

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO TIPO ECC COM  
USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E COMBINAÇÕES DE POZOLANAS**

Carolina Bernhard

Porto Alegre

2023

CAROLINA BERNHARD

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO TIPO ECC COM  
USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E COMBINAÇÕES DE POZOLANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre

2023

**CAROLINA BERNHARD**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO TIPO ECC COM  
USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E COMBINAÇÕES DE POZOLANAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Construção e Infraestrutura, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de outubro de 2023.

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

**BANCA EXAMINADORA**  
**Profa. Angela Gaio Graeff (UFRGS)**  
Phd, The University of Sheffield

**Prof. Rogério Cattelan Antochaves de Lima (UFSC)**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Alexandre Lorenzi (UFRGS)**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Dedico este trabalho aos meus avós maternos, pelo amor, criação e perseverança!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha mãe, Laís, pelo incentivo à docência e à pesquisa. Ela, com mais de 40 anos de ensino de literatura e português para educação básica sempre me fez ver o caminho da educação como direcionamento a uma sociedade mais igualitária e desenvolvida.

Agradeço aos meus avós maternos, Paulo e Selma, que são as bases da minha criação. Mesmo sem concluírem qualquer ensino superior, me incentivam para que eu o faça com perseverança.

Agradeço aos meus “dindos” (padrinhos), Alexandre e Cristiane, por serem os maiores críticos construtivos quanto a minha carreira. Por ambos serem professores, ele de química, e ela de artes, sabem o quão importante significa um título de mestre, sendo assim, em todos os momentos me deram forças para que eu concluísse com êxito esta pesquisa. Agradeço também ao meu namorado, Mauricio Fernandes, por me incentivar a seguir nesta pesquisa, me apoiar e me ajudar nos afazeres de casa durante minha ausência, e por estar sempre disposto a fazer tudo o que for necessário para que eu tenha êxito no meu trabalho e estudo.

Agradeço a minha parceira de trabalho Daniela Vescovi por me motivar a seguir com esta pesquisa, mesmo que em muitos momentos isto implicou na minha ausência em nosso escritório.

O agradecimento de maior impacto ao longo desta caminhada vai para minha amiga Débora Pedroso Righi. Os momentos passados pela pandemia, afastamento da sala de aula e laboratórios, aulas virtualizadas e outras adaptações necessárias do ensino emergencial, beiraram a minha desistência neste programa de pós-graduação. Porém, quando eu mais precisei de palavras de afeto e incentivo, a Débora se fez presente, em corpo e alma. Obrigada! Em todos os momentos desta pesquisa eu pude contar com a cumplicidade e solicitude da Débora, que me acompanhou algumas vezes em laboratório, me auxiliou com seu conhecimento sobre o assunto, me direcionou a outros pesquisadores e bolsistas, e o principal, ela me colocou em contato com o orientador desta dissertação, o prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Agradeço ao Prof. Luiz por toda sua generosidade em ter me aceito como sua orientanda quando eu já estava com outra pesquisa em andamento. Obrigada por me direcionar a um assunto em que eu pude me familiarizar e voltar ao engajamento da pesquisa acadêmica. As conversas com o professor sempre foram um alento ao pensamento acelerado desta que vos

fala, sempre muito tranquilo e com um sorriso no rosto me orientou e tranquilizou da melhor maneira possível.

Agradeço a imensa ajuda dos profissionais do LEME, porém em especial ao Técnico responsável Edgar e ao mestrando Luiz Henrique Tirado por sanarem minhas dúvidas quanto aos procedimentos e equipamentos laboratoriais, pois, sem eles este trabalho não teria sido realizado. Obrigada! Ao Luiz reforço a gratidão por também me auxiliar com alguns materiais em momentos que minha distância não permitia que eu me fizesse presente.

Agradeço aos rapazes do LAPOL, Eduardo e Osiris, por não medirem esforços durante os dias de ensaios de resistência, e me acompanharem em todos os momentos, inclusive extrapolando seus próprios horários de serviço, sem este auxílio não teria sido possível seguir o cronograma de análise dos resultados.

Agradeço a atenção da Danielle Airão Barros pelas instruções para lidar com o mesmo material que ela utilizou em sua tese (escória de alto forno). E, se tratando do material utilizado nesta pesquisa, reitero o agradecimento a Débora, pela doação dos materiais remanescentes de sua pesquisa de doutorado, e por todas as empresas que de alguma forma também colaboraram com a doação materiais.

Agradeço aos professores das disciplinas deste programa de pós-graduação. Todos de alguma forma contribuíram com seus conhecimentos para que este trabalho pudesse ser escrito dentro de normas técnicas e embasamento de conceitos. Agradeço a compreensão da coordenação deste programa de pós-graduação, que mesmo diante das condições que eu enfrentei durante as cheias de setembro de 2023 em Roca Sales, se solidarizou em homologar com rapidez a defesa desta dissertação.

E por fim, agradeço a todos os demais amigos e familiares, que compreenderam este processo e período de formação pessoal.

*“A motivação é uma porta que se abre por dentro!”*

**Mario Sérgio Cortella**

## RESUMO

BERNHARD, C. Estudo das propriedades reológicas dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Brasil.

O *Engineered Cementitious Composite* (ECC) é uma classe de compósito cimentício desenvolvido com fibras que apresenta comportamento *strain-hardening* (endurecimento por tensão através de múltiplas microfissuras) após quando submetido a esforços tensores. Porém, a composição originária do ECC demanda até três vezes mais volume de cimento se comparado às misturas tradicionais. Na última década, no LEME/UFRGS, foram estudadas misturas de ECC mais sustentáveis através de materiais suplementares e fibras ecológicas, conceituando o *greener* ECC. Neste contexto, o presente trabalho analisa novas formulações de ECC com a suplementação por cinza de casca de arroz (CCA), resíduo agroindustrial abundante no Rio Grande do Sul, e escória de alto forno (EAF), um subproduto da produção do ferro gusa. Estes materiais já estão sendo utilizados pelo grupo de pesquisa do LEME, e a ideia de combinações binárias e ternárias é difundida como alternativa ao elevado consumo de cimento. O objetivo foi verificar a possibilidade de se obter uma mistura de ECC com menor impacto ambiental e maior trabalhabilidade, sem que houvesse uma perda de resistência (com referência de 10% da resistência média). Para entender o impacto do balanço dos materiais, foi empregado um traço padrão com fibras de polipropileno, em combinação binária com substituição do cimento em 40% e 50% por CCA; e introduzindo combinações ternárias onde 50% do cimento foi substituído, na sequência, por 20% de CCA e 30% de EAF, 30% de CCA e 20% de EAF e 40% de CCA e 10% de EAF. Para entender as alterações reológicas das misturas, foram realizados ensaios de mini *slump-flow*, índice de consistência, fluidez pelo cone de Marsh e viscosidade. Já, para verificar os impactos na resistência e assegurar que fosse mantido o comportamento de múltipla fissuração foram realizados ensaios de tração direta, flexão a quatro pontos e resistência a compressão axial, aos 28 dias de idade (considerado para projetos de engenharia). Quanto ao deslocamento causado pela tensão por flexão das misturas ternárias, aquela com 20% de EAF apresentou capacidade de até 84% superior ao traço de referência, porém com decréscimo de resistência na ordem de 50% os mesmos ensaios. A mesma mistura indicou aumento da trabalhabilidade até 18,48%, sendo que, através de testes estatísticos por ANOVA, percebeu-se que as mudanças de dosagem influenciaram significativamente nos resultados de trabalhabilidade. Pensando em viabilizar o uso em aplicações reais, remeteu-se os resultados a possíveis parâmetros de *whitetopping*. Neste caso, as resistências compressivas superaram estimativas mínimas de projeto, já as de tração e flexão ficam abaixo do esperado, no entanto a trabalhabilidade e a pegada ambiental poderiam vir a suprir esta lacuna, ainda mais se considerado o fato de que materiais pozolânicos podem reagir em maiores idades.

Palavras-chaves: ECC; Trabalhabilidade; Cinza de casca de arroz; Escória de alto forno.



## ABSTRACT

BERNHARD, C. Study of the rheological properties of cementitious compounds with high deformation capacity, type ECC, using polypropylene and synthetic pozzolan fibers. 2023. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, UFRGS, Brazil.

Engineered Cementitious Composite (ECC) is a class of cementitious composite developed with fibers that exhibits strain hardening behavior (tension hardening through multiple microcracks) after being subjected to tensile exercises. However, the original composition of ECC demands up to three times more volume of cement compared to traditional mixtures. In the last decade, at LEME/UFRGS, more sustainable ECC mixtures were studied through supplementary materials and ecological fibers, conceptualizing the greener ECC. In this context, the present work analyzes new ECC formulations supplemented with rice husk ash (RCA), an agroindustrial waste abundant in Rio Grande do Sul, and blast furnace slag (EAF), a by-product of pig iron production. These materials are already being used by the LEME research group, and the idea of binary and ternary combinations is widespread as an alternative to the high consumption of cement. The idea was to verify the possibility of obtaining a more workable mixture of ECC with less environmental impact and greater workability, without significant loss (here taken as a loss above 10% of the average strength). To understand the impact of the material balance, a standard mix with polypropylene fibers was used, in binary combination with replacement of cement by 40% and 50% by CCA; and introducing ternary combinations where 50% of the cement was replaced, in sequence, by 20% CCA and 30% EAF, 30% CCA and 20% EAF and 40% CCA and 10% EAF. To understand the rheological alterations of the mixtures, tests of mini slump-flow, consistency index, fluidity through the Marsh cone and viscosity were carried out. In order to verify the impacts on strength and ensure that the multiple cracking behavior was maintained, direct traction, 4-point bending and axial compression strength tests were carried out at 28 days of age (considered for engineering projects). As for displacement by flexion of the ternary mixtures, the one with 20% EAF showed a capacity of up to 84% greater than the reference mix, but with a decrease in resistance of around 50%. This same mixture indicated an increase in workability of up to 18.48%, and through statistical tests by ANOVA, it was noticed that changes in dosage significantly influenced the workability results. Thinking about making its use feasible in real applications, the results were referred to possible whitetopping parameters. In this case, the compressive strengths exceed the minimum design estimates, while the tensile and bending strengths are below expectations, however the workability and the environmental footprint could come to fill this gap, even more so if you consider the fact that pozzolanic materials can react at older ages. Keywords: ECC; Workability; Rice husk ash; Blast furnace slag.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.3.1 Objetivo Geral .....	22
1.3.2 Objetivos específicos:.....	23
1.4 DELINEAMENTO.....	23
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>2 REOLOGIA DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....</b>	<b>26</b>
2.1 DEFINIÇÕES.....	26
2.2 CONCEITOS.....	27
2.3 MODELOS REOLÓGICOS .....	30
2.3.1 Fluídos Newtonianos .....	30
2.3.2 Fluídos Não-Newtonianos .....	30
2.4 REOLOGIA DOS CONCRETOS .....	32
2.4.1 Influência da Trabalhabilidade .....	34
2.4.2 Viscosidade Plástica e Tensão de Escoamento.....	35
<b>3 ENGINEERED CIMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) .....</b>	<b>38</b>
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	38
3.1.1 Matrizes Cimentícias com fibras .....	39
3.1.2 Interação Fibra-Matriz e Aspectos Tecnológicos.....	42
3.2 CARACTERÍSTICAS DO ENGINEERED CIMENTITIOUS COMPOSITES – ECC ...	44
3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS – ECC .....	46
3.3 AVANÇOS DOS ESTUDOS DO ECC NO GRUPO DE PESQUISA LEME.....	48
3.4 APLICAÇÕES DO ECC NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	52
3.5 INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA MATRIZ DO ECC - <i>GREENER ECC</i> .....	56
3.5.1 Combinações Binárias e Ternárias .....	58
3.5.2 Combinações Binárias e Ternárias em ECC .....	59
3.6 ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO ECC.....	61
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>63</b>
4.1 MATERIAIS .....	64

---

4.1.1 Cimento Portland.....	64
4.1.2 Água de Amassamento .....	65
4.1.3 Agregado Miúdo.....	65
4.1.4 Aditivos .....	66
4.1.5 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima Sem Controle de Temperatura .....	67
4.1.6 Fibras de Polipropileno.....	69
4.1.7 Escória de alto forno.....	70
4.2 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA.....	72
4.2.1 Análise Computacional dos Traços e Empacotamento de Partículas.....	72
4.2.2 Especificações de Dosagem e Parâmetros de Mistura.....	75
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E REOLOGIA DA MATRIZ CIMENTÍCIA	80
4.3.1 Trabalhabilidades pelo Método de Mini <i>Slump-Flow</i> .....	80
4.3.2 Viscosidade Plástica e Torque .....	81
4.3.3 Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh .....	82
4.3.4 Determinações do Índice de Consistência .....	82
4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS .....	83
4.4.1 Tração Direta .....	83
4.4.2 Flexão a Quatro Pontos .....	85
4.4.3 Compressão axial.....	86
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>88</b>
5.1 TRABALHABILIDADE PELO MINI <i>SLUMP FLOW</i> E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	88
5.2 FLUIDEZ PELO CONE DE MARSH .....	92
5.3 VISCOSIDADE PLÁSTICA E TORQUE.....	95
5.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	100
5.4.1 Tração Direta .....	102
5.4.2 Flexão à quatro pontos.....	108
5.4.3 Compressão Axial .....	114
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da pesquisa .....	24
Figura 2 – Componentes do Tensor Tensão .....	27
Figura 3 – Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluidos.....	29
Figura 4 – Modelos de fluidos não-Newtonianos .....	31
Figura 5 - Reologia do concreto: (A) mesma tensão de escoamento e diferentes viscosidades; (B) mesma viscosidade e diferentes tensões de escoamento .....	37
Figura 6 – Diagrama de tensão x deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.....	41
Figura 7 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b). .....	43
Figura 8 – Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (A) e onde não há (B). .....	44
Figura 9 - Processo de múltipla fissuração num corpo de prova para ensaios de durabilidade	46
Figura 10 - Concepção dos comportamentos <i>strain-softening</i> e <i>strain-hardening</i> sob tensões de tração uniaxial.....	47
Figura 11 - Três tipos de comportamento na ruptura observados em materiais cimentícios ...	47
Figura 12 - Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional .....	48
Figura 13 - Curva tensão-deformação dos compósitos sob flexão a quatro pontos .....	50
Figura 14 - Comparação por MEV para identificação dos poros capilares nos compósitos ...	51
Figura 15 - Padrões de fissuração de diferentes sistemas de sobreposição .....	53
Figura 16 - Padrões de rachadura conexão viga-pilar (a) estrutura controle (b) estrutura com ECC (c) condição de amostra .....	54
Figura 17 - Padrões de ensaios para teste de cisalhamento na conexão viga pilar em situação de terremoto.....	54
Figura 18 - Padrão de degradação sob carregamento cíclico de cisalhamento (a) concreto convencional, e (b) ECC.....	55
Figura 19 - Comportamento de uma parede de contenção de terra reparada (a) Antes da reparação e mostrando dano pela reação álcali-sílica, e (b) após reparo aos 12 meses, e (c) após reparo aos 24 meses.....	56
Figura 20 – Resultados de resistência à compressão de misturas de ECC com diferentes	

Figura 21 - Etapas da pesquisa .....	63
Figura 22 - Distribuição granulométrica do CPV-ARI .....	65
Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	66
Figura 24 - Aspecto da CCA sem moagem .....	67
Figura 25 - Moinho de Bolas utilizado para a moagem da CCA .....	68
Figura 26 - Difratoograma da CCA .....	68
Figura 27 - Distribuição granulométrica da CCA .....	69
Figura 28 - Fibras de polipropileno .....	70
Figura 29 - Escória de alto forno após moagem .....	71
Figura 30 - Distribuição granulométrica da EAF .....	71
Figura 31 - Simulação de traço referência de Righi (2015) .....	73
Figura 32 - Simulação do traço com graduação da areia limitada em 300 $\mu\text{m}$ .....	74
Figura 33 - Simulação do traço com graduação da areia limitada em 150 $\mu\text{m}$ .....	74
Figura 34 - Comparativo entre simulações dos traços a serem estudados .....	75
Figura 35 - Etapas de mistura até moldagem dos corpos de prova .....	79
Figura 36 - Procedimento de Mini <i>Slump-Flow</i> .....	81
Figura 37 - Execução do ensaio no viscosímetro .....	81
Figura 38 - Execução do ensaio no Cone de Fluxo Marsh .....	82
Figura 39 - Execução do ensaio de índice de consistência .....	83
Figura 40 - Molde para ensaio de tração direta .....	84
Figura 41 - Execução do ensaio de tração direta .....	84
Figura 42 - Molde para ensaio de flexão .....	85
Figura 43- Execução do ensaio de flexão a quatro pontos .....	86
Figura 44 - Execução do ensaio de compressão axial .....	87
Figura 45 - Consistência com e sem fibras na matriz cimentícias do ECC .....	88
Figura 46 - Verificação dos estágios de consistência do ECC .....	89
Figura 47 - Relação decrescente de consistência pelo diâmetro do fluxo mini <i>slump</i> antes e depois da adição de fibras, para combinações binárias .....	90
Figura 48 – Índice de consistência pelo diâmetro do fluxo mini <i>slump</i> antes e depois da adição de fibras para combinações ternárias .....	91
Figura 49 - Resultados de fluidez pelo Cone de Marsh .....	93
Figura 50 - Viscosidade e torque do ECC referência .....	96

Figura 51 - Viscosidade e torque do ECC CCA50.....	97
Figura 52 - Viscosidade e torque do ECC CCA40.....	97
Figura 53 - Viscosidade e torque do ECC EAF10.....	98
Figura 54 - Viscosidade e torque do ECC EAF20.....	99
Figura 55 - Viscosidade e torque do ECC EAF30.....	99
Figura 56 - Relação entre ensaio direto com viscosímetro e valores indiretos do fluxo do Cone de Marsh .....	100
Figura 57 - Definição de áreas de interesse para cálculo de coeficiente de deformação .....	101
Figura 58- Situação após ensaio do corpo de prova submetido à tração – verificação das fissuras na alma (amostra CP1 CCA50) .....	102
Figura 59 - Resistência a tração para o ECC referência .....	104
Figura 60 - Resistência a tração para o ECC CCA40.....	104
Figura 61 - Resistência a tração para o ECC CCA50.....	105
Figura 62 - Resistência a tração para o ECC EAF10 .....	107
Figura 63 - Resistência a tração para o ECC EAF20 .....	107
Figura 64 - Resistência a tração para o ECC EAF30 .....	107
Figura 65 - Situação durante e após ensaio do corpo de prova submetido à flexão – verificação das fissuras (amostra CP1 EAF20).....	110
Figura 66 - Resultados do ensaio de flexão - ECC Referência .....	111
Figura 67 - Resultados do ensaio de flexão - ECC CCA40 .....	111
Figura 68 - Resultados do ensaio de flexão - ECC CCA50 .....	111
Figura 69 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF10 .....	112
Figura 70 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF20 .....	112
Figura 71 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF30 .....	113
Figura 72 - Ganho de resistência à flexão após primeira fissuração .....	114
Figura 73 - Ponte de fibras na abertura da fissuração para ensaio de compressão.....	115
Figura 74 - Valores de resistência a compressão.....	115
Figura 75 - Ganho de resistência à tração após primeira fissuração .....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento para descrever o comportamento do escoamento de concretos no estado fresco .....	33
Tabela 2 – Propriedades de diversos tipos de fibras.....	40
Tabela 3 - Composição do Cimento CP V -ARI .....	64
Tabela 4 - Características granulométrica do agregado miúdo .....	66
Tabela 5 - Características da CCA .....	69
Tabela 6– Características da fibra de polipropileno .....	70
Tabela 7 – Dosagem do Traço Referência (REF).....	76
Tabela 8 - Proporção de materiais das misturas de interesse .....	78
Tabela 9 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas no ECC sem fibras .....	92
Tabela 10 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas no ECC com fibras.....	92
Tabela 11 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas nas misturas de ECC.....	94
Tabela 12 – ANOVA da influência das combinações EAF10, EAF20 e EAF30 nas misturas de ECC .....	94
Tabela 13 - Resultados para comportamento de corpos de provas ensaiados à tração .....	103
Tabela 14 - Resultados para comportamento de corpos de provas ensaiados à flexão .....	109
Tabela 15 - ANOVA da influência de combinações pozolanas no ECC quanto à resistência à compressão .....	117
Tabela 16 - ANOVA da influência de combinações CCA40, CCA50 quanto à resistência à compressão .....	117
Tabela 17- ANOVA da influência de combinações EAF10, EAF20 e EAF30 quanto à resistência à compressão.....	118

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

ASMT - *American Society for Testing and Materials*

CCA – Cinza de casca de arroz

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

cm<sup>3</sup> - centímetro cúbico (unidade de volume)

CP – Corpo de prova

CPV – ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

DRX - Difração de raio X

EAF – escória de alto forno

ECC - *Engineered Cementitious Composite* (Compósito cimentício para engenharia)

EMMA – Elken Material Mix Analyzer

GGBS - *ground granulated blast-furnace slag* (Escória granulada de alto forno)

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

LEME - Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT - Transdutor de Deslocamento Variável Linear

MCS - *Supplementary Cementitious Materials* (Materiais Cimentícios Suplementares)

ml – mililitro (unidade de volume)

mm – milímetro (unidade de comprimento)

MPa – Megapascal (unidade de força)

N – Newton (unidade de força)

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

PVA - *Polyvinyl alcohol* (Álcool polivinílico)

rpm – rotações por minuto

RS - Rio Grande do Sul

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

µm – micrometro (unidade de comprimento)



# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo inicial apresenta o tema proposto para este estudo de dissertação partindo de uma breve contextualização que antecede a justificativa, os objetivos e o delineamento desta pesquisa.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Durante a última década, a tecnologia do concreto passou por um rápido desenvolvimento na busca por minimizar suas deficiências. O esforço para modificar o comportamento frágil de materiais de cimento simples, como pastas, argamassas e concretos resultou no desenvolvimento de materiais cimentícios de alto desempenho, incluindo concretos de alta resistência com baixa relação água/cimento, compósitos cimentícios reforçados com fibras exibindo resistência e ductilidade aprimoradas, concreto mais ecológicos com teores crescentes de materiais suplementares ao cimento como subprodutos industriais e misturas minerais (ZHU; YANG; YAO, 2014).

Neste contexto surgem os compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, originalmente chamados de *engineered cementitious composites* (ECC). Esses materiais se caracterizam por misturas cimentícias reforçadas com fibras descontínuas de alto desempenho, que apresentam um comportamento de endurecimento por deformação e capacidade de fissuração múltipla após pico de carregamento, denominado comportamento *strain-hardening* (ZHANG, *et al.*, 2020).

Essa classe de material foi desenvolvida pelo Professor Victor Li (2003) na ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos. O princípio de sua criação se baseia em uma tensão de tração em uma faixa de 3 a 5% obtida a partir de compósitos usando fibras de álcool polivinílico (PVA) em fração volumétrica não superior a 2% (LI *et al.*, 2002; LI e WANG, 2007). Teoricamente os estudos indicam que, ao contrário dos materiais de concreto comuns, o ECC endurece após a primeira fissura como um metal dúctil e demonstra aproximadamente 300 a 500 vezes mais capacidade de deformação à tração do que o concreto normalmente reforçado com fibras.

Mesmo em grandes deformações impostas sob carregamento de tração, as larguras de trincas do ECC permanecem pequenas, em torno de 100  $\mu\text{m}$ . Diante da alta tenacidade à fratura e múltiplas fissuras com baixa abertura, o ECC tem sido estudado como um material ideal para

melhorar a capacidade de manutenção e a durabilidade das obras de infraestruturas como por exemplo. Nos últimos anos, a aplicação de campo de ECC aumentou, o material foi aplicado com sucesso em reparos de barragens, coberturas de tabuleiros de pontes, pavimentos de aeródromos e outros elementos e sistemas estruturais (ŞAHMARAN *et al.*, 2013; MA; ZHANG, 2020).

No entanto, a produção do ECC tradicional requer de duas a três vezes mais cimento Portland do que misturas tradicionais de concreto; fibras de álcool polivinílico (PVA) que são sintetizadas quimicamente para sua fabricação embutindo elevado valor de mercado (PVA); e areia de sílica industrializada. Sabe-se que cada tonelada de cimento produzida gera igual quantidade de dióxido de carbono, responsável por 5% da emissão global de gases de efeito estufa gerados pelas atividades humanas. Tendo em vista o desenvolvimento sustentável global, na última década, surgiram contínuas pesquisas a cerca de um ECC mais ecológico, dando origem ao termo de *greener* ECC. Esses esforços podem ser amplamente classificados pelo uso de materiais cimentícios suplementares, enchimentos e fibras mais ecológicas que superem as de PVA (YANG; YANG; LI, 2007; ZHANG, *et al.*, 2020).

Shoji *et al.* (2022) indicam que os materiais cimentícios suplementares (MCS) têm sido reconhecidos como componentes promissores para melhorar as questões sustentáveis do desempenho de ligantes cimentícios. Alguns são produzidos intencionalmente, enquanto outros são considerados subprodutos ou resíduos de diferentes locais industriais (por exemplo, usinas elétricas movidas a carvão, usinas siderúrgicas e fábricas de sílica-metal). Esses materiais são considerados valiosos devido ao seu impacto ambiental reduzido.

Alguns materiais suplementares atualmente utilizados incluem cinzas volantes, escória de alto-forno moída, sílica ativa, pó de forno de cimento e argila calcinada (ou metacaulim) (WANG *et al.*, 2020; YU, LI, LEUNG, 2018). Entretanto alguns estudos recentes também utilizaram subprodutos industriais como exemplo a cinza de casca de arroz incorporada às misturas de Righi (2015, 2022) e Barros (2023). Esses materiais além de suplementarem o cimento, também participam de combinações binárias e/ou ternárias entre pozolanas, como é o caso do estudo de Zhu *et al.* (2014) que mediu a correlação da ductilidade e resistência à compressão para ECC produzidos por sistemas binários e ternários de materiais a base de cinzas volantes, escória, sílica ativa e cimento Portland.

Contudo essa variabilidade de materiais suplementares deve ser cuidadosamente estudada se baseando na micromecânica para selecionar adequadamente os constituintes da matriz, fibra e propriedades da interface fibra-matriz para exibir endurecimento por deformação e comportamento *strain-hardening*. Şahmaran *et al.* (2013) afirmam que além das restrições

micromecânicas de projeto, as aplicações práticas mostram que a trabalhabilidade e as propriedades reológicas da matriz podem afetar a uniformidade da dispersão das fibras, o que também afeta diretamente as propriedades mecânicas e reológicas do ECC. Assim, para se obter a alta ductilidade e trabalhabilidade desejada, deve ser realizado o controle de materiais nas combinações de tipo, tamanho e quantidade.

Sendo assim, considerando inúmeros os cenários de influência para a dosagem das misturas de ECC com inserção de materiais suplementares é necessária atenção aos parâmetros que permitam sua utilização em escala comercial de modo a garantir a repetibilidade do comportamento mecânico e principalmente garantir uma trabalhabilidade semelhante ao concreto convencional. No Brasil, o ECC está sendo estudado com o uso da fibra de polipropileno e o uso da cinza de casca de arroz (CCA) em sua matriz cimentícia como material suplementar, porém até o momento poucos estudos avaliaram as propriedades reológicas desse material visando obter diferentes trabalhabilidades para diferentes aplicações.

Por base nas discussões de Barros (2023), Righi (2015), Zhu *et al.* (2014), Shoji *et al.*, (2022), entre outros autores, a escória de alto forno e a cinza de casca de arroz permitem baratear a produção e aumentar o “esverdeamento” do ECC (*greener ECC*), já que em tese, além de serem resíduos, a produção desses dois materiais consome menos energia e gera menos emissões de CO<sub>2</sub> do que o cimento Portland. Assim, este estudo visa estudar parâmetros de mistura para um traço padrão anteriormente desenvolvido por Righi (2015) para analisar as características mecânicas e reológicas de modo a garantir trabalhabilidade do ECC. Sabe-se que a trabalhabilidade da matriz no estado fresco rege diretamente a dispersão das fibras, e que influência tanto no comportamento *strain-hardening* quanto no desenvolvimento da múltipla fissuração. Portanto, a fim de estudar melhorias sobre a trabalhabilidade e reologia do ECC, neste estudo serão avaliadas combinações binárias de cimento Portland e CCA com controle granulométrico do agregado miúdo. E ainda, visto que o ECC possui um elevado consumo de cimento, ainda será testada uma combinação ternária de CCA, cimento e escória de alto forno moída, também com controle de agregado miúdo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi o pioneiro em estudar o comportamento mecânico dos ECC com a finalidade de adaptar esse compósito com materiais locais brasileiros,

visando que este compósito possa suprir pontos ainda falhos tanto na construção civil quanto nas construções de infraestrutura.

Uma das primeiras adaptações realizadas dentro do grupo de pesquisa do LEME foi por intermédio da pesquisa de Garcez (2009) na qual a autora testou a incorporação da fibra de polipropileno ao invés da fibra de PVA testada por Li (2003). A questão econômica foi o balizador para o uso das fibras de polipropileno, uma vez que as de PVA, tradicionalmente utilizadas por Li (2003), necessitavam elevados custos de importação. Contudo o intuito das misturas de ECC não é somente por questão de viabilizar sua dosagem com o uso de materiais locais e economicamente atrativos. A preocupação com a sustentabilidade na indústria da construção é crescente.

Estima-se que para a composição inicial desenvolvida por Li (2003) seja necessário um elevado consumo de cimento Portland, cerca de 1000 kg/m<sup>3</sup>, potencializado pelo baixo consumo de agregados miúdos e a não utilização de agregados graúdos (WANG e LI, 2007). Wang *et al.* (2020) indicam que esse teor de cimento é relativamente alto quando comparado com o do concreto convencional e, conseqüentemente, aumenta o custo e o teor de carbono incorporado ao ECC, já que a emissão de CO<sub>2</sub> associada à produção de cimento representa 5% do total de CO<sub>2</sub> emissão no mundo. No entanto, esses problemas podem ser efetivamente mitigados substituindo parcialmente o cimento por outros materiais pozolânicos ou inertes com finura menor e/ou comparável, como cinzas volantes (WANG e LI, 2007), escória de alto-forno (KIM *et al.*, 2019; CHEN; YANG; YAO, 2013), e sílica ativa.

Esses materiais alternativos, também reconhecidos como materiais suplementares têm sido reconhecidos como ingredientes promissores para melhorar o desempenho ecológico de ligantes cimentícios no concreto. Alguns são produzidos intencionalmente, enquanto outros são provenientes de subprodutos e/ou resíduos de outras cadeias de produção industriais (por exemplo, usinas elétricas movidas a carvão, usinas siderúrgicas e fábricas de sílica-metal). E ainda, esses materiais podem ser adicionados individualmente às matrizes cimentícias ou em combinações de pozolanas, como indicam os estudos de Zhang *et al.* (2023) que para produção de um modelo de ECC sustentável incorporou às misturas com sílica ativa, cinza volante e pó de diatomita para reduzir a dosagem de cimento.

Nesse sentido, outros trabalhos desenvolvidos pelo LEME já utilizaram subprodutos agroindustriais a exemplo da CCA. Righi (2015, 2022) verificou o potencial do uso desse material como suplemento ao cimento Portland nas misturas de ECC dosadas inclusive com fibras de polipropileno, tendo foco no desempenho mecânico; Pereira da Costa (2015) seguindo

a mesma linha de materiais, estudou sobre a durabilidade das misturas; e Rodríguez (2018) pesquisou sobre a aplicação deste mesmo ECC no recapeamento de pavimentos.

Neste último, por testar uma aplicação em escala comercial, Rodríguez (2018) observou uma grande dificuldade de moldagem devido à baixa trabalhabilidade apresentada. Ao encontro disso, Pasinatto (2018) também se deparou com uma baixa trabalhabilidade ao tentar viabilizar o compósito como reforço/reparo estrutural. Essa dificuldade se dá à inserção das fibras na matriz cimentícia do ECC. Desde que o traço referência de ECC foi ajustado pelo grupo do LEME não foram realizados estudos com foco na trabalhabilidade desse compósito.

Barros (2023) analisou a incorporação de escória de alto forno no traço já consolidado do LEME. No caso, nesta pesquisa não ocorreu a suplementação do cimento, mas sim uma substituição parcial ao agregado miúdo (o que também é alvo de estudos, uma vez que o ECC originário de Li (2003) utiliza agregado artificial a base de sílica, ao invés de utilizar um agregado miúdo natural de origem quartzosa. Contudo, em diferentes estudos a escória também vem sendo empregada como suplementação ao cimento, inclusive em composições ternárias com outros elementos pozzolânicos (ZHOU *et al.*, 2009; ZHU *et al.*, 2014).

Essa classe de material suplementar tem sido reconhecida como ingredientes promissores quanto a questão ambiental devido ao menor custo energético concomitante ao melhoramento de desempenho dos ligantes cimentícios. Partindo de um contexto de avanço contínuo na adaptação do ECC a questões econômicas e ecológicas, principalmente a redução do cimento Portland, aliadas a viabilidade em escala comercial de tornar o produto trabalhável, este trabalho visa o estudo reológico com misturas binárias e ternárias de materiais suplementares.

O estudo irá se basear em um traço padrão de Righi (2015) com a suplementação por CCA e escória de alto forno. O ECC já possui um histórico de desempenho mecânico aceitável dentro das pesquisas do LEME.

A escória de alto forno, também conhecido como *ground granulated blast-furnace slag* (GGBS), é um resíduo visto como subproduto da fabricação de ferro-gusa. Oner e Akyuz (2007) explicam que apontam que o uso desse material melhora as propriedades do concreto, proporcionam alta ductilidade com incremento da trabalhabilidade por conta de seu melhor desempenho na dispersão das fibras (KIM *et al.*, 2019). Assim a escolha deste material ainda se soma a premissa de Zhu *et al.* (2014) de que incrementam a ductilidade do ECC substituindo o cimento; às afirmativas de Zhou *et al.* (2009) e Chen, Yang, Yao (2013) sobre a condição de

a escória de alto forno melhorar as propriedades da mistura fresca e endurecida, como trabalhabilidade e durabilidade (por gerar menor calor de hidratação, maior resistência a sulfatos e ácidos, menor permeabilidade e maior resistência à corrosão); e ainda se baseia na tese de que se considerados compósitos cimentícios com fibras de polipropileno os resultados melhoram a resistência à compressão e o deslocamento à flexão do ECC em comparação com um traço referencial (HUSAIN; LEE, 2018).

Além disso, este trabalho também terá como base a utilização de fibras de polipropileno, fabricadas no Brasil, ao invés das fibras de PVA, de fabricação americana e não disponíveis no mercado brasileiro, originalmente utilizadas pelo Professor Li (2003).

As alternativas a mistura, como combinações binárias e ternárias, uso de aditivos e ainda a dosagem sob controle granulométrico do agregado miúdo, serão realizadas com o intuito de complementar e avançar os estudos do grupo de pesquisa do LEME sobre ECC no que se refere a reologia e trabalhabilidade do material. Porém, além disso, o intuito geral é verificar se mesmo os ganhos ambientais conseguem manter a condição *strain-hardening* de elevada ductilidade e consequente capacidade de múltipla fissuração. Para aferição desta característica os inúmeros ensaios em estado endurecido que serão desenvolvidos tem por base os esforços principais que refletem o ECC, os de tração e flexão. Por mais que os ECC possuem resistência de longo prazo, as datas de análise se pautaram em 28 dias, como um indicador que baliza os dimensionamentos de projetos de engenharia, se for remetido o uso do ECC, por exemplo, para painéis ou como *whitetopping*<sup>1</sup>, (que costuma ter como referência normativa  $f_{ck} 28 = 4,5 \text{ MPa}$  (CARVALHO, 2012; DNIT, 2004)).

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é verificar a influência de combinações de materiais suplementares sob a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas de um ECC produzido com fibra de polipropileno.

---

<sup>1</sup> *Whitetopping* é um pavimento de concreto de cimento Portland utilizado para recapear vias sobre um pavimento flexível existente. As tensões solicitantes, em específico às de tração na flexão, são combatidas somente pelo próprio concreto, não havendo nenhum tipo de armadura distribuída. Em suma, promovem a reabilitação dos pavimentos com intenso fluxo de veículos, visando melhorar a qualidade do tráfego e, também, a mobilidade urbana.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

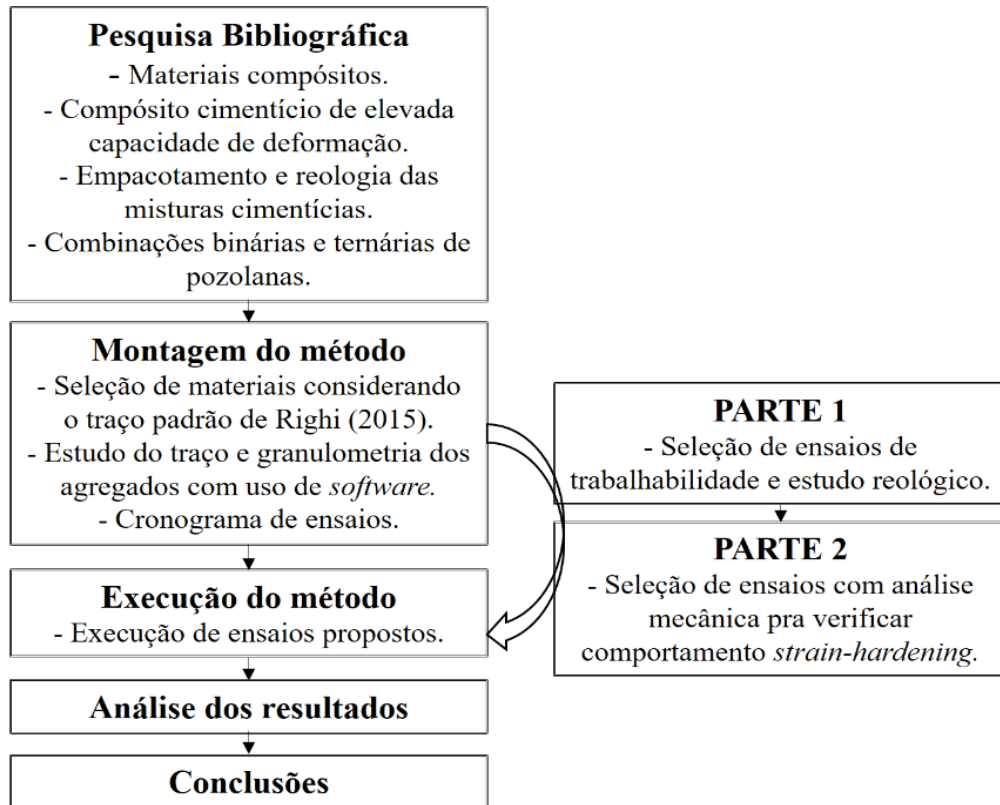
Esta dissertação tem os seguintes objetivos específicos:

- Estudar as porcentagens de substituição de cimento por CCA nas porcentagens de 40% e 50% (em volume de cimento) considerando controle granulométrico para agregado miúdo;
- Estudar combinações ternárias de material suplementar unindo frações de CCA e escória de alto forno, em substituição de até 50% do cimento nas seguintes combinações: EAF10 (10% de escória de alto forno e 40% de CCA); EAF20 (20% de escória de alto forno e 30% de CCA); EAF30 (30% de escórias de alto forno e 20% de CCA);
- Entender como o empacotamento de diferentes misturas de materiais suplementares pode interferir na trabalhabilidade dos ECC por meio dos métodos de Fluides pelo Cone de Fluxo Marsh, pelo Método mini-*Slump Flow*, e mesa de espalhamento;
- Verificar a reologia das misturas por meio da viscosidade plástica e torque, e buscar uma relação direta com o ensaio mais simplificado de Fluides pelo Cone de Fluxo Marsh;
- Investigar o desenvolvimento do comportamento *strain-hardening* através da tração direta e flexão a quatro pontos, considerando 28 dias de idade a fim de entender como as misturas de materiais suplementares impactam nestas categorias;
- Reconhecer a capacidade de deformação pós pico de carregamento das misturas, para verificar o impacto das substituições com uso de materiais suplementares na ductilidade do compósito.
- Entender se a resistência a compressão aos 28 dias atende aos parâmetros e controle de qualidade de alguns materiais de recapeamento;
- Relacionar os ensaios em estado fresco com os resultados em estado endurecido no intuito de justificar as substituições e perpetuar pesquisas com as matérias-primas utilizadas.

### 1.4 DELINEAMENTO

O trabalho segue as etapas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da pesquisa



Fonte: a autora, 2023.

A etapa de pesquisa bibliográfica visa aumentar os conhecimentos teóricos sobre o tema da pesquisa possibilitando um melhor entendimento do mesmo, é necessária para a definição das variáveis da pesquisa e para a análise e interpretação dos resultados. Esta etapa estará presente durante toda a execução do trabalho.

A segunda etapa, denominada de montagem do método, trata da caracterização dos materiais que serão utilizados, a definição das porcentagens e a escolha dos ensaios adequados para esse estudo.

A terceira etapa (execução do método) constituiu-se na busca e aquisição dos materiais e equipamentos necessários para a realização dos ensaios laboratoriais. Em paralelo, a etapa envolve a execução das atividades laboratoriais, isto é, a moldagem e cura dos corpos de prova.

A quarta etapa constituiu-se da análise dos resultados, sendo efetuadas as análises qualitativas e quantitativas dos ensaios realizados neste estudo. A quinta e última etapa é formada pelas conclusões acerca dos resultados obtidos.



## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é organizada em seis capítulos, sendo que o primeiro contém uma introdução ao assunto abordado, juntamente com justificativa do tema e seguida dos objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre a reologia dos materiais cimentícios. O capítulo 3 aborda as principais características dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, também conhecidos como ECC. O mesmo capítulo aborda avanços dos estudos deste material com a incorporação de materiais suplementares, de modo em combinações binárias e ternárias de materiais pozolânicos.

O capítulo 4 detalha o método de pesquisa a ser utilizado neste trabalho, apresenta todos os materiais e procedimentos utilizados nos ensaios para a realização desta pesquisa.

À medida que o trabalho for desenvolvido, serão acrescentados o capítulo 5, com os resultados e análises obtidas; e o capítulo 6, o qual será reservado à apresentação das conclusões derivadas do desenvolvimento da dissertação, com indicações e recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, encontra-se anexada a lista de referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

## 2 REOLOGIA DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Neste item são abordados conceitos e definições sobre reologia, quais modelos reológicos mais adequados para misturas cimentícias a base de cimento, o comportamento reológico dos concretos abordando sobre a influência da trabalhabilidade das misturas, quais ensaios mais adequados para verificar estas propriedades e por fim conceitos sobre viscosidade plástica e tensão de escoamento para misturas cimentícias.

### 2.1 DEFINIÇÕES

Pode-se definir a viscosidade de um fluido com o conceito da resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna e, quanto maior o grau de fricção interna de um fluido, este conceito foi definido por Isaac Newton, em 1687. O cientista Bingham em 1929 reconheceu o termo “reologia” com origem da palavra grega *rhein* que significa “escorrer” e vem de encontro ao estudo da deformação e do escoamento da matéria estudados por Van Wazer *et al.*, (1966) apud Reis (2008).

Reologia é definida como uma ciência que estuda materiais denominados como abstrusos e que não podem ser classificados somente como gás, líquido ou sólido. Também pode ser definida como a ciência da deformação e fluidez da matéria com relação direta entre as unidades de tensão, deformