no desenvolvimento da tecnologia do concreto. Essas adições são resíduos de processos industriais e apresentam características necessárias para melhorar o desempenho de materiais à base de cimento Portland.

Esses materiais melhoram a trabalhabilidade do concreto no estado fresco como também garantem a durabilidade necessária do concreto em condições de serviço, porém a grande variabilidade da composição química e a presença de substâncias indesejadas, como os metais pesados, tornam-se pontos de atenção para a sua utilização (BELIE; SOUTSOS, GRUYAERT, 2018). Para efeitos de classificação, eles são divididos em três grupos:

- Materiais pozolânicos, como a Cinza de Casca de Arroz (CCA);
- Materiais cimentícios, como a escória de alto forno;
- Materiais não reativos, como o filler de calcário;

Sobre o processo histórico, a expressão pozolona surgiu originalmente na Itália, para indicar a existência de um tufo vulcânico perto da região de Napoli. Com o passar do tempo, este termo passou a ser utilizado como indicativo de materiais que apresentam capacidade de reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , na presença de água, formando produtos hidratados com capacidade ligante, quando em temperatura ambiente (MASSAZZA, F.; COSTA, 1980).

Neville (2016) define pozolana como um material de origem natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. Formalmente, a ABNT NBR 12653:2015 - Materiais Pozolânicos – Requisitos, define materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com  $\text{Ca(OH)}_2$  à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. Esses materiais podem ter origem natural ou artificial, sendo estas últimas obtidas, muitas vezes, a partir de tratamento térmico de subprodutos de processos industriais.

Neville (2016) afirma ser essencial que o material pozolânico esteja finamente moído, pois assim a sílica presente combinará com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produzido durante o processo de hidratação do cimento e, na presença de água, formará os silicatos de cálcio estáveis com propriedades cimentícias. Além disso a sílica precisa ser amorfa, pois a sílica cristalina apresenta baixa reatividade.

Somada às questões ambientais, discutidas anteriormente, e econômicas advindas da substituição de parte do cimento Portland por MCS, outras propriedades do concreto, em seu estado endurecido, podem ser melhoradas. De acordo com Kurdowski (2014), esses materiais são adicionados ao concreto pelas seguintes razões:

- Aumentar a resistência e a impermeabilização;
- Melhorar a trabalhabilidade, sem aumentar a quantidade de cimento;
- Diminuir o risco de segregação;
- Diminuir o calor de hidratação;
- Aumentar a resistência do concreto contra os ataques químicos;

Sobre a dosagem do ECC, um ponto de atenção é trabalhabilidade adequada da mistura, a fim de possibilitar uma melhor dispersão das fibras e permitir, no estado endurecido, que as fissuras se iniciem antes de se atingir a tensão de transferência da fibra. Na concepção deste material, o agregado graúdo foi eliminado, o que conseqüentemente causa um maior consumo

de cimento, quando comparado com o concreto convencional. Como consequências, tem-se o elevado calor de hidratação, do aumento de custo e sobrecarga ao meio ambiente. Portanto, uma das soluções existentes, é substituir parte do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS), sem que haja perda nas propriedades mecânicas do material, especialmente a elevada ductilidade à tração e a durabilidade (ZHANG et al., 2020b).

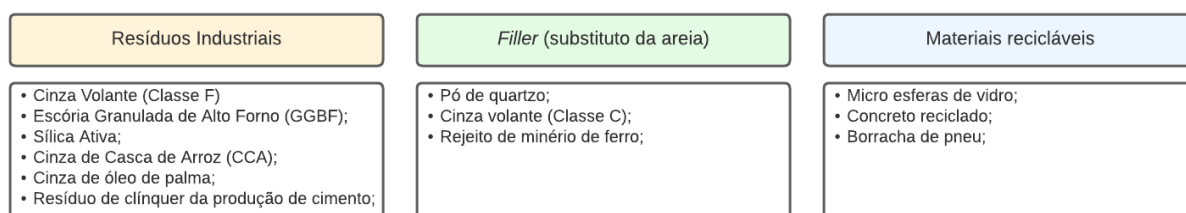
De acordo com Lepech et al. (2008), na análise e escolha de materiais alternativos para a composição da matriz de concreto deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- Propriedades mecânicas: resistência e rigidez dos materiais substituintes;
- Propriedades químicas: avaliação se o material tem potencial para desenvolver reações químicas adversas, como a presença cloretos ou elementos corrosivos;
- Sustentabilidade ambiental;

Entre os vários MCS utilizados na construção, a cinza volante é o mais empregado na dosagem do ECC, devido aos seus efeitos positivos na reologia, no controle de resistência matricial e efeito interativo entre fibra e matriz. No entanto, a qualidade das cinzas volante varia muito conforme a origem, o que afeta o desempenho da ECC em termos de trabalhabilidade, dispersão de fibras, força e ductilidade, sendo impraticável determinar as propriedades exatas da cinza volante que se adequam à produção da ECC. Com isso, é necessário explorar os comportamento de outros materiais cimentícios suplementar, especialmente em regiões onde a qualidade da cinza volante é insuficiente (ZHANG et al., 2020b).

Por existir diversas combinações de dosagem de ECC utilizando MCS pesquisadas, Bahraq, Malehuddin e Al-Dulaijan (2020) listaram as formulações de MCS e de fibras que foram utilizadas na produção de ECC ao longo dos anos. A origem dos resíduos industriais elencados foi separada em três grupos: subprodutos de resíduos industriais, *filler*, como substituto da areia e materiais recicláveis. A Figura 19 mostra essa relação.

Figura 19 – Materiais substituintes no concreto



Fonte: Adaptado de Bahraq, Malehuddin e Al-Dulaijan (2002)



### 2.5.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

A CCA é um resíduo do processo de combustão da casca do arroz, que apresenta propriedades pozolânicas, podendo ser utilizada como material cimentício suplementar. Segundo Neville (2016), a CCA apresenta um alto teor de sílica em sua composição (cerca de 95% a 100% de sua composição) e, quando submetida à uma queima controlada, entre 500°C e 700°C, origina um material amorfo com uma estrutura porosa.

A casca do arroz é um material de baixa densidade e elevado volume, sendo composta de celulose (50%), lignina (30%) e sílica (20%) e, devido ao seu alto poder calorífico (aproximadamente 300 kcal/kg), ela é utilizada como fonte de energia no beneficiamento do arroz, formando assim a CCA. Salienta-se que a CCA beneficiada representa cerca de 20% da massa de casca de arroz (POUEY, 2006).

Apesar da CCA ter características químicas compatíveis para utilização como material cimentício suplementar e, mesmo com o desenvolvimento de diversas pesquisas para o emprego na construção civil, ainda se observa que a destinação final desse resíduo ocorre de forma incorreta. O efetivo uso deste material encontra algumas restrições, como a cor, a falta de uniformidade e o custo adicional de moagem.

Outro ponto importante é que, para a obtenção CCA amorfa e com alta reatividade, necessita-se que o processo de queima ocorra com controle de tempo e temperatura. Por conta do alto custo desse processo, tal fato, muitas vezes, inviabiliza o uso da CCA como adição ao concreto (ISAIA et al., 2010). Nesse cenário, pesquisadores buscam contribuir para a viabilidade técnica do uso da CCA, estudando tratamentos químicos, físicos e/ou térmicos desse resíduo afim de permitir um uso mais nobre do material. Portanto, com a substituição parcial do cimento pela CCA, além de reduzir a geração de resíduo, há também a diminuição do consumo de energia e de emissão de gases que causam o efeito estufa durante a produção do cimento Portland (POUEY, 2006).

Apesar dos benefícios da incorporação da CCA como um MCS, poucos foram os estudos desenvolvidos aplicando-o especificamente para o ECC, onde destaca-se os trabalhos de Righi (2015), Righi (2022) e Costa (2015), sendo todos eles desenvolvidos no LEME-UFRGS. Também têm-se os estudos de Zhang e Malhotra (1996), Stults et.al. (2010), Zhang et al. (2020b), Zhang et al. (2021) e Khan et al. (2022). O Quadro 4 mostra cada um desses estudos.

Quadro 4 – Estudos sobre a incorporação de CCA no ECC

Ano	Autor	Resumo
1996	Zhang e Malhotra	Esta pesquisa investigou as propriedades físicas e químicas do concreto nos estados fresco e endurecido com a adição de CCA, sendo avaliadas a trabalhabilidade, tempo de pega e temperatura, no estado fresco e no estado endurecido, as resistências à compressão, tração e flexão, módulo de elasticidade, retração por secagem, resistência à penetração de íons cloreto e aos ciclos de gelo e degelo. Esses resultados foram comparados com os obtidos por um concreto convencional e com adição de sílica ativa. Os resultados indicam que a CCA é altamente pozzolânica e que pode ser usada como MCS para produzir concreto de alto desempenho.
2010	Stults et.al	Este estudo analisou os efeitos da adição de CCA em uma matriz de concreto de alto desempenho (UHPC), cujo resultados indicaram que com o uso de CCA, a resistência à compressão de várias relações água/material cimentício foi melhorada e que a CCA pode ser utilizada como material pozzolânico na dosagem de UHPC.
2015	Righi	Esta pesquisa avaliou o uso da CCA como substituinte parcial do cimento Portland, onde foram caracterizados compósitos cimentícios do tipo ECC, com várias frações de substituição, sem controle de queima, variando o tempo de moagem da cinza. Como resultado, percebeu-se que é possível utilizar a CCA como MCS, sendo a melhor combinação com 30% de substituição com tempos de moagem de 4 e 8 horas.
2015	Costa	Neste estudo foi analisada a durabilidade do ECC, estudando dosagens com e sem a substituição parcial do cimento por CCA, onde foi observada a estrutura da matriz cimentícia, penetração e difusão de íons cloreto, retração livre e restringida e a resistência à abrasão. Como resultado, observou-se a viabilidade do uso de CCA como adição, com melhora nas propriedades do compósito, como a conexão e solução dos poros. Porém, a desvantagem foi a maior abertura de fissuras ocasionadas pela retração restringida.
2020 2021	Zhang et al.	Neste estudo, a CCA substituiu a cinza volante na dosagem do ECC. Os resultados experimentais mostraram que o uso da CCA acelerou o processo de hidratação, promoveu a reação pozzolânica e refinou a distribuição de poros na matriz, com aumento da resistência à compressão. A resistência à tração melhorou com a adição de CCA, exceto a com taxa de substituição de 50%. Em microescala, a incorporação de CCA reduziu a dureza da matriz e a ligação interfacial matriz/fibra, com aumento do índice de PSH ( <i>Pseudo - Strain- Hardening - <math>J_b' / J_{TIP}</math></i> ), o que concorda com o aprimoramento da capacidade de tensão do ECC.
2022	Righi	Esta pesquisa avaliou misturas de ECC com fibras de polipropileno e elevados teores de CCA, sob aspectos reológicos, mecânicos e de durabilidade, com o objetivo de compreender suas características, com intuito de estabelecer a melhor aplicabilidade deste material na construção civil e infraestrutura.
2022	Khan et al.	Este estudo investigou as propriedades mecânicas e de durabilidade de dosagens de ECC com diferentes MCS, como a cinza de casca de trigo, cinza de casca de arroz, pó de vidro e fibras de polipropileno fibrilado. Os resultados revelaram maior resistência mecânica, velocidade de propagação de pulso ultrassônico e resistividade elétrica para mistura contendo CCA.

Fonte: A Autora

Observa-se que além da questão ambiental, a CCA destaca-se como material cimentício suplementar utilizado, principalmente, nas pesquisas desenvolvidas no LEME-UFRGS, por ser um subproduto existente em grande abundância no estado do Rio Grande do Sul. A estimativa de produção da safra de arroz 2022/2023 é 10.871 milhões de toneladas de arroz e, desse total, o estado do Rio Grande do Sul é responsável por cerca de 70% dessa produção (CONAB, 2022). Todos esses fatos, em conjunto, justificam a importância dada para esse material como MCS.

## **2.6 Influência do agregado na composição do ECC**

Devido a necessidade do controle das propriedades do concreto, deve-se conhecer a microestrutura, as propriedades físicas e químicas da matriz cimentícia assim como as relações entre cada um dos materiais constituintes. O agregado, apesar de muitas vezes ser considerado um material inerte na dosagem do concreto, é responsável pelo enchimento e estabilidade dimensional e suas características afetam as propriedades do concreto no estado fresco, a reologia da mistura, as propriedades mecânicas e a durabilidade. Em concretos convencionais o agregado representa entre 60% a 70% do volume do material.

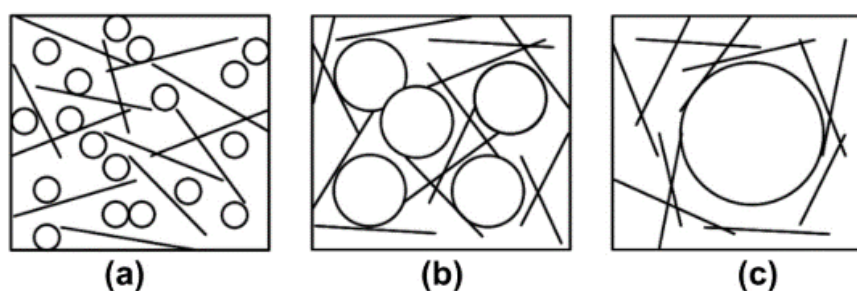
Porém, para manter as características mecânicas do ECC, este material tende a utilizar maior teor de cimento devido à eliminação de agregados de sua dosagem. Conforme os princípios da micromecânica do ECC, para se obter o comportamento dúctil, a resistência à fratura da matriz cimentícia é limitada à máxima tensão de transferência das fibras. Segundo Huang et al. (2013), especificamente no ECC, os agregados influenciam na resistência à tração, pois a resistência à fratura tende a aumentar com maior dimensão do agregado, devido ao aumento da tortuosidade da propagação da fissura. Além da aglomeração de fibras tornar-se mais pronunciada.

Conforme descrito por Sahmaran et al. (2009), materiais à base de cimento com agregados com dimensão da partícula maior que o espaçamento médio entre as fibras, impacta nas propriedades do concreto no estado fresco, devido à dificuldade de dispersão uniforme das fibras. Sherir, Hossain e Lachemi (2018) e Wu et al. (2019) afirmam que a dimensão do agregado influencia na distribuição e na orientação das fibras, o que pode impactar negativamente o processo de transferência de tensões, resultando em uma fratura localizada prematura, comprometendo a resistência à tração e a capacidade de deformação do ECC. Adicionalmente, agregados com maiores dimensões podem aumentar a tortuosidade da

propagação da fissura e a tenacidade à fratura da matriz ( $K_m$ ), condição esta que não é favorável para a propagação das fissuras e múltipla fissuração do material (LI, 2007).

Sahmaran et al. (2012) afirmam que existe um limite para a dimensão máxima do agregado que pode ser utilizada na composição do ECC. Por afetar a distribuição das fibras, a trabalhabilidade e aumentar a resistência à fratura, para a produção do ECC, limitou-se à utilização de agregado fino, com dimensão máxima próxima a  $200 \mu m$ . No ECC convencional, as fibras são separadas apenas por partículas finas que podem se mover livremente entre as fibras, representada pela letra (a) na Figura 20. Quando a dimensão do agregado é maior do que a distância média entre as fibras, há uma tendência delas se concentrarem e se distribuírem irregularmente na matriz cimentícia, sendo este efeito proporcional ao aumento da dimensão máxima do agregado, conforme as letras (b) e (c) da Figura 20 (KOKER; ZIJL, 2004).

Figura 20 – Influência da dimensão do agregado na orientação e distribuição das fibras



Fonte: Koker e Zijl (2004)

Como agregado, o material mais utilizado para a produção do ECC, tanto o convencional quanto o de alta resistência, é a areia de sílica fina. Porém, esta apresenta elevado custo, alto consumo de energia e impacto ambiental, o que limita a aplicação em larga escala do ECC, apesar deste, ao substituir o concreto convencional, permitir manutenções em com menor frequência e aumentar a durabilidade das estruturas.

Neste contexto, atualmente, são desenvolvidas pesquisas para substituição parcial desse tipo de agregado, que pode ser dividida em duas frentes de trabalho. A primeira relaciona-se com o desenvolvimento de estudos para avaliar a viabilidade de aumentar a dimensão do agregado usado na dosagem do ECC sem que haja perdas nas suas propriedades mecânicas. A segunda é a substituição da areia de sílica fina por subprodutos/resíduos industriais/urbanos ou materiais alternativos, como borracha de pneu, rejeito de minério de ferro e agregados finos recicláveis, de forma a desenvolver um ECC que gere menor impacto ambiental (XU et al.,

2021). A evolução da tecnologia para a utilização de agregados artificiais não somente economiza os recursos naturais, em razão da exploração de jazidas para a produção de areia como também, reduz a carga ambiental devido a utilização de resíduos.

Seguindo a tendência de desenvolvimento de um ECC econômico, utilizando materiais disponíveis localmente e que gere menor impacto ambiental, torna-se imprescindível compreender como o tamanho e o tipo do agregado influencia nas propriedades mecânicas, no comportamento dúctil e na durabilidade desse composto. Também é importante conhecer os efeitos da quantidade de agregado quando combinado com diferentes tipos de material cimentício suplementar nas propriedades do ECC.

Segundo Sherir, Hossain e Lachemi (2018) a utilização de agregados com maior dimensão, ao invés de areia de sílica, em conjunto com elevado volume de cinza volante, podem ser usados na produção de misturas ECC sem afetar a ductilidade e o comportamento *strain-hardening*. Porém, eles afirmam ser necessário desenvolver mais estudos sobre a durabilidade desses compostos. Nessas condições, a maioria dos estudos existentes abordam somente a avaliação das propriedades mecânicas do ECC.

Wu et al., (2019) afirmam que apesar de existir estudos que avaliaram os efeitos do tipo e dimensão da areia no desempenho mecânico do ECC, a influência dos parâmetros morfológicos dos agregados, nessas propriedades não foram avaliados. Segundo esses autores, a presença de areia com superfície lisa leva a uma zona de transição interfacial menos resistente, o que pode prejudicar tanto a resistência à compressão quanto a resistência à fratura da matriz ( $K_m$ ), que é um dos parâmetros para se alcançar o comportamento *strain-hardening* do ECC.

Diante deste cenário de busca por essas respostas, o Quadro 5 descreve sobre alguns estudos que analisaram a influência da origem, da dimensão e da forma do agregado na ductilidade e nas propriedades mecânicas do ECC convencional e do UHP-ECC.

Quadro 5 – Pesquisas sobre a influência do agregado

Ano	Autor	Descrição
2009	Sahmaran et al.	Estudo de diferentes dosagens de ECC com areia calcária dolomítica triturada ou areia de cascalho de dimensão máxima igual a 1,19 mm e 2,38 mm. Para cada tipo e tamanho de agregado, foram estudados diferentes dosagens com variação da relação cinza volante/Cimento Portland, analisando os efeitos sobre a tração direta, flexão, compressão, desenvolvimento de fissuras e retração por secagem. Os resultados obtidos indicam que os agregados, dentro da faixa de tamanho estudadas, desde que não interfiram na dispersão das fibras, não influenciam na ductilidade do ECC. Segundo os autores os efeitos negativos dos agregados sobre a dispersão das fibras podem ser eliminados ou minimizados pelo aumento da quantidade de cinza volante na mistura. Eles também destacam que novas pesquisas para avaliar a micromecânica do ECC são necessárias para determinar as mudanças nas propriedades da interface fibra/matriz. Além disso, devido à prolongada reação pozolânica da cinza volantes, seria necessário a investigação do comportamento à longo prazo do ECC com agregados de maiores dimensões e maiores teores de cinza volante.
2012	Sahmaran et al.	Estudo experimental para compreender a dependência das propriedades do ECC combinando a dimensão máxima do agregado com diferentes tipos de MCS (cinza volante e escória), avaliando o tipo e quantidade de adição e a dimensão e quantidade de agregado. Os resultados revelaram que o aumento da dimensão e da quantidade de agregado não influenciaram negativamente na ductilidade do ECC desde que combinados adequadamente com tipo e quantidade MCS apropriado.
2013	Huang et al.	Estudo da viabilidade do uso de rejeitos de minério de ferro como agregados alternativos, mais baratos e ecológicos no desempenho mecânico do ECC. Foi analisada a influência da dimensão, viscosidade, dispersão de fibras e comportamento mecânico, variando a relação cinza volante/Cimento Portland. Os resultados foram comparados com dosagens de ECC padrão contendo areia de micro sílica como agregado e cinza volante como adição. Os resultados mostraram que é possível utilizar o rejeito de minério de ferro como agregado, revelando que sua dimensão influenciou nas propriedades do ECC, tanto no estado fresco quando no endurecido.
2018	Sherir, Hassain e Lachemi	Estudo do efeito da areia disponível localmente, com dimensão máxima igual a 1,8mm, em substituição da areia de sílica e alta taxa de substituição do cimento Portland por cinza volante. Foi avaliada as propriedades no estado fresco (calor de hidratação e trabalhabilidade), mecânicas (resistência à compressão e flexão) e durabilidade (velocidade de propagação do pulso ultrassônico, retração, absorção por capilaridade e resistência as ciclos de gelo e degelo). Segundo os autores, de modo geral, a substituição da areia de sílica pelo agregado disponível localmente não afetou nas propriedades do material, apresentando todas as propriedades quase que semelhantes ao ECC padrão. Tal fato confirma a viabilidade de uso de agregados produzidos localmente combinados com alto volume de cinza volante.
2019	Wu et al.	Estudo desenvolvido para investigar os efeitos da forma do agregado no desempenho mecânico do ECC, em termos de resistência à compressão e à tração e no processo de dispersão das fibras. Nesta pesquisa foram estabelecidas equações empíricas que correlacionaram parâmetros morfológicos do agregado com as propriedades mecânicas do ECC. Os autores concluíram que a diminuição do arredondamento das partículas de areia melhorou as propriedades mecânicas do ECC.
2019	Guan et al.	Neste estudo, o objetivo foi avaliar a possibilidade de utilização de um agregado de rio com dimensão máxima igual a 4,75mm para a produção de concretos do tipo ECC, sendo avaliadas a resistência à compressão, à tração e a abertura de fissuras. Os resultados mostraram que os ECC's com areia do rio apresentaram comportamento dúctil à tração e múltipla fissuração, embora o uso desse agregado aumente a resistência à fratura e diminua a energia complementar.

Quadro 5 – Pesquisas sobre a influência do agregado (Continuação)

Ano	Autor	Descrição
2021	Li et al.	Este estudo avaliou a influências da inclusão da areia do rio sobre a resistência e à fratura do ECC. Além da avaliação experimental foi proposto um modelo analítico para calcular a resistência da matriz para a formação das fissuras e desenvolvido um estudo paramétrico para entender quais os fatores que influenciam nessa característica. Como resultado observou-se que a areia de rio pode introduzir microfissuras ao longo da interface agregado/matriz cimentícia devido à retração do ECC. Além disso, o aumento do teor da areia aumenta a resistência à fratura ( $K_m$ ) para ECC de resistência normal e permanece o mesmo para os ECC de alta resistência.
2021	Adesina e Das	Estudo para avaliar o uso de asfalto reciclado como agregado para a substituição parcial e total da areia de sílica convencional, sendo estudadas cinco dosagens diferentes e avaliadas as propriedades mecânicas e a durabilidade. Como resultado, constatou-se que a incorporação de asfalto reciclado pode comprometer um pouco o desempenho da ECC tradicional. A resistência à compressão do ECC com 100% de asfalto reciclado foi 20,6% menor que no ECC de controle, com areia de sílica, enquanto que a penetração de cloreto aumentou 11,4%. Diante desses resultados, mesmo com a diminuição do desempenho do material, considera-se possível o uso do agregado de asfalto reciclado como substituinte de areia de sílica para a produção de ECC.
2022	Dong et al.	Estudo da viabilidade de produção de ECC com alto volume de agregados com dimensão superior a 4,75mm, sendo avaliado a influência do teor de agregado e da relação água/material cimentício. No estudo experimental foram analisadas as propriedades mecânicas, a retração, os custos de produção e o impacto ambiental, com as seguintes conclusões: em comparação com o ECC convencional, a presença agregados de maior dimensão na matriz ECC tem pequenos efeitos positivos nos valores da resistência à compressão e no módulo de elasticidade. Para todas as dosagens estudadas a deformação excedeu 2 %, o que indica a manutenção do comportamento dúctil do material. Sobre as questões ambientais e econômicas, a substituição do agregado diminui a pegada de carbono, o consumo de energia e os custos de produção. Os autores afirmam que esta pesquisa foi um estudo preliminar e que é necessário estudos mais profundos para entender a influência da dimensão e tipo de agregado no comportamento do ECC.
2022	Xu et al.	Estudo experimental para avaliar o comportamento <i>strian-hardening</i> do HS-ECC ( <i>high-strenght ECC</i> ) utilizando agregados de geopolímeros artificiais (GPA) e areia de sílica natural. Verificou-se que com o aumento da taxa de substituição da areia de sílica pelo GPA melhorou a ductilidade à tração, a capacidade de controle de fissuras e a absorção de energia, embora suas tenha diminuído as resistências à compressão e à tração. Observou-se que o GPA com baixa alcalinidade reagiu com a matriz cimentícia e a reação pozolânica forneceu ligação química adicional, melhorando a interface GPA/matriz.

Fonte: A Autora

Observa-se que, nas primeiras pesquisas, o objetivo era avaliar como o aumento da dimensão do agregado influenciava no comportamento dúctil do ECC e, nos estudos mais recentes, o foco é examinar sobre a viabilidade de utilização de agregados com origens alternativas (agregados reciclados). Porém, todas elas possuem o mesmo direcionamento que é diminuir o impacto ambiental e os custos de produção do compósito.

Analisando as pesquisas descritas no Quadro 5, consegue-se tecer as seguintes considerações:

---

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

1. Existe a preocupação em desenvolver um ECC que gere menor impacto ambiental e com menor custo, para permitir um avanço da aplicação deste material em maior escala.
2. Apesar das desvantagens que o aumento dimensão do agregado gera na matriz cimentícia, percebe-se que é possível utilizar outros tipos de agregado sem perder o comportamento dúctil característico do ECC.
3. O foco da maioria dos trabalhos foi estudar sobre o comportamento mecânico do material com a introdução de diferentes tipos de agregado na composição do ECC. Pesquisas mais aprofundadas precisam ser desenvolvidas para entender como as propriedades morfológicas do agregado impactam na microestrutura, no comportamento mecânico, assim como a avaliação do comportamento à longo prazo do material.

## **2.7 Estudos sobre ECC no LEME – UFRGS<sup>5</sup>**

No LEME - UFRGS, desde 2009, são desenvolvidas pesquisas sobre o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho, como o ECC e o UHPFRC, utilizando materiais locais, seguindo o princípio de obter compósitos cimentícios com elevado desempenho mecânico e que gerem menor impacto ambiental e que a produção seja economicamente viável.

A pesquisa de Garcez (2009), pioneira, teve como objetivo de verificar a possibilidade de desenvolvimento de um ECC com materiais disponíveis no Brasil para a aplicação em camadas de recapeamento para a reabilitação de pavimentos de concreto. Neste trabalho as fibras de PVA foram substituídas por fibras de PP de alta tenacidade como reforço das matrizes cimentícias.

Para tanto, o seu trabalho foi dividido em quatro etapas: a primeira foi desenvolver diferentes versões de concretos reforçados com fibras, adaptando o traço do original do ECC, caracterizando-os à tração direta. Na segunda etapa, foram selecionados os traços que obtiveram os melhores resultados na etapa anterior para a caracterização do comportamento à flexão estática e cíclica, realizando os ensaios de flexão à quatro pontos, fadiga, abatimento e resistência à compressão. Na terceira etapa o compósito com melhor desempenho à flexão foi avaliado quanto à sua eficiência de prevenção da fissuração refletiva. A última etapa foi a análise de viabilidade econômica e ambiental da utilização do ECC com relação às técnicas existentes de reabilitação de pavimentos de concreto.

---

<sup>5</sup> Neste trabalho foram descritas somente as pesquisas desenvolvidas sobre o ECC, no LEME-UFRGS, publicadas. Salienta-se que existem outros estudos sobre este material em andamento.



Como resultados Garcez (2009) observou que é possível utilizar a fibra de PP de alta tenacidade em substituição das fibras de PVA. Ela evidenciou que a seleção adequada dos materiais para a dosagem do ECC é um passo fundamental para a manutenção das propriedades mecânicas e de suas características, pois elas influenciam na interação das fibras com a matriz cimentícia. Garcez (2009) também ressalta sobre a necessidade de desenvolvimento de estudos para verificação do comportamento a longo prazo dos ECC's produzidos com fibras de PP.

Seguindo a mesma linha, o trabalho desenvolvido por Righi (2015) teve como objetivo verificar a viabilidade de utilização da CCA em substituição de parte do cimento em compósitos cimentícios com elevada capacidade de deformação, utilizando fibras de PP. Foram estudadas composições em que o volume de cimento foi substituído por 10%, 20% e 30% de CCA, sem controle de queima, moída por 1h, 2h, 4h, 6h e 8h.

Em seu trabalho, como propriedades mecânicas, foram analisadas a resistência à tração e à flexão, por meio do ensaio de flexão à quatro pontos. A durabilidade foi avaliada por meio dos ensaios de absorção e índice de vazios, além da análise da curva de liberação de calor de hidratação, para verificar o efeito da adição de CCA na mistura. Dos resultados obtidos por Righi (2015) verifica-se que o melhor traço foi o com substituição parcial do cimento, por 30% de CCA com tempo de moagem de 4 e 8 horas.

Conjuntamente, Costa (2015) estudou sobre a durabilidade do ECC produzido com CCA e fibras de PP. A autora avaliou os processos de deterioração mais significativos do ECC que podem afetar o seu desempenho quando aplicados em pavimentos ou estruturas de concreto. Foram analisadas duas misturas de concreto, sendo uma sem a substituição do cimento por CCA e outra com a substituição de 30% de cimento por CCA sem controle de queima.

Foram desenvolvidos ensaios para o estudo da estrutura de poros (absortividade, absorção e índice de vazios, absorção e água por capilaridade), penetração e difusão dos íons cloretos, retração livre e restringida e resistência à abrasão. Os resultados obtidos com as duas dosagens de ECC foram comparados com um concreto de dosagem convencional.

Costa (2015) concluiu que a incorporação de CCA na dosagem do ECC melhorou as propriedades do compósito relacionadas à conexão e solução dos poros, que dificulta a passagem dos íons cloretos, além de apresentar resistência à abrasão próxima ao compósito de referência, indicando a viabilidade do uso de CCA em termos de durabilidade.

Rodríguez (2018) analisou a aplicabilidade do ECC produzido com materiais existentes no estado do Rio Grande do Sul no processo de recapeamento de pavimentos, em ensaios de Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

verdadeira grandeza. Este trabalho avaliou as propriedades mecânicas do ECC utilizando fibras de PP e CCA em sua mistura. A pesquisa de Rodríguez (2018) foi dividida em duas etapas: a primeira referente à determinação das propriedades mecânicas do ECC produzido localmente, por meio de ensaios monotônicos e cíclicos. A segunda parte foi o estudo da viabilidade de execução do ECC, verificando a capacidade do material de distribuir tensões, sofrer microfissuração sem romper, e a evolução das características de textura do compósito em ensaios de verdadeira grandeza.

Com isso Rodríguez (2018) confirmou a possibilidade de aplicação do ECC desenvolvido em conjunto com o LEME-UFRGS e LAPAV (Laboratório de Pavimentação) para recapeamento de pavimentos. Em seu ensaio de verdadeira grandeza mediante a aplicação de um simulador de tráfego linear, foram estudadas as manifestações patológicas, o desgaste superfície de rodagem e a possibilidade de reflexão de fissuras causadas pela aplicação de ciclos de carga.

Posteriormente Molz (2021) analisou a viabilidade da aplicação do ECC como pavimento de tabuleiros metálicos, avaliando o comportamento do material em termos de cura acelerada, aderência ao aço e retração. Em seu estudo foram analisados o comportamento do ECC sem e com a adição de CCA como substituto parcial do cimento. Para a cura acelerada foram avaliadas as propriedades mecânicas nas primeiras idades de dosagens de ECC com a utilização de aditivo acelerador de cura, além do aditivo superplastificante comumente utilizado.

Neste trabalho também foram estudadas diferentes estratégias de aderência entre o tabuleiro metálico e o concreto, por meio do ensaio de cisalhamento oblíquo. Finalmente foi avaliada a retração do conjunto com a instrumentação de modelos experimentais de pequena grandeza. Com isso, seu estudo conseguiu comprovar a aplicabilidade do ECC como pavimento sobre tabuleiros metálicos. As dosagens estudadas demonstraram comportamento mecânico adequado ao uso proposto, exibindo bons resultados de resistência mecânica, deformação por retração, aderência entre o aço e o ECC, frente às solicitações impostas pela cura acelerada.

Righi (2022) estudou dosagens de ECC com fibras de PP e elevados teores de CCA (30%, 50% e 70% de substituição do cimento), avaliando o comportamento mecânico, durabilidade, a reologia e a análise do ciclo de vida do material. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão, de flexão à quatro pontos e à abrasão. Os aspectos de durabilidade foram examinados por meio de processos deteriorativos

de reação álcali-sílica e penetração de íons cloretos. Na reologia foram analisadas a trabalhabilidade, tempo de fluxo por cone de Marsh, tensão de escoamento e viscosidade plástica. A avaliação do ciclo de vida ocorreu em dois cenários, o primeiro foi pela produção de 1m<sup>3</sup> de material, e o segundo foi com a aplicação do ECC como elemento de recapeamento de pavimentos.

Como resultados Righi (2022) entendeu que as dosagens com substituição do cimento por 50% de CCA, tanto para ensaios mecânicos quanto os de indicativos de durabilidade, constituem como uma alternativa promissora como material para a construção civil. Porém são necessários ajustes na dosagem para que as propriedades de elevada capacidade de absorção de energia e de deformação sob carregamentos de tração sejam desenvolvidas, resultando na possibilidade de formação de múltiplas fissuras de pequena abertura. Ressalta-se que mais estudos devem ser desenvolvidos para a aplicação prática do material.

Com isso, percebe-se que todas as pesquisas desenvolvidas no LEME – UFRGS chegaram a mesma conclusão, de que é possível desenvolver um concreto que utilize materiais locais e que apresente as características do ECC, como alta capacidade de deformação quando submetidos à esforços de tração uniaxial e múltipla microfissuração.

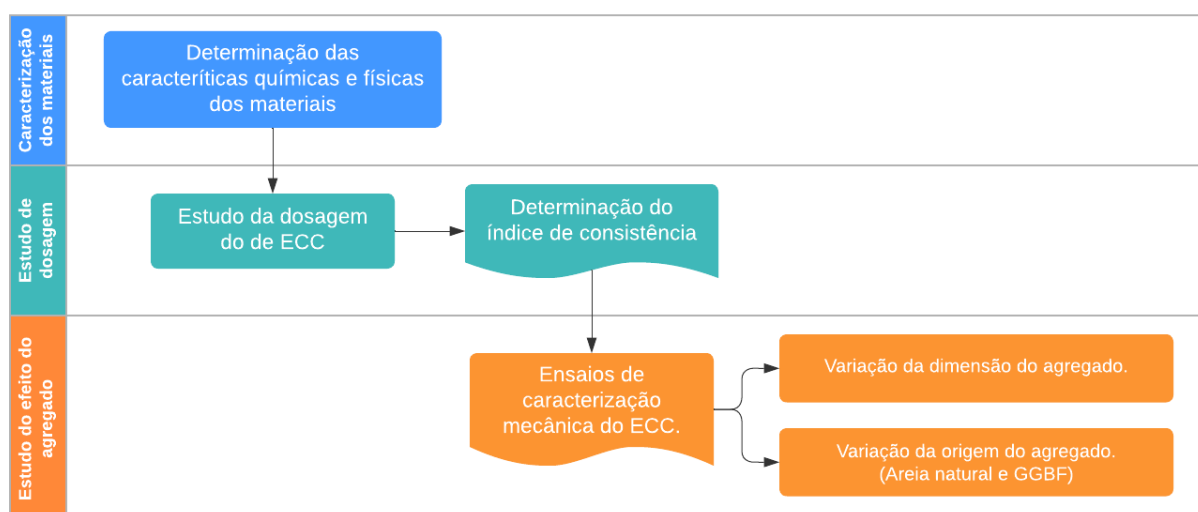
Porém, as lacunas deixadas por esses estudos direcionam para o desenvolvimento de novas pesquisas para melhor entendimento da reologia, da interação entre fibra-matriz cimentícia, do comportamento mecânico, dos aspectos de durabilidade e de aplicação do ECC. Em todos os trabalhos desenvolvidos teve a preocupação em desenvolver compósitos que gerem um menor impacto ambiental e que sejam economicamente viáveis, em consonância com as principais preocupações e com as pesquisas que estão sendo desenvolvidas atualmente sobre o assunto.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atender ao objetivo proposto por esta pesquisa, que é estudar como a variação da quantidade, da origem e da dimensão do agregado na dosagem do ECC impactam nas propriedades material, tanto em seu estado fresco quanto endurecido, desenvolveu-se um programa experimental que foi dividido em três etapas.

A primeira etapa foi o planejamento do programa experimental, onde foram escolhidos os materiais e as variáveis de controle e definidos os ensaios e procedimentos necessários tanto para a caracterização dos materiais quanto para a determinação das propriedades mecânicas do ECC. Nesta fase foram verificados os aspectos gerais de dosagem, processos de mistura, moldagem e cura. A segunda etapa consistiu na caracterização das propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados na pesquisa, com base em dados experimentais e/ou dados fornecidos pelos fabricantes. A terceira e última etapa, foi a execução do plano experimental, considerando os testes de traço e os ensaios de caracterização mecânica planejados, avaliando o índice de consistência e o estudo dos efeitos das características dos agregados nas propriedades mecânicas do ECC. Todas as etapas do plano experimental estão representadas, esquematicamente, no fluxograma da Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma da terceira etapa do programa experimental



Fonte: A Autora

O estudo da dosagem do ECC, considerando a variação quantidade, dimensão e origem do agregado e o volume de aditivo superplastificante, serviu como caracterização inicial dos traços. O objetivo foi escolher, entre as as diversas combinações de agregado e aditivos, as que apresentaram uma trabalhabilidade adequada e que permitissem a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de caracterização mecânica.

O estudo do efeito do agregado nas propriedades mecânicas do ECC foi desenvolvido para avaliar como a quantidade, a variação da dimensão e a origem do agregado impactam no comportamento deste material. Portanto, foram estes os fatores controláveis do estudo experimental, isto é, aqueles escolhidos para verificar a sua influência no comportamento mecânico do ECC. O objetivo foi verificar se é possível manter a ductilidade do material considerando essas alterações na dosagem do compósito.

Ao longo deste capítulo serão descritos os equipamentos utilizados e os procedimentos adotados para cada uma das etapas do programa experimental. Com relação aos ensaios, o estado fresco do ECC foi analisado por meio do índice de consistência/trabalhabilidade e as propriedades mecânicas foram avaliadas com base nos ensaios de compressão simples, tração direta, flexão à quatro pontos e módulo de elasticidade.

Com base nesses ensaios, as variáveis de resposta, que são aquelas relacionadas com os resultados esperados de cada um dos ensaios, são:

- Índice de consistência no estado fresco;
- Resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ );
- Parâmetros do ensaio de tração direta;
- Parâmetros do ensaio de flexão à 4 pontos;
- Análise visual do padrão de fissuração das amostras dos ensaios de flexão à quatro pontos e tração direta;
- Módulo de elasticidade.

### 3.1 Processos de mistura e cura do ECC

O processo adotado para a mistura do ECC seguiu as orientações indicadas por Righi (2015) e a Figura 22 mostra este processo, desde a concretagem até a moldagem dos corpos de prova. Inicialmente, misturou-se o material seco até ficar uniforme, por aproximadamente 5 minutos. Posteriormente, adicionou-se a água de amassamento e o aditivo superplastificante, até obter uma pasta extremamente fluida, para permitir a dispersão das fibras. Finalmente, adicionou-se as fibras, de forma gradual e contínua, mantendo a rotação por mais 5 minutos, até sua completa dispersão. Nas Figuras 23 (a), (b) e (c) é possível observar a evolução da consistência do concreto durante a mistura.

Figura 22 – Etapas para a produção do ECC

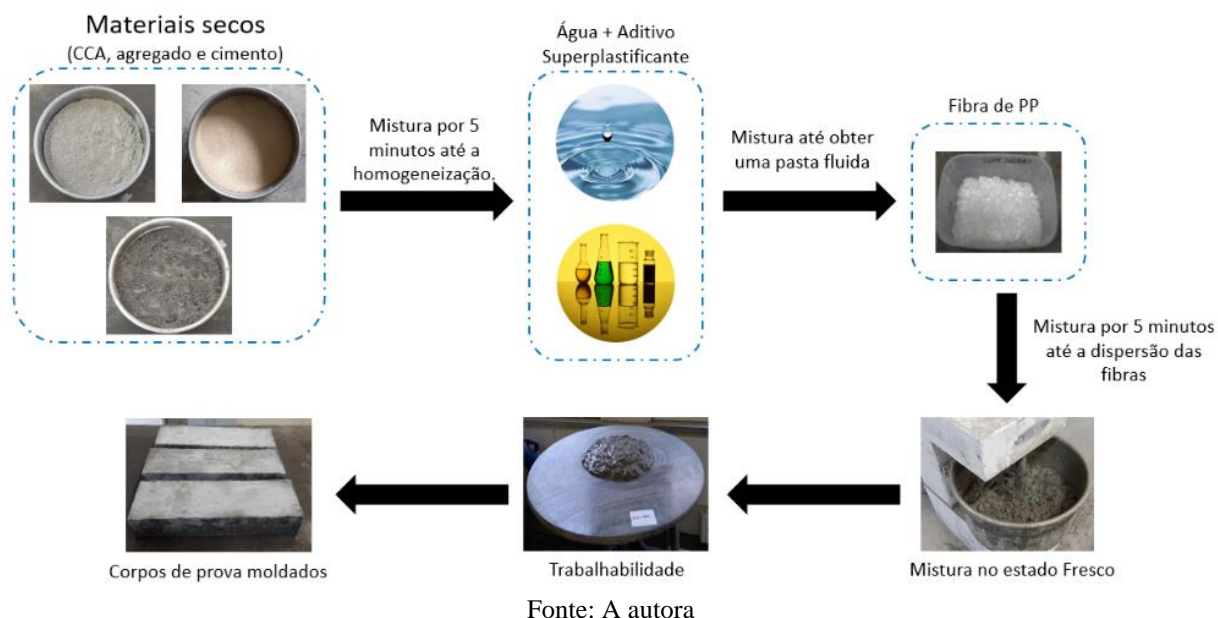


Figura 23 – Processo de mistura do ECC



Fonte: A autora

Antes de moldar, as formas foram revestidas com uma fina camada de óleo e, após a concretagem, eles foram compactados com o auxílio de mesa vibratória. Posteriormente eles foram armazenados em uma superfície rígida e cobertos com plástico, para evitar a perda de água do concreto e possível efeito da retração por secagem. Após 24h os corpos de prova foram desmoldados e armazenados na câmara úmida, com temperatura ( $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa do ar (95%) controladas, conforme as recomendações da ABNT NBR 5738:2015 – Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, até a data programada para os ensaios de caracterização mecânica.

### 3.2 Caracterização dos materiais

Neste item apresenta-se as principais propriedades físicas e químicas dos materiais que foram utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.2.1 CIMENTO PORTLAND

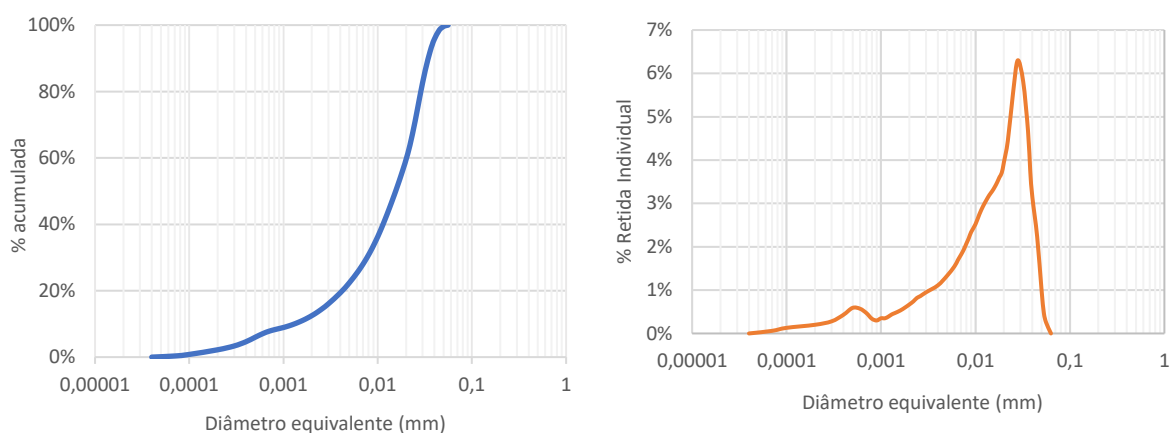
O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV – ARI), produzido pela empresa Nacional. A composição química e as propriedades físico-químicas deste material estão descritas na Tabela 1, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante. Os gráficos (a) e (b) da Figura 24 mostram a distribuição granulométrica retida acumulada e individual, respectivamente e a figura (c) o cimento utilizado. A distribuição granulométrica do cimento foi obtida por meio do ensaio de granulometria a laser, executado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER-UFRGS). Este método é baseado na sedimentação das partículas, em uma dada suspensão, medida por intermédio da absorção da luz. O diâmetro médio das partículas de cimento é  $17,07\mu\text{m}$ .

Tabela 1 – Propriedades físico – químicas do cimento Portland

Propriedades físico-químicas	Resultado
Estado Físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Ph	13
Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,2
Densidade ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	2,99
Solubilidade em ácido clorídrico	99%
Solubilidade e água ( $\text{g}/\text{l}$ )	1,5

Fonte: Brennand Cimentos (2018)

Figura 24 – Distribuição granulométrica do Cimento Portland



(a) Distribuição granulométrica retida acumulada

(b) Distribuição granulométrica retida individual



(c) Cimento utilizado

Fonte: A autora

### 3.2.2 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água utilizada foi a proveniente da rede de distribuição pública da cidade de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul.

### 3.2.3 AGREGADO

O ECC é um compósito cimentício que utiliza areia de sílica fina, com dimensão máxima próxima a 200 $\mu$ m em sua composição, não sendo comum a utilização de agregado graúdo na sua dosagem. Conforme discutido, apesar dos efeitos positivos dos agregados na estabilidade dimensional do concreto, existe um limite para o tamanho das partículas de agregado. Além deste, começam a existir problemas com a dispersão de fibras, perda da trabalhabilidade e da resistência da matriz cimentícia.



Além dessa característica inerente ao ECC, o rápido desenvolvimento da indústria da construção criou uma grande demanda por areia de rio como agregado fino para a produção de concreto, o que leva ao esgotamento da disponibilidade deste material (ZIHAI,2022). Portanto, devido à maior preocupação com as questões ambientais, a necessidade de diminuir os custos de produção, para viabilizar a produção do ECC, ao longo dos anos, vem sendo desenvolvidas pesquisas para avaliar o impacto da dimensão, origem e forma do agregado no comportamento mecânico deste material. Logo, a premissa é diminuir o impacto ambiental das misturas alternativas, mantendo as principais características mecânicas do ECC, que são: o comportamento dúctil à tração e a microfissuração. Com isso, consegue-se diminuir o consumo de energia, a emissão de CO<sub>2</sub> e os custos de produção e transporte do agregado.

Por ser um coproduto do processo de fabricação do aço, a GGBF é um material que atende à necessidade de diminuição do impacto ambiental na produção do concreto. Por suas propriedades, este material pode ser utilizado tanto como agregado ou material aglomerante, nesta última forma desde que finamente moído. Estima-se que a produção anual global de escória de alto-forno é de cerca de 530 milhões de toneladas, sendo apenas 65% desse total reciclado (ZIHAI,2022). A GGBF utilizada nesta pesquisa foi fornecida, por meio de doação, pela Arcelor Mittal Tubarão e a Tabela 2 mostra a composição química deste material, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2 – Composição química da GGBF (Valores de referência)

Composição química	(%)
FeO	0,45
SiO <sub>2</sub>	33,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,42
CaO	41,60
MgO	7,95
TiO	0,73

Fonte: Arcelor Mittal (2020)

Com base nesse cenário e conforme os objetivos da pesquisa, neste trabalho foram utilizados agregados naturais de origem quartzoza com três diferentes dimensões máxima característica:  $D_{max}=0,3mm$ ,  $D_{max}=1,2mm$  e  $D_{max}=2,4mm$ . Como agregado artificial foi escolhida a escória de alto forno (GGBF) para substituir parcialmente da areia fina da composição do ECC, considerando dimensões máxima característica iguais a  $D_{max}=1,2mm$  e  $D_{max}=2,4mm$ .

---

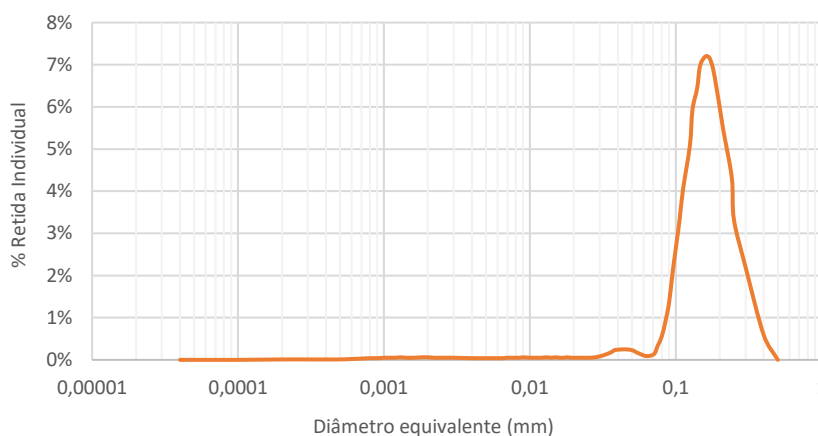
Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

A distribuição granulométrica dos agregados naturais com dimensões máximas características iguais a  $D_{\max}=1,2\text{mm}$  e  $D_{\max}=2,4\text{mm}$  e da GGBF, foram obtidas por meio do peneiramento mecânico da amostra, conforme o procedimento descrito na norma ABNT NBR NM 248:2003 Agregados: Determinação da composição granulométrica, sendo este o método mais adequado para materiais que contém partículas maiores.

Por outro lado, para materiais com partículas menores, indica-se a granulometria a laser para a determinação da curva de distribuição granulométrica. Portanto, para o agregado com dimensão máxima característica igual a  $D_{\max}=0,3\text{mm}$  foi utilizado este método, com o ensaio realizado no LACER - UFRGS.

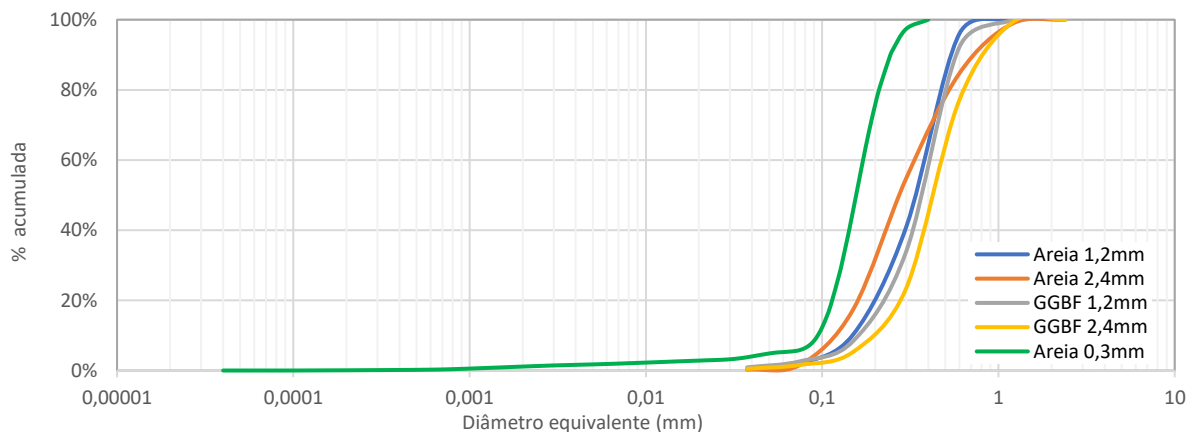
Com base nessas informações o gráfico da Figura 25 mostra a distribuição granulométrica retida individual da areia com  $D_{\max}=0,3\text{mm}$  e o gráfico da Figura 26 mostra a distribuição granulométrica retida acumulada dos agregados e, as Figuras 27 e 28, mostram os agregados naturais e artificiais (GGBF) utilizados nesta pesquisa, respectivamente.

Figura 25 – Distribuição granulométrica dos agregados retida individual  $D_{\max}=0,3\text{mm}$



Fonte: A autora

Figura 26 – Distribuição granulométrica retida acumulada dos agregados



Fonte: A autora

Figura 27 – Agregados naturais



Legenda: (a) Areia dimensão máxima característica igual à 0,3mm, (b) Areia com dimensão máxima característica igual à 1,2mm e (c) Areia com dimensão máxima característica igual à 2,4mm

Fonte: A autora

Figura 28 – Fotos dos agregados artificiais (GGBF)



Legenda: (a) GGBF dimensão máxima característica igual à 1,2 mm, (b) GGBF com dimensão máxima característica igual à 2,4mm

Fonte: A autora

Para este trabalho estas informações são muito importantes, pois elas permitem perceber se o material tem partículas ou muito finas ou muito grossas ou ainda, se é carente de alguma dimensão específica. A composição granulométrica também fornece outras informações importantes como: o volume de vazios entre os agregados que devem ser preenchidos por pasta de cimento e a área superficial de agregados que precisa ser molhada pela água, tendo efeitos significativos na determinação tanto da trabalhabilidade quanto das propriedades mecânicas do concreto.

Todos os agregados utilizados foram secos à sombra, para desconsiderar parcialmente os efeitos da umidade, peneirados mecanicamente para a retirada de impurezas e das frações desejadas e quarteados manualmente para homogeneização.

As massas específicas foram determinadas por meio do ensaio de picnometria de gás hélio, realizadas no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) – UFRGS. Neste

---

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

ensaio, consegue-se determinar o volume ocupado por uma quantidade de material, comparando a variação da pressão do gás hélio na câmara contendo uma amostra de material com uma câmara de volume calibrado. O gás hélio é utilizado por ser um gás inerte e por penetrar facilmente entre os poros da amostra.

A Figura 29 mostra a realização do ensaio de picnometria de gás de hélio e a Tabela 3 descreve os resultados das massas específicas dos agregados, tanto os naturais quanto os artificiais em  $\text{g/cm}^3$ .

Figura 29 – Picnometria a gás de hélio



(a) Pesagem do material



(b) Medição do volume de gás

Fonte: A autora

Tabela 3 – Massa específica dos agregados

Tipo de Agregado	Dimensão máxima (mm)	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )
Areia natural	0,3	2,62
	1,2	2,62
	2,4	2,64
GGBF	1,2	2,79
	2,4	2,78

Fonte: A autora

### 3.2.4 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Na dosagem do ECC o uso deste material é essencial devido à ausência de agregado graúdo e a inclusão de fibras, que geram um impacto significativo na trabalhabilidade do concreto. Portanto, para melhorar a consistência das dosagens estudadas e facilitar a dispersão

das fibras, sem aumentar a relação água/material cimentante, foi utilizado o aditivo superplastificante Tec-flow 8000, fornecido pela empresa GCP.

### 3.2.5 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) foi o material cimentício suplementar escolhido como substituto parcial do cimento. Essa escolha levou em consideração o histórico do uso desse material nas pesquisas desenvolvidas no LEME-UFRGS. Além das vantagens ambientais e econômicas advindas do uso desse material, a CCA melhora o comportamento mecânico e a durabilidade do concreto, conforme resultados das pesquisas de Righi (2015) e Costa (2015).

A CCA utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa SILCCA NOBRE, a qual é refinada e comercializada em sacos de 20 Kg pela empresa Pilecco Nobre, localizada na cidade de Alegrete - RS. Este material é obtido a partir da queima controlada da casca de arroz em um sistema de combustão via leito fluidizado, que permite a extração da sílica de casca de arroz amorfa. Tal condição permite o uso da CCA como adição e os principais benefícios da incorporação deste material ao concreto ou argamassa são: a diminuição da porosidade, o aumento da resistência mecânica e à corrosão, a redução do consumo de cimento e o acréscimo de vida útil da estrutura (SILCCA NOBRE, 2015).

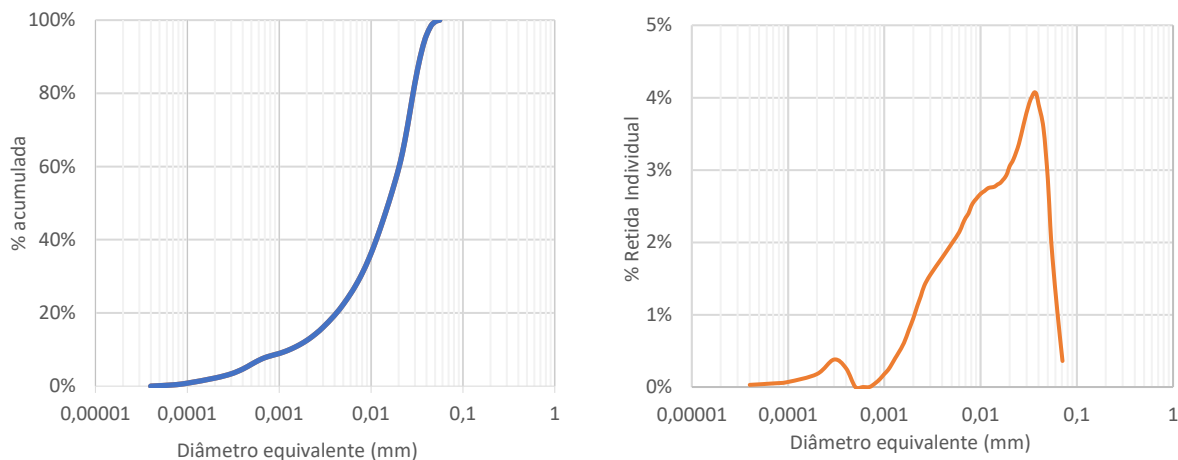
A Tabela 4 mostra as propriedades físico-químicas da CCA, conforme os dados fornecidos pelo fornecedor e os gráficos da Figura 30 (a) e (b) mostram a distribuição granulométrica acumulada e individual da CCA, que foi determinada por meio da granulometria a laser, realizada no LACER-UFRGS. e a Figura 30 (c) representa a CCA utilizada.

Tabela 4 – Propriedades da CCA

Propriedades físico-químicas	Resultado
Perda ao fogo (%)	< 3,5
Umidade (%)	< 3,0
Teor de sílica amorfa (%)	> 95
Densidade aparente	> 550
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,16
Coloração	Cinza claro

Fonte: SILCCA NOBRE (2015)

Figura 30 – Distribuição granulométrica da CCA



(a) Distribuição granulométrica retida acumulada

(b) Distribuição granulométrica retida individual



(c) CCA utilizada

Fonte: A autora

### 3.2.6 FIBRA DE POLIPROPILENO

A micromecânica do ECC é um fator que direciona a escolha do tipo de fibra a ser utilizada na composição da matriz cimentícia, com o objetivo de atingir a alta ductilidade quando submetido aos esforços de tração e a microfissuração. Apesar da baixa quantidade, cerca de 2% do volume de concreto, este material representa a maior parcela do custo de fabricação do ECC.

A escolha pela fibra de polipropileno (PP) aconteceu por ser um material facilmente disponível no Brasil, de menor custo, apesar de possuir menor módulo de elasticidade e resistência à tração, quando comparada com as fibras de PVA, tradicionalmente utilizadas na dosagem do ECC. Apesar da sua dificuldade de dispersão na matriz cimentícia devido à sua elevada razão de aspecto (comprimento/diâmetro) e hidrofobia, o que dificulta a interação

química com a matriz cimentícia, as pesquisas desenvolvidas no LEME, iniciadas com Garcez (2009), mostraram ser possível utilizar as fibras de PP em substituição às fibras de PVA e manter as propriedades mecânicas do ECC.

Para a determinação da fibra a ser utilizada, a avaliação da geometria e das propriedades mecânicas são os principais fatores a serem levados em consideração. Há de se observar que a escolha da fibra está diretamente relacionada atendimentos aos critérios de resistência e energia para se obter o comportamento dúctil desejado.

A fibra utilizada foi a microfibrã sintética de polipropileno (PP) de alta tenacidade, produzida e distribuída no Brasil pela empresa Brasilit – *Saint Gobain* da cidade de Esteio - RS. Este material é resultante do processo de fiação por fusão de uma resina de polipropileno, seguido de uma extração controlada para alcançar as suas propriedades físicas e mecânicas, sendo os filamentos cobertos por uma fina camada de acabamento por centrifugação, o que garante uma dispersão adequada das fibras em água ou no cimento. A Tabela 5 descreve as propriedades dessa fibra, conforme os dados fornecidos pelo fabricante e a Figura 31 mostra uma porção dessas fibras.

Tabela 5 – Propriedades da fibra de PP

Propriedade	Resultado
Comprimento dos filamentos (mm)	9
Diâmetro médio dos filamentos ( $d_{ext}$ )	12 $\mu$ m
Densidade ( $g/cm^3$ )	0,91
Alongamento na ruptura (%)	18 - 22
Resistência à tração (MPa)	850
Módulo de Elasticidade (GPa)	6
Resistência à álcalis	Excelente

Fonte: Organizado pela autora

Figura 31 – Distribuição granulométrica da CCA



Fonte: A autora

### 3.3 Teste de Traço

Esta etapa do programa experimental teve como principal objetivo entender o comportamento da mistura no estado fresco, avaliado pela consistência/trabalhabilidade, considerando a variação da quantidade, dimensão e origem do agregado quanto a dosagem de aditivo superplastificante. O desenvolvimento desta etapa foi importante para o estudo inicial dos traços, auxiliando na escolha de quais combinações de dosagens seriam indicadas para a caracterização mecânica.

A determinação do índice de consistência do concreto no estado fresco, avaliado por meio do seu espalhamento na mesa de consistência (*flow table*), é um parâmetro importante para avaliar a fluidez da massa e, conseqüentemente, a facilidade para moldagem do concreto. Por ser um teste rápido, barato e de fácil execução ele foi escolhido como o ensaio a ser realizado nesta etapa da pesquisa.

A dosagem de ECC adotada como referência foi a com 30% de substituição, em massa, do cimento Portland por CCA e, descrita por Righi (2015), como a que obteve melhor resultado, em sua pesquisa. Este traço, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi modificado em função dos objetivos delineados, onde foram alteradas as proporções de agregado e, conseqüentemente, o volume de aditivo.

A modificação da quantidade de aditivo ocorreu porque a mudança da distribuição granulométrica influencia na demanda de água necessária para produzir uma mistura com trabalhabilidade adequada, que está relacionada com a área superficial das partículas. Finalmente, a substituição de parte da areia fina por outro agregado que apresenta características diferentes, impacta tanto no empacotamento das partículas quanto na reologia da mistura.

Considerando os testes de traço desenvolvidos, foram moldadas 19 diferentes combinações de ECC, que variavam a proporção, dimensão e o tipo de agregado quanto o volume de aditivo superplastificante. Em todos os traços a relação água/aglomerante e o volume de fibras, igual a 2% do volume de concreto, foram mantidas constantes.

Para avaliar o efeito da variação da granulometria no comportamento do ECC, a areia fina do traço de referência foi substituída, em massa, por diferentes proporções de agregados com dimensões máximas características ( $D_{max}$ ) iguais a 1,2mm e 2,4mm. E, para avaliar o efeito da origem do agregado, parte da areia fina do traço original foi substituída por GGBF, com dimensões máximas características ( $D_{max}$ ) iguais a 1,2mm e 2,4mm.



Todos os testes desta etapa iniciaram com a substituição (em massa) da areia fina do traço de referência por 50% de agregado com  $D_{\max}=1,2\text{mm}$ . Com base nos resultados do índice de consistência e a avaliação visual da segregação, foi possível ajustar a quantidade de aditivo superplastificante, considerada como porcentagem da massa de cimento, de forma mais assertiva, para mais ou para menos, nas outras combinações avaliadas. O traço contendo 100% de areia fina foi considerado como o de referência para efeito de comparação. A Tabela 6 mostra as dosagens de ECC e as Tabelas 7 e 8 mostram um resumo das combinações avaliadas.

Tabela 6 – Dosagem do ECC ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Traço	Cimento	CCA	Água	Areia Fina	Areia Média/GGBF	Fibra	Aditivo
Traço REF.	706,41	197,61	348,55	805,00	-	17,90	4,23
ECC	706,41	197,61	348,55	Variável	Variável	17,90	Variável

Fonte: A autora

Tabela 7 – Combinação de traços: Alteração da proporção do agregado

Combinação	$D_{\max}$	Proporção Areia Fina	Proporção Areia Média	% Aditivo <sup>6</sup>
Traço REF.	0,3 mm	100%	-	0,60
Traço 1.01	1,2 mm	75%	25%	0,50
Traço 1.02	1,2 mm	50%	50%	0,25
Traço 1.03	1,2 mm	50%	50%	0,30
Traço 1.04	1,2 mm	50%	50%	0,40
Traço 1.05	1,2 mm	50%	50%	0,50
Traço 1.06	1,2 mm	-	100%	0,40
Traço 1.07	1,2 mm	-	100%	0,50
Traço 1.08	2,4 mm	75%	25%	0,50
Traço 1.09	2,4 mm	50%	50%	0,40

Fonte: A autora

Tabela 8 – Combinação de traços: Origem do agregado

Combinação	$D_{\max}$ GGBF	Proporção Areia Fina	Proporção GGBF	% Aditivo
Traço 2.01	1,2 mm	75%	25%	0,50
Traço 2.02	1,2mm	50%	50%	0,25
Traço 2.03	1,2 mm	50%	50%	0,30
Traço 2.04	1,2 mm	50%	50%	0,40
Traço 2.05	1,2 mm	50%	50%	0,50
Traço 2.06	1,2 mm	50%	50%	0,60
Traço 2.07	1,2 mm	-	100%	0,40
Traço 2.08	1,2 mm	-	100%	0,50
Traço 2.09	2,4 mm	75%	25%	0,50

Fonte: A autora

<sup>6</sup> A quantidade de aditivo é calculada como porcentagem da massa de cimento.

O procedimento adotado para a avaliação da consistência do concreto seguiu as orientações da ABNT NBR 13276:2016 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto: Determinação do índice de consistência. Segundo as orientações desta norma, o ensaio foi realizado em uma mesa giratória (*flow table*), com auxílio de um molde cônico metálico, uma régua metálica e um soquete. Após a preparação da massa de concreto, o cone foi preenchido com três camadas sendo aplicados, sequencialmente, 15, 10 e 5 golpes em cada uma das camadas. A superfície foi rasada e o molde retirado, verticalmente, prosseguindo-se com 30 giros na mesa giratória durante 30 segundos. Ao final, com o auxílio da régua metálica, foram registradas três medidas de diâmetros, e a média deles caracteriza o espalhamento do material. As Figura 32 (a) e (b) apresentam os equipamentos e o concreto após o espalhamento, respectivamente.

Figura 32 – Ensaio do índice de consistência do ECC



(a) Equipamentos para o ensaio



(b) Concreto após o espalhamento

Fonte: A autora

### 3.4 Caracterização mecânica do ECC

A falha de elementos estruturais de concreto comumente é associada ao seu comportamento frágil, quando submetido a tensões de tração. Porém, o ECC, quando submetido à essas tensões, apresenta um comportamento dúctil. Para a caracterização mecânica deste material, serão analisados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, tração direta, flexão à 4 pontos e módulo de elasticidade. O padrão de fissuração do material foi verificado apenas visualmente.

Estes ensaios foram escolhidos de forma a cumprir com os objetivos propostos pelo programa experimental e, foram executados, seguindo os procedimentos descritos nas normas técnicas ou na literatura, quando da realização de ensaios não padronizados.

### 3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ( $f_{ck}$ )

O ensaio de resistência à compressão é um dos mais importantes para a caracterização do concreto, pois o seu resultado serve tanto como parâmetro de projeto quanto para controle de qualidade do material. Este é um ensaio simples, barato, de fácil execução e consolidado universalmente, cujo objetivo é determinar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

Para a sua execução, foram seguidas as orientações das normas ABNT NBR 5738:2015 - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova e ABNT NBR 5739:2018 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Este ensaio foi realizado no LEME-UFRGS com uma prensa com capacidade de carga igual à 2000kN. Para cada um dos traços analisados, foram concretados 24 corpos de prova de 10 cm x 5 cm, com a idade de ruptura igual 3, 7 e 28 dias. Para as idades de 3 e 7 dias foram rompidos 6 corpos de prova e para 28 dias foram 12 corpos de prova, sendo todos eles carregados de forma contínua e sem choques, com velocidade de carregamento igual a  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s. Antes da ruptura, todos os corpos de prova foram retificados, para diminuir as imperfeições superficiais e evitar pontos de concentração de tensões.

Como resultado deste ensaio, tem-se a resistência à compressão, que é determinada pela razão entre a carga máxima obtida pelo ensaio e a área da seção transversal do corpo de prova. A Figura 33 mostra os corpos de prova preparados para este ensaio e a Figura 34 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 33 – Corpos de prova preparados



Fonte: A autora

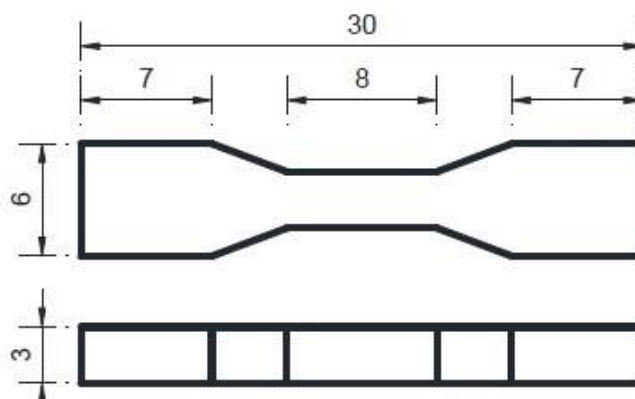
Figura 34 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: A autora

### 3.4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA ( $f_t$ )

Um dos principais ensaios para determinação das propriedades mecânicas do ECC é o de tração direta. Apesar deste ensaio não ser muito utilizado para caracterização do concreto convencional, não ser padronizado e apresentar grande variabilidade nos resultados, ele é importante para determinar da relação tensão x deformação do ECC. Por essas razões, a sua execução deve ser cuidadosa de forma que haja menor interferência possível nos resultados. Para este ensaio foi utilizado corpo de prova do formato *dogbone*, cujas dimensões podem ser observadas na Figura 35.

Figura 35 – Dimensões do *dogbone* (cm)

Fonte: Righi (2015)

A moldagem dos corpos de prova para este ensaio ocorreu no LEME-UFRGS, em formas metálicas, sendo concretadas 4 unidades para cada uma das dosagens estudadas. Devido a sensibilidade do ensaio, a moldagem em formas metálicas torna-se importante para garantir menor variação dimensional dos corpos de prova. Pequenas diferenças em suas dimensões podem trazer dificuldade para o correto encaixe dos corpos de prova nas garras e consequente pontos de concentração de tensões, além de gerar uma torção localizada, impactando nos resultados do ensaio.

A idade de ruptura dos corpos de prova foi  $(28 \pm 1)$  dias e a velocidade de controle de deslocamento foi 0,2 mm/min, simulando um comportamento quase estático no ensaio. A ruptura deste ensaio foi no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL – UFRGS), em uma prensa com capacidade de carga de 100kN, conectada a um sistema para aquisição de dados de carga. A Figura 36 mostra o conjunto de forma utilizado para a moldagem dos corpos de prova e a Figura 37 mostra o corpo de prova preparado para o ensaio.

Figura 36 – Forma para moldagem dos *dogbones*



Fonte: A autora

Figura 37 – Corpo de prova preparado para ensaio



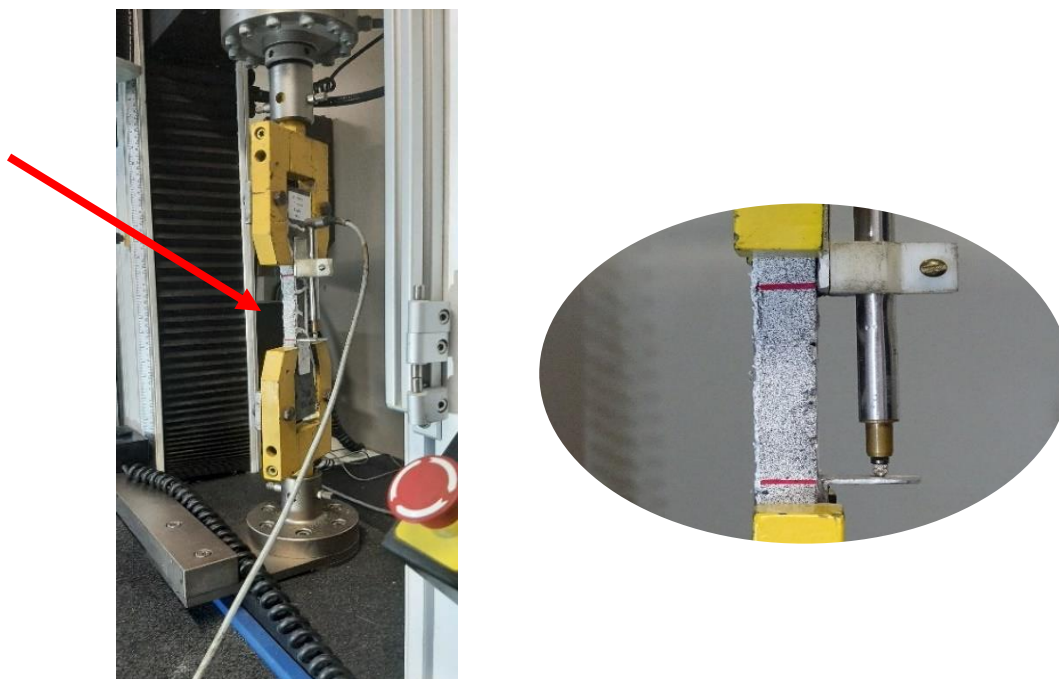
Fonte: A autora



Para a medição dos deslocamentos do corpo de prova foram utilizadas duas metodologias, simultaneamente: a primeira foi com um LVDT (Transdutor de Deslocamento Variável Linear), posicionado na face frontal e na região central do corpo de prova, conforme a Figura 38. A situação ideal é sempre utilizar mais de um equipamento de medição, porém por disposições construtivas da garra, utilizou-se apenas um equipamento.

O LVDT utilizado é da marca HBM com um curso de medição igual a  $\pm 10$  mm e precisão de 0,01 mm. A aquisição de dados dos deslocamentos foi realizada pelo programa *Catman Easy*, a partir do equipamento *Spider8*, também da marca HBM, com frequência de aquisição de dados igual a 10 Hz. De posse dos dados de carga da prensa e dos deslocamentos foi possível montar a curva tensão x deformação para cada um dos corpos de prova ensaiados.

Figura 38 – Ensaio de tração direta



Fonte: A autora

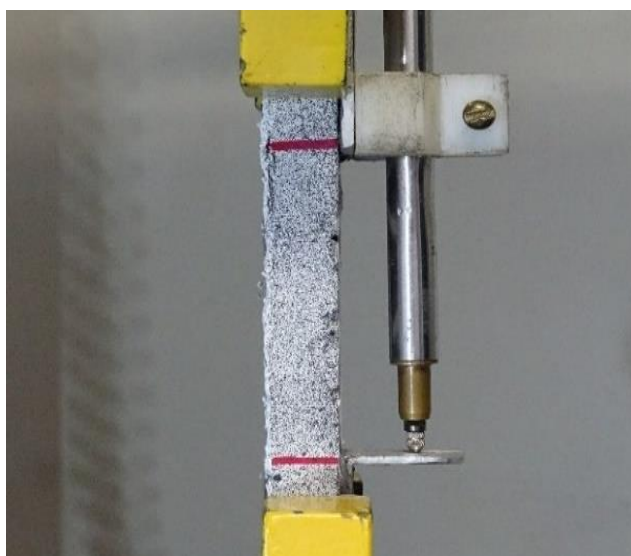
Para complementar o estudo, outra forma escolhida para a aquisição de dados foi por meio da DIC<sup>7</sup> (*Digital Image Correlation*) que é classificada como uma técnica óptica sem contato e que pode determinar o deslocamento de superfície através do pós-processamento de

---

<sup>7</sup> Esta metodologia foi utilizada como complemento do trabalho, não sendo o foco principal, por não ser totalmente validada no meio acadêmico. Os dados obtidos serão utilizados na pesquisa de doutorado que está sendo desenvolvida por Ottoni, com previsão de defesa em 2024. Essa mesma observação vale para todos os ensaios de caracterização mecânica desenvolvido nesta pesquisa.

imagens digitais. A superfície de interesse a ser fotografada deve ser coberta com padrões de manchas artificiais dispostas aleatoriamente e então realiza-se a comparação entre as situações inicial e final, após o ensaio. Para a criação do padrão de manchas, a superfície do corpo de prova filmada foi pintada com uma tinta de cor branca, formando a base e, após a secagem, foi realizado espreiamento com *spray* preto fosco, para produzir contraste e criar pontos estocásticos, de forma possa ser identificado e avaliado pelo *software* no pós-processamento da imagem. A Figura 39 mostra o padrão de pintura.

Figura 39 – Padrão de pintura



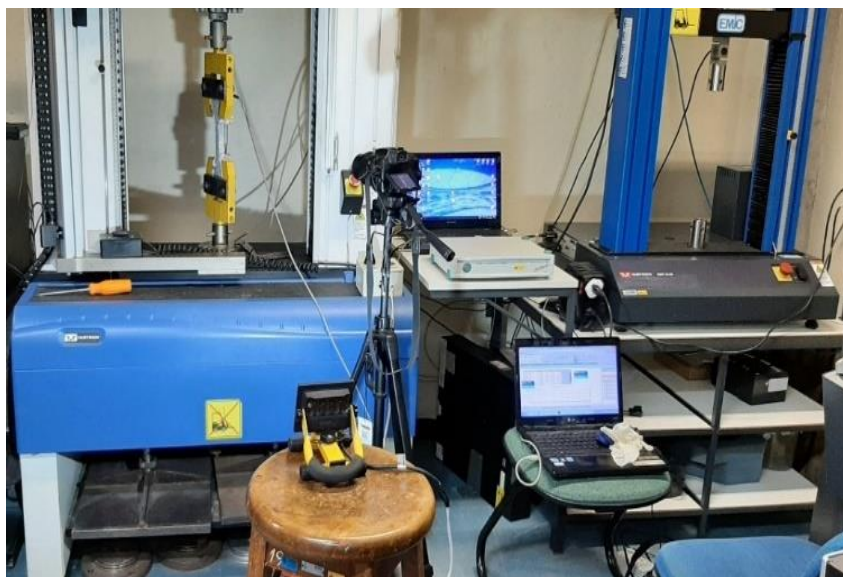
Fonte: A autora

O uso desta técnica para medição de deslocamentos atingiu seu ápice nos últimos anos, devido ao rápido e bem-sucedido desenvolvimento de diferentes equipamentos eletrônicos como as câmeras digitais e os *softwares* especializados para processamento de imagens. As filmagens dos corpos de prova foram capturadas com uma câmera digital modelo *Cyber-Shot*, marca Sony, *full HD*, capazes de capturar 30 quadros por segundo, posicionadas de forma a estar a 90° da região do centro do prisma. Para a aquisição de imagens, o ideal é utilizar duas câmeras, porém pela configuração da posição da prensa, foi utilizada somente uma.

A Figura 40 mostra o *layout* para adotado para a aquisição da imagem. Durante o ensaio, deve-se sempre buscar reduzir a interferência da incidência da luz, efeitos de vibrações e ruídos externos, para evitar distorções nos resultados. Os corpos de prova também foram iluminados com refletores de LED de cor branca, para eliminar possíveis sombras e assim garantir uma

melhor qualidade de filmagem. O *software Gom Correlate* foi utilizado para o processamento das imagens e geração do padrão de deformação do corpo de prova. Maiores detalhes sobre a aplicação da metodologia DIC por ser obtida no trabalho desenvolvido por Ottoni (2020). A avaliação e validação dessas medições faz parte do programa experimental de doutorado, deste autor, em desenvolvimento.

Figura 40 – Layout para a captura de imagem



Fonte: A autora

Como respostas deste ensaio tem-se a medição do alongamento da região central do corpo de prova e a curva tensão x deformação, de onde consegue-se obter várias informações importantes para o ensaio, que são: a tensão de abertura da primeira fissura, tensão máxima e deformação na tensão máxima. Neste ensaio não foi feita contagem da quantidade de fissuras e nem a medição do comprimento e espessura delas.

### 3.4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO ( $f_{t,f}$ )

Para avaliar o comportamento do concreto à tração, o ensaio de flexão, sozinho, não pode ser utilizado para caracterizar esse comportamento sendo que o módulo de ruptura e a deformação dependem tanto das propriedades de tração quanto de compressão do material. Mesmo com essa limitação e, considerando a facilidade de execução deste ensaio, ele pode ser usado como uma forma de controlar a qualidade do material desde que, anteriormente, seja



comprovado que o concreto analisado apresente o comportamento *strain-hardening* quando submetido a tensões de tração (LI, 2019).

A norma utilizada como referência para este ensaio foi a ASTM C1609 - *Standart test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete*, cujo objetivo é avaliar o desempenho de concretos reforçados com fibras, usando os parâmetros advindos da curva carga x deslocamento, obtida pelo carregamento no terço médio das vigas. A recomendação da ASTM C1609 é que as dimensões dos corpos de prova prismáticos tenham as seguintes dimensões<sup>8</sup>: 100 x 100 x 350 mm ou 150 x 150 x 500 mm, podendo ser adotadas outras dimensões desde que a altura e a largura sejam, no mínimo, três vezes o comprimento da fibra utilizada e que o comprimento do corpo de prova seja, no mínimo, 350 mm.

Para cada uma das dosagens estudadas foram concretados 3 corpos de prova prismáticos, com dimensões 50 x 100 x 400 mm e vão livre para ensaio igual a 300 mm, com idade de ruptura igual a  $(28 \pm 1)$  dias. As moldagens foram executadas no LEME – UFRGS e ruptura realizada no LAPOL-UFRGS em uma prensa com capacidade de carga de 100kN. A Figura 41 mostra o conjunto de formas utilizado para as concretagens e os corpos de prova moldados.

Figura 41 – Formas e corpos de prova



(a) Formas



(b) Corpos de prova moldados

Fonte: A autora

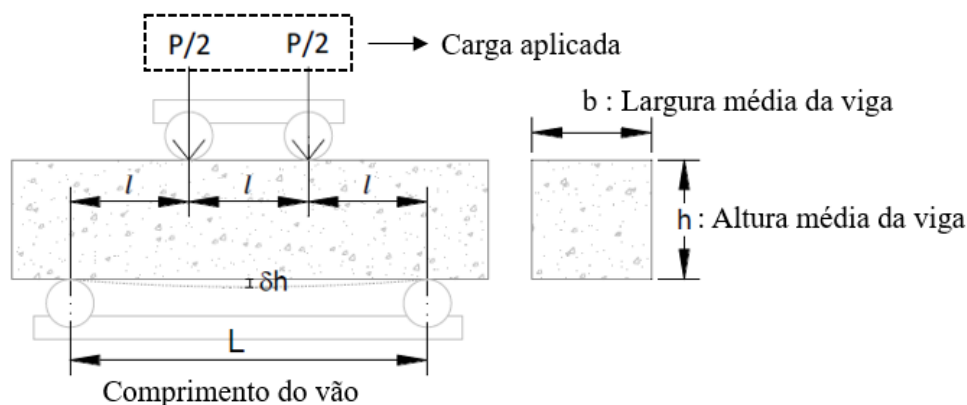
Durante a execução deste ensaio, foi aplicada uma carga vertical monotônica crescente, no terço médio de uma viga biapoiada, solicitando a amostra à flexão, conforme ilustra a Figura 42. A velocidade de controle de deslocamento aplicada foi igual à 0,2 mm/min, simulando um comportamento quase estático. Para a correta execução do ensaio, deve-se garantir que as

---

<sup>8</sup> Altura x largura x comprimento

fissuras principais na estrutura ocorram na região central do corpo de prova, que é a de momento fletor máximo da estrutura. Para tanto, considera-se uma tolerância de 5% em relação à essa região central para a ocorrência de fissuras, conforme as orientações da norma ASTM C1609. Com a curva força x deslocamento obtida é possível definir a força na abertura da primeira fissura, a força máxima e o deslocamento vertical para cada uma dessas cargas.

Figura 42 – Esquema do ensaio de flexão



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2018)

Para a medição dos deslocamentos do corpo de prova, semelhante ao ensaio de tração direta, foram utilizadas duas metodologias: uma foi com dois LVDT's, sendo dispostos em cada um dos lados do corpo de prova, no centro do vão livre. Para posicioná-los adequadamente, utilizou-se um pórtico retangular (*yoke*) para fixação dos LVDT's e, na parte inferior dos corpos de prova foi fixada uma chapa de aço que serviu como elemento de referência para a medição dos deslocamentos verticais da viga. A Figura 43 mostra o esquema de medição dos deslocamentos utilizando LVDT's.

Os LVDT's utilizado são da marca HBM com um curso de deslocamento igual a  $\pm 10$  mm e precisão de 0,01 mm. A aquisição de dados dos deslocamentos foi realizada pelo programa *Catman Easy*, a partir do equipamento *Spider8*, também da marca HBM, com frequência de aquisição de dados igual a 10 Hz. De posse dos dados de carga da prensa e dos deslocamentos foi possível montar a curva força x deslocamento vertical.

Figura 43 – Ensaio de flexão 4 pontos com LVDT's



Fonte: A autora

A outra forma para a aquisição de dados foi por meio da DIC, que seguiu o mesmo processo e cuidados adotados no ensaio de tração direta para a criação do padrão de manchas na superfície do corpo de prova, *layout* e captura de imagem. A análise dos resultados por meio da DIC foi desenvolvida no software *Gom Correlate*, utilizado para o processamento das imagens e geração do padrão de deformação do corpo de prova. A Figura 44 exibe o detalhe do padrão de pintura.

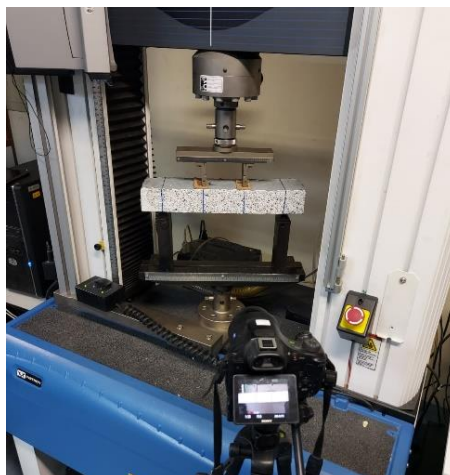
Figura 44 – Padrão de pintura dos corpos de prova



Fonte: A autora

Diferentemente do ensaio de tração direta, a obtenção dos dados de deslocamento não ocorreu de forma simultânea, pois o pórtico utilizado para o suporte dos LVDT's atrapalhava a captura das imagens. Por conta disso, optou-se por ensaiar 2 corpos de prova com o sistema de medição tradicional e 1 corpo de prova com a captura de imagens, a fim de comparar os resultados obtidos pelas duas metodologias de medição. A Figura 45 mostra a configuração adotada para a captura da imagem por meio da DIC.

Figura 45 – Esquema para captura da imagem



Fonte: A autora

Finalmente, o objetivo do ensaio de flexão a 4 pontos é determinar o comportamento do compósito quando submetido à flexão, sendo a resistência à tração na flexão um dos resultados obtidos e, para o seu cálculo, segundo a teoria clássica da resistência dos materiais, este valor pode ser obtido por meio da Equação 5.

$$\sigma_{t,f} = \frac{PL}{bh^2} \quad (5)$$

$\sigma_{t,f}$ : Tensão à tração na flexão;

$P$ : Carga aplicada no corpo de prova;

$L$ : Distância entre os apoios (vão livre do ensaio);

$b$ : Largura da seção transversal;

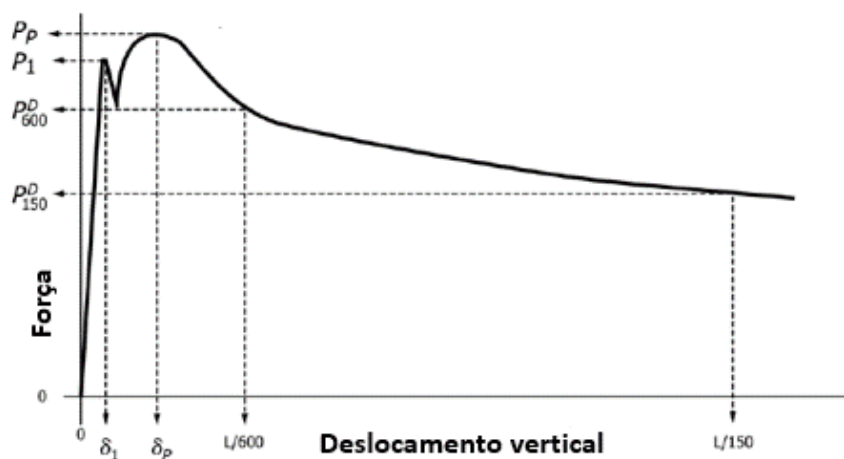
$h$ : Altura da seção transversal;

A tensão de tração à flexão, quando ocorre a abertura da primeira fissura é obtida substituindo os devidos valores na Equação 5, sendo  $P$  a carga que indica o fim do trecho linear-elástico da curva força x deslocamento. O módulo de ruptura é a maior tensão resistida pelo material, e que também pode ser calculada com base nessa equação. Para cada uma dessas tensões também se define os respectivos valores de deslocamento vertical.

Segundo a norma ASTM C1609, a Figura 46 representa a forma da resposta padrão esperada para o comportamento *deflection-hardening* do ensaio de flexão a 4 pontos. Para este caso, as fibras adicionadas ao concreto têm como papel melhorar do comportamento mecânico

do compósito após a fissuração. A curva de resultado deste ensaio, que apresenta este comportamento, pode ser dividida em quatro diferentes trechos: Primeiro, um trecho linear-elástico onde as deformações são proporcionais às tensões, até a abertura da primeira fissura. O segundo trecho é caracterizado pela mudança de direção da curva, pelo início do processo de múltipla fissuração e pela perda da relação linear entre a tensão e a deformação. No terceiro trecho observa-se a abertura das fissuras existentes e aumento da força até um valor máximo. No último trecho ocorre a redução da capacidade de carga resistente de uma fissura principal até a ocorrência do arrancamento da fibra da matriz cimentícia (RIBEIRO, 2021).

Figura 46 – Comportamento esperado para o ensaio de flexão a 4 pontos



- $P_1$  Força de abertura da 1ª fissura;
- $P_p$  Força máxima;
- $\delta_1$  Deslocamento vertical na abertura da 1ª fissura;
- $\delta_p$  Deslocamento vertical na carga máxima;
- $P_{600}^D$  Carga residual para o deslocamento vertical igual a  $L/600$ ;
- $L/600$  Deslocamento vertical igual a  $L/600$ ;
- $P_{150}^D$  Carga residual para o deslocamento vertical igual a  $L/150$ ;
- $L/150$  Deslocamento vertical igual a  $L/150$ ;

Fonte: Adaptado ASTM C1609

Outro resultado importante que pode ser obtido com este ensaio é a tenacidade ( $T_{150}^D$ ) que representa o trabalho dissipado do material, sendo é calculado pela área abaixo da curva força x deslocamento do ensaio de flexão à 4 pontos, tendo o ponto final de deslocamento igual a  $L/150$ , que neste caso é equivalente à 2mm, conforme a orientação da norma ASTM

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

C1609. Esta propriedade representa a energia absorvida pelo material quando carregado, tanto antes quanto após o início da fissuração da matriz cimentícia, quando as fibras começam a atuar no processo de transferência de tensões (FIGUEIREDO, 2011).

Para considerar a parcela não-linear da curva força x deslocamento obtida por este ensaio, a ASTM C1609 recomenda o cálculo da tensão de tração na flexão equivalente ( $f_{e,150}^D$ ), conforme a Equação 6, no ponto com deslocamento igual a  $L/150$ . Com este resultado consegue-se calcular o fator de tenacidade à flexão ou a razão de resistência de flexão equivalente ( $R_{T,150}^D$ ), que é obtido pela razão entre a tensão de tração equivalente ( $f_{e,150}^D$ ) sobre a tensão de abertura da primeira fissura ( $f_1$ ), conforme a Equação 7, sendo esta uma forma de avaliar a ductilidade do material.

$$f_{e,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{bh^2} \quad (6)$$

$$R_{T,150}^D = \frac{f_{e,150}^D}{f_1} \times 100\% \quad (7)$$

$f_{e,150}^D$ : tensão de tração na flexão equivalente (MPa);

$T_{150}^D$ : tenacidade (J);

b: largura média da seção viga (mm);

h: altura média da seção viga (mm);

### 3.4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Outra propriedade mecânica importante do concreto é o módulo de elasticidade. A sua correta determinação é de grande importância para o cálculo das deformações de uma estrutura, sendo decisivo para um dimensionamento eficiente e que atenda aos requisitos de segurança de projeto, sobretudo para situações em que as estruturas são mais esbeltas e com maiores vãos. O módulo de elasticidade do concreto relaciona a tensão aplicada no material com a deformação no regime elástico, representando a rigidez do material.

A norma ABNT NBR 8522-1:2021 Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão especifica a metodologia de ensaio para a determinação do módulo de deformação tangente inicial, foi a referência adotada para este ensaio.

Seguindo as orientações desta norma, para cada uma das dosagens estudadas foram concretados 5 corpos de provas cilíndricos, de dimensões 10cm x 20cm, sendo todos da mesma betonada e moldados conforme os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 5738:2015.

A execução desse ensaio é dividida em duas etapas. A primeira é determinar a resistência à compressão do concreto, conforme as orientações da ABNT NBR 5739, onde foram utilizados dois corpos de prova. O valor de  $f_c$  foi determinado a partir da média dos resultados obtidos.

Na segunda etapa, que é efetivamente o ensaio de módulo, foram utilizados os outros 3 corpos de prova, sendo adotada a metodologia de tensão fixa. Neste caso o corpo de prova é carregado até a uma força correspondente à tensão limite superior, correspondente à 30% de  $f_c$ , e mantida nesse nível de carga por 60s. Posteriormente o corpo de prova é descarregado até a uma tensão equivalente à 0,5MPa e mantido nesse nível de carga por 60s. Esse procedimento é repetido de forma que ocorram 4 ciclos de carga e 3 ciclos de descarga. Após o ensaio esses corpos de prova são rompidos se para determinar a resistência a compressão.

A medida dos deslocamentos dos corpos de prova foi obtida por meio de dois LVDT's da marca HBM com um curso de deslocamento igual a +/- 2 mm e a aquisição de dados foi realizada pelo programa *Catman Easy*, a partir do equipamento *QuantumX*, também da marca HBM, com frequência de aquisição de dados igual a 10 Hz.

Para este ensaio, além da metodologia tradicional para medição dos deslocamentos, descrita em norma, também foi utilizada a correlação por imagem para a determinação do módulo de elasticidade. Neste caso, cabe ressaltar que as duas metodologias ocorreram simultaneamente.

Os procedimentos de preparação dos corpos de prova e cuidados necessários para a execução dos ensaios foram os mesmos descritos para os ensaios de tração direta e flexão à 4 pontos. A Figura 47 mostra um corpo de prova submetido a este ensaio.



Figura 47 – Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: A autora

O valor do módulo de elasticidade foi determinado conforme a ABNT NBR 8522:2021, considerando a metodologia de tensão fixa, pode ser calculado conforme a Equação 8:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (8)$$

$\sigma_b$ : Maior tensão correspondente a 30% da resistência à compressão ( $\sigma_b = 0,3f_c$ );

0,5 é a tensão básica, expressa em MPa;

$\varepsilon_b$ : Deformação específica média dos corpos de prova sob a maior tensão;

$\varepsilon_a$ : Deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica;



## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

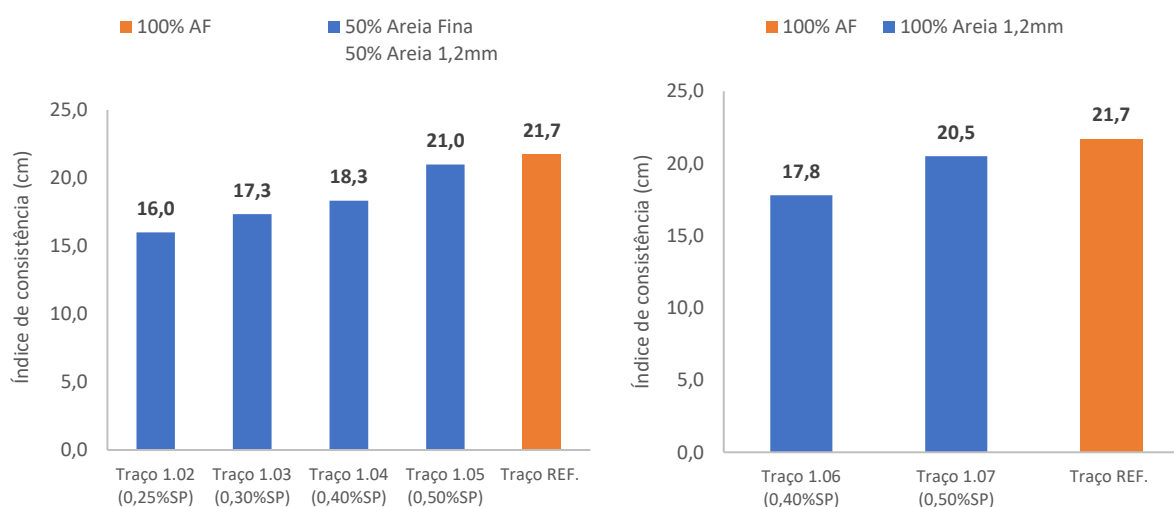
Neste capítulo são exibidos e discutidos os resultados experimentais das etapas propostas neste trabalho.

### 4.1 Teste de traço

Para cada uma das 19 dosagens estudadas (Tabelas 7 e 8) foi avaliada a trabalhabilidade, por meio da medição do índice de consistência. Esta etapa, conforme descrito no item 3.3, foi importante para adequação da quantidade de aditivo superplastificante utilizado na dosagem do concreto e para escolher os traços para posterior caracterização mecânica. Além da determinação do índice de consistência, determinado pela média de três diâmetros obtidos após o espalhamento, foi feita uma avaliação visual para observar possíveis problemas, como a segregação do material.

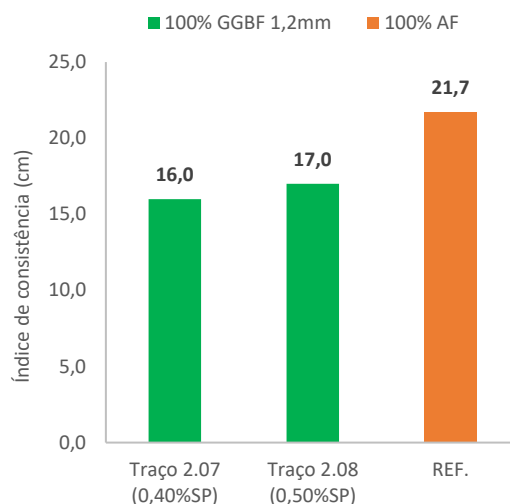
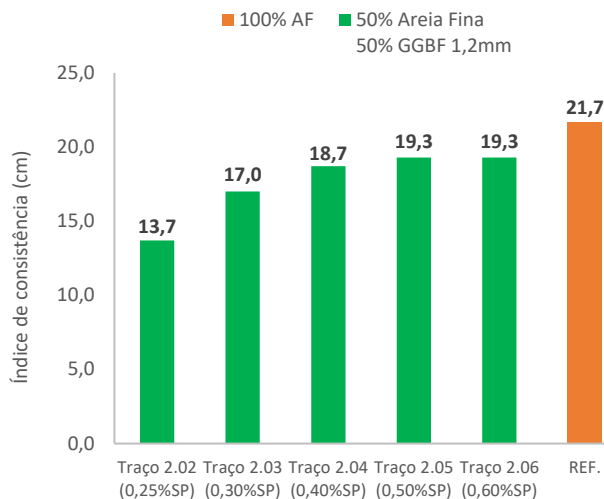
Os gráficos das Figura 48 mostram os resultados dos índices de consistência, considerando a variação da quantidade de aditivo superplastificante na dosagem e os gráficos da Figura 49 exibem a evolução do índice de consistência, considerando a substituição da areia fina, para cada uma das dimensões e origem dos agregados utilizados. As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados obtidos para cada uma das dosagens avaliadas.

Figura 48 – Resultados do índice de consistência (Aditivo Superplastificante)



(a) Índice de consistência para a proporção 50% areia fina e 50% areia natural com  $D_{max}=1,2mm$

(b) Índice de consistência para a proporção 100% areia natural com  $D_{max}=1,2mm$

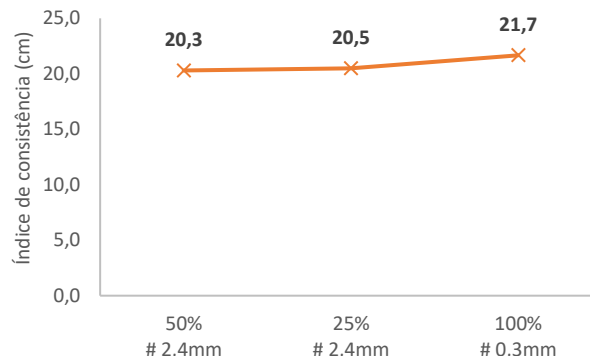
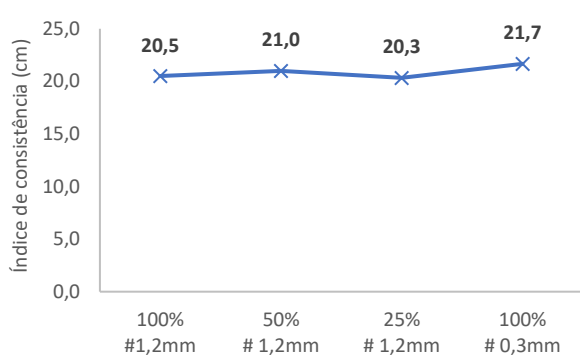


(c) Índice de consistência para a proporção 50% areia fina e 50% GGBF com  $D_{max}=1,2mm$

(d) Índice de consistência para a proporção 100% areia natural com  $D_{max}=1,2mm$

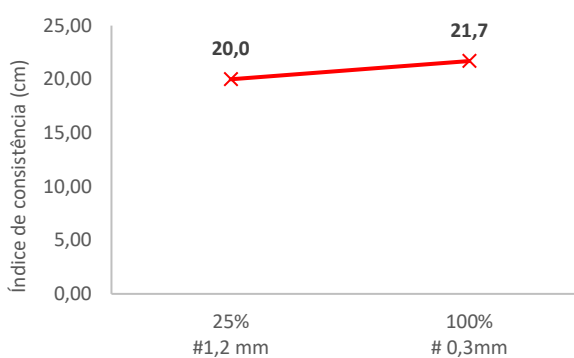
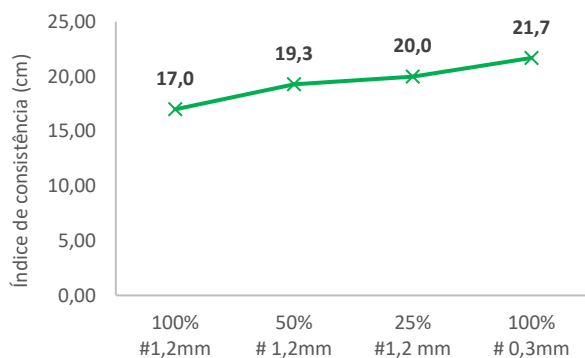
Fonte: A autora

Figura 49 – Evolução do índice de consistência (Agregado)



(a) Evolução do Índice de consistência areia natural com  $D_{max}=1,2mm$

(b) Evolução do Índice de consistência areia natural com  $D_{max}=2,4mm$



(c) Evolução do Índice de consistência GGBF com  $D_{max}=1,2mm$

(d) Evolução do Índice de consistência GGBF com  $D_{max}=2,4mm$

Fonte: A autora

Tabela 9 – Índice de consistência (Areia natural)

Combinação	D <sub>max</sub>	Proporção Areia Fina	Proporção Areia Média	% Aditivo	Índice de consistência (cm)
Traço REF.	0,3mm	100%	-	0,60	21,7
Traço 1.01	1,2 mm	75%	25%	0,50	20,3
Traço 1.02	1,2 mm	50%	50%	0,25	16,0
Traço 1.03	1,2 mm	50%	50%	0,30	17,3
Traço 1.04	1,2 mm	50%	50%	0,40	18,3
Traço 1.05	1,2 mm	50%	50%	0,50	21,0
Traço 1.06	1,2 mm	-	100%	0,40	17,8
Traço 1.07	1,2 mm	-	100%	0,50	20,5
Traço 1.08	2,4 mm	75%	25%	0,50	20,5
Traço 1.09	2,4 mm	50%	50%	0,40	20,3

Fonte: A autora

Tabela 10– Índice de consistência (GGBF)

Combinação	D <sub>max</sub> GGBF	Proporção Areia Fina	Proporção GGBF	% Aditivo	Índice de consistência (cm)
Traço 2.01	1,2 mm	75%	25%	0,50	20,0
Traço 2.02	1,2mm	50%	50%	0,25	13,7
Traço 2.03	1,2 mm	50%	50%	0,30	17,0
Traço 2.04	1,2 mm	50%	50%	0,40	18,7
Traço 2.05	1,2 mm	50%	50%	0,50	19,3
Traço 2.06	1,2 mm	50%	50%	0,60	19,3
Traço 2.07	1,2 mm	-	100%	0,40	16,0
Traço 2.08	1,2 mm	-	100%	0,50	17,0
Traço 2.09	2,4 mm	75%	25%	0,50	20,0

Fonte: A autora

Como base nos resultados do índice de consistência obtidos para cada um dos traços, foram escolhidas as dosagens para a caracterização mecânica do ECC. Para tal, foram selecionadas as combinações que apresentaram as maiores trabalhabilidades, totalizando 7 diferentes dosagens. As Tabelas 11 e 12 mostram quais foram os traços selecionados para cada uma das condições avaliadas e a Tabela 13 mostra os ensaios escolhidos para a caracterização mecânica e as respectivas quantidade de corpos de prova moldados.

Tabela 11 – Dosagem do ECC (kg/m<sup>3</sup>) – Areia quartzoza<sup>9</sup>

Traço	Cimento	CCA	Água	Areia Fina	Areia Média 1,2 mm	Areia Média 2,4 mm	Fibra	% Aditivo
Traço 1.01	706,41	197,61	348,55	603,80	201,30	-	17,90	0,50
Traço 1.05	706,41	197,61	348,55	402,50	402,50	-	17,90	0,50
Traço 1.08	706,41	197,61	348,55	616,51	-	205,50	17,90	0,50
Traço 1.09	706,41	197,61	348,55	413,35	-	410,22	17,90	0,40

Fonte: A autora

Tabela 12 – Dosagem do ECC (kg/m<sup>3</sup>) – GGBF

Traço	Cimento	CCA	Água	Areia Fina	GGBF 1,2 mm	GGBF 2,4 mm	Fibra	% Aditivo
Traço 2.01	706,41	197,61	348,55	612,96	204,32	-	17,90	0,50
Traço 2.09	706,41	197,61	348,55	613,77	-	202,92	17,90	0,40

Fonte: A autora

Tabela 13 – Ensaio de caracterização mecânica

Ensaio	Resistência Compressão	Flexão 4 pontos	Tração Direta	Módulo de Elasticidade
Idade (dias)	3, 7 e 28	28	28	28
Traço REF.	24	3	4	5
Traço 1.01	24	3	4	5
Traço 1.05	24	3	4	5
Traço 1.08	24	3	4	5
Traço 1.09	24	3	4	5
Traço 2.01	24	3	4	5
Traço 2.09	24	3	4	5

Fonte: A autora

Analisando os resultados experimentais obtidos com o teste de traço podem ser feitos os seguintes comentários e considerações:

- Para todas as misturas, independentemente da origem do agregado, com a alteração da dimensão e da taxa de substituição da areia fina houve diminuição da trabalhabilidade, conforme esperado.
- Observando os resultados dos gráficos da Figura 48, mantendo-se constante a proporção de agregado e variando o volume de aditivo superplastificante adicionado à mistura, tem-se uma melhora do índice de consistência, porém, este valor é sempre menor que o do traço de referência. É importante destacar que existe um limite superior para a quantidade de

<sup>9</sup> A dosagem de referência está descrita na Tabela 7.

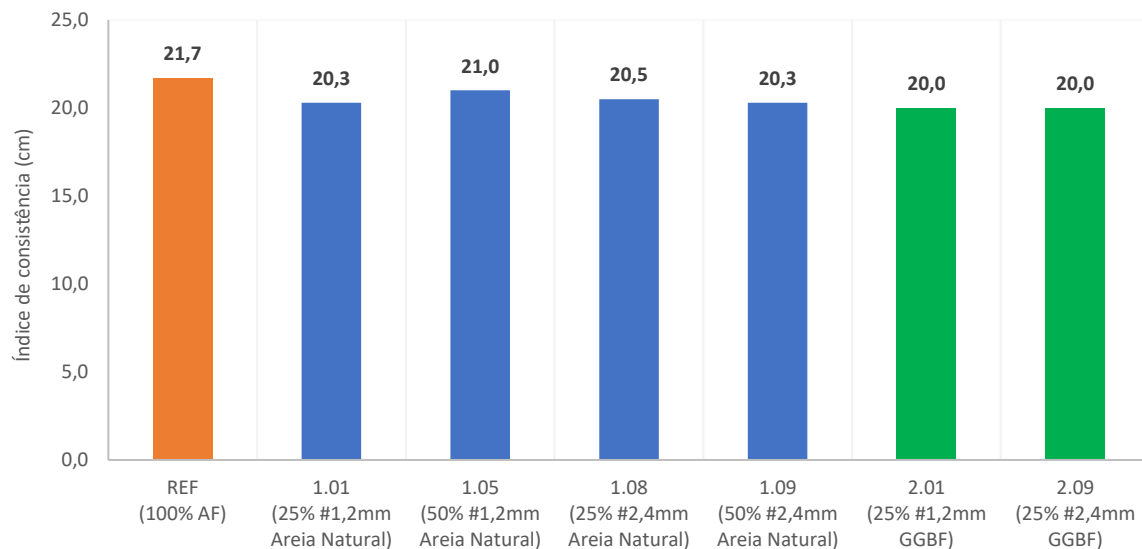
aditivo superplastificante, a partir da qual ocorre a segregação da mistura e não há mais a melhora da trabalhabilidade.

- c) Conforme os gráficos da Figura 49, o índice de consistência melhora com o aumento da proporção da areia fina na mistura. Este resultado ocorre tanto para a variação da origem quanto para a variação da dimensão do agregado. A exceção ocorreu na proporção de 25% de areia natural com  $D_{\max}=1,2\text{mm}$  (gráfico (a) da Figura 49). Tal fato pode ter ocorrido por problemas durante o processo de mistura, que impactou na reologia do concreto. Comparando os efeitos da dimensão do agregado na trabalhabilidade, considerando as mesmas proporções de areia fina na mistura, os índices de consistência da areia com  $D_{\max}=1,2\text{mm}$  foram maiores do que a de  $D_{\max}=2,4\text{mm}$ . Portanto, entende-se que a quantidade de partículas mais finas de agregado na mistura impacta positivamente no índice de consistência. Destaca-se que o aumento da dimensão do agregado dificulta a homogeneização das fibras, gerando concentração e dispersão irregular desse elemento, o que impacta negativamente na trabalhabilidade do concreto. Esse fato foi levantado por Sahmaran et al. (2012) e Yu et al. (2022). Este efeito é mais evidenciado quando se aumenta a dimensão do agregado utilizado.
- d) Para as combinações contendo GGBF, considerando os baixos índices de consistência obtidos com as combinações com  $D_{\max}=1,2\text{mm}$ , decidiu-se não fazer as combinações contendo 50% e 100% de GGBF com  $D_{\max}=2,4\text{mm}$ , pois antecipadamente, percebeu-se que não seria atingida uma trabalhabilidade adequada para a mistura.
- e) Além do efeito do agregado na trabalhabilidade devem ser destacadas duas características das fibras de PP que também impactam nesta propriedade, que são: a sua superfície hidrofóbica e a elevada razão de aspecto (comprimento/diâmetro). Esta última torna-se necessária para garantir a efetividade do processo de transferência de tensões da fibra de PP, devido à baixa aderência química entre a fibra e a matriz cimentícia (ZHANG D. et al, 2022).

O gráfico da Figura 50 mostra a comparação dos índices de consistência para as dosagens escolhidas. Observando esses resultados, incorporando a GGBF como substituinte parcial da areia fina, tem-se que os índices de consistência, para todas as dosagens, foram menores do que os das dosagens que continham areia natural. Tal fato pode ser justificado pelo formato dos grãos e pela rugosidade. A areia natural tende a apresentar uma forma esférica enquanto a GGBF uma forma lamelar, conforme observação visual do formato dos grãos.

Na Figura 51, as letras (a) e (b), mostram o abatimento de duas diferentes dosagens, contendo somente areia natural enquanto a Figura 52 mostra a evolução da consistência do concreto com a variação do volume de aditivo superplastificante.

Figura 50 – Comparação dos índices de consistência para as dosagens selecionadas



Fonte: A autora

Figura 51 – Avaliação visual do teste de índice de consistência – Areia natural



(a) Traço 1.05  
(Composição: 50% #1,2mm e 50% #0,3mm)

(b) Traço 1.09  
(Composição: 50% #2,4mm e 50% #0,3mm)

Fonte: A autora

Figura 52 – Avaliação visual do teste de índice de consistência – GGBF  $D_{max}=1,2mm$ .



(a) Traço 2.02  
(Composição: 0,25% Aditivo superplastificante)



(b) Traço 2.03  
(Composição: 0,30% Aditivo superplastificante)



(c) Traço 2.04  
(Composição: 0,40% Aditivo superplastificante)



(d) Traço 2.06  
(Composição: 0,60% Aditivo superplastificante)

Legenda: Evolução do índice de consistência para a proporção 50% Areia fina (0,3mm) e 50% GGBF com  $D_{max}=1,2mm$  variando a 25

Fonte: A autora

Analisando a Figura 52 (a) percebe-se que a quantidade de aditivo superplastificante não foi adequada, com a amostra apresentando pouco espalhamento. Nas letras (b) e (c), a amostra apresenta uma melhora da trabalhabilidade com o aumento do volume de aditivo superplastificante adicionado. Na letra (d) percebe-se que houve segregação na mistura, com a formação de uma camada de água em volta do concreto, indicando excesso de água na



mistura. Com isso, conclui-se que nesse traço especificamente, o aditivo superplastificante foi dosado além do necessário e que, a partir desse ponto, não há melhora na trabalhabilidade da mistura.

Conforme Figmig e Kovac (2019) e Aissoun, Hwang, Khayat (2016) as propriedades do agregado, como composição granulométrica, dimensão, forma e textura, impactam diretamente consistência e nas propriedades mecânicas do concreto. Os efeitos do agregado, especificamente na reologia do concreto, resultam das forças de atrito entre as partículas e do movimento delas no estado fresco do concreto (HU; WANG, 2011).

Figmig e Kovac (2019), em seu trabalho, levantaram os seguintes fatos acerca da trabalhabilidade do concreto:

- A demanda por água para atingir a consistência necessária diminui com o aumento da dimensão das partículas na mistura. Conseqüentemente, para partículas com menores dimensões, necessita-se de mais água para alcançar a consistência. Isso acontece pelo aumento da superfície específica das partículas menores.
- Os grãos com forma arredondada e superfície lisa melhoram a consistência do concreto.

Wu et al. (2019) em seu estudo sobre a influência da forma do agregado no comportamento do ECC, percebeu que o volume de aditivo superplastificante diminui com o aumento da esfericidade do agregado. Eles justificam que tal fato provavelmente ocorre porque a areia com menor angulosidade dos grãos apresenta menos atrito interno durante a mistura, impactando positivamente na trabalhabilidade.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) para a obtenção de uma trabalhabilidade adequada, o consumo de água da mistura diminui quando aumenta-se a dimensão máxima característica de um agregado com boa composição granulométrica. E, conforme Neville (2016), uma elevada relação entre o volume de agregados com maior dimensão em relação a agregados mais finos pode resultar em segregação e menor trabalhabilidade, obtendo-se uma mistura mais áspera e de difícil acabamento. Hu e Wang (2011) afirmam e há a elevação da viscosidade com o aumento da fração de volume de agregado com maior dimensão.

Esses pontos levantados corroboram com o comportamento e os resultados obtidos no teste de traço. Como conclusão desta etapa tem-se que o agregado possui um papel fundamental



no comportamento do concreto no estado fresco e que a escolha e proporção adequadas desse componente é um fator importante para a obtenção da consistência adequada.

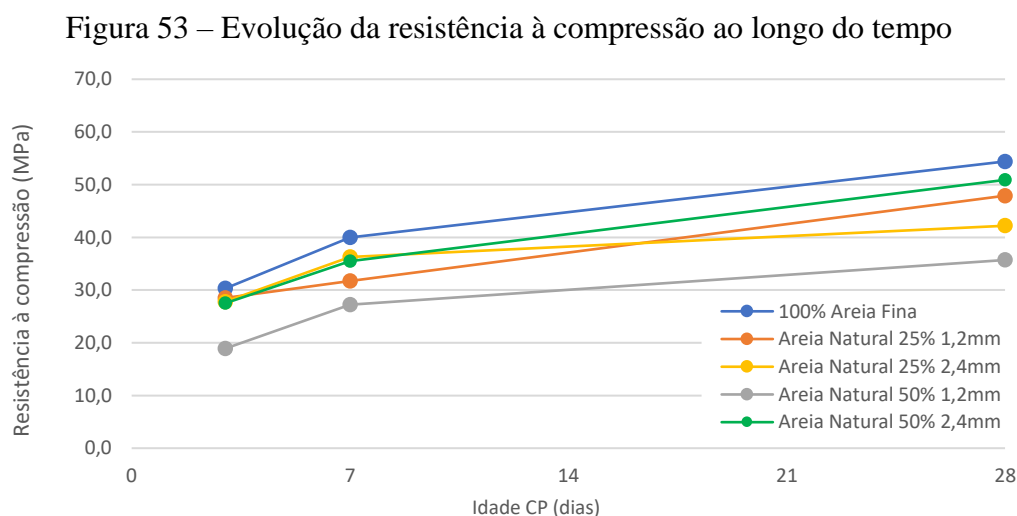
Avaliar a consistência do concreto no estado fresco é importante pois, uma trabalhabilidade adequada gera uma mistura mais homogênea o que facilita a moldagem dos elementos estruturais, melhor adensamento e redução dos vazios. Todos esses fatos impactam na qualidade e na durabilidade do concreto no estado endurecido.

## 4.2 Resistência à compressão

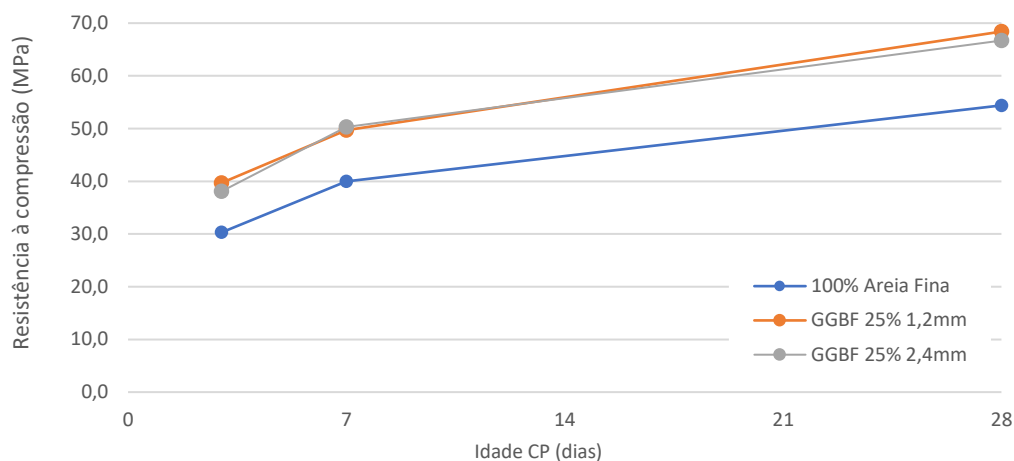
Segundo Mehta e Monteiro (2014), vários são os fatores que podem interferir no resultado da resistência à compressão do concreto. Sobre a influência do agregado nesta propriedade mecânica, muitas vezes ele não é um fator considerado, pois a ruptura é determinada pelas outras duas fases do concreto, a pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado.

Porém, este mesmo autor descreve que outras características do agregado como a dimensão, a forma, a textura, a distribuição granulométrica e a mineralogia afetam a resistência à compressão em diferentes graus pois, essas propriedades, impactarão nas características da zona de transição na interface e, conseqüentemente, a resistência do concreto.

A Figura 53 e a Tabela 14 mostram os resultados do ensaio de resistência à compressão, apresentando a sua evolução ao longo do tempo (3, 7 e 28 dias), para cada uma das 7 dosagens selecionadas e a Figura 54 compara a resistência à compressão, aos 28 dias para cada um dos traços estudados.



(a) Dosagens utilizando areia natural



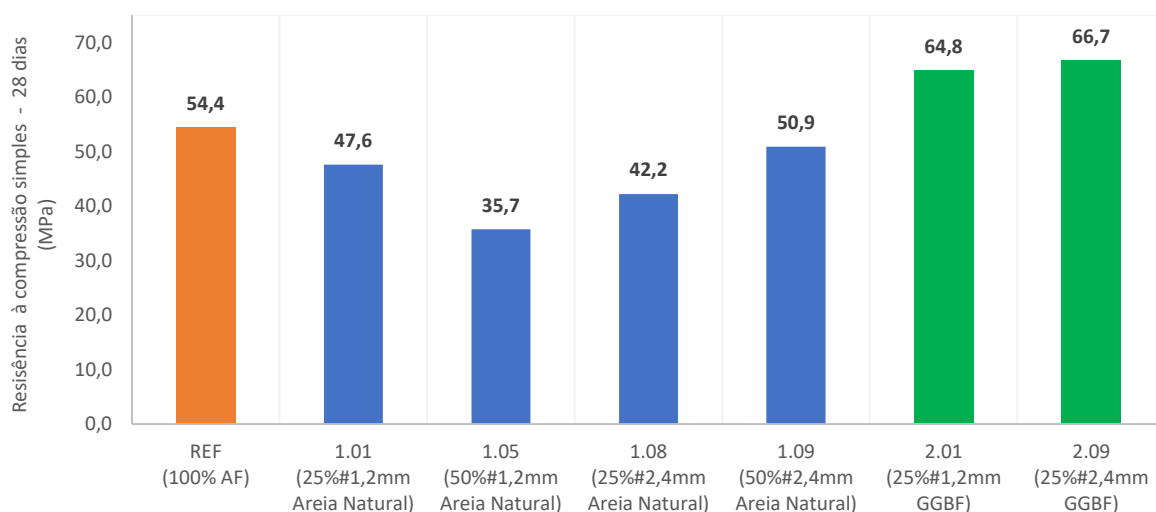
(b) Dosagens utilizando GGBF

Fonte: A autora

Tabela 14 – Resultados ensaio de compressão

Traço	Composição	Resistência à compressão - MPa		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço REF.	100% areia fina	30,3	40,0	54,4
Traço 1.01	25% areia natural 1,2 mm	28,5	31,7	47,9
Traço 1.05	50% areia natural 1,2 mm	18,9	27,2	35,7
Traço 1.08	25% areia natural 2,4 mm	27,8	36,3	42,2
Traço 1.09	50% areia natural 2,4 mm	27,5	35,5	50,9
Traço 2.01	25% GGBF 1,2 mm	39,7	49,7	64,8
Traço 2.09	25% GGBF 2,4 mm	38,1	50,3	66,7

Fonte: A autora

Figura 54 – Resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias

Fonte: A autora

Com base nas observações visuais e com resultados obtidos pelo ensaio de compressão, podem ser feitos os seguintes comentários e considerações:

- a) Analisando o gráfico (a) da Figura 53, observa-se que os valores de resistência à compressão, para todas as dosagens com substituição parcial da areia fina, foram menores quando comparados com os resultados obtidos com a dosagem referência, que contém 100% de areia fina. Conforme Mehta e Monteiro (2014) uma mudança na dimensão máxima do agregado, com boa distribuição granulométrica de uma dada mineralogia, pode apresentar dois efeitos contrários. Considerando o mesmo consumo de cimento e consistência, dosagens de concreto contendo partículas maiores de agregado requerem menos água de amassamento (devido à menor superfície específica) e, por outro lado, agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface pasta de cimento e agregado mais fraca. Este efeito varia conforme a relação água/cimento e o tipo de tensão aplicada.
- b) No gráfico (b) da Figura 53 observa-se que as dosagens que utilizaram a GGBF como substituinte parcial da areia fina tiveram maiores valores de resistência à compressão, avaliando todas as idades, quando comparados com a dosagem de referência, independentemente da dimensão da GGBF. Pela análise visual, percebe-se que o agregado originário da GGBF tem forma mais angulosa e é mais áspero. Conforme os resultados obtidos por Wu et al. (2019) a forma do agregado impacta no resultado deste ensaio e dosagens de concreto que utilizaram agregados com forma menos arredondada tendem a apresentar uma maior ligação com a pasta de cimento e, conseqüentemente, maior resistência à compressão.
- c) Com os resultados, entende-se que a porcentagem de substituição da areia, a origem do agregado a dimensão e a forma, para esta pesquisa, são fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto. Porém, nessa pesquisa, não foi feita uma avaliação de como cada um desses fatores influenciam, individualmente, nesta propriedade.

Além do agregado, deve-se também analisar a influência da adição de fibras no comportamento do material à compressão, especialmente após a tensão de ruptura. A adição de fibras na matriz cimentícia resulta em um comportamento mais dúctil do material durante a propagação das fissuras. Portanto, essas matrizes tendem a apresentar uma maior resistência residual e maior deformação última quando comparadas a matrizes cimentícias com ausência de fibras, o que indica maior capacidade de absorção de energia na compressão. As fibras ligam

as superfícies da fissura, como uma ponte, retardando o processo de propagação das fissuras, prevenindo uma falha catastrófica (RIBEIRO, 2021).

Analisando a forma de ruptura dos corpos de prova, a Figura 55 mostra cilindros de corpos de prova após o ensaio, sendo possível observar a influência da fibra no modo de falha, que evita a ruptura frágil, com a formação de microfissuras verticais. Segundo Li (2019), após a ruptura, o corpo de prova permanece com uma tensão residual que pode ser parcialmente determinada pela tensão de tração que atravessa a fissura vertical por meio do processo de transferência de carga das fibras.

Figura 55 – Corpos de prova rompido à compressão



Fonte: A autora

### 4.3 Tração direta ( $f_t$ )

De acordo com Li (2019), para se alcançar os resultados desejados com o ensaio de tração direta, os seguintes pontos devem ser observados durante a sua realização.

- A inevitável concentração de tensões nas garras do ensaio de tração, que pode causar falha prematura do corpo de prova;
- Fixação das garras para a realização do ensaio, que pode causar rotação do corpo de prova e conseqüente desalinhamento;
- Geometria do corpo de prova;

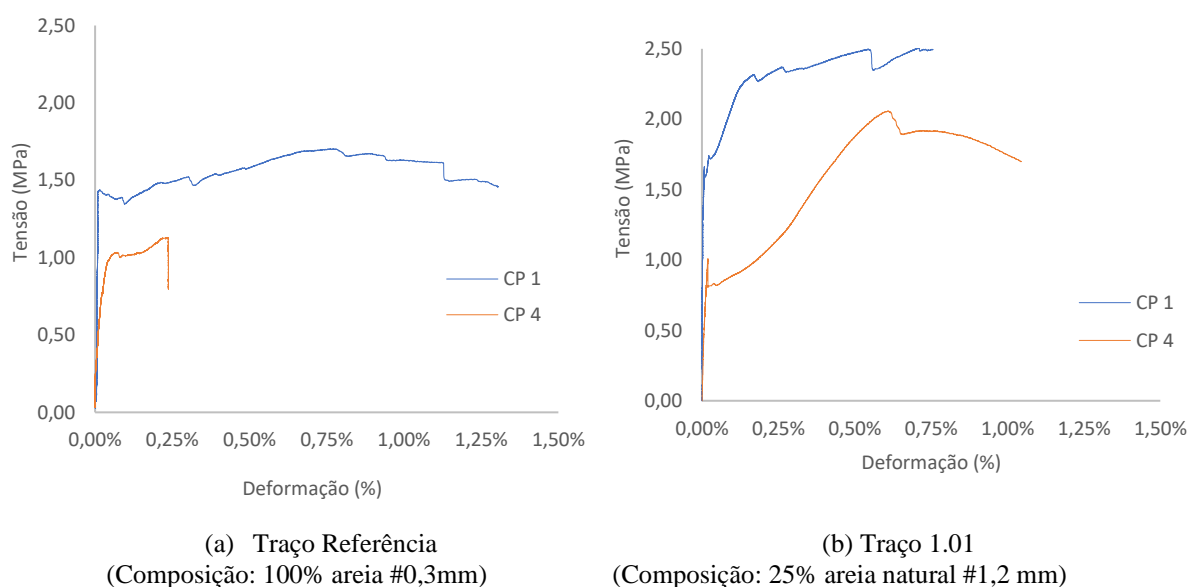
Gopalaratnam e Shan (1987) reforçam que a concentrações de tensões nas garras provocam falhas que são representativas do comportamento do material e a possível rotação dos corpos de prova geram tensões que não são somente de tração.

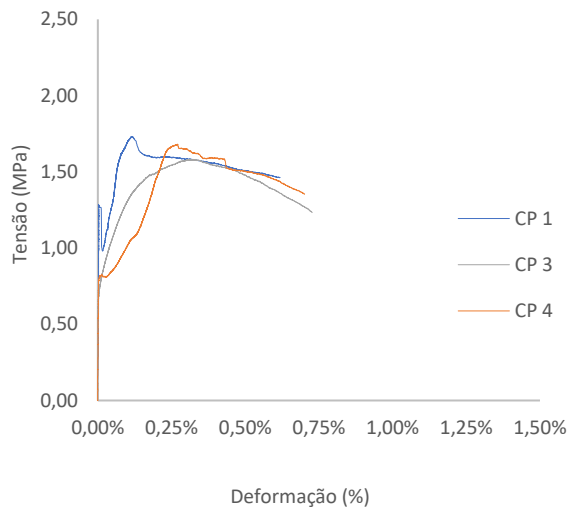
Ouro fator a ser considerado é a possível excentricidade da aplicação da carga, pois esta pode não estar sendo aplicada no centro da seção transversal do corpo de prova. Uma das formas de garantir que este ensaio esteja correto, é observar a localização das fissuras no corpo de prova, que devem ocorrer na região central, que é a área útil de ensaio. Toutanji (1999) reforça alguns dos possíveis problemas de execução deste ensaio, como o esmagamento da amostra, causada pela pressão da garra e a excentricidade durante a aplicação da carga, passando o ensaio a ser uma flexo-tração, diminuindo a resistência do material.

Além dos fatores mecânicos inerentes ao ensaio, a dificuldade de moldagem dos corpos de prova, falhas de concretagem, a não homogeneidade na distribuição das fibras e a mudança na forma da seção transversal também impactam nos resultados do ensaio.

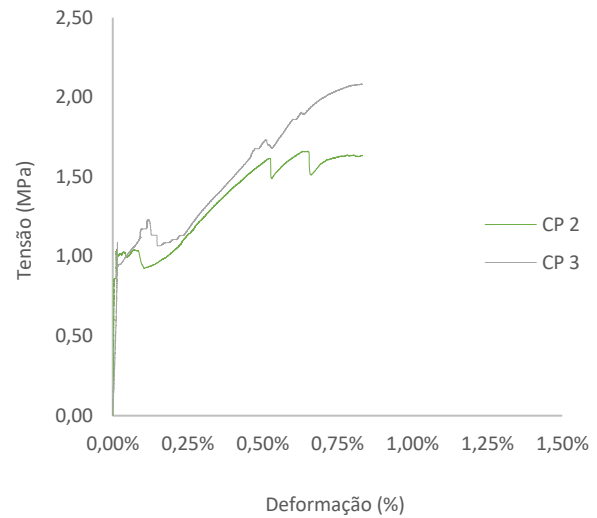
Portanto, considerando todas as influências externas no ensaio, o foco da discussão dos resultados nesta etapa será o comportamento obtido na curva tensão x deformação para as amostras ensaiadas. Mesmo não sendo um ensaio comum para estruturas de concreto e não normatizado, ele é importante para a caracterização mecânica do ECC, pois permite avaliar o seu comportamento dúctil. Como resultados do ensaio tem-se os gráficos da Figura 56 que mostram a curva tensão x deformação para cada um dos traços estudados e a Tabela 15 mostra os resultados obtidos na tensão de abertura da primeira fissura, a tensão máxima e a deformação na tensão máxima para cada um dos corpos de prova ensaiados. Os resultados não indicados foram descartados devido à falha de execução dos ensaios.

Figura 56 – Resultados do ensaio de tração direta

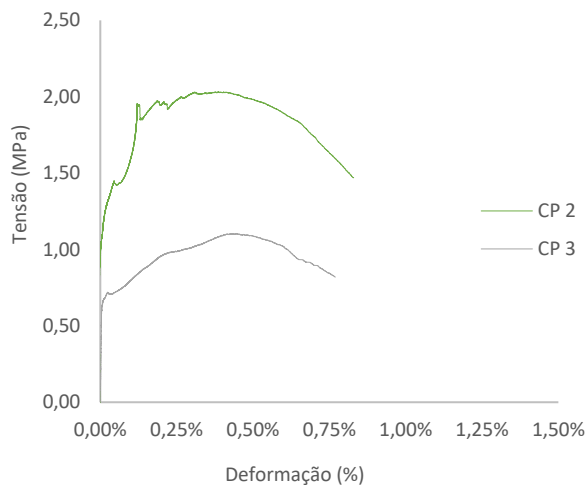




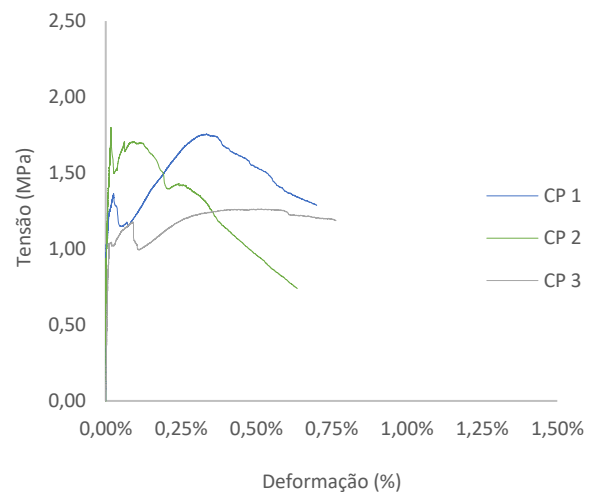
(c) Traço 1.05  
(Composição: 50% areia natural #1,2 mm)



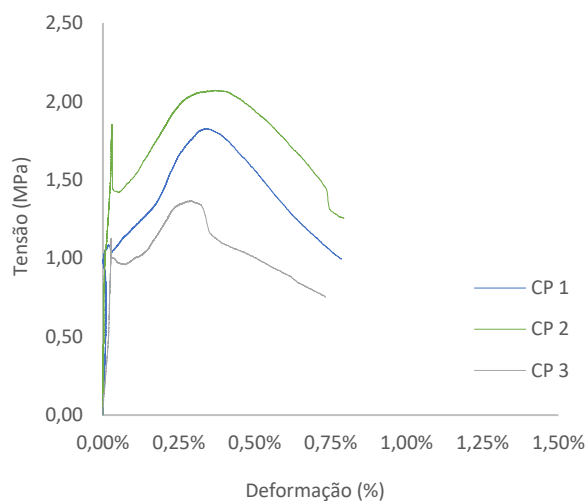
(d) Traço 1.08  
(Composição: 25% areia natural #2,4 mm)



(e) Traço 1.09  
(Composição: 50% areia natural #2,4 mm)



(f) Traço 2.01  
(Composição: 25% GGBF #1,2 mm)



(g) Traço 2.09  
(Composição: 25% GGBF #2,4 mm)

Fonte: A autora

Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração direta por dosagem

Traço	Composição	CP	Tensão abertura 1ª fissura (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação na tensão máxima (%)
Traço REF.	100% areia fina	1	1,41	1,70	0,771
		2	-	-	-
		3	-	-	-
		4	1,01	1,13	0,235
Traço 1.01	25% areia natural 1,2 mm	1	1,58	2,50	0,709
		2	-	-	-
		3	-	-	-
		4	0,91	2,06	0,611
Traço 1.05	50% areia natural 1,2 mm	1	1,30	1,73	0,114
		2	-	-	-
		3	0,72	1,58	0,331
		4	0,88	1,68	0,270
Traço 1.08	25% areia natural 2,4 mm	1	-	-	-
		2	0,83	1,66	0,651
		3	0,91	2,08	0,829
		4	-	-	-
Traço 1.09	50% areia natural 2,4 mm	1	-	-	-
		2	1,01	2,03	0,399
		3	0,63	1,10	0,445
		4	-	-	-
Traço 2.01	25% GGBF 1,2 mm	1	1,03	1,76	0,334
		2	1,80	1,80	0,017
		3	1,08	1,26	0,518
		4	-	-	-
Traço 2.09	25% GGBF 2,4 mm	1	1,01	1,82	0,339
		2	1,04	2,07	0,369
		3	0,99	1,37	0,290
		4	-	-	-

Fonte: A autora

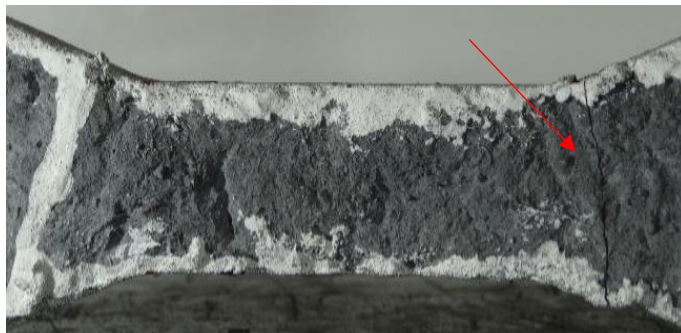
Com base nos resultados, são observados os seguintes fatos:

- a) Por ser um ensaio com procedimento de execução bem delicado e considerado as variáveis que podem impactar no resultado, tem-se uma quantidade elevada de perda de corpos de prova e uma grande variabilidade de comportamento entre os elementos do mesmo traço. Dos 28 corpos de prova ensaiados foram descartadas 12 amostras, confirmando todas as observações descritas. Porém, isso não diminui a sua importância, sendo este ensaio relevante para confirmar o comportamento dúctil do concreto. Após o ensaio, alguns resultados foram descartados pelo motivo do corpo de prova não apresentar fissuração na região central, tendo elas ocorridos na região da acomodação das garras. Possivelmente, para esses casos, ocorreu uma concentração de tensões nessa região. Righi (2015), em sua pesquisa, também relatou estes problemas com a execução do ensaio de tração direta. A Figura 57 mostra a localização dessas fissuras em dois corpos de prova diferentes. A Figura 57 (a) representa um comportamento errado que ocorreu durante o ensaio, com a ruptura do corpo da prova localizada na região da garra, conforme indicação. Na Figura 57 (b) é possível observar um corpo de prova com a ruptura ocorrendo na região central, que é o esperado para este ensaio.
- b) Dentre as amostras ensaiadas, um corpo de prova do traço 2.01 não apresentou o comportamento dúctil à tração, que foi o corpo de prova 2, conforme pode ser visto no gráfico (f) da Figura 56 e na Tabela 15. Neste caso, a tensão máxima foi a tensão de abertura da primeira fissura.
- c) A tensão na abertura da primeira fissura, entre as amostras ensaiadas, variou entre 0,63MPa e 1,80MPa. A tensão máxima ocorreu entre 1,10MPa e 2,50MPa e a deformação máxima entre as amostras ensaiadas foi 0,829% que é superior às deformações à tração obtidas para um concreto convencional. A Figura 58 mostra o detalhe da fissuração de um corpo de prova do traço 2.01, onde consegue-se observar a microfissuração. Mesmo considerando a variabilidade de resultados, percebe-se que a maioria das amostras apresentaram um comportamento dúctil.
- d) Apesar dos gráficos da Figura 56 indicarem um comportamento dúctil para as amostras, analisando visualmente a formação das fissuras ao longo do ensaio, percebe-se que elas ficaram concentradas em uma região. Uma das possibilidades é a dificuldade da fibra em realizar o seu papel de transferência de tensões.
- e) Possíveis justificativas para a reduzida microfissuração nos corpos de prova e o pequeno ganho de ductilidade, com valores aquém do esperado para a tensão máxima: o baixo

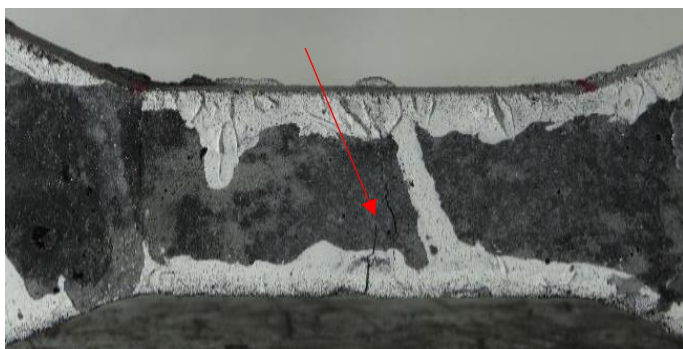


módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra e a pouca aderência química entre as fibras e a matriz cimentícia, que impactam diretamente no processo de transferência de tensões.

Figura 57 – Corpos de prova ensaiados à tração



(a) Fissura na região da garra

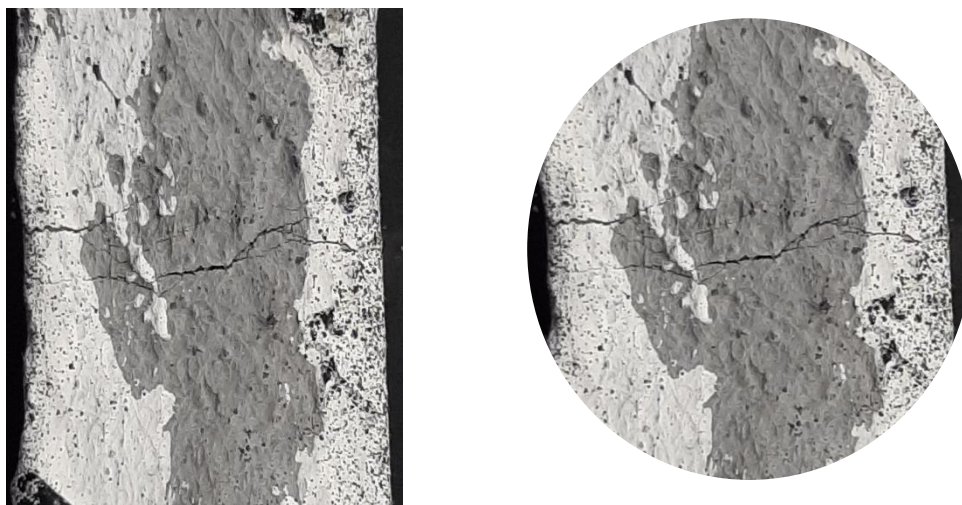


(b) Fissura na região central

Fonte: A Autora



Figura 58 – Padrão de fissuração



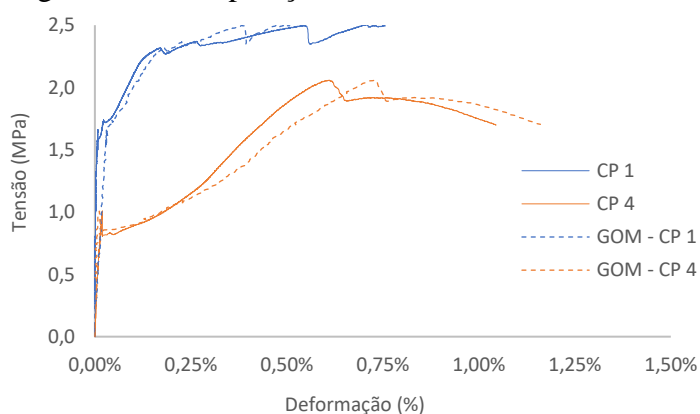
Fonte: A Autora

Sobre a adição de fibras, sabe-se que o seu papel como elemento de reforço da matriz cimentícia é aumentar a capacidade de absorção de energia, tornando-as dúcteis, sendo este um importante elemento no processo de transferência de tensões. A curva tensão x deformação obtida nos ensaios apresenta dois comportamentos distintos. O primeiro é representado por um trecho linear e que vai até a abertura de primeira fissura, que é o limite do trecho elástico. Nesta situação, o material é considerado íntegro e apenas apresenta microfissuras em torno dos grãos dos agregados. A segunda parte está relacionada com o comportamento *strain-hardening*, com mudança da inclinação da curva, representado pelo aumento da tensão e da deformação após a primeira fissura. As fibras, neste caso, atuam como elemento de redistribuição dos esforços que permitem o surgimento de novas fissuras até a deformação máxima, que usualmente é atingida quando as fibras sofrem o arrancamento na matriz cimentícia (RIBEIRO 2021).

Neste contexto para a obtenção da ductilidade os agregados também têm um papel importante. Segundo Sahmaran et al. (2009), sabe-se que o aumento da dimensão do agregado geralmente produz maior energia de fratura e, portanto, maior resistência da matriz cimentícia e tal fato deve contribuir para uma redução da capacidade de carga à tração, de acordo com a teoria da micromecânica do ECC, explicada no item 2.3.

Analisando as metodologias utilizadas para a medição dos deslocamentos dos corpos de prova durante o ensaio, o gráfico da Figura 59 compara os resultados obtidos por meio dos LVDT's, que é a forma tradicional, e por meio da DIC. Como o objetivo, neste momento, é mostrar a aplicabilidade dessa tecnologia e as novas possibilidades de uso do DIC, foi escolhida somente uma dosagem para análise. A dosagem escolhida para comparação dos dados foi o traço 1.01, contendo 25% de areia com  $D_{max}=1,2mm$ .

Figura 59 – Comparação dos resultados LVDT x DIC



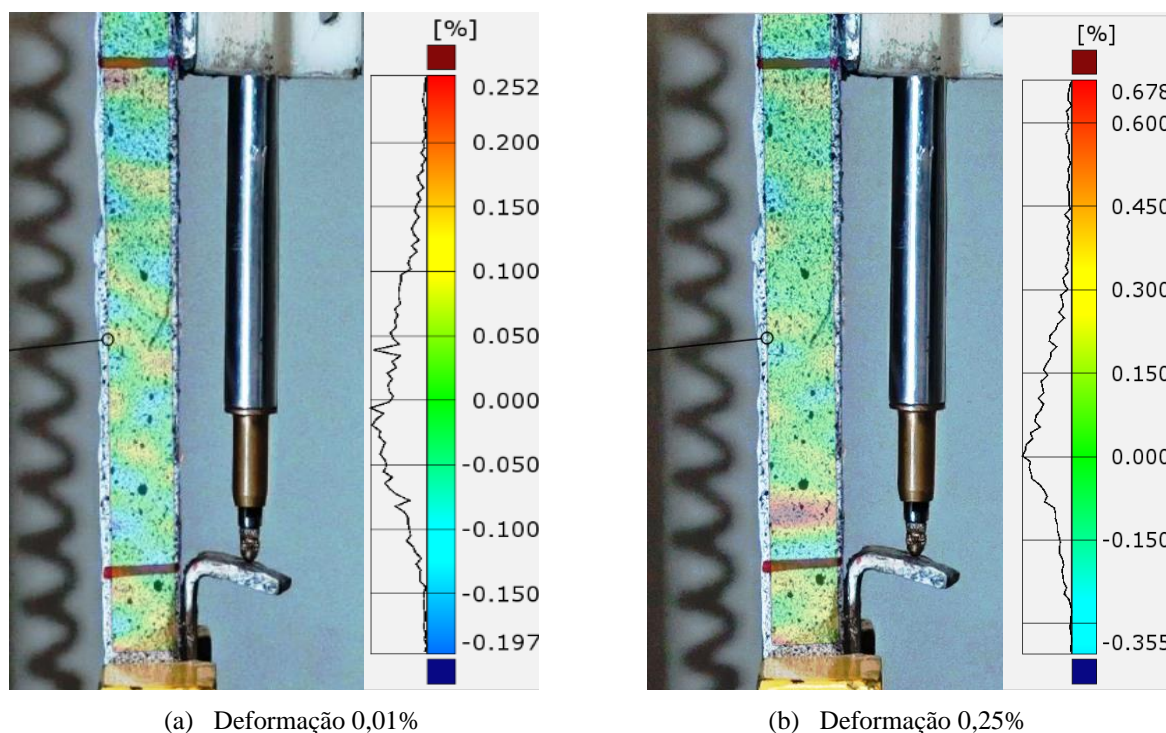
Fonte: A autora

Observando o resultado percebe-se que as duas metodologias de medição de deslocamentos são compatíveis, mostrando que a tecnologia DIC pode ser utilizada para esse fim, desde que sejam tomados os devidos cuidados na preparação dos corpos de prova. Portanto, o posicionamento da câmera e o processo de pintura são dois fatores que interferem diretamente nos resultados.

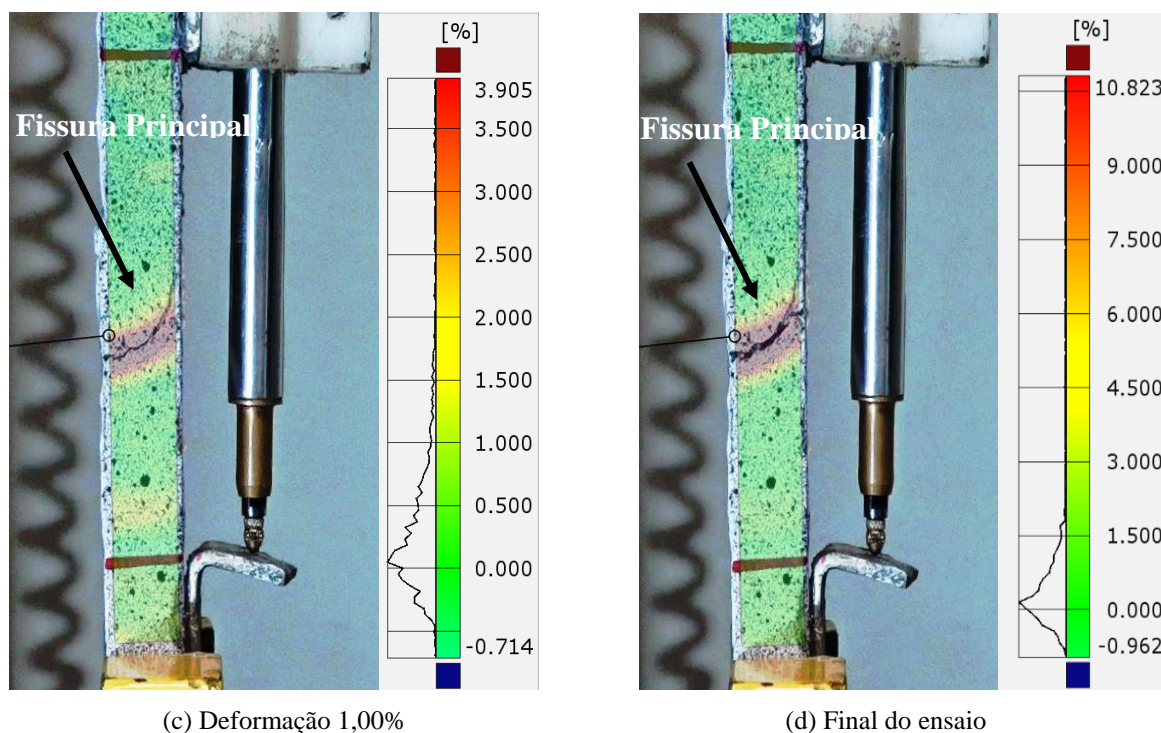
Um ponto interessante sobre a utilização da DIC é a possibilidade de obter mapas de calor para observar a evolução do comportamento da amostra ao longo do ensaio ao longo do ensaio. A Figura 60 mostra esse mapa, para o CP4 do traço 1.01, as deformações na direção  $y$  ( $\epsilon_y$ ) em 0,01%, 0,25% ,1,00% e ao final do ensaio. Comparando esses resultados percebe-se a evolução das deformações e, ao final do ensaio, a localização da abertura da principal fissura do corpo de prova.

Essa tecnologia de medição vem sendo aos poucos incorporadas no desenvolvimento de pesquisas, sendo utilizada em vários trabalhos mais recentemente publicados, como os de Sui et al. (2018), Lukovic et al. (2018) e Xu, Huang, Dai, (2021) por exemplo. Com isso, percebe-se que a DIC é mais uma ferramenta que pode ser aplicada para auxílio no entendimento do comportamento mecânico de vários ensaios, porém é necessário o desenvolvimento de mais estudos para validação do seu uso.

Figura 60 – Mapa de deformação na direção  $y$  ( $\epsilon_y$ )







Fonte: A autora

Durante a realização deste ensaio, percebeu-se uma série de fatores que podem justificar a grande variabilidade de comportamento do material, a elevada perda de corpos de prova e a baixa resistência a tração do material. O sistema de fixação da garra utilizada nos ensaios não garante uma rigidez adequada da região de apoio, o que pode gerar uma torção nos corpos de prova. Nesse caso, o corpo de prova não estaria sendo submetido à uma tração pura, o que impacta no valor final da resistência. Portanto, a tendência é que as tensões de tração sejam maiores do que as realmente encontradas. Outro ponto que chama a atenção é a concentração de tensões nos corpos de prova na região da garra, devido a existência de amostras que romperam nessa região, invalidando a aceitação do ensaio. Outros fatores que também podem ter impactado nos resultados são as imperfeições durante a concretagem e a dificuldade de garantir a homogeneização das fibras na mistura.

Mesmo diante desses fatos, a grande importância deste ensaio é demonstrar o comportamento *strain-hardening* do material, que está associado com a sua ductilidade e rigidez e com o processo de formação de fissuras. Portanto, mesmo não sendo possível discutir com precisão como o agregado influencia no comportamento à tração das dosagens estudadas e, considerando as dificuldades de execução e a variabilidade dos resultados, foi possível observar o comportamento dúctil à tração em praticamente todas as amostras ensaiadas. Para conseguir uma análise mais assertiva sobre esse comportamento seria necessário ensaiar um

maior número de corpos de prova e eliminar os fatores que podem influenciar na obtenção de um resultado mais consistente. Considerando esses fatos, entende-se que este ensaio cumpriu o seu papel principal que foi demonstrar o comportamento dúctil à tração.

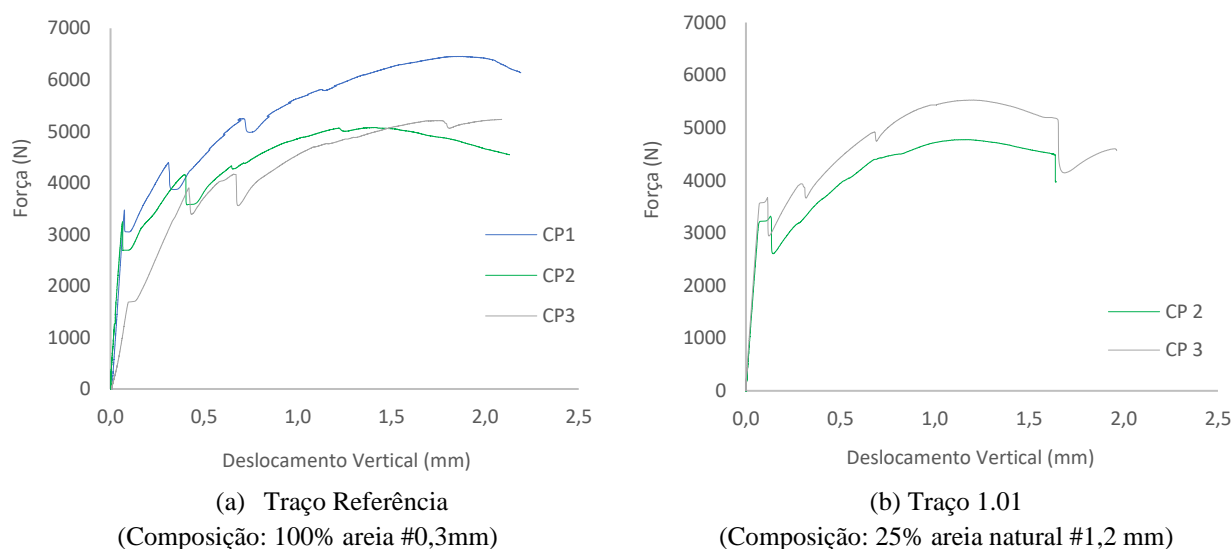
#### 4.4 Resistência à tração na flexão ( $f_{t,f}$ )

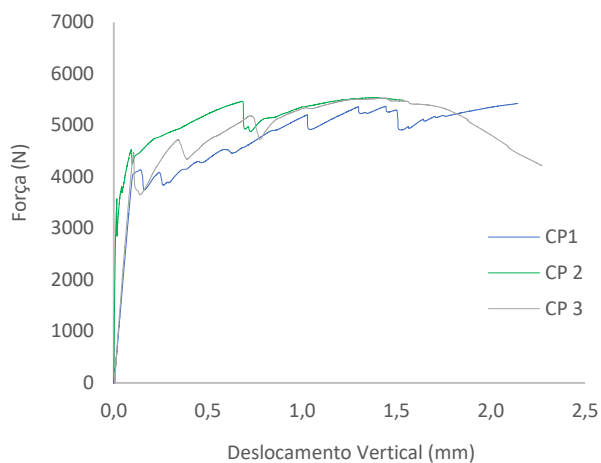
Os gráficos da Figura 61 e os dados da Tabela 16 e e mostram os resultados do ensaio de flexão a 4 pontos para os corpos de prova ensaiados para cada uma das dosagens estudadas. Como resposta para este ensaio, tem-se os seguintes parâmetros: força na abertura da 1ª fissura, tensão de abertura da 1ª fissura, deslocamento vertical na ocorrência da primeira fissura, força máxima, tensão máxima, deslocamento vertical na ocorrência da força máxima, tenacidade e fator de tenacidade.

O gráfico da figura 62 compara a média das forças para a abertura da primeira fissura e a força máxima média, para cada uma das dosagens estudadas, mostrando a evolução das forças de abertura da primeira fissura e das forças máximas. A Figura 63 mostra alguns corpos de prova após a realização do ensaio.

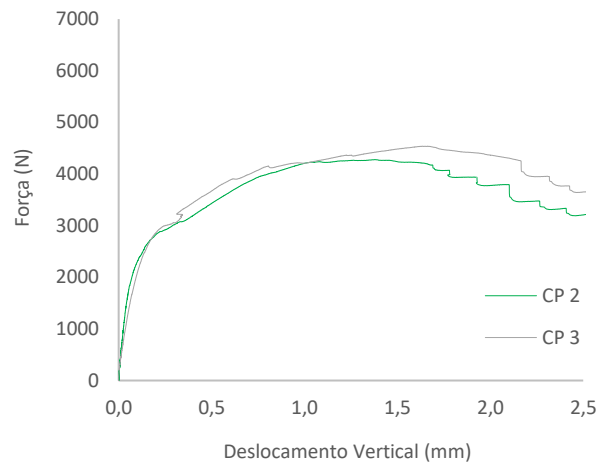
Ressalta-se que os deslocamentos apresentados, neste momento foram os obtidos utilizando a metodologia tradicional de medição dos deslocamentos, ou seja, com o uso dos LVDT's.

Figura 61 – Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos

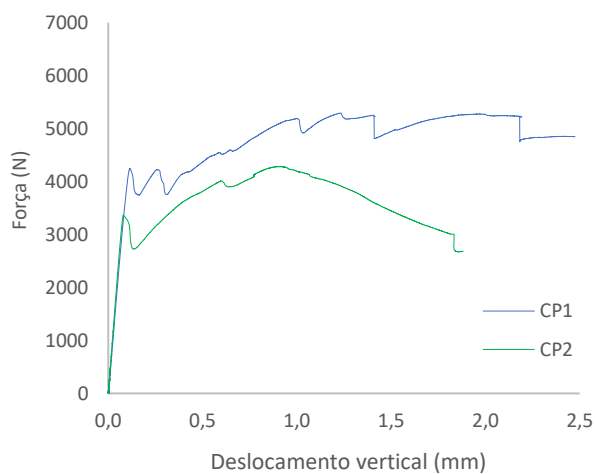




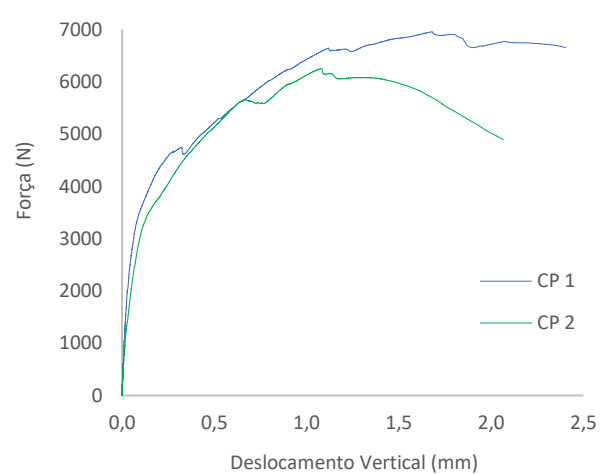
(c) Traço 1.05  
(Composição: 50% areia natural #1,2 mm)



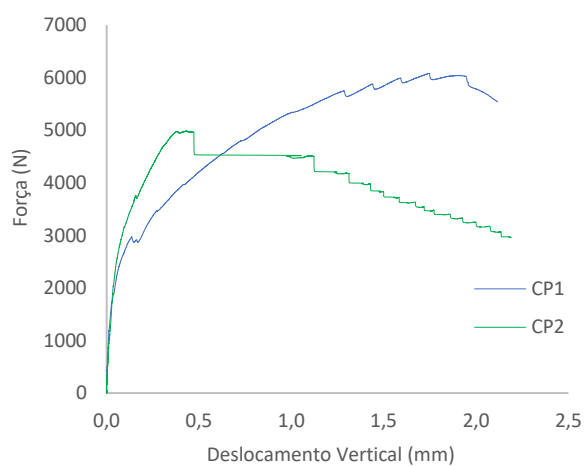
(d) Traço 1.08  
(Composição: 25% areia natural #2,4 mm)



(e) Traço 1.09  
(Composição: 50% areia natural #2,4 mm)



(f) Traço 2.01  
(Composição: 25% GGBF #1,2 mm)



(g) Traço 2.09  
(Composição: 25% GGBF #2,4 mm)

Fonte: A autora

Tabela 16 - Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos

Traço <sup>10</sup>	Composição	Corpo de prova	Força 1ª fissura (N)	Tensão abertura 1ª fissura (MPa)	Deslocamento vertical da 1ª fissura (mm)	Força Máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento vertical na força máxima (mm)	Tenacidade (kJ)	Fator de Tenacidade (%)
Traço REF.	100% areia fina	1	1.805,1	2,17	0,15	6.454,4	7,75	1,88	38,34	299
		2	3.233,8	3,88	0,06	5.074,9	6,09	1,41	30,89	331
		3	3.410,5	4,09	0,07	5.239,5	6,29	2,09	27,31	262
Traço 1.01	25% areia natural 1,2	2	3.268,3	3,92	0,06	4.775,4	5,73	1,17	16,79	211
		3	3.424,3	4,11	0,07	5.526,8	6,63	1,21	22,29	244
Traço 1.05	50% areia natural 1,2 mm	1	3.921,4	4,71	0,10	5.424,5	6,51	2,14	27,95	261
		2	3.597,8	4,32	0,03	5.537,8	6,65	1,54	17,77	162
		3	4.320,6	5,18	0,10	5.531,7	6,64	1,47	30,03	311
Traço 1.08	25% areia natural 2,4	2	1.656,3	1,99	0,05	4.278,9	5,13	1,38	20,96	277
		3	1.638,0	1,97	0,07	4.538,9	5,45	1,64	20,03	229
Traço 1.09	50% areia natural 2,4	1	4.241,8	5,09	0,12	5.283,3	6,34	1,23	28,12	266
		2	3.229,4	3,88	0,11	4.283,3	5,14	0,91	19,91	370
Traço 2.01	25% GGBF 1,2 mm	1	3.097,3	3,72	0,07	6.956,9	8,35	1,68	34,11	253
		2	2.876,2	3,45	0,08	6.235,5	7,48	1,08	28,46	283
Traço 2.09	25% GGBF 2,4 mm	1	2.124,4	2,55	0,05	6.081,3	7,30	1,75	34,98	302
		2	2.152,7	2,58	0,04	4.982,4	5,98	0,44	17,60	100

Fonte: A autora

7 O ensaio do traço REF. teve que ser repetido por problemas externos e por isso tem mais corpos de prova ensaiados do que previsto originalmente.

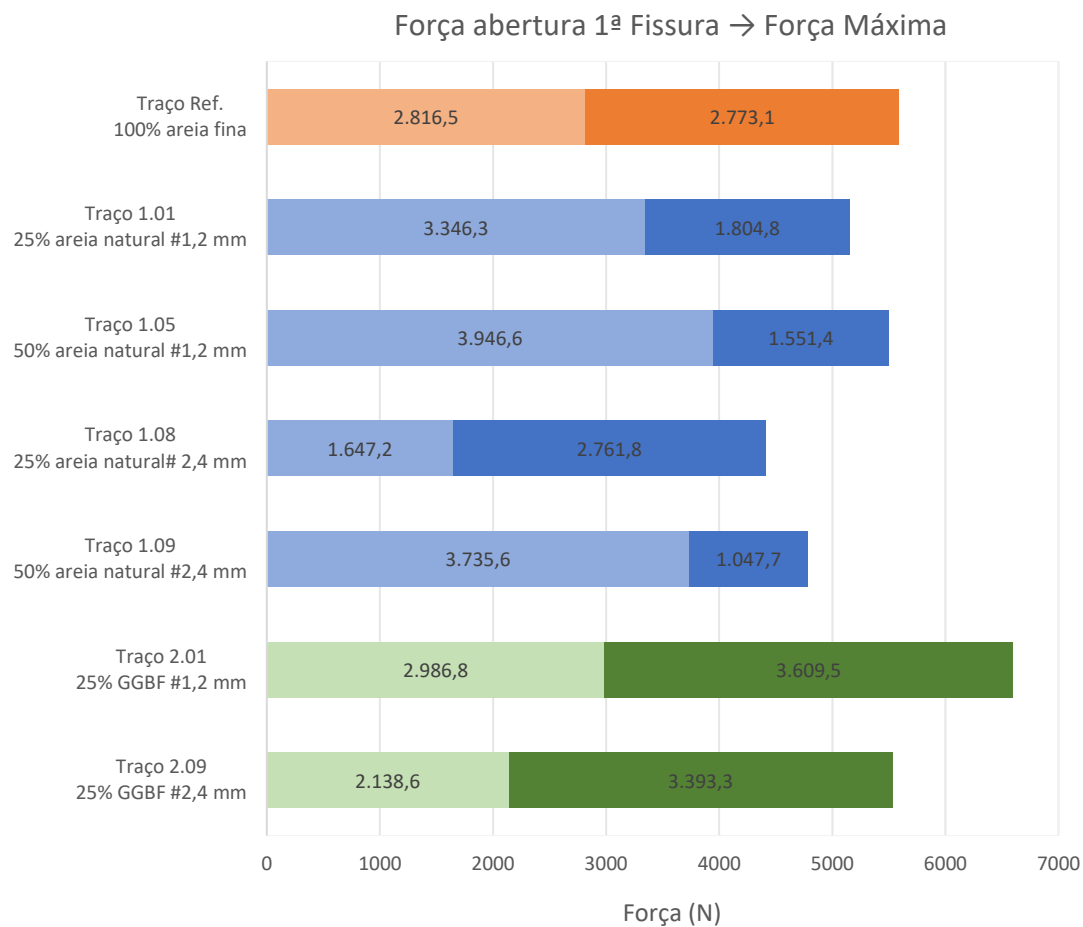
No traço 1.01 (25% areia natural de 1,2mm) um dos corpos de prova não foi ensaiado corretamente, sendo considerados somente dois resultados para esta análise.

Portanto esse traço não teve vídeo gravado

Os traços que apresentaram filmagem foram o REF, 1.05 e 2.01 os resultados utilizando a DIC serão mostrados ao longo do texto, separadamente.

Os vídeos dos traços 1.08, 1.09 e 2.09 não foram analisados.

Figura 62 – Evolução da força



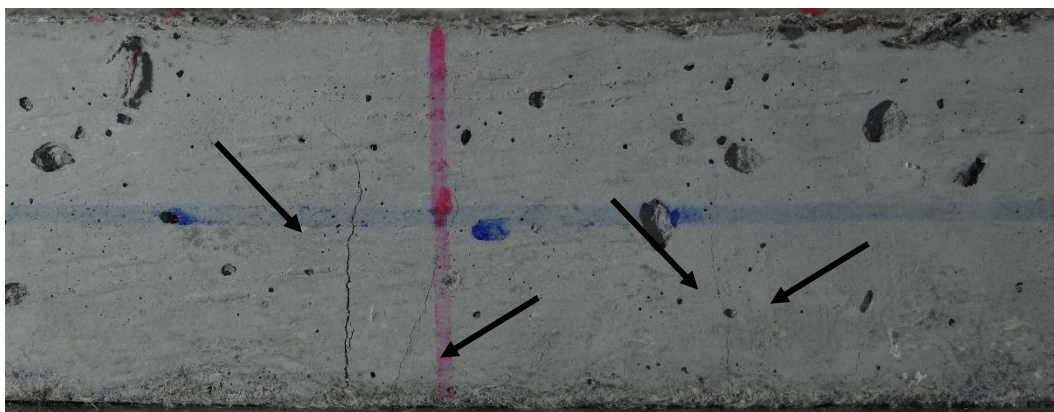
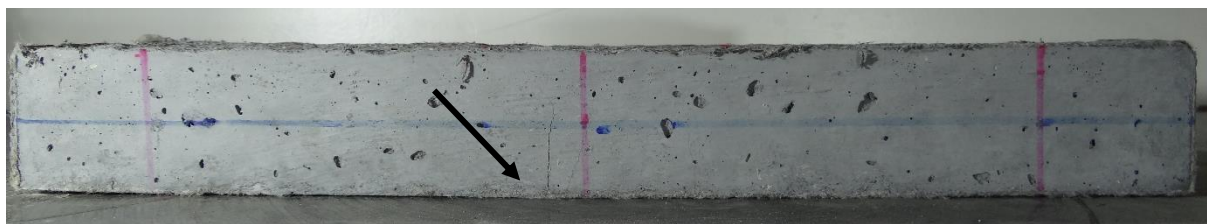
Fonte: A autora

Figura 63 – Corpos de prova ensaiados



(a) Traço 1.08 – 25% Areia Natural #2,4mm (CP02) - Detalhe da fissura formada





(b) Traço 1.01 – 25% Areia Natural #1,2mm (CP03) - Detalhe da fissura formada

Fonte: A autora

Com base nos resultados, são observados os seguintes fatos:

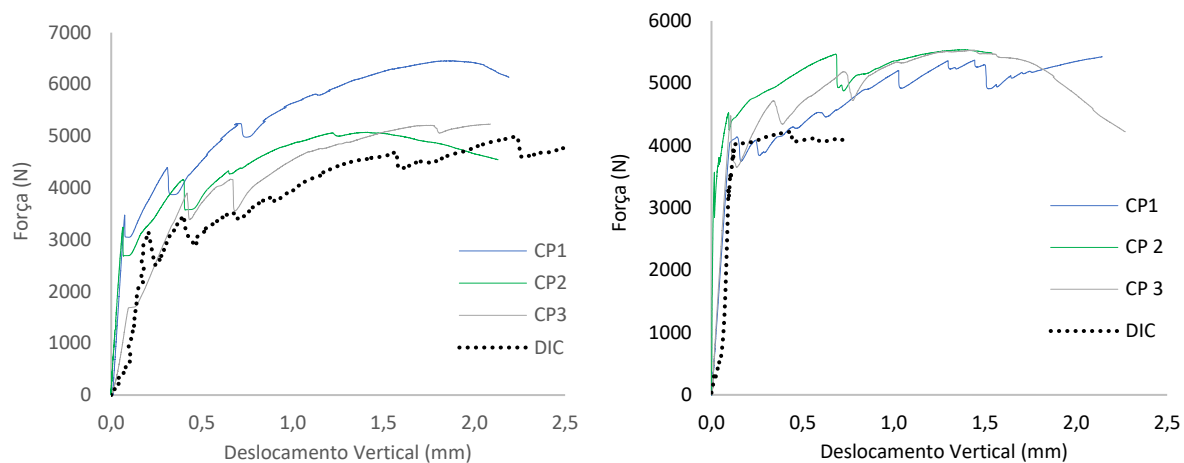
- a) Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram um comportamento *deflection-hardening* e as fissuras ocorreram na região do vão central, conforme esperado. A falha à flexão ocorreu quando as fibras não foram mais capazes de transferir as tensões na matriz, resultando em uma deformação localizada. Todas as curvas obtidas neste ensaio seguem o comportamento previsto pela norma ASTM C1609.
- b) Observando o comportamento dos gráficos da figura 61, tem-se que o valor da força de abertura da primeira fissura ( $P_1$ ) é maior que o valor da força máxima ( $P_p$ ), para todas as situações. As curvas apresentam um primeiro, um trecho linear-elástico onde as deformações são proporcionais às tensões, até a abertura da primeira fissura. O segundo trecho é caracterizado pela mudança de direção da curva, pelo início do processo de múltipla fissuração e pela perda da relação linear entre a tensão e a deformação. No terceiro trecho observa-se a abertura das fissuras existentes e aumento da força até um valor máximo. No último trecho ocorre a redução da capacidade de carga resistente de uma fissura principal até a ocorrência do arrancamento da fibra da matriz cimentícia
- c) Analisando a ductilidade do material, tanto visualmente, por meio dos gráficos da figura 61, quanto por meio do cálculo da resistência à flexão equivalente, tem-se que os corpos de prova ensaiados possuem capacidade de sustentar grandes deformações até o ponto de

carga máxima, com o fator de tenacidade ( $R_{t,150}^D$ ) maior ou igual à 100%. A exceção seria o corpo de prova 2 do traço 2.09, onde inicia a perda de carga com deslocamento igual a 0,4mm.

- d) Possíveis justificativas para a reduzida microfissuração nos corpos de prova e reduzido ganho de ductilidade são o baixo módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra e a pouca aderência química entre as fibras e a matriz cimentícia, que impactam no processo de transferência de tensões.
- e) A tensão de abertura da primeira fissura variou entre 1.638,0N e 4.320,6N, e a tensão máxima variou entre 4.283,3N e 6.956,9N. O deslocamento vertical máximo na abertura da primeira fissura foi 0,15mm e na tensão máxima, o maior deslocamento vertical foi 2,14mm.
- f) Alterando a distribuição granulométrica, considerando as dosagens em que o material substituinte é a areia natural (traços 1.01, 1.05, 1.08 e 1.09), observa-se que aumentando a taxa de substituição da areia fina, a tensão de abertura da primeira fissura tende a ser maior. Uma possível justificativa seria uma maior resistência da matriz cimentícia.
- g) Aumentando a dimensão máxima dos agregados e fixando a taxa de substituição, tanto para a areia natural quanto para a GGBF, analisando a força máxima, percebe-se que nas dosagens com maior  $D_{max}$  há a tendência de ela ser menor. Tem-se que o aumento do  $D_{max}$  influencia na ductilidade do material e esse efeito pode ser atribuído à dificuldade de garantir uma dispersão uniforme das fibras com o aumento da dimensão, o que influencia na ligação da fibra com a matriz cimentícia. Para todas as dosagens, com o aumento do  $D_{max}$ , mantendo a proporção de substituição de areia fina, percebeu-se a diminuição da trabalhabilidade.

Sobre as técnicas utilizadas para a medição dos deslocamentos, os gráficos da Figura 64 mostram os resultados dos ensaios de flexão à 4 pontos s utilizando a DIC (traços Ref., 1.05 e 2.01).

Figura 64 – Comparação resultados LVDT's x DIC

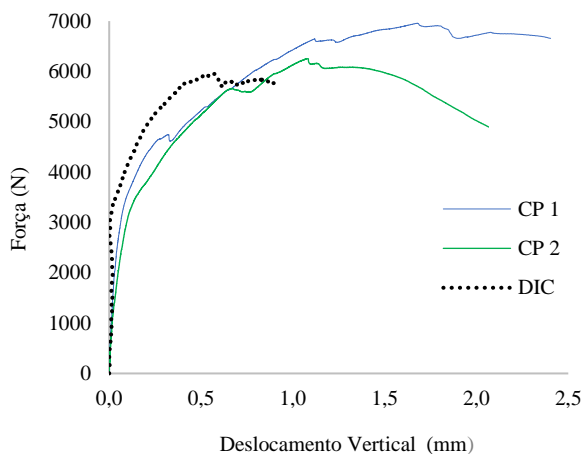


(a) Traço Referência

(Composição: 100% areia #0,3mm)

(b) Traço 1.05

(Composição: 50% areia natural #1,2 mm)

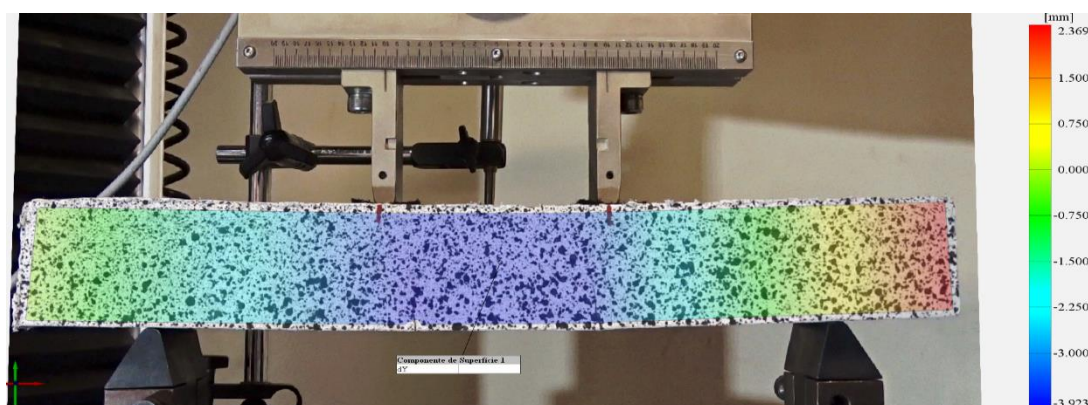


(c) Traço 2.01

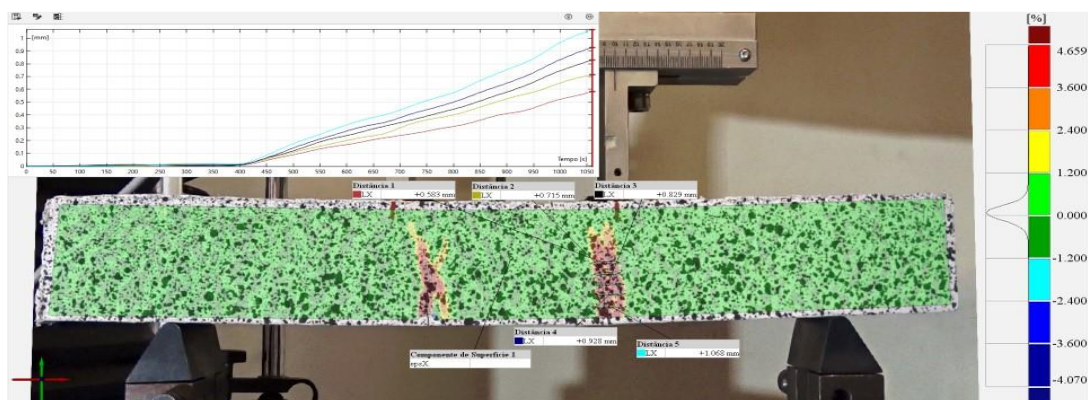
(Composição: 25% GGBF #1,2 mm)

Fonte: A autora

Em linha com os resultados do ensaio de tração, percebe-se que a DIC apresentou resultados compatíveis e que ela pode ser utilizada desde que todos os devidos cuidados de preparação do corpo de prova e captura da imagem sejam tomados. Vários problemas podem ocorrer durante a filmagem, portanto esses cuidados são essenciais para garantir a qualidade das informações. Ressalta-se, novamente, que esta é uma ferramenta complementar para as análises do corpo de prova e que mais estudos precisam ser desenvolvidos para validação e entendimento de seu funcionamento. A Figura 65 mostra os mapas de calor, onde é possível perceber como as fissuras se desenvolveram nos corpos de prova.

Figura 65 – Mapas de calor – Análise DIC<sup>11</sup>

(a) Traço Referência – Deslocamento vertical



(b) Traço Referência – Fissura

Fonte: A autora

Com base na Figura 65 (a) é possível observar que a região central é a que apresenta maior deslocamento vertical, o que é totalmente coerente com o ensaio e o comportamento esperado. Com essa imagem é possível saber como está variando o deslocamento em todo o comprimento da viga. A Figura 65 (b) mapeia as fissuras que foram abertas durante o ensaio, que são as regiões que se destacam em vermelho e amarelo.

Resumindo as informações coletadas, tem-se que a granulometria, a dimensão do agregado, a origem e a forma são fatores que afetam o comportamento à flexão do material e essas características. Um ponto de atenção é a garantia da trabalhabilidade adequada da mistura e consequente homogeneização das fibras na mistura. Conforme discutido anteriormente, são as fibras as responsáveis pelo comportamento dúctil do material e, portanto, é de extrema importância que elas estejam bem distribuídas na mistura.

<sup>11</sup>Maiores detalhes de aplicação da DIC poderão ser obtidas com o trabalho que está sendo desenvolvido por Ottoni, com previsão de defesa da tese para 2024.

#### 4.5 Módulo de Elasticidade

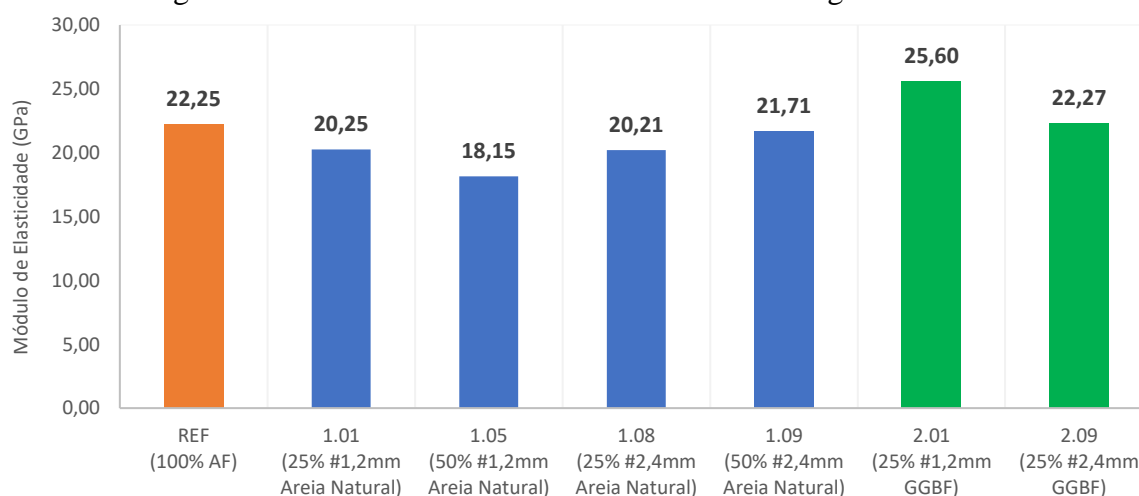
Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade, para cada uma das dosagens estudadas, considerando que eles foram feitos com idade igual a 28 dias, estão descritos na Tabela 17 e no gráfico da Figura 66, que compara os resultados médios dos módulos de elasticidade.

Tabela 17 – Resultados do Módulo de Elasticidade ( $E_{ci}$ )

Traço	Composição	CP	$f_c$	$E_{ci}$ (GPa)	$E_{ci}$ médio (GPa)	CV(%)
Traço REF.	100% areia fina	1	50,58	23,20	22,25	4,41
		2		21,24		
		3		22,32		
Traço 1.01	25% areia natural 1,2 mm	1	46,22	19,64	20,25	2,62
		2		20,56		
		3		20,56		
Traço 1.05	50% areia natural 1,2 mm	1	34,74	18,49	18,15	1,83
		2		17,83		
		3		18,17		
Traço 1.08	25% areia natural 2,4 mm	1	44,48	20,66	20,81	0,66
		2		20,83		
		3		20,93		
Traço 1.09	50% areia natural 2,4 mm	1	48,32	21,13	21,71	3,44
		2		22,55		
		3		21,44		
Traço 2.01	25% GGBF 1,2 mm	1	67,10	25,47	25,60	1,14
		2		25,39		
		3		25,93		
Traço 2.09	25% GGBF 2,4 mm	1	62,65	21,30	22,27	4,58
		2		23,33		
		3		22,17		

Fonte: A autora

Figura 66 – Módulo de Elasticidade médio das dosagens estudadas



Fonte: A autora

Analisando os resultados descritos na Tabela 17 e na Figura 66, tem-se:

- a) O traço que obteve maior módulo de elasticidade, considerando a areia natural como agregado foi a dosagem com 100% de areia fina na composição e, para a escória, foi o traço com substituição do agregado em 25% com dimensão máxima igual a 1,2mm.
- b) O módulo de elasticidade médio das dosagens com GGBF na composição foram maiores do que todos os traços contendo somente areia natural. Uma possível justificativa seria uma maior aderência entre a pasta de cimento e o agregado. Segundo Neville (2016) a ligação mecânica é influenciada pelas propriedades da superfície e em certo grau pela forma do agregado. Os grãos de escória, visualmente, são mais ásperos e apresentam forma angulosa, justificando tal comportamento.

Segundo Helene (1997) o módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade mecânica difícil de ser medida e que apresenta uma grande variabilidade nos resultados, sendo que depende vários fatores, além da resistência à compressão. De acordo com e Mehta e Monteiro (2014), Neville (2016) e Leal et al. (2020) alguns desses fatores são: proporção volumétrica, tamanho, forma e módulo dos agregados, consistência da mistura, condições de cura, idade do concreto, e os parâmetros adotados durante a realização do ensaio.

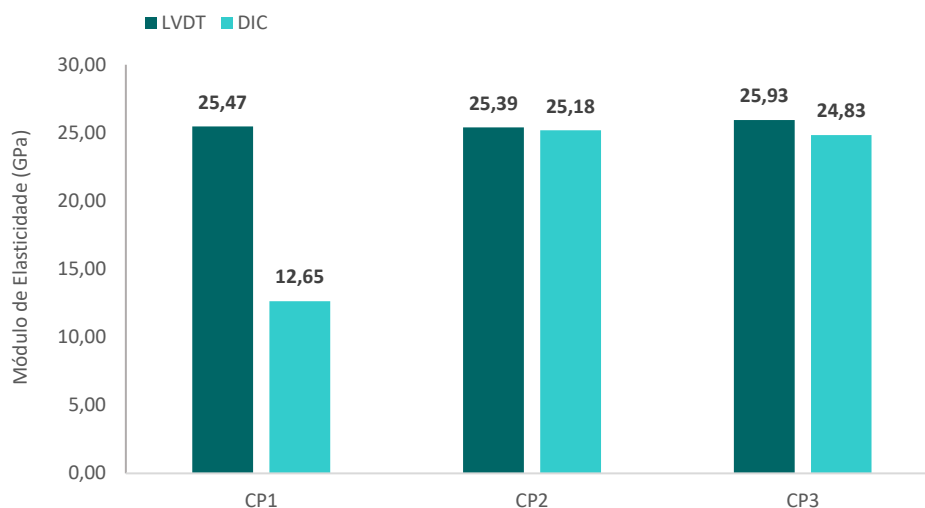
De acordo Leal et al. (2020) a relação pasta/argamassa/agregados assim como a origem do agregado exercem maior influência na determinação do módulo de elasticidade do que a resistência do concreto. Monteiro, Helene e Kang (1993) afirmam que o módulo elástico do concreto depende, sobretudo, da aderência entre a matriz cimentícia e os agregados por ela envolvidos. Devido a essa grande quantidade de fatores que influenciam o módulo de elasticidade é difícil quantificar qual é interferência de cada um deles na determinação desta propriedade mecânica do concreto.

Tal influência dos agregados na determinação do módulo de elasticidade pode ser confirmada com as formulações empíricas propostas pelas normas de projeto de estruturas de concreto. Por exemplo, a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento, introduziu um parâmetro  $\alpha_E$  que representa a natureza do agregado, no cálculo do módulo de elasticidade.

Conforme, descrito na metodologia deste ensaio, além do uso dos LVDT's como instrumento de medida de deslocamentos também foi adotada a DIC como uma forma alternativa de obtenção desses dados. Tendo como exemplo o traço 2.01, com a dosagem contendo 25% de GGBF 1,2mm em sua composição, o gráfico da Figura 67 compara os valores

de módulo de elasticidade médio utilizando as duas metodologias citadas para a captura de dados.

Figura 67 – Comparação dos resultados LVDT's x DIC



Fonte: A autora

Excetuando-se os resultados do corpo de prova 1, comparando os resultados das duas metodologias de medição, tem-se que os valores obtidos foram bem próximos, com uma diferença máxima entre eles igual a 4,2%. Apesar de um dos resultados não ter sido satisfatório, tal fato não invalida o uso da DIC como um meio de captura de dados para ensaios mecânicos do concreto. Pelo ensaio de módulo de elasticidade ser bastante sensível, essa diferença de resultados pode ter ocorrido em função dos efeitos externos e ruídos durante a captura da imagem.

Como o uso medições com correlação de imagem é incipiente na construção civil, ainda não se conhece todos os fatores que podem influenciar nos resultados dos ensaios. Porém sabe-se que o processo de preparação dos corpos de prova, a qualidade do padrão de pintura e o contraste adequado, ruídos externos, variação da luz incidente sobre a superfície filmada e a qualidade dos equipamentos de filmagem podem impactar na qualidade da captura das imagens. Mesmo com essas adversidades, entende-se que o uso da correlação por imagem é viável, pelas suas vantagens, porém ele precisa ser validado com um maior número de ensaios.

#### **4.6 Comentários finais**

De forma a resumir os resultados obtidos para os ensaios desenvolvidos no programa experimental e permitir uma comparação global entre todas as dosagens estudadas, a Tabela 18 resume os principais resultados. Para tal, foi considerada a média de cada um deles a fim de facilitar a análise. Os maior e o menor valor de cada uma das séries está destacado, respectivamente de verde e vermelho. Após a análise dos resultados dispostos na Tabela 18, o Quadro 6 resume as observações levantadas durante a análise experimental, justificando como as características dos agregados podem influenciar nos resultados de cada um dos ensaios



Tabela 18 – Resumo dos resultados por dosagem estudada

Traço	Composição	Trabalhabilidade (cm)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)
Traço REF.	100% areia fina	<b>21,7</b>	54,4	<b>1,4</b>	6,7	22,25
Traço 1.01	25% areia natural 1,2 mm	20,3	47,6	<b>2,3</b>	6,2	20,25
Traço 1.05	50% areia natural 1,2 mm	21,0	<b>35,7</b>	1,7	6,6	<b>18,15</b>
Traço 1.08	25% areia natural 2,4 mm	20,5	42,2	1,9	<b>5,3</b>	20,21
Traço 1.09	50% areia natural 2,4 mm	20,3	50,9	1,6	5,7	21,71
Traço 2.01	25% GGBF 1,2 mm	<b>20,0</b>	64,8	1,6	<b>7,9</b>	<b>25,60</b>
Traço 2.09	25% GGBF 2,4 mm	<b>20,0</b>	<b>66,7</b>	1,8	6,6	22,27

Fonte: A autora

Quadro 6 – Resumo das análises

Ensaio	Observação	Justificativa
Índice de Consistência	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tendência de diminuir a trabalhabilidade com o aumento da dimensão máxima do agregado;</li> <li>- Os valores da trabalhabilidade são menores quando se utiliza a GGBF como material substituinte;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldade de dispersão e homogeneização das fibras;</li> <li>- A forma e a textura do agregado influenciam na trabalhabilidade;</li> <li>- Duas características das fibras de PP impactam nesta propriedade, que são: a sua superfície hidrofóbica e a elevada razão de aspecto;</li> </ul>
Resistência à compressão	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para a areia natural, a resistência à compressão para todas as dosagens, foram inferiores ao traço referência;</li> <li>- Tendência de as partículas com forma irregular apresentar maior resistência à compressão;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A mudança na dimensão máxima do agregado pode apresentar dois efeitos contrários. Com o mesmo consumo de cimento e consistência, dosagens com partículas maiores necessitam de menos água e, por outro lado, os agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface pasta/cimento menos resistente;</li> <li>- Tendência de as partículas com forma irregular apresentarem maior resistência na ligação do agregado com a pasta de cimento;</li> </ul>
Tração Direta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Devido à grande variabilidade nos resultados desse ensaio, não foi possível verificar como as características do agregado podem influenciar nos resultados deste ensaio;</li> <li>- Mesmo com essa dificuldade, observa-se que a maioria das amostras apresentou um comportamento dúctil à tração;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O aumento da dimensão do agregado geralmente produz maior energia de fratura e, portanto, maior resistência da matriz cimentícia e tal fato deve contribuir para uma redução da capacidade de tração, de acordo com a teoria da micromecânica do ECC (SAHMARAN et al., 2009).</li> <li>- O baixo módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra e a pouca aderência química entre as fibras e a matriz cimentícia impactam diretamente no processo de transferência de tensões;</li> </ul>
Flexão à 4 pontos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento da dimensão máxima dos agregados, com a proporção de substituição fixa, tanto para a areia natural quanto para a GGBF, há a tendência de a tensão máxima ser menor;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O aumento do <math>D_{max}</math> influencia na ductilidade do material e esse efeito negativo pode ser atribuído à dificuldade de garantir uma dispersão uniforme das fibras, com a tendência de a força última ser menor. com o aumento da dimensão, o que influencia na ligação da fibra com a matriz cimentícia.</li> <li>- O baixo módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra e a pouca aderência química entre as fibras e a matriz cimentícia impactam diretamente no processo de transferência de tensões;</li> </ul>
Módulo de elasticidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O módulo de elasticidade médio das dosagens com GGBF foram maiores do que todos os traços contendo somente areia natural.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior aderência entre a pasta de cimento e o agregado. Segundo Neville (2016) a ligação mecânica é influenciada pelas propriedades da superfície e em certo grau pela forma do agregado.</li> </ul>

Fonte: A autora

De posse dessas informações, percebe-se que várias são as propriedades do agregado que influenciam no comportamento do concreto, tanto seu estado fresco quanto endurecido, conforme foi discutido ao longo do texto. Mesmo percebendo essa influência é difícil quantificar como cada uma das características do agregado influenciam no desempenho do concreto. Todas as observações levantadas estão de acordo com os pontos discutidos ao longo deste texto.

Deve-se destacar que o tipo de fibra escolhida para este trabalho também influencia no comportamento mecânico do material. Neste caso, módulo de elasticidade, resistência à tração e a baixa aderência química da fibra de PP com a matriz cimentícia também impactam no processo de transferência de tensões e consequente ductilidade.

Com os resultados obtidos, percebe-se que é possível manter o comportamento dúctil do concreto, para todas as dosagens avaliadas, desde que ocorra uma adequada distribuição das fibras na matriz cimentícia, sendo este o ponto chave e de maior preocupação. Ressalta-se a importância das fibras e é o elemento que faz o processo de transferência das tensões. Por fim, para se obter o comportamento dúctil do concreto devem ser atendidos os critérios de resistência e energia para garantir a ductilidade do material após o aparecimento da primeira fissura.

## 5. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

O desenvolvimento de modelos constitutivos de materiais é um passo necessário para o estudo das estruturas e simulação de seu comportamento, sendo uma ferramenta essencial de otimização para a definição da geometria, dimensões e propriedades mecânicas dos materiais. Os modelos constitutivos também auxiliam na validação do dimensionamento dos elementos estruturais sem a necessidade de realização de experimentos, que muitas vezes são difíceis de serem executados, tanto pela escala quanto pelo custo envolvido. Todo esse contexto torna-se mais crítico para materiais ainda em desenvolvimento, como o caso do ECC (LI, 2019).

Por causa das características mecânicas, o modelo constitutivo do ECC é diferente do conhecido para o concreto convencional ou FRC tradicional. Analisando o comportamento do FRC tradicional, a abertura da primeira fissura é acompanhada pelo desenvolvimento de uma zona de fratura localizada, onde as fibras transferem parcialmente as tensões, que diminui com a expansão das fissuras. Neste caso, o comportamento do material é considerado como quase-frágil e a fissura é única. O ECC, no entanto, apresenta um comportamento diferenciado. Neste material, há uma concentração de tensões na ponta da fissura e, devido a capacidade de transferência de cargas pelas fibras, uma redistribuição de tensões ocorre e conseqüentemente se inicia o processo de microfissuração.

Considerando esses pontos, neste capítulo serão abordadas a construção de dois modelos analíticos para o ECC e um modelo de simulação numérica, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Os dois modelos analíticos escolhidos para estudo, o de Maaleji e Li (1994) e a análise inversa de Qian e Li (2007), foram construídos em planilhas eletrônicas do *software Excel*, seguindo o equacionamento proposto por cada um deles e, a simulação numérica foi desenvolvida no *software Ansys*. Posteriormente, para os três casos de aplicação, foram feitas simulações e as respostas obtidas foram comparadas com os resultados experimentais discutidos no capítulo 4.

### 5.1 Modelo teórico de vigas de ECC à tração na flexão (Maaleji e Li, 1994)

Maaleji e Li (1994) desenvolveram um modelo teórico que auxilia na previsão o desempenho *deflection-hardening* de vigas e lajes de ECC submetidas à flexão, garantido pelo comportamento *strain-hardening* característico do material. Para tal, algumas premissas foram adotadas:

- As seções planas permanecem planas durante a deformação;
- Para modelar o comportamento das vigas, foram considerados somente os modelos constitutivos para as tensões uniaxiais de tração e compressão, conforme as Equações 9 e 10 e a Figura 68 (a) e (b), respectivamente, sendo considerada uma representação bilinear para ambos os casos;
- Assumido uma distribuição linear de deformações na seção transversal das vigas, a tração devido à flexão, na base da viga, é definida em função das equações de equilíbrio de força e momento;
- A falha na viga ocorre quando a deformação última a tração ( $\varepsilon_{tu}$ ) é atingida;

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{tc}}{\varepsilon_{tc}} \varepsilon & \varepsilon < \varepsilon_{tc} \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}} (\varepsilon - \varepsilon_{tc}) & \varepsilon \geq \varepsilon_{tc} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sigma = \begin{cases} 2 \frac{\sigma_{cp}}{\varepsilon_{cp}} \varepsilon & \varepsilon < \frac{\varepsilon_{cp}}{3} \\ \frac{1}{2} \sigma_{cp} \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cp}} \right] & \varepsilon \geq \frac{\varepsilon_{cp}}{3} \end{cases} \quad (10)$$

$\varepsilon$ : Deformação em um ponto;

$\sigma_{tc}$ : Tensão de tração na abertura da primeira fissura;

$\varepsilon_{tc}$ : Deformação à tração na abertura da primeira fissura;

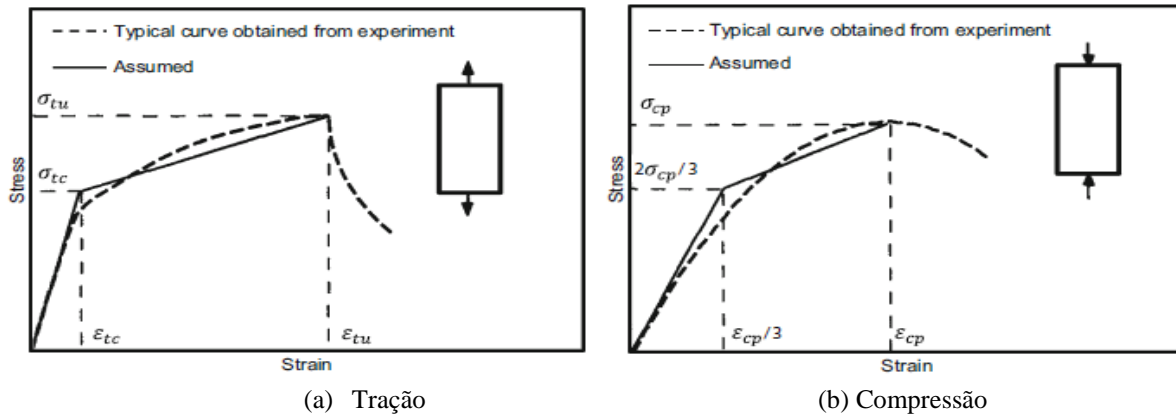
$\sigma_{tu}$ : Tensão última à tração;

$\varepsilon_{tu}$ : Deformação à tração última;

$\sigma_{cp}$ : Tensão à compressão;

$\varepsilon_{cp}$ : Deformação à compressão na tensão máxima;

Figura 68 – Representação dos modelos de tração e compressão



Fonte: Maalej e Li (1994)

Para a construção desse modelo Maaleji e Li (1994), consideraram uma viga de seção transversal com largura igual à  $b$  e altura igual à  $d$ , submetida à flexão, de ECC e quando submetida ao esforço uniaxiais de tração, exibe um comportamento *stran-hardening* caracterização pela curva tensão x deformação exibida na Figura 68 (a). O comportamento à compressão do ECC é caracterizado pela curva tensão x deformação da Figura 68 (b). A Figura 69 mostra a seção transversal da viga submetida ao momento máximo, assumindo que a deformação varia linearmente ao longo da altura da viga e que a distribuição de tensões varia conforme Equações 11 a 14:

$$\sigma(x) = \sigma_1(x) = \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} [\epsilon(x) - \epsilon_{tc}] \quad 0 \leq x \leq a \quad (11)$$

$$\sigma(x) = \sigma_2(x) = \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(x) \quad a \leq x \leq c \quad (12)$$

$$\sigma(x) = \sigma_3(x) = -2 \frac{\sigma_{cp}}{\epsilon_{cp}} \epsilon(x) \quad c \leq x \leq e \quad (13)$$

$$\sigma(x) = \sigma_4(x) = -\frac{1}{2} \sigma_{cp} \left[ 1 + \frac{\epsilon(x)}{\epsilon_{cp}} \right] \quad e \leq x \leq d \quad (14)$$

$\sigma_{tc}$ : Tensão de tração na abertura da primeira fissura;

$\epsilon_{tc}$ : Deformação à tração na abertura da primeira fissura;

$\sigma_{tu}$ : Tensão última à tração;

$\epsilon_{tu}$ : Deformação à tração última;

$\sigma_{cp}$ : Tensão à compressão;

$\epsilon_{cp}$ : Deformação à compressão na tensão máxima;

$\varepsilon(x)$ : Deformação em um ponto, em função da posição da linha neutra que pode ser calculada conforme as Equações 15 e 16:

$$x = \frac{x}{a}(\varepsilon_{tc} - \varepsilon_t) + \varepsilon_t \quad 0 \leq x \leq c \quad (15)$$

$$x = \frac{x}{a}(\varepsilon_t - \varepsilon_{tc}) - \varepsilon_t \quad c \leq x \leq d \quad (16)$$

$x$ : Distância da extremidade tracionada até um ponto arbitrário ao longo da altura da viga

$a$ : Comprimento da zona de com portamento inelástico;

$c$ : Distância da extremidade tracionada até a linha neutra, que é calculado conforme a Equação 17:

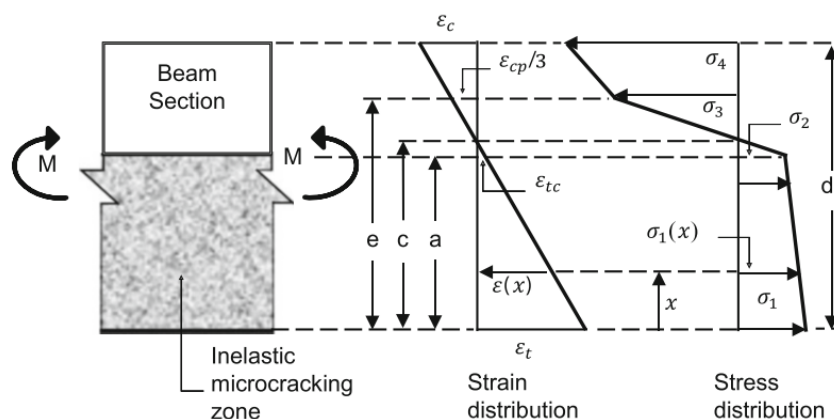
$$c = \frac{a\varepsilon_t}{(\varepsilon_t - \varepsilon_{tc})} \quad (17)$$

$e$ : Distância da extremidade tracionada até ponto onde se inicia a região comprimida da seção da viga, calculado conforme a Equação 18;

$$e = \frac{a(\varepsilon_{cp} - 3\varepsilon_t)}{(3\varepsilon_t - 3\varepsilon_{tc})} \quad (18)$$

Todas as distâncias calculadas, indicadas pelos índices  $x$ ,  $a$ ,  $c$  e  $e$  e destacadas na Figura 69, com o eixo neutro localizado a uma distância  $c$  da base e com o processo de microfissuração ocorrendo a uma distância  $a$  da base da viga.

Figura 69 – Distribuição de tensões e deformações na viga



Fonte: Maalej e Li (1994)

Escrevendo as equações de equilíbrio para uma seção da viga, onde a soma das forças normal é igual a 0 e o momento gerado por elas é igual ao momento externo aplicado na viga, tem-se, conforme as Equações 19 e 20:

$$\int_0^a b\sigma_1(x)dx + \int_a^c b\sigma_2(x)dx + \int_c^e b\sigma_3(x)dx + \int_e^d b\sigma_4(x)dx = 0 \quad (18)$$

$$\int_0^a b\sigma_1(x)xdx + \int_a^c b\sigma_2(x)xdx + \int_c^e b\sigma_3(x)xdx + \int_e^d b\sigma_4(x)xdx = M \quad (19)$$

Onde o momento externo  $M$  e tensão de tração na fibra extrema  $\varepsilon_t$  são definidos em função dos parâmetros conhecidos do material, das dimensões da viga e do tamanho da zona de microfissuração  $a$ , conforme as Equações 20, 21 e 22:

$$M = M(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r, b, d) \quad (20)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_t(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) \quad (21)$$

$$r = a/d \quad (22)$$

Para este caso, os autores assumiram que a falha da viga ocorre quando o momento aplicado  $M$  é igual à capacidade resistente da viga. Também se assumiu que a viga falha quando é atingida a capacidade de deformação do material tanto à tração ( $\varepsilon_t > \varepsilon_{tu}$ ) quanto à compressão ( $\varepsilon_c > \varepsilon_{cp}$ ). Conforme as Equações 23 a 27, o momento máximo é:

$$M_u = M(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r_u, b, d) \quad (23)$$

$$r_u = \min(r_t, r_c) \quad (24)$$

$$\varepsilon_t(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r_t) = \varepsilon_{tu} \quad (25)$$

$$\varepsilon_c(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r_c) = \varepsilon_{cp} \quad (26)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) = \frac{1-r}{r} \varepsilon_t(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) - \frac{1}{r} \varepsilon_{tc} \quad (27)$$

A tensão na flexão, pode ser calculada conforme a Equação 28:

$$\sigma_f = \frac{6M}{bd^2} = \sigma_f(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) \quad (28)$$

O módulo de ruptura (MOR), correspondente a  $M_u$  é dado pela Equação 29:

$$MOR = \sigma_f(\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r_u) \quad (29)$$



A deformação da viga associada ao momento  $M$  aplicado pode ser descrita pela sua curvatura. Baseada nas condições geométricas, a curvatura da viga  $1/\rho$  pode ser descrita com a razão entre a deformação de tração máxima pela distância da extremidade mais tracionada da viga até a linha neutra, conforme a Equação 30:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_t}{c} \quad (30)$$

Para uma curvatura constante, a deflexão máxima para a viga tendo um vão livre  $L$  é dada pela Equação 31:

$$u = \frac{L^2}{8\rho} \quad (31)$$

A relação momento x curvatura pode ser determinado por meio das Equações 23 e 30 com  $r$  variando entre 0 e  $r_u$ .

$L$ : Vão livre;

$M$ : Momento externo aplicado;

$M_u$ : Momento máximo (capacidade resistente à flexão);

$r$ : Razão entre  $a/d$ ;

$r_c$ : Valor da razão  $a/d$  onde a deformação à compressão na fibra mais comprimida é igual à deformação à compressão quando atingida a tensão de compressão máxima;

$r_t$ : Valor da razão  $a/d$  onde a deformação à tração na fibra mais tracionada é igual à deformação à máxima deformação à tração;

$r_u$ : O menor valor entre  $r_c$  e  $r_t$ ;

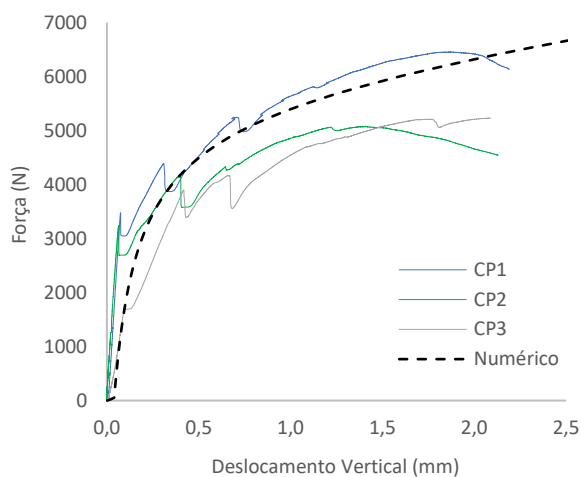
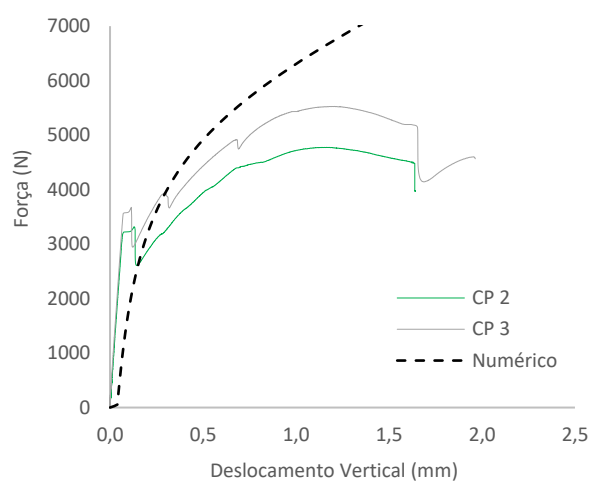
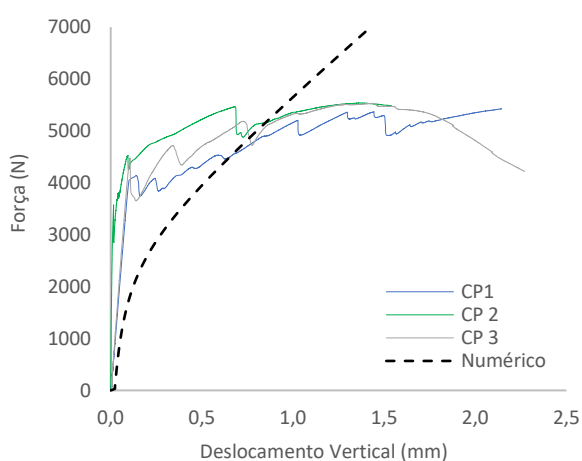
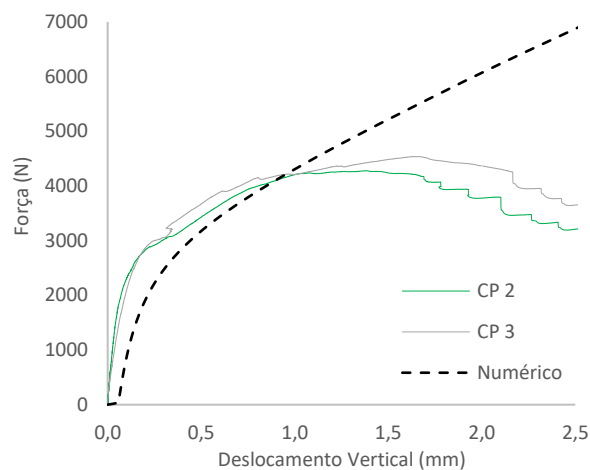
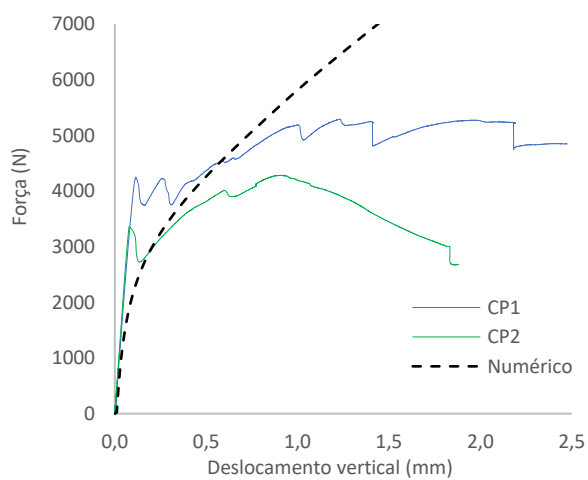
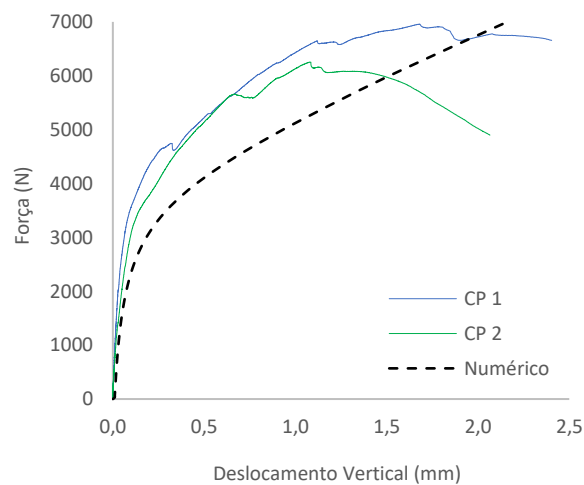
$\rho$ : Curvatura da viga;

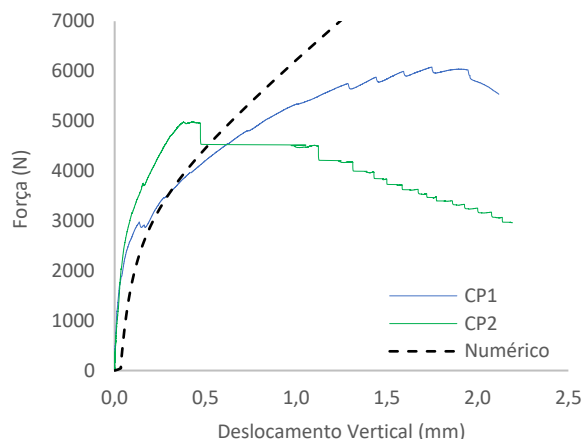
$\sigma(x)$ : Tensão em  $x$ ;

$\sigma_f$ : Tensão à flexão correspondente à  $M$ ;

Com o desenvolvimento dessas equações, os gráficos da Figura 70 mostram a relação força x deslocamento vertical obtida empregando o modelo constitutivo desenvolvido por Maaleji e Li (1994), sendo este resultado comparado com os obtidos experimentalmente, por meio do ensaio de flexão a 4 pontos. Os valores de  $M$  e  $\varepsilon_t$  foram calculadas conforme as equações apresentadas no Anexo I.

Figura 70 – Aplicação do modelo teórico de Maalej e Li (1994)

(a) Traço Referência  
(Composição: 100% areia #0,3mm)(b) Traço 1.01  
(Composição: 25% areia natural #1,2 mm)(c) Traço 1.05  
(Composição: 50% areia natural #1,2 mm)(d) Traço 1.08  
(Composição: 25% areia natural #2,4 mm)(e) Traço 1.09  
(Composição: 50% areia natural #2,4 mm)(f) Traço 2.01  
(Composição: 25% GGBF #1,2 mm)



(h) Traço 2.09  
(Composição: 25% GGBF #2,4 mm)

Fonte: A autora

A Tabela 19 mostra os dados adotados como parâmetros de entrada, que consideram os resultados dos ensaios de tração direta e compressão uniaxial. Para a deformação do concreto à compressão, por não ter sido medida, foi considerada igual a 0,5%, conforme os valores adotados por Qian e Li (2008).

Tabela 19 – Dados de entrada do modelo

Traço	$\sigma_{tc}$ (MPa)	$\epsilon_{tc}$	$\sigma_{tu}$ (MPa)	$\epsilon_{tu}$	$\sigma_{cp}$ (MPa)	$\epsilon_{cp}$	d (mm)
Traço REF.	1,42	0,000085	1,70	0,0077	54,4	0,005	50
Traço 1.01	1,58	0,000078	2,50	0,0071	47,6	0,005	50
Traço 1.05	0,72	0,000047	1,68	0,0027	35,7	0,005	50
Traço 1.08	0,91	0,000148	2,08	0,0083	42,2	0,005	50
Traço 1.09	1,01	0,000160	2,03	0,0040	50,9	0,005	50
Traço 2.01	1,03	0,000015	1,76	0,0034	64,8	0,005	50
Traço 2.09	1,04	0,000085	2,07	0,0037	66,7	0,005	50

Fonte: A autora

Com base nos resultados obtidos com aplicação deste modelo analítico desenvolvido por Maalej e Li (1994), observa-se que ele pode ser útil para a estimativa do comportamento à flexão, considerando a proximidades das curvas analíticas e experimental. Porém, deve-se observar que as curvas que representam o comportamento à tração do material foram construídas com base nos dados obtidos experimentalmente. Devido aos problemas encontrados durante a execução do ensaio de tração direta, conforme discutido no capítulo anterior, as curvas que representam esse comportamento podem não os representar

corretamente, impactando no resultado da aplicação do modelo analítico. Porém tal fato não invalida a sua utilização para a previsão do comportamento do compósito à flexão.

Apesar desse modelo analítico ser útil, deve-se ter em mente que é necessário caracterizar o comportamento do material à tração que, dependendo da situação, pode ser inviável. Logo, uma análise sobre a relação custo x benefício para a realização de outros ensaios para a caracterização do material torna-se uma alternativa interessante.

## 5.2 Modelo inverso simplificado (Qian e Li, 2007)

Com o desenvolvimento e avanço dos estudos de concreto reforçado com fibras, em especial os que apresentam o comportamento *strain-hardening*, torna-se necessário conhecer o desempenho deste material à tração, com a correta determinação das tensões e deformações. Porém conforme discutido, o ensaio para a determinação dessas propriedades é complexo e com vários detalhes de execução, o que muitas vezes não fornece bons resultados, sendo tal fato também relatado por Stang e Li (2004) e Qian e Li (2008).

Diante desse cenário, uma alternativa para a substituição do ensaio de tração direta para o controle de qualidade, especialmente nas construções *in loco*, é a consideração dos resultados do ensaio de flexão à 4 pontos, seguida da análise inversa, proposta por Stang e Li (2004). Esses autores mostram que a deflexão da viga obtida pelo ensaio de flexão, a partir de um modelo teórico, pode ser linearmente relacionada com capacidade de deformação à tração. Tem-se que a execução do ensaio de flexão é mais simples do que o ensaio de tração direta, gerando resultados mais confiáveis.

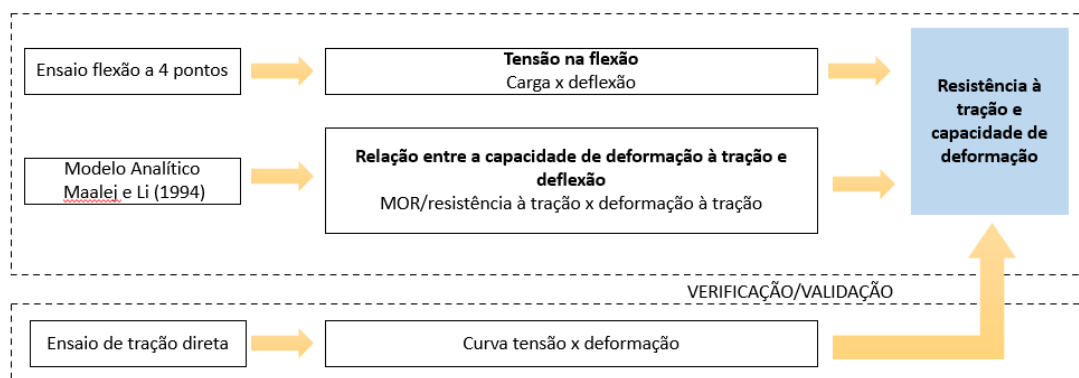
A vantagem do ensaio de flexão a 4 pontos é a possibilidade de utilização das curvas momento-curvatura ou momento-deflexão na análise inversa e determinar as propriedades à tração do material. Porém, destaca-se que esta análise não determina se um material apresenta um comportamento *strain hardening* ou *strain-softening*. O objetivo da análise inversa é determinar a capacidade de deformação do material e a sua resistência quando submetido ao esforço de tração, como parte de um controle de qualidade (STANG e LI, 2004; QIAN e LI, 2008).

A transformação linear desenvolvida por esses pesquisadores, para a construção da curva mestre, foi desenvolvida com base em estudo paramétrico de vários resultados experimentais para determinação das propriedades à tração e à compressão dos materiais. A deflexão correspondente à maior tensão à flexão ou módulo de ruptura (MOR) pode ser obtida

por meio do ensaio de flexão a 4 pontos, que é a capacidade de deflexão. Com isso a curva mestre pode ser construída, por meio de estudo paramétrico, em termos da deformação à tração e da deflexão da viga. Baseando nessas informações, consegue-se determinar a capacidade de deformação do material (QIAN e LI, 2008).

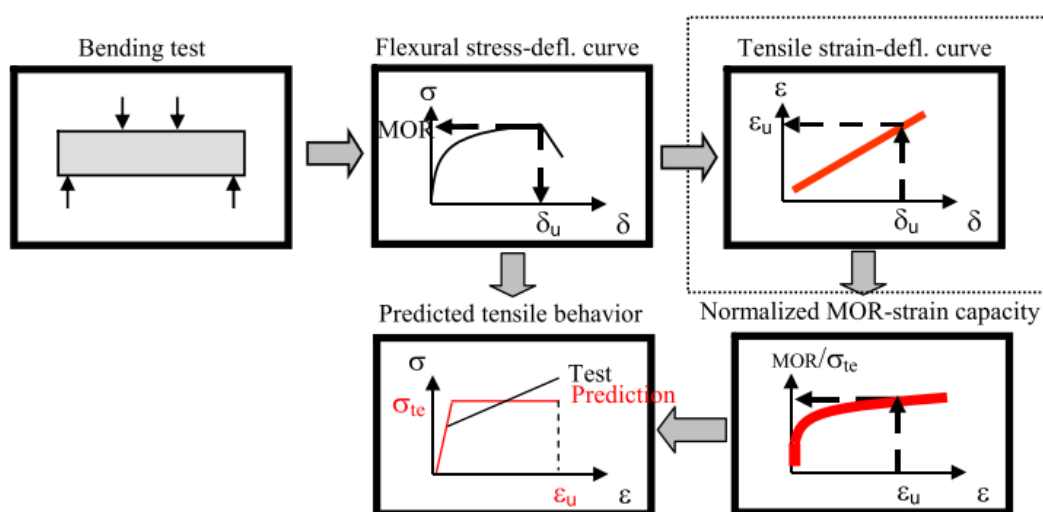
Conforme os passos descritos nas Figuras 71 e 72 para o desenvolvimento do estudo paramétrico e construção das curvas mestre, o modelo a flexão utilizado foi o desenvolvido por Maaleji e Li (1994), que tem a vantagem de apresentar a contribuição do comportamento *strain-hardening* à tração do material. Para facilitar análise a curva tensão x deformação do ECC, tanto para a tração quanto para a compressão, foram consideradas as curvas bilinear, (Figura 68). Para este modelo, a tensão na abertura da primeira fissura é igual a tensão última e esta é considerada como a resistência do material à tração.

Figura 71 – Desenvolvimento modelo inverso simplificado



Fonte: Adaptado de Qian e L (2008)

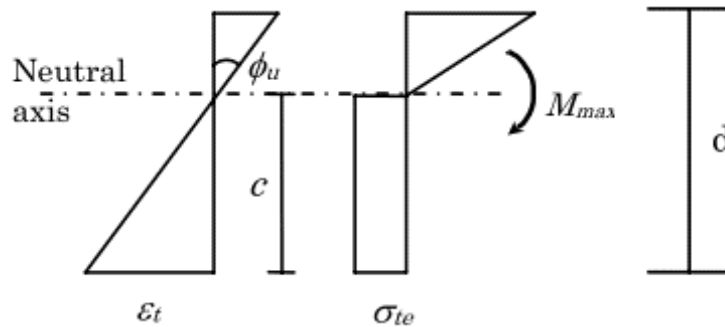
Figura 72 – Distribuição de tensões e deformações na viga



Fonte: Qian e Li (2008)

A Figura 73 mostra como foi considerada a distribuição de tensões e deformações em uma seção da viga e, por meio do equilíbrio das forças e momento, conforme as Equações 32 a 36, tem-se:

Figura 73 – Distribuição de tensões e deformações na viga



Fonte: Qian e Li (2008)

$$\frac{E \cdot b \cdot \phi_u}{2} \cdot (d - c)^2 = \sigma_{te} \cdot b \cdot c \quad (32)$$

$$M_{max} = \frac{E \cdot b \cdot \phi_u}{3} \cdot (d - c)^3 + \frac{\sigma_{te} \cdot b}{2} c^2 \quad (33)$$

$$\sigma_{te} = \frac{E \phi_u}{2c} (d - c)^2 \quad (34)$$

$$MOR = \frac{6M_{max}}{bd^2} = 2E \cdot d \cdot \phi_u \left(1 - \frac{c}{d}\right)^3 + 3\sigma_{te} \cdot \left(\frac{c}{d}\right)^2 \quad (35)$$

$$\frac{MOR}{\sigma_{te}} = 4 \left(\frac{c}{d}\right) - \left(\frac{c}{d}\right)^2 = 4c_0 - c_0^2 \quad (36)$$

$E$ : Módulo de elasticidade (N/mm<sup>2</sup>);

$b$ : Largura da viga (mm);

$d$ : Altura da viga (mm);

$c$ : Posição da linha neutra, medida a partir da extremidade de tensão de tração máxima (mm);

$\phi_u$ : curvatura (1/mm);

$\sigma_{te}$ : Tensão de tração prevista (MPa);

$M_{max}$ : Momento Máximo (N.mm);

$MOR$ : Tensão de tração à flexão máxima (MPa);

Baseada nas características geométricas, a curvatura da viga pode ser computada com a razão entre a deformação máxima à tração e distância da extremidade mais tracionada da viga até o eixo neutro, expressada pela Equação 37 e definida na Figura 74.

$$\phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_t}{c} \quad (37)$$

Onde:

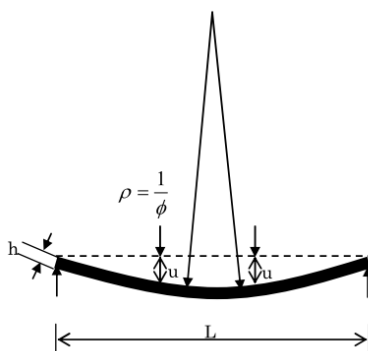
$\phi$ : Curvatura da viga;

$\rho$ : Raio de curvatura;

$\varepsilon_t$ : Máxima deformação de tração;

$c$ : distância da extremidade mais tracionada da viga até o eixo neutro<sup>12</sup>;

Figura 74 – Curvatura da viga



Fonte: Qian e Li (2007)

Com isso consegue-se obter uma equação que relaciona a deflexão da viga com a curvatura e, portanto, a deformação máxima a tração, que simplificada pode ser descrita como a Equação 38:

$$u = 0,1 * \phi * L^2 \quad (38)$$

$u$ : Deflexão da viga;

$L$ : Vão livre da viga ensaiada;

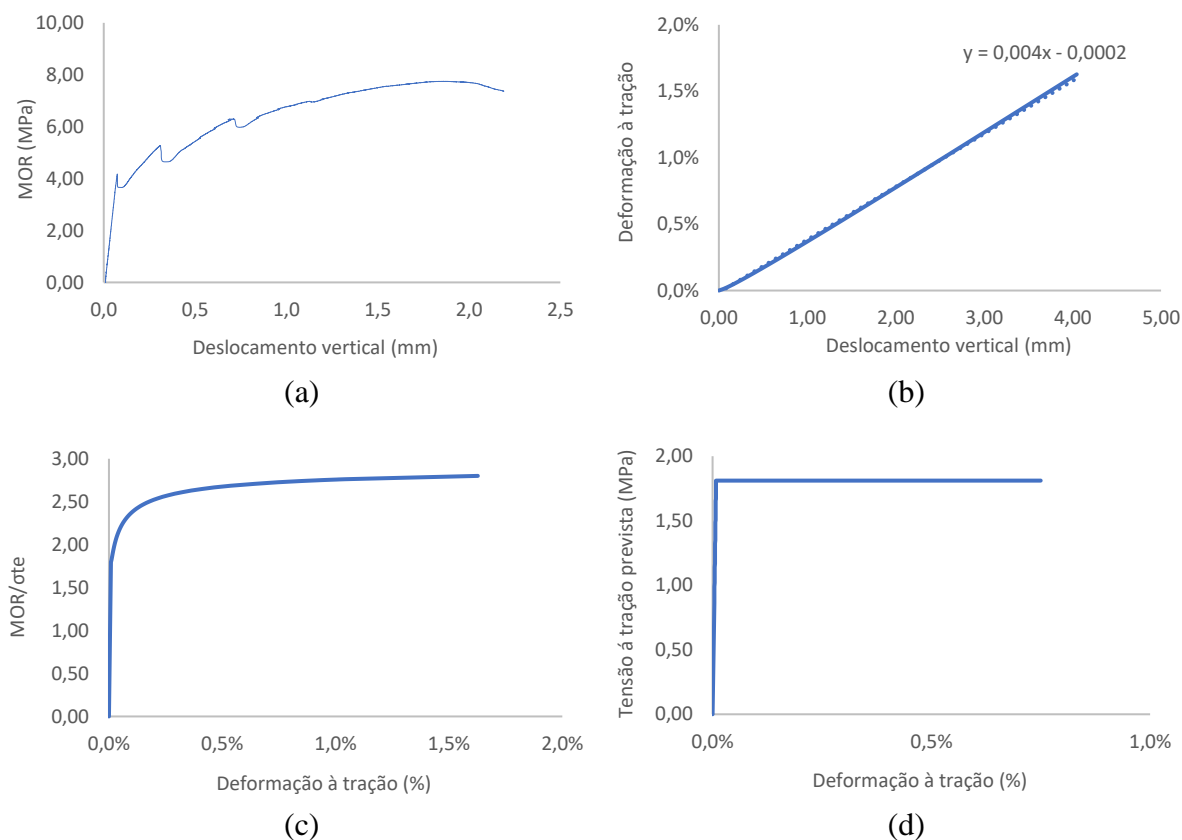
$\phi$ : Curvatura da viga;

<sup>12</sup> Segundo Qian e Li (2007), a deflexão é mais sensível a capacidade de deformação à tração para uma determinada geometria, do que à resistência à tração ou ao módulo de elasticidade, o que pode ser explicado pelo fato de que a distância entre a fibra de tensão máxima e o eixo neutro se estabiliza até cerca de 90% da profundidade da viga.

Com base na distribuição linear de deformações e no equilíbrio de forças e momento, (Figura 69), a relação entre a tensão devido à flexão e a deformação de tração máxima pode ser determinada em função das propriedades básicas do material. Devido à relação linear entre a deformação de tração máxima e a deflexão, a relação entre a tensão de flexão e a deflexão podem então ser estabelecidas (QIAN e LI, 2008).

Para a validação da análise inversa, a MOR obtida no ensaio de flexão a 4 pontos é convertida para a resistência efetiva à tração por meio das Equações 32 a 36. Posteriormente os resultados são comparados com a tensão de abertura da primeira fissura, obtida por meio do ensaio de tração direta, para validação do modelo. Os gráficos da Figura 75, exemplificam os passos a aplicação da análise inversa para traço de referência, para o corpo de prova 1. A Tabela 20 compara os resultados da análise inversa com os resultados experimental do ensaio de tração direta.

Figura 75 – Distribuição de tensões e deformações na viga



Fonte: A autora



Na Figura 75, o gráfico da letra (a) representa a curva tensão de tração à flexão x deslocamento vertical resultante do ensaio de flexão à 4 pontos aplicada. O gráfico da letra (b) representa a curva deslocamento vertical x deformação à tração (curva mestra), construída com a aplicação das equações do modelo analítico desenvolvido por Maaleji e Li (1994). A letra (c) mostra a curva deformação à tração x MOR normalizado e a letra (d) mostra a curva de deformação à tração x tensão à tração prevista, que representa o comportamento estimado do material à tração, considerando uma curva bilinear.

Tabela 20 – Resultados da análise inversa

TRAÇO	ENSAIO DE TRAÇÃO			ANÁLISE INVERSA	
	Tensão abertura 1 <sup>a</sup> fissura (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação na tensão máxima (%)	Tensão abertura 1 <sup>a</sup> fissura (MPa)	Deformação máxima (%)
Traço REF.	1,42	1,70	0,77	1,58	0,73
Traço 1.01	0,91	2,50	0,71	1,95	0,43
Traço 1.05	0,72	1,68	0,27	2,10	0,53
Traço 1.08	0,91	2,08	0,83	1,58	0,62
Traço 1.09	1,01	2,03	0,40	1,70	0,48
Traço 2.01	1,03	1,76	0,34	1,71	0,65
Traço 2.09	1,04	2,07	0,37	1,75	0,75

Fonte: A autora

Com base nos resultados apresentados na Tabela 20 e comparando os resultados da análise inversa simplificada com os resultados do ensaio de tração direta, observa-se maior similaridade dos resultados quando analisados o traço REF. Neste traço, a diferença entre as tensões máximas foi 5,9% e entre as deformações máximas foi 9,5%. Ressalta-se, mais uma vez, que a falta de confiabilidade nos resultados do ensaio de tração dificulta a validação do modelo de análise inversa. Considerado essas dificuldades, tem-se que os resultados obtidos pelas duas formas apresentam a mesma ordem de grandeza tanto para as tensões quanto para as deformações. e portanto, conclui-se que os resultados da análise inversa são coerentes.

Com isso, entende-se que é possível aplicar a análise inversa simplificada para estimar a tensão à tração do material, por meio de uma transformação para a construção das curvas-mestre, mesmo com as simplificações adotadas para a construção deste modelo. Para a aplicação desse método, assume-se que o material apresenta um comportamento *strain-hardening*, pois ele é utilizado apenas para determinar as constantes relacionadas à tensão de tração do material (resistência e deformação), sendo considerada como parte do controle de qualidade do material em campo.

### 5.3 Simulação numérica - Ansys

Seguindo o objetivo proposto por este trabalho, esta seção será dedicada ao desenvolvimento do modelo numérico por meio do Método de Elementos Finitos (MEF), que é mais uma ferramenta de análise do comportamento mecânico das dosagens de ECC estudadas. O objetivo desta etapa é comparar os resultados experimentais do ensaio de flexão à 4 pontos com os resultados da aplicação do modelo numérico.

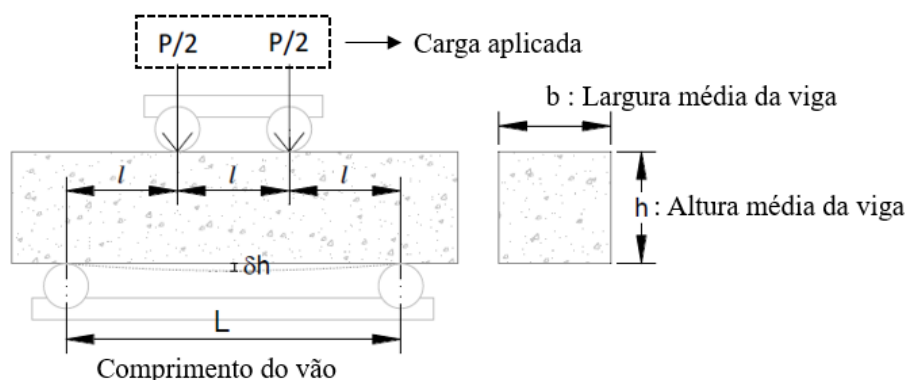
Nesta seção serão apresentados os conceitos utilizados para o desenvolvimento da simulação numérica, descrevendo os principais aspectos relacionados a este estudo, que são: descrição do elemento finito, propriedades e modelos constitutivos do material, malha de elementos finitos, discretização da geometria, condições de contorno e tipo de sollicitação.

A simulação numérica deste trabalho foi realizada no programa *Ansys Mechanical APDL*, na versão estudantil 2022 R2, que é um *software* de elementos finitos utilizado para aplicação em vários problemas de engenharia. A sua vantagem é que ele permite a programação de um *script*, de forma a automatizar o processo, e assim, por meio de informações definidas pelo usuário, torna-se possível gerar a geometria e a malha de elementos finitos, realizar as análises não-lineares e disponibilizar os resultados de interesse.

A construção do modelo numérico, que visa simular o ensaio de flexão a 4 pontos, seguiu as mesmas medidas e parâmetros utilizados na etapa experimental. As dimensões adotadas foram 50 x 100 x 400 mm, com vão livre igual a 300 mm e velocidade de carregamento igual a 0,2 mm/min. Para diminuir o custo computacional e o tempo de processamento do modelo numérico, foram utilizados dois planos de simetria, nos eixos X e Z. Portanto, apenas um quarto do modelo físico foi analisado. A Figura 76 mostra o esquema de ensaio modelado e a Figura 77 mostra o modelo de elementos finitos construído, considerando a simetria adotada.

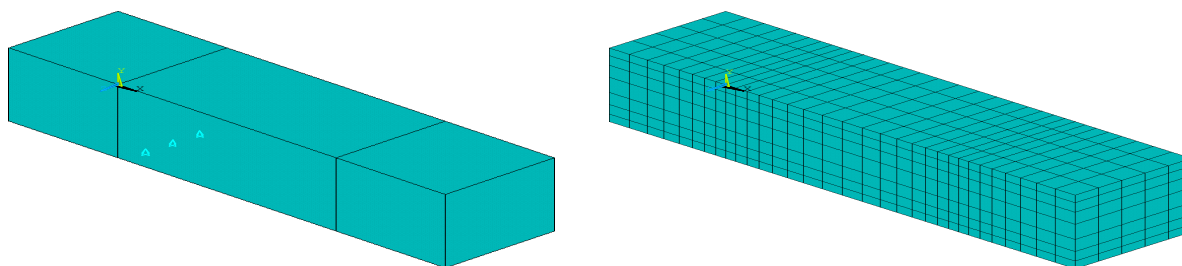
A análise utilizada foi a estática, que é utilizada para determinar deslocamentos e tensões sob essa condição de carregamento, sendo possível desenvolver uma análise não-linear e quantificar a magnitude dos deslocamentos e esforços internos, ignorando os efeitos das forças de amortecimento e de inércia.

Figura 76 – Esquema do ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2018)

Figura 77 – Modelo numérico construído



Fonte: A autora

No *Ansys Mechanical APDL* a construção do modelo pode ser dividida em três etapas: “*Preprocessor*”, “*Solution*” e “*Postprocessor*”. Na etapa *Preprocessor* é desenvolvida a geometria do modelo da estrutura, com a definição do tipo de elemento estrutural, suas características e o tipo de material utilizado. Na etapa *Solution* são definidas as forças atuantes, as condições de contorno e a escolha do tipo de análise. Na última etapa, o *Postprocessor* é onde são obtidos os resultados.

A simulação numérica das fibras distribuídas aleatoriamente na matriz de concreto, conforme observado por Agüero (2019), é um trabalho bastante complexo, não sendo este o escopo desta pesquisa. Mesmo com essa limitação, é possível obter bons resultados com a modelagem computacional. Para a simulação numérica foi utilizado elemento SOLID185, presente na biblioteca do programa.

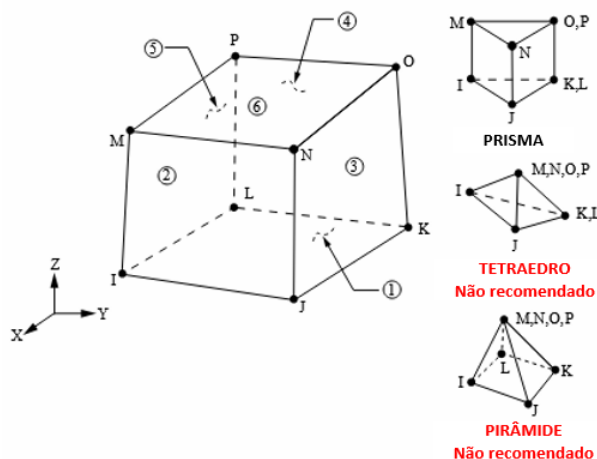
O manual do *Ansys* (2022) o descreve o SOLID185 como um elemento sólido, tridimensional e prismático, utilizado para modelar elementos estruturais. Apesar de permitir

---

Estudo do comportamento mecânico de misturas alternativas de ECC – variação das características dos agregados

as formas tetraédrica e piramidal, em superfícies com geometria irregular, não é recomendado a utilização dessas formas. O SOLID185 é definido por oito nós com três graus de liberdade cada deles, representadas pela translação nodal nas direções x, y e z. Esse elemento suporta a plasticidade e grande capacidade de tensão e deflexão. A Figura 78 mostra a configuração desse elemento.

Figura 78 – Configuração do SOLID185



Fonte: Adaptado ANSYS (2022)

Destaca-se que esse elemento é classificado, pelo manual do *Ansys* (2022) como um elemento de tecnologia atual (*current technology element*), que é compatível com os modelos de materiais disponibilizados atualmente pelo programa. O elemento SOLID65, utilizado em conjunto com o modelo *concrete*, é considerado um elemento desatualizado e por isso não foi escolhido, mesmo tendo sido utilizado por outros pesquisadores, como por exemplo, por Mahmood et al. (2016) e Agüero (2019). O uso desse elemento não é mais recomendado, mesmo ainda sendo possível a interpretação de *scripts* que o contenham (BENINCÁ, 2019).

Devido ao custo computacional que o emprego de um elemento sólido gera no modelo numérico, ele deve ser utilizado somente quando não existe a possibilidade de empregar um elemento menos robusto. Tal fato ocorre devido ao tamanho da matriz de rigidez e a necessidade de um bom refinamento da malha de elementos finitos para obter-se resultados representativos.

O ECC foi modelado como um único material e as leis de comportamento do material, tanto à tração quanto à compressão foram obtidas por meio de modelos teóricos apresentados por Maalej e Li (1994), descrito na seção 5.1 por meio das equações 9 e 10 e da Figura 68.

Posteriormente essas curvas foram comparadas com os resultados experimentais obtidos por este trabalho.

Para representar esse comportamento do concreto, no *Ansys*, foi utilizado o modelo de material CAST - *Cast Iron Plasticity*, que é um modelo multilinear e se caracteriza por ser elástico e isotrópico, com o mesmo comportamento elástico tanto à tração quanto à compressão. O limite elástico e o comportamento de endurecimento isotrópico podem ser diferentes à tração e à compressão. O comportamento à tração depende da pressão aplicada e ele utiliza o critério de tensão máxima de Rankine, enquanto à compressão se utiliza o critério de esforços de Von Mises, que é independente da pressão.

Segundo o manual do *Ansys* (2022), a plasticidade pode ser utilizada para modelar materiais que estão submetidos à carga além do seu limite elástico, que é o caso do ECC. Apesar de não ser uma característica dos concretos convencionais, considerar o comportamento *strain-hardening* à tração para o material estudado neste trabalho torna-se essencial, e isso justifica a escolha do modelo CAST. Ressalta-se que esse modelo de material também foi o escolhido por Agüero (2019) na simulação numérica desenvolvida em seu trabalho, para concretos reforçados com fibras de aço de ultra-alto desempenho (UHPRC).

Além das leis constitutivas do material à tração e à compressão, deve-se incluir na simulação os dados referentes ao módulo de elasticidade ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). A análise numérica desenvolvida foi do tipo estática não-linear, considerando grandes deslocamentos. O método de solução adotado para a resolução dos sistemas de equações não-linear foi o Newton-Raphson regular.

Com isso, os parâmetros escolhidos para a modelagem numérica foram divididos em duas partes: os relacionados com as propriedades físicas dos materiais e os relacionados com o processamento. As variáveis necessárias para a caracterização de cada um dos materiais no modelo numérico foram obtidas por meio dos ensaios do programa experimental desenvolvidos nesta pesquisa. Os dados que não possuíam tais resultados foram calibrados com base em formulações e dados literários.

Os parâmetros relacionados ao processamento (método de resolução do sistema de equação não-linear, número de passos de carga, número máximo de iterações, critério de convergência e tamanho do passo de carga) também foram escolhidos em função dos testes realizados no modelo numérico.

O modelo de elementos finitos desenvolvido foi realizado com o objetivo de caracterizar as dosagens de ECC desenvolvidas de acordo com seu comportamento em flexão, comparando os resultados dessa simulação numérica com os obtidos experimentalmente. As Tabelas 21 e 22 mostram os dados de entrada da simulação numérica, para a compressão e tração, respectivamente.

Tabela 21 – Dados de entrada - Compressão

Traço	E (GPa)	$\sigma_{c0}$ (MPa)	$\epsilon_{c0}$	$\frac{2}{3} \sigma_{c0}$ (MPa)	$\frac{1}{3} \epsilon_{c0}$
Traço REF.	22,25	54,4	0,0049	36,3	0,0016
Traço 1.01	20,25	47,6	0,0047	31,7	0,0016
Traço 1.05	18,15	35,7	0,0039	23,8	0,0013
Traço 1.08	20,21	42,2	0,0041	28,1	0,0014
Traço 1.09	21,71	50,9	0,0047	33,9	0,0016
Traço 2.01	25,60	64,8	0,0051	43,2	0,0017
Traço 2.09	22,27	66,7	0,0060	44,5	0,0020

Fonte: A autora

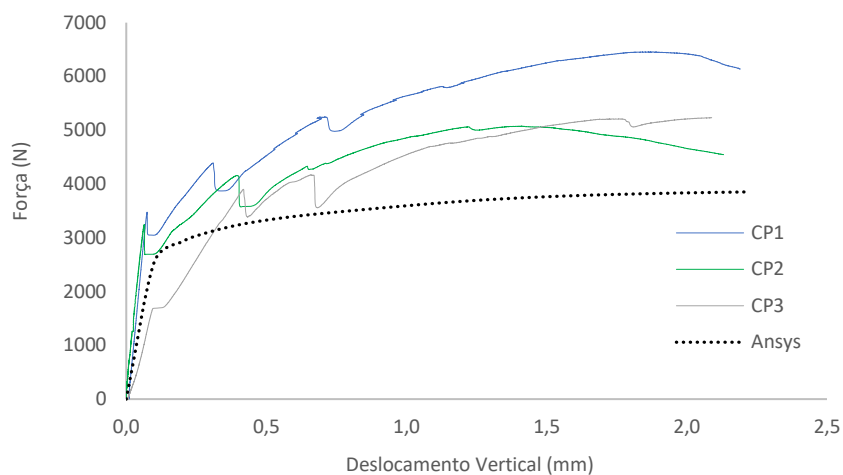
Tabela 22 – Dados de entrada – Tração

Traço	$\sigma_{tc}$ (MPa)	$\epsilon_{t0}$	$\sigma_{tu}$ (MPa)	$\epsilon_{tu}$
Traço REF.	1,42	0,000064	1,70	0,0077
Traço 1.01	1,58	0,000078	2,50	0,0071
Traço 1.05	1,30	0,000071	1,68	0,0011
Traço 1.08	0,91	0,000044	2,08	0,0083
Traço 1.09	1,01	0,000047	2,03	0,0040
Traço 2.01	1,03	0,000050	1,76	0,0034
Traço 2.09	1,04	0,000063	2,07	0,0037

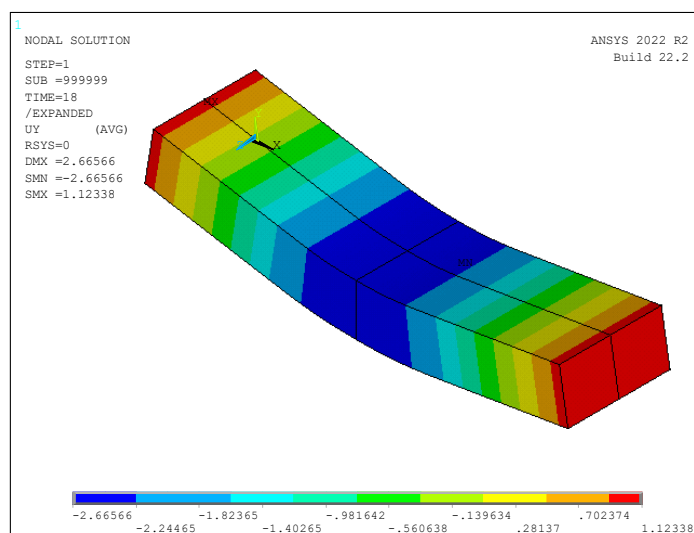
Fonte: A autora

Para o módulo de elasticidade foram considerados os resultados experimentais e o coeficiente de Poisson  $\nu = 0,2$ , constante para todas as dosagens. De posse desses dados foi possível construir as curvas de relação tensão x deformação para cada um dos traços estudados e assim validar o modelo numérico, comparando com os resultados experimentais, que podem ser vistos nas Figuras 79 a 85.

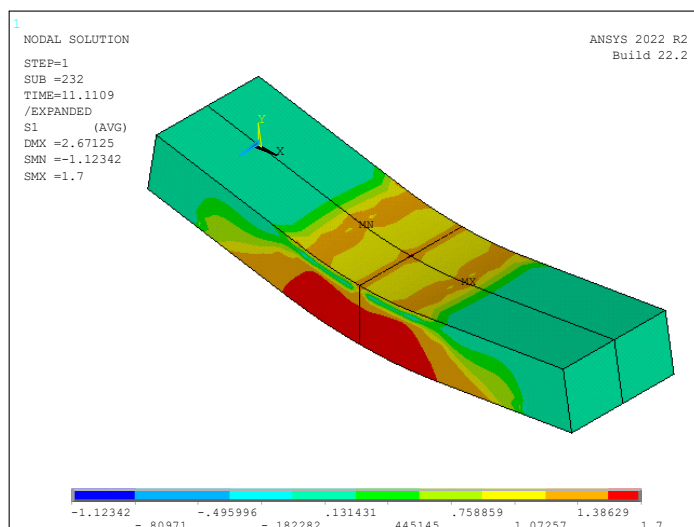
Figura 79 – Modelo numérico (Traço REF.)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



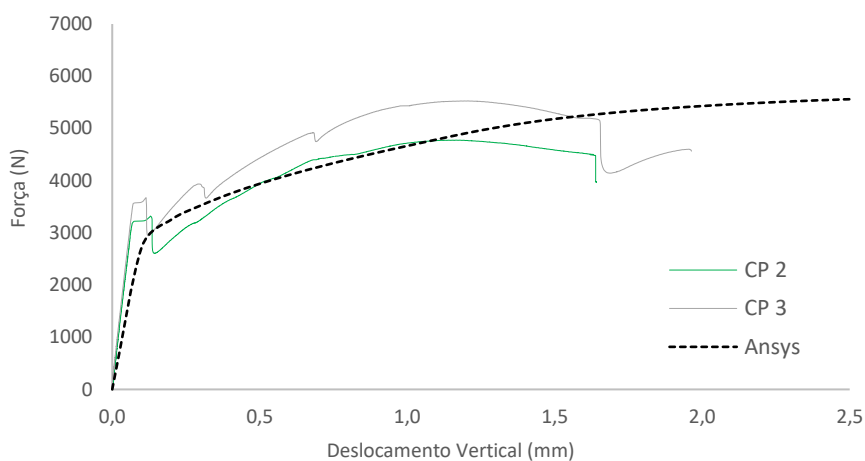
(b) Deslocamento vertical (mm)



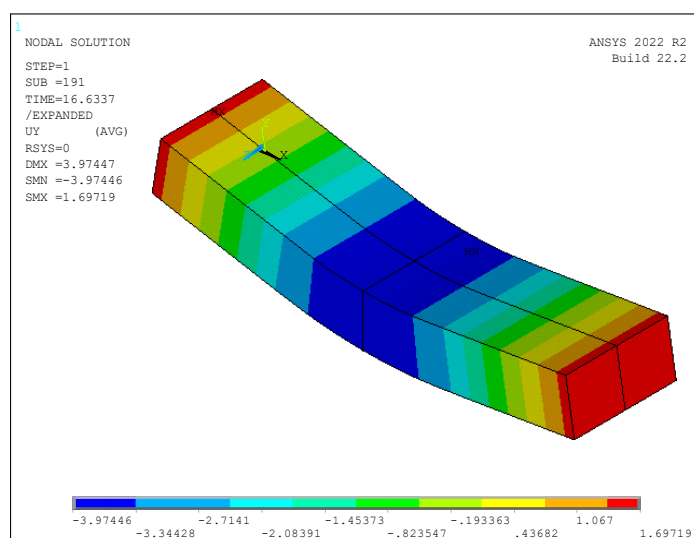
(c) Tensão de tração (MPa)

Fonte: A autora

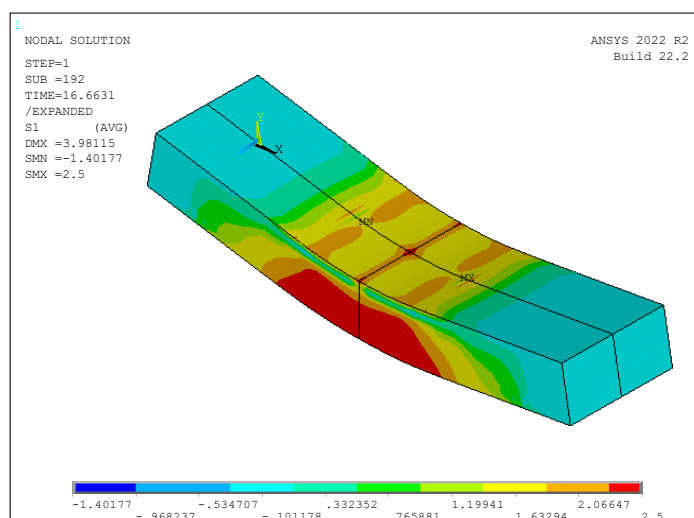
Figura 800 – Modelo numérico (Traço 1.01)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



(b) Deslocamento vertical (mm)

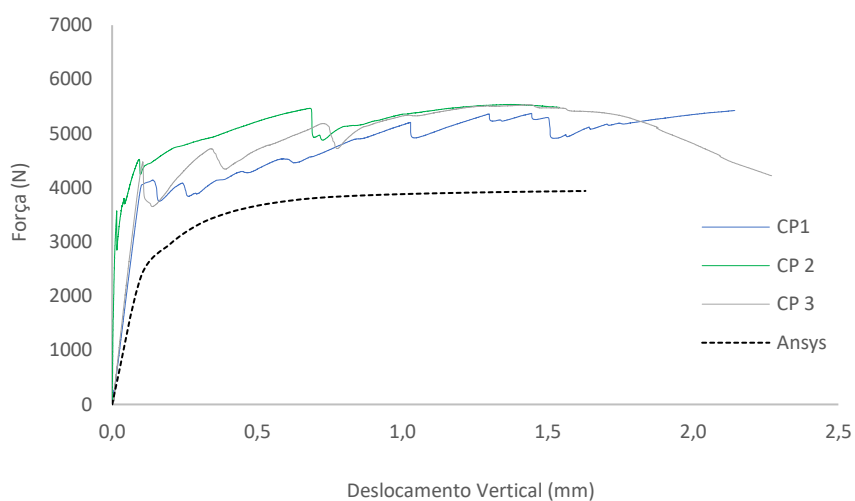


(c) Tensão de tração (MPa)

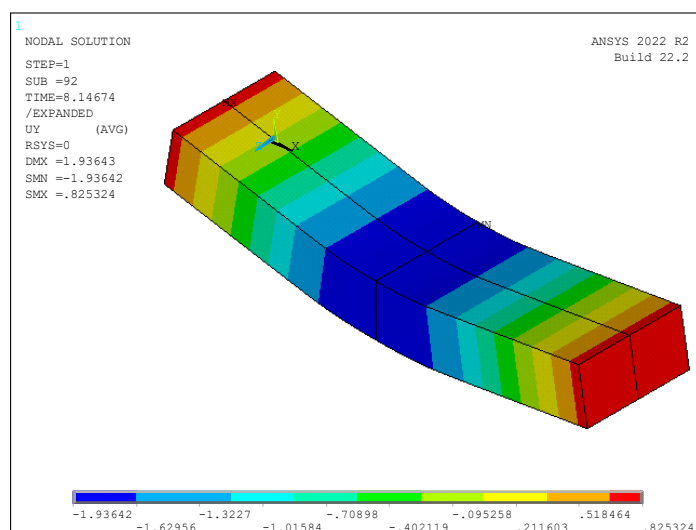
Fonte: A autora



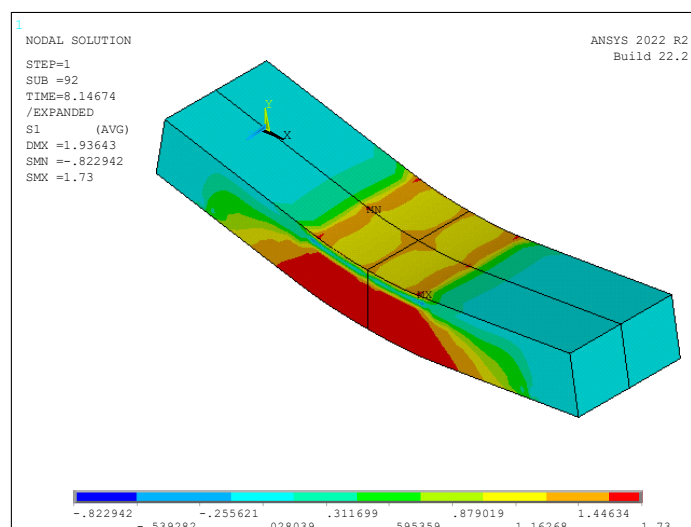
Figura 811 – Modelo numérico (Traço 1.05)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



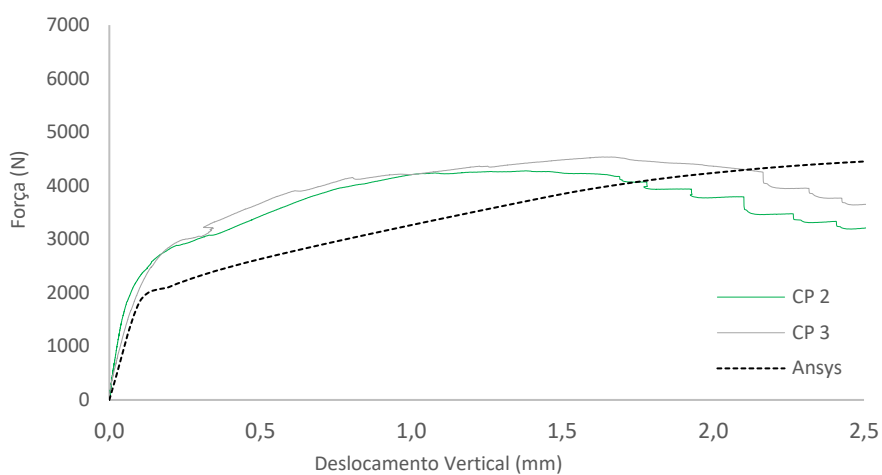
(b) Deslocamento vertical (mm)



(c) Tensão de tração (MPa)

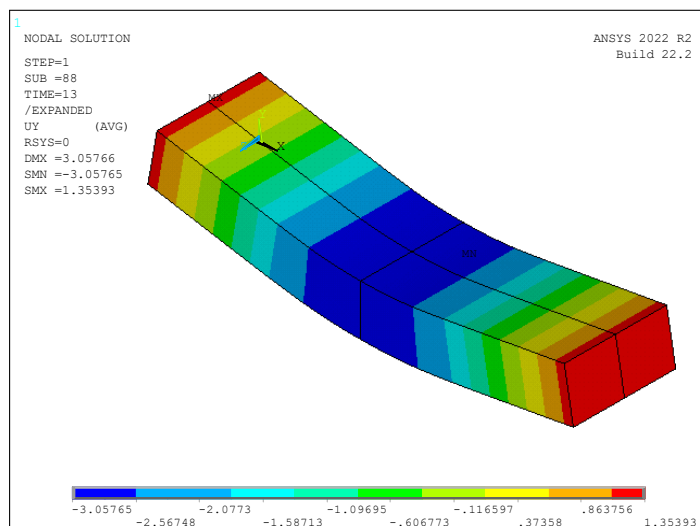
Fonte: A autora

Figura 822 – Modelo numérico (Traço 1.08)

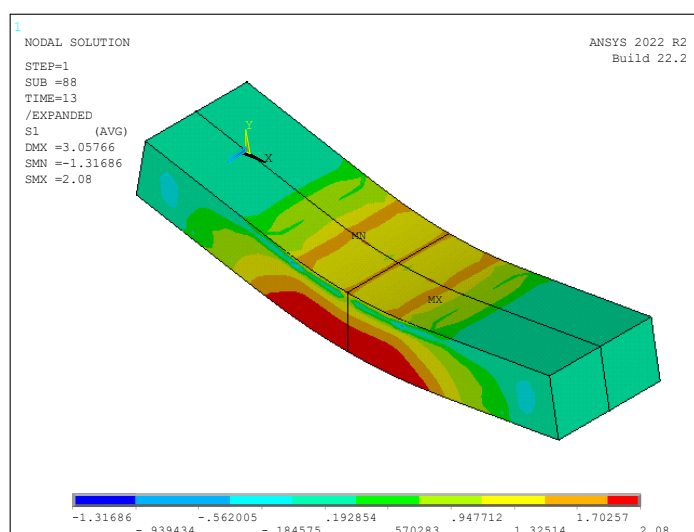


(a) Resultado modelo numérico Ansys

(b)



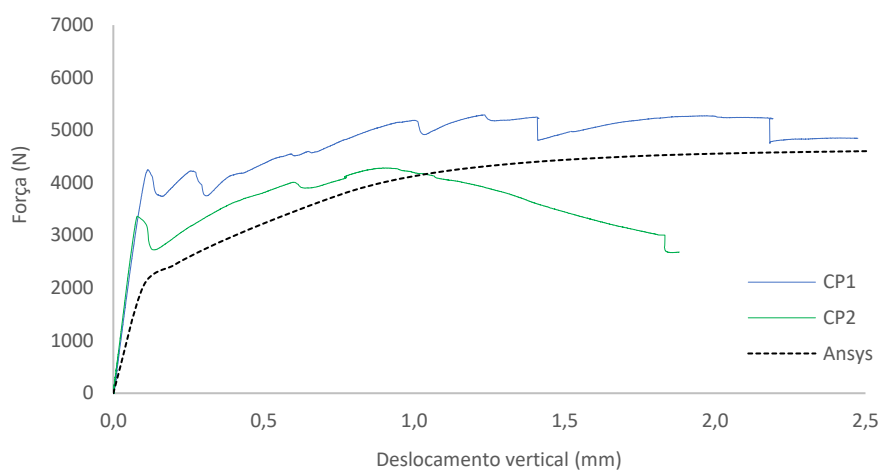
(b) Deslocamento vertical (mm)



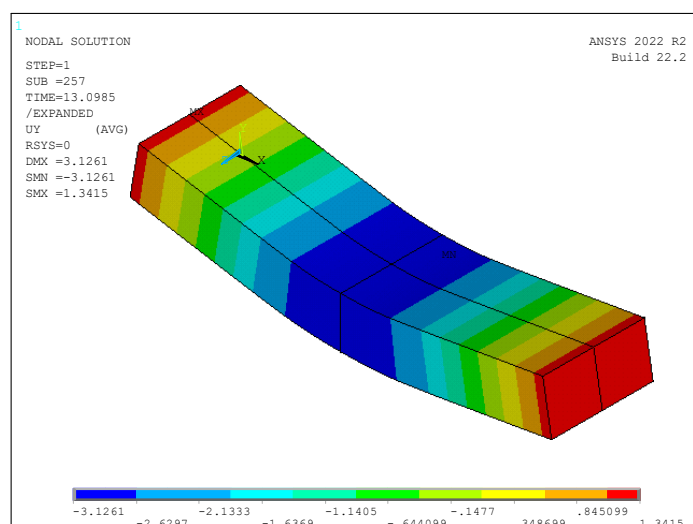
(c) Tensão de tração (MPa)

Fonte: A autora

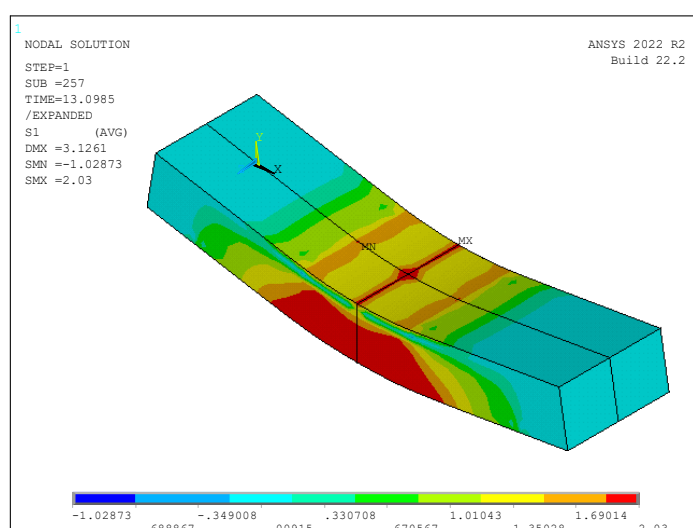
Figura 833 – Modelo numérico (Traço 1.09)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



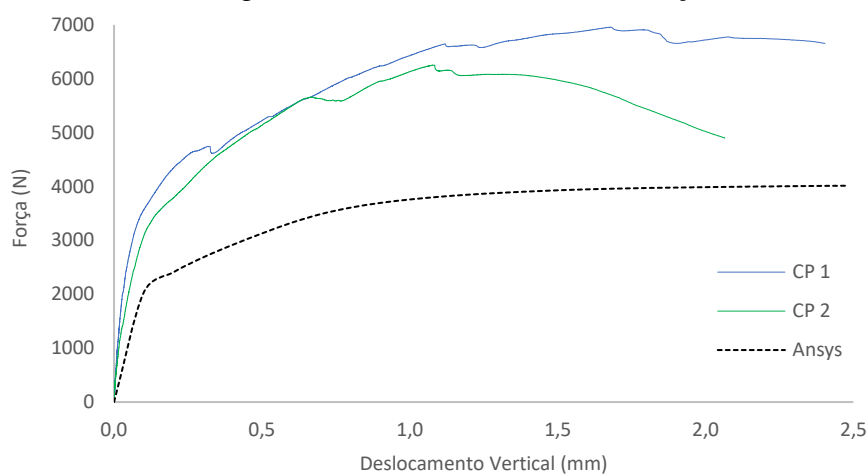
(b) Deslocamento vertical (mm)



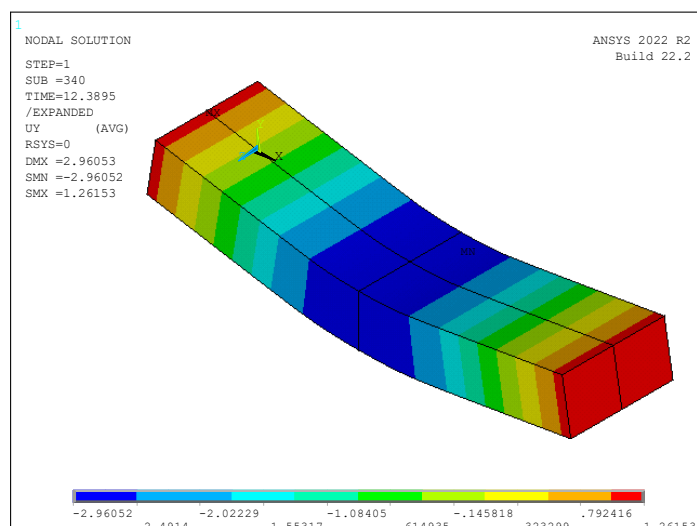
(c) Tensão de tração (MPa)

Fonte: A autora

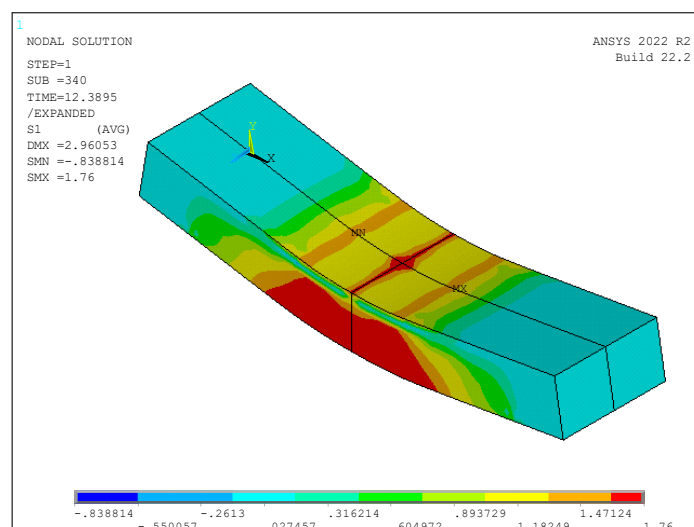
Figura 844 – Modelo numérico (Traço 2.01)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



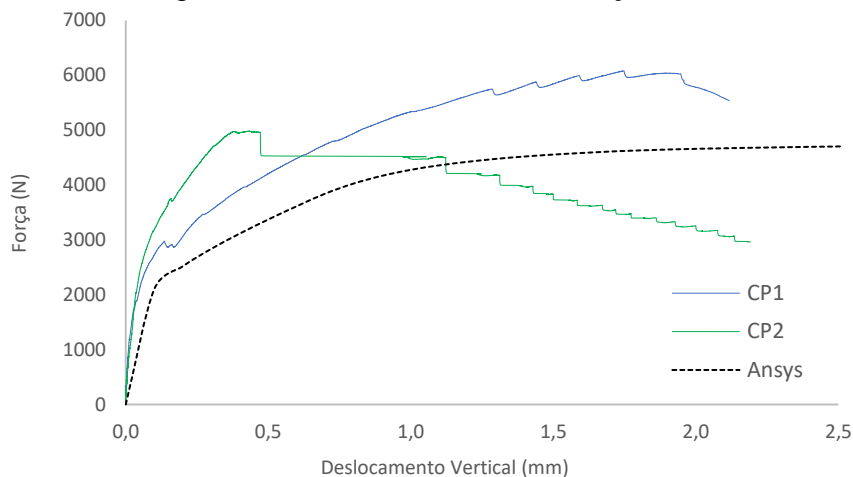
(b) Deslocamento vertical (mm)



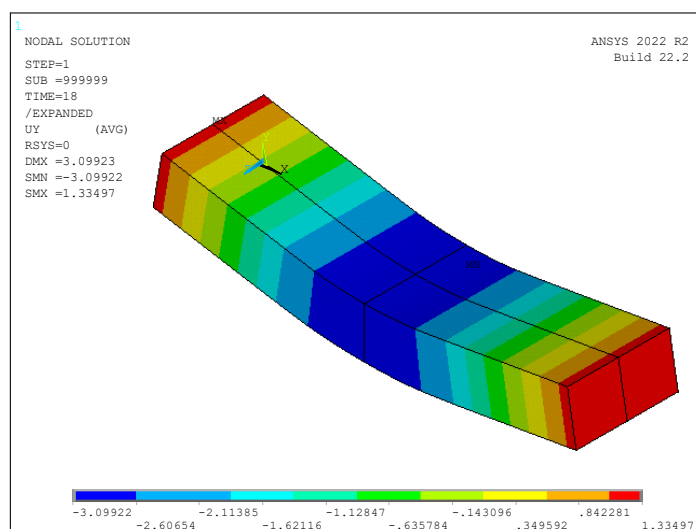
(c) Tensão de tração (MPa)

Fonte: A autora

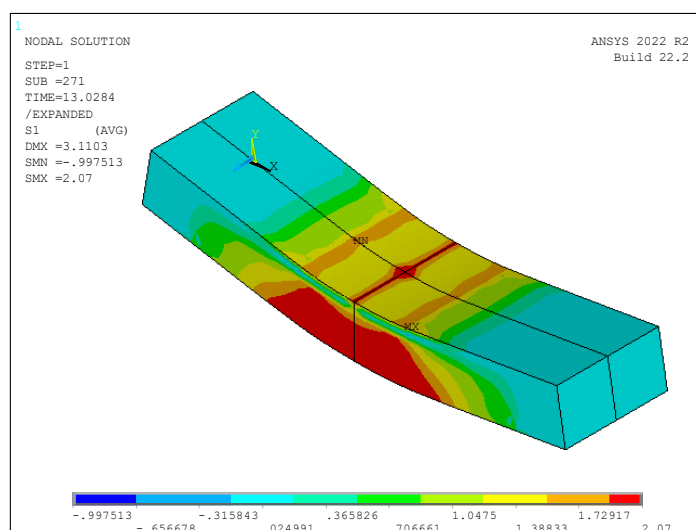
Figura 855 – Modelo numérico (Traço 2.09)



(a) Resultado modelo numérico Ansys



(b) Deslocamento vertical (mm)



(c) Tensão de tração (MPa)

Fonte: A autora

Com esses resultados da aplicação do modelo numérico para cada uma das dosagens estudadas, tem-se as seguintes conclusões:

- a) Este estudo numérico apresentou os detalhes do modelo não-linear de elementos finitos para a análise do comportamento do ECC quando submetido ao ensaio de flexão à 4 pontos, que foi validado tendo como base os resultados dos ensaios de caracterização do material.
- b) A curva numérica observou um comportamento satisfatório para o traço 1.01. Entende-se que a diferença de comportamento ocorrida nas outras dosagens foi devido aos dados referentes ao ensaio de tração direta, que é um item sensível para a calibração do modelo numérico. Conforme descrito na seção 4.3 deste texto, os resultados do ensaio de tração direta não foram suficientemente satisfatórios, devido às dificuldades relatadas para a execução deste ensaio.
- c) Observando as curvas numéricas de cada uma das dosagens observa-se que elas apresentam um comportamento dentro do esperado. Em todas as curvas a força máxima foi menor do que a obtida com o ensaio de flexão à 4 pontos e que após um certo ponto ocorre a estabilização dessa força.
- d) Analisando as deflexões observa-se que todas elas atingiram a mesma ordem de grandeza do que obtido experimentalmente com o ensaio de flexão à 4 pontos.
- e) Observando a distribuição de tensões de tração, tem-se que o comportamento está dentro do esperado. Em todas as dosagens atingiu-se o valor da tensão de tração máxima e a região central da viga é mais tracionada. Esses resultados estão de acordo com o observado experimentalmente, pois além de ser a região de momento fletor máximo é também a região onde ocorre a fissuração. Nas Figuras 79 a 85 corresponde à região marcada de vermelho.
- f) Observa-se que a região mais solicitada, em todos os modelos, se aproxima da extremidade superior da viga, o que está coerente também com o descrito por Qian e Li (2007) que afirmam que há uma estabilização das tensões de tração quando a posição linha neutra atinge 90% da altura da viga.

Com todos esses pontos abordados conclui-se que o modelo numérico construído está satisfatório para uma análise inicial do comportamento do material.

## 6. CONCLUSÃO

Neste capítulo são descritas as conclusões alcançadas durante o desenvolvimento deste trabalho, conforme os objetivos propostos e as limitações do trabalho. Além disso são apresentadas sugestões de trabalhos futuros para sanar lacunas de conhecimento que não foram abordadas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Inicialmente tem-se que este trabalho cumpriu a sua função que foi continuar o desenvolvimento de dosagens alternativas de ECC estudadas no LEME-UFRGS, avaliando como a variação da quantidade, dimensão e origem do agregado impactam no comportamento do material, tanto em seu estado fresco e endurecido.

O estudo sobre o impacto da quantidade de agregado no comportamento do ECC foi avaliada com a variação da taxa de substituição de areia fina por agregado com maior dimensão máxima característica, sendo estudadas duas taxas de substituição, iguais à 25% e 50%. Para avaliar o efeito da dimensão nas propriedades do ECC, também foram considerados dois tipos de agregados com  $D_{\max}=1,2\text{mm}$  e  $D_{\max}=2,4\text{mm}$ . E, finalmente para estudar o efeito da origem, foram utilizadas a areia natural e a escória granulada de alto forno.

Todas essas análises se justificam tanto pelo impacto ambiental quanto pelo econômico. O impacto ambiental está relacionado com dois diferentes aspectos: a necessidade de se desenvolver concretos mais duráveis. A múltipla fissuração, com a formação de microfissuras torna este material menos sujeito ao ataque de agentes químicos agressivos ao concreto. Para se obter tais características, este material, em sua dosagem, apresenta um elevado consumo de cimento e elevada quantidade de finos, em especial areia fina com dimensão máxima característica inferior à 0,3mm. O impacto econômico está relacionado com o elevado custo de produção deste material, mesmo com menor necessidade de manutenção das estruturas ao longo do seu ciclo de vida. Portanto, existe a tendência de substituir esses materiais por outros que gerem menor impacto ao meio ambiente e que diminua os custos de produção do ECC.

Com isso, um dos objetivos deste trabalho foi estudar misturas alternativas de ECC, com substituição parcial da areia fina, de modo a obter um material que mantenha as principais propriedades mecânicas características deste material e gere um menor impacto ambiental. Para cumprir esse objetivo foi desenvolvido programa experimental para avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido de misturas alternativas de ECC, sendo destacadas as seguintes observações:

- a) É possível produzir ECC's com menor quantidade de areia fina em sua dosagem e manter o comportamento *strain-hardening* do material, desde que as fibras sejam corretamente distribuídas na matriz cimentícia.
- b) A taxa de substituição da areia fina, a origem e a dimensão do agregado influenciam nas propriedades do material tanto no estado fresco quanto no endurecido. Porém, é difícil quantificar como cada uma dessas características e qual é a parcela de contribuição de cada uma delas no desempenho final do concreto.
- c) Avaliando índice de consistência, percebeu-se a tendência de diminuição da trabalhabilidade com o aumento da dimensão máxima do agregado como também com a utilização de GGBF como material substituinte. Portanto entende-se que a forma e a dimensão do agregado impactam na trabalhabilidade.
- d) Observou-se a tendência de partículas com forma irregular terem maiores resistência à compressão, devido à maior resistência na ligação do agregado com a pasta de cimento.
- e) Sobre o ensaio de tração direta, observou-se grande variabilidade nos resultados além da dificuldade de execução deste ensaio. Também chamou a atenção a elevada quantidade de resultados descartados, seja por problemas de leitura dos LVDT's ou por causa da ruptura dos corpos de prova na região de fixação das garras. Possíveis problemas deste ensaio: flexo-torção, o que causa menores resistência à tração, concentração de tensões nas garras, falhas de concretagem e não homogeneidade na distribuição das fibras. Com isso não foi possível definir um padrão de comportamento, apesar da maioria das amostras ter apresentado um comportamento dúctil.
- f) Para o ensaio de flexão a quatro pontos, o aumento da dimensão máxima dos agregados, com a proporção de substituição fixa, tanto para a areia natural quanto para a GGBF, há a tendência de a tensão máxima ser menor. O aumento do  $D_{max}$  influencia na ductilidade do material e esse efeito negativo pode ser atribuído à dificuldade de garantir uma dispersão uniforme das fibras, com a tendência de a força última ser menor.
- g) O módulo de elasticidade médio das dosagens com GGBF foram maiores do que todos os traços contendo somente areia natural. Uma justificativa seria a maior aderência entre a pasta de cimento e o agregado.
- h) A metodologia DIC utilizada como complemento para medição dos deslocamentos apresenta um grande potencial para a aplicação dentro da engenharia civil, em especial análise experimental de estruturas. Porém, devem ser padronizadas e melhor desenvolvidas as técnicas de preparação das amostras e filmagem.



Com todas essas observações levantadas com a execução do programa experimental proposto, entende-se que tanto as características do agregado quanto as propriedades da fibra escolhida influenciam diretamente no comportamento dúctil do material. Observa-se que os atributos dos agregados escolhidos, como a forma, dimensão e a rugosidade e a hidrofobia e alta relação de aspecto das fibras, influenciam diretamente na distribuição das fibras na matriz cimentícia, trazendo impactos para o comportamento da mistura tanto no estado fresco quanto endurecido. Na concepção mecânica do ECC, as fibras têm um papel fundamental para garantir o comportamento dúctil do material, pois são elas as responsáveis pelo processo de transferência de tensões.

Outro ponto a ser destacado é que a baixa aderência química, o baixo módulo de elasticidade, quando comparado com o do concreto, e a resistência à tração das fibras, que também impactam no processo de transferência de tensões. Todos esses fatos afetam o balanço energético necessário para garantir o comportamento dúctil do material e a propagação estável das fissuras. Tal fato pode justificar o pouco ganho de ductilidade do material e abaixa quantidade de fissuras visualizadas nos corpos de prova ensaiados.

Analisando os modelos analíticos e o modelo numérico, desenvolvido por meio da aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), tem-se as seguintes conclusões:

- a) A utilização desses métodos para a análise de estruturas se torna interessantes tanto pela facilidade de aplicação quanto pelo custo envolvido. Elas permitem uma variação parâmetros de forma simples sem a necessidade de desenvolver modelos experimentais robustos e em escala real.
- b) A aplicação do modelo analítico de Maalej e Li (1994) apresentou resultados compatíveis, quando comparado com os resultados do ensaio de flexão a 4 pontos, mesmo com todas as simplificações adotadas para o desenvolvimento da formulação matemática. Com base nesses resultados, observa-se que este modelo pode ser útil para a estimativa do comportamento à flexão, considerando a proximidades das curvas analíticas e experimental. Porém, deve-se observar que as curvas que representam o comportamento à tração do material foram construídas com base nos dados do modelo experimental. Devido aos problemas de execução deste ensaio, as curvas que representam o comportamento à tração podem não representar corretamente o comportamento do material, o que impacta no resultado da aplicação do modelo. Porém tal fato não invalida a sua aplicação para a previsão do comportamento do compósito à flexão.

- c) Considerando a aplicação da análise inversa, comparando os resultados obtidos com o ensaio de tração, observou-se maior similaridade dos resultados para o traço REF, percebendo-se que é possível utilizar a análise inversa simplificada para estimar a tensão à tração do material, podendo ser considerada uma ferramenta de controle de qualidade do material em campo.
- d) Sobre o modelo de MEF desenvolvido no *Ansys*, observa-se que a curva numérica teve um comportamento satisfatório para o traço 1.01. Entende-se que a diferença de ocorrência para as outras dosagens foram devido aos dados referentes ao ensaio de tração direta, que é um dado de calibração do modelo. As curvas numéricas de cada uma das dosagens apresentaram um comportamento dentro do esperado e em todas elas a força máxima foram menores do que a obtida com o ensaio de flexão a 4 pontos e que após um certo ponto ocorre a estabilização dessa força.
- e) Analisando as deflexões observa-se que todas elas atingiram a mesma ordem de grandeza do que obtido experimentalmente com o ensaio de flexão à 4 pontos e que o comportamento de distribuição das tensões de tração ocorreu dentro do esperado. Em todas as dosagens atingiu-se o valor da tensão de tração máxima e a região central da viga é mais tracionada. Esses resultados estão de acordo com o observado experimentalmente, pois além de ser a região de momento fletor máximo é também a região de fissuração. Observa-se que a região mais tracionada, em todos os modelos, se aproxima da extremidade superior da viga, o que está coerente com a teoria desenvolvida.

Com essas análises entende-se que todos os objetivos propostos por essa pesquisa foram cumprido e entende-se que alguns pontos precisam ser melhor estudados para permitir maior entendimento de como as características dos agregados e das fibras interferem no comportamento final do material. A importância dessa pesquisa reside-se no fato de mostrar que é possível desenvolver misturas de ECC que gerem um menor impacto ambiental, utilizando materiais disponíveis localmente.

Com isso, as sugestões de pesquisas para trabalhos futuros se baseiam nas simplificações adotadas, nas limitações e dificuldades encontradas para o desenvolvimento do trabalho e nas lacunas de conhecimento que ficaram para serem preenchidas:

- Estudar a reologia das misturas alternativas de ECC e aprofundar o conhecimento de modo a desenvolver um ECC autoadensável;
- Desenvolver estudos para a utilização de agregados alternativos na composição do ECC, como por exemplo o agregado reciclado;

- Analisar o ciclo de vida das misturas alternativa de ECC;
- Estudar e padronizar a metodologia de execução do ensaio de tração direta;
- Desenvolver estudos sobre durabilidade e comportamento a longo prazo de ECC com mistura alternativa;
- Estudar novos arranjos de fibras (sistema híbrido) de forma a obter concretos com elevada ductilidade e resistência;
- Realizar ensaios de carga cíclica para as misturas alternativas de ECC;
- Realizar estudo experimental e numérico em real escala de aplicação do ECC;
- Avaliar os ganos financeiros e ambientais com a utilização de misturas alternativas de ECC;

## REFERÊNCIAS

ADESINA, A.; DAS, S. Sustainable utilization of recycled asphalt as aggregates in engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v.283, p.1-9, 2021.

AGUERO, Rosangel Rojas. **Estudo experimental e numérico de vigas usando Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado Com Fibras (CUADRF)**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

AÏSSOUN, B. M.; HWANG, S. D.; KHAYAT, K. H. Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. **Materials and Structures**, v.49, n.1-2, p.597-609, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609/C1609M-19**, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). 2019.

ANDREW, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v.10, n.1, p. 195-217, 2018.

ANSYS Inc. **ANSYS Help System**, version 2022.2 Canonsburg, 2022.

ARCELORMITTAL. **Escória de Alto Forno**. 2020. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>. Acesso em 20 nov. 2020.

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 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

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: Procedimentos. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1**: Concreto endurecido:Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – Determinação do índice de consistência.

Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

BAHRAQ, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; AL-DULAIJAN, S. U. Macro and Micro Properties of Engineered Cementitious Composites (ECCs) Incorporating Industrial Waste Materials: A Review. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.45, n.10, p.7869–7895, 2020.

BELIE, N. de; SOUTSOS, M.; GRUYAERT, E. **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4**. Springer Nature, 2018.

BENINCÁ, Matheus Erpen. **Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto: modelo parametrizado de elementos finitos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

BRENNAND CIMENTOS. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPO**, Sete Lagoas, Minas Gerais, rev. 6, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil) Produção Agrícola - Safra - Estimativa da evolução de grãos *In: Portal de informações agropecuárias - Visão Nacional, 2020*. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-estimativa-de-evolucao-graos.html>. Acesso em 20 ago. 2022.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da Costa. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

DONG, Z.; TAN, H.; YU, J.; LIU, F. Feasibility study on Engineered cementitious Composites mixed with coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v.350, p.1-12, 2022.

EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY. Calcined clay: A supplementary cementitious material with a future *In: Newsletter*. 2019. Disponível em: [https://ecra-online.org/fileadmin/ecra/newsletter/ECRA\\_Newsletter\\_3\\_2019.pdf](https://ecra-online.org/fileadmin/ecra/newsletter/ECRA_Newsletter_3_2019.pdf). Acesso em 27 fev.2023.

FERRARA, L. High performance fibre reinforced cementitious composites: Six memos for the XXI century societal and economical challenges of civil engineering. **Case Studies in Construction Materials**, v.10, p.1-16, 2019.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, USP, São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGMIG, R.; KOVAC M. The influence of aggregate gradation on the fresh and hardened concrete properties. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 566, 2019. DOI:10.1088/1757-899X/566/1/012007.

FU, C.; CHEN, M.; GUO R.; QI R. Green-Engineered Cementitious Composite Production with High-Strength Synthetic Fiber and Aggregate Replacement. **Materials**, v.15, n.9, 2022.

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) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GOPALARATNAM, V. S.; SHAH, S. P. Tensile Failure of Steel Fiber-Reinforced Mortar. **Journal of Engineering Mechanics**, v.113, n.5, p.635–652,1987.

GUAN, X. *et al.* An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand. **Construction and Building Materials**, v.201, p.461–472, 2019.

HELENE, P. R. **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido**. São Paulo, p. 1-23, 1997.

HU, J.; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v.25, n.3, p.1196–1204, 2011.

HUANG, X.; RANADE, R.; NI, W.; LI, V.C. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, v.44, p.757-764, 2013.

ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, v.10, n. 1, p.121–137, 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do setor**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>. Acesso em: 17/02/2023.

KEOLEIAN, G. A ; KENDALL, A. M.; LEPECH, M. D.; LI, V. C. Guiding the design and application of new materials for enhancing sustainability performance: Framework and infrastructure application. **Materials Research Society Symposium Proceedings**, v.895,n. June, p.123–134, 2006.

KHAN, M. H. *et al.* Effects of Various Mineral Admixtures and Fibrillated Polypropylene Fibers on the Properties of Engineered Cementitious Composite (ECC) Based Mortars. **Materials**, v.15, n.8, 2022.

KOKER, D. de; ZIJL, G. van. Extrusion of Engineered Cement-Based Composite Material. *In: 6<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB 2004*, Varenna, Italy, p.1301–1310, 2004.

KUNIEDA, M.; ROKUGO, K. Recent progress on HPFRCC in Japan required performance and applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v.4, n.1, p.19–33, 2006.

KURDOWISK, W. **Cement and concrete chemistry**, Springer Netherlands, 2014.

- LEAL, C. E. F.; PARSEKIANG, A.; FERREIRA, F. G. S.; CHRISTOFORO, A. L. Comparison between deformation modulus of national concretes made with coarse aggregates from different mineralogical origins. **Revista Materia**, v.25, n.4, p.1–23, 2020.
- LEPECH, M. D. ; LI, V. C.; ROBERTSON, R. E.; KEOLEIAN, G. A. Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. **ACI Materials Journal**, v. 105, n.6, p 567–575, 2008.
- LEUNG, C. K. Y. Design criteria for pseudoductile fiber-reinforced composites. **Journal of Engineering Mechanics**, v.122, n.1, p.10–18, 1996.
- LI, V. C. From micromechanics to structural engineering -the design of cementitious composites for civil engineering applications. **Structural Engineering/Earthquake Engineering**, v.10, n.2, p.1–34, 1994.
- LI, V. C. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. **Journal of Applied Polymer Sciences**, v. 83, p. 660-686, 2002.
- LI, V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC). **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n.3, p.215–230, 2003.
- LI, V. C. Engineered cementitious composite (ECC): Material, structural, and durability performance. *In: Concrete Construction Engineering Handbook, Second Edition.* 2 ed. CRC Press, p. 1001–1048, 2007.
- LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC) - Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure**. Springer Nature, 2019.
- LI, V. C.; KANDA, T. Engineered cementitious composites for structural applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.10, n.2, p. 66-69,1998.
- LI, V. C.; LEPECH, M.; WANG, S. Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. *In: International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, v.1, p.181-191, 2004.
- LI, Y.; LI, J.; YANG, E; GUAN, X. Investigation of matrix cracking properties of engineered cementitious composites (ECCs) incorporating river sands. **Cement and Concrete Composites**, v.123, p.2-13, 2021.
- LIN, Z.; T. KANDA; LI, V. C. On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites. **Concrete Science and Engineering**, v.1, p.173-184, 1999.
- LUKOVIĆ, M.; HUANG, Z.; HORDIJK, D.; SCHLANGEN, E.. Strain Hardening Cementitious Composite (SHCC) for crack width control in reinforced concrete beams. *In: Workshop on Concrete and Materials Behaviour in Honor of Professor Klaas van Breugel* , v. 64, n. 1–2, p. 189–206, 2018.

- MAALEJ, M.; LI, V. C. Flexural/tensile-strength ratio in Engineered Cementitious Composites **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.6, n.4, p.513–528, 1994.
- MASSAZZA, F.; COSTA, U. Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements. **Journal of the Ceramic Association, Japan**, v. 88, n. 1022, 1980.
- MATSUMOTO, T.; MIHASHI, H. **JCI-DFRCC summary report on DFRCC terminologies and application concepts**, 2002.
- MEHTA, P. K.; BURROWS, R. W. Building durable structures in the 21st century. **Indian Concrete Journal**, v.75, p.437-443, 2001.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M., **Concreto: Propriedades e Materiais**, 2 ed., São Paulo, IBRACON, 2014.
- MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n.8, p.601–605, 2009.
- MOLZ, Carine. **Avaliação da aplicabilidade de compósitos cimentícios de elevada deformação como pavimento de tabuleiros metálicos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2021.
- NAAMAN, A. E. Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960. In: **Advances in Construction Materials**, 2007.
- NAAMAN, A. E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications. In: CBM-CI International Workshop, 2009, Karachi, Pakistan, **Proceedings [...]**, 2009, p.389-401.
- NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v.39, n.5, p.547–555, 2006.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Porto Alegre, Bookman, 2016.
- OTTONI, Tobias Pigatto, **Deformações e modo de ruptura em prismas de alvenaria de blocos cerâmicos: Análise experimental com extensometria e correlação de imagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2020.
- PAN, B. *et al.* ECCs / UHPFRCCs with and without FRP reinforcement for structural strengthening / repairing : A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v.316, p. 125824, 2022.
- P. J. M. MONTEIRO; P. R. L. HELENE; KANG, S. H. Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy. **Materials and Structures**, v.26, p.443–452, 1993.
- POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual**



**com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006.

QIAN, S.; LI, V. C. Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of strain hardening cementitious composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v.5, n.2, p.235–246, 2007.

RANADE, R. et al. Development of high strength high ductility concrete. **2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites**, n. December, p. 1–8, 2011.

RIBEIRO, D. V. (coord.), **Princípio da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**, 1 ed., Curitiba: Apris, 2021.

RIGHI, Débora. Pedroso. **Caracterização do Comportamento de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

RIGHI, Débora. Pedroso. **Influência de altos teores de cinza de casca de arroz nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade dos Engineered Cementitious Composites (ECC) 2022.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2022.

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

ROKUGO, K.; KANDA, T.; YOKOTA, H.; SAKATA, N. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. **Materials and Structures**, v.42, n.9, p.1197–1208, 2009.

ROKUGO, K. Applications of SHCC in Japan - Tools and tips for promoting ist use. *In: Strain-hardening cement-based composites - SHCC4.* 2018.

SAHMARAN, M. *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, 2009.

ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Engineered Cementitious Composites: An innovative concrete for durable structure. *In: Structures Congress 2009, Proceedings[...]*, 2009, p. 2219-2231.

SAHMARAN M. *et al.* Combined Effect of Aggregate and Mineral Admixtures on Tensile Ductility of Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**, v.109, n.6, p.627-637, 2012.

- SHERIR, M. A. A.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. 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, 2018.
- SHOJI, D.; OGWEZI, B.; LI, V. C. Bendable concrete in construction: Material selection case studies. **Construction and Building Materials**, v.349, 2022.
- SILLCCA NOBRE. **Ficha Técnica**, Alegrete, Rio Grande do Sul, rev.1, 2015.
- STANG, H.; LI, V. C. Classification of fiber reinforced cementitious materials for structural applications. *In: 6<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB 2004*, Varenna, Italy, p.197–218, 2004.
- STULTS, M D.; RANADE, R.; LI, V. C.; RUSHING, T. S. Mechanical effects of rice husk ash in ultra-high performance concretes. *In: Advances in Cement-Based Materials*. 2010. Leiden, South Africa, **Proceedings[...]**, CRC Press, p. 307-312, 2010.
- SUI, L. *et al.* Flexural fatigue properties of Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composites (UHP-ECC) reinforced by polymer fibers. **Polymers (Basel)**, v.10, n.8, 2018.
- TOUTANJI, H. A. Evaluation of the tensile strength of cement-based advanced composite wrapped specimens. **Composites Science and Technology**, v.59, n.15, p.2261–2268, 1999.
- ULAS, M. A.; ALYAMAC, K. E.; ULUCAN, Z. C. Influence of Aggregate Gradation on the Workability, Mechanical Properties and Cost of Steel Fiber – Reinforced Concrete. **Advances in civil engineering materials**, v.8, p.209–223, 2019.
- WANG, S.; LI, V. C. Engineered Cementitious Composites with High-volume Fly Ash. **ACI Materials Journal**, v.104, n3, p. 233-241, 2007.
- WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v.48, p.53–66, 2014.
- WU, H. L. *et al.* Effect of morphological parameters of natural sand on mechanical properties of engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 100, n. April, p.108–119, 2019.
- WU, L. S.; YU, Z. H.; ZHANG, C.; BANGI, T. Design approach, mechanical properties and cost-performance evaluation of ultra-high performance engineered cementitious composite (UHP-ECC): A review. **Construction and Building Materials**, v.340, p.1-26, 2022.
- XU, L. Y.; HUANG, B. T.; DAI, J. G. Development of engineered cementitious composites (ECC) using artificial fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 305,p.1-11, 2021.
- XU, L. Y.; HUANG, B. T.; LI, V. C.; DAI, J. G. High-strength high-ductility Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) incorporating geopolymer fine aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p.1-14, 2022.

YANG, E. H.; WANG, S.; YANG, Y.; LI, V. C. Fiber-bridging constitutive law of Engineered Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v.6, n.1, p.181–193, 2008.

YU, Z. *et al.* Mechanical properties, durability and application of ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate (UHPC-CA): A review. **Construction and Building Materials**, v.334, p. 1-23, 2022.

ZHANG, D. *et al.* Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites ( ECC ). **Composites Part B**, v.184, p.1-20, 2020a.

ZHANG, D. *et al.* Optimization of matrix viscosity improves polypropylene fiber dispersion and properties of engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**. v. 346, p. 1-11, 2022.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. M. High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material. **ACI Materials Journal**, v.93, n.6, p.629-636, 1996.

ZHANG, W. Research Progress of Advanced Cementitious Composites. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v.651, n.3, 2021.

ZHANG, Z.; YANG, F; LIU, J.C.; WANG, S. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v.137, p. 1-15, 2020b.

ZHANG, Z. *et al.* Sustainable high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of cement by rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v.317, p.1-14, 2021.

ZHU, J. *et al.* Recent developments in Engineered / Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC / SHCC) with high and ultra-high strength. **Construction and Building Materials**. v. 342, p. 1-22, 2022.

ZIHAO, L. A. *et al.* A study on engineering properties and environmental impact of sustainable concrete with fly ash or GGBS. **Construction and Building Materials**. v. 316, p. 1-13, 2022.

## ANEXO I

Este anexo apresenta as expressões que foram utilizadas para o cálculo de  $M$  e  $\varepsilon_t$  no modelo analítico desenvolvido por Maaleji e Li (1994).

### - Distribuição de tensões bilinear

$$\varepsilon_t = \frac{a_1(v) - [a_1(v)^2 - 4a_0(v)a_2(v)]^{1/2}}{2a_0(v)} \quad (39)$$

$$v = (\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) \quad (40)$$

$$a_0(v) = -6\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(1 - r)^2 + 12\varepsilon_{cp}(\sigma_{tu} - \sigma_{tc})^2 \quad (41)$$

$$a_1(v) = 12\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(\varepsilon_{tc} - \varepsilon_{cp})r + 24\varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^2 \quad (42)$$

$$a_2(v) = 2\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(\varepsilon_{cp}^2 r^2 + 6\varepsilon_{cp}\varepsilon_{tc}r - 3\varepsilon_{tc}^2) - 12\varepsilon_{tc}\varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^2 \quad (43)$$

$$M = \left(\frac{bd^2}{6}\right) \frac{b_0(v) + b_1(v)\varepsilon_t + b_2(v)\varepsilon_t^2 + b_3(v)\varepsilon_t^3}{108\varepsilon_{cp}(\varepsilon_t - \varepsilon_{tc})^2(\varepsilon_{tc} - \varepsilon_{tu})} \quad (44)$$

$$b_0(v) = 6\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(18\varepsilon_{tc}^3 - 27\varepsilon_{cp}\varepsilon_{tc}^2 r + \varepsilon_{cp}^3 r^3) + 108\varepsilon_{cp}\varepsilon_{tc}^2(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3 \quad (45)$$

$$b_1(v) = 54(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})[-6\varepsilon_{tc}^2 + 3\varepsilon_{tc}(2\varepsilon_{cp} + \varepsilon_{tc})r + \varepsilon_{cp}^2 r^3] - 324\varepsilon_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3 \quad (46)$$

$$b_2(v) = 162\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(2\varepsilon_{tc} - 2\varepsilon_{tc}r - \varepsilon_{cp}r + \varepsilon_{cp}r^3) + 324\varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3 \quad (47)$$

$$b_3(v) = 54\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(-2 + 3r - r^3) + 108\varepsilon_{cp}(\sigma_{tu} - \sigma_{tc})r^3 \quad (48)$$

### - Distribuição de tensões linear

$$\varepsilon_t = \frac{-a_1(v) - [a_1(v)^2 - 4a_0(v)a_2(v)]^{1/2}}{2a_0(v)} \quad (49)$$

$$v = (\sigma_{tc}, \varepsilon_{tc}, \sigma_{tu}, \varepsilon_{tu}, \sigma_{cp}, \varepsilon_{cp}, r) \quad (50)$$

$$a_0(v) = -2\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(1 - r)^2 + \varepsilon_{cp}(\sigma_{tu} - \sigma_{tc})r^2 \quad (51)$$

$$a_1(v) = 4\sigma_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(1 - r) + 2\varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^2 \quad (52)$$

$$a_2(v) = \varepsilon_{tc} [-2\sigma_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}) - \varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^2] \quad (53)$$

$$M = \left(\frac{bd^2}{6}\right) \frac{b_0(v) + b_1(v)\varepsilon_t + b_2(v)\varepsilon_t^2 + b_3(v)\varepsilon_t^3}{108\varepsilon_{cp}(\varepsilon_t - \varepsilon_{tc})^2(\varepsilon_{tc} - \varepsilon_{tu})} \quad (54)$$

$$b_0(v) = 108\varepsilon_{tc}^2 [4\sigma_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}) + \varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3] \quad (55)$$

$$b_1(v) = 324\varepsilon_{tc} [2\sigma_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(r - 2) - \varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3] \quad (56)$$

$$b_2(v) = 324 [4\sigma_{cp}\varepsilon_{tc}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(1 - r) + \varepsilon_{cp}(\varepsilon_{tu}\sigma_{tc} - \varepsilon_{tc}\sigma_{tu})r^3] \quad (57)$$

$$b_3(v) = 108 [-2\sigma_{cp}(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc})(2 - 3r + r^3) + \varepsilon_{cp}(\sigma_{tu} - \sigma_{tc})r^3] \quad (58)$$

$\sigma_{tc}$ : Tensão de tração na abertura da primeira fissura;

$\varepsilon_{tc}$ : Deformação à tração na abertura da primeira fissura;

$\sigma_{tu}$ : Tensão última à tração;

$\varepsilon_{tu}$ : Deformação à tração última;

$\sigma_{cp}$ : Tensão à compressão;

$\varepsilon_{cp}$ : Deformação à compressão na tensão máxima;

$M$ : Momento externo aplicado;

$r$ : Razão entre  $a/d$ ;

$\varepsilon_t$ : Tensão de tração na fibra extrema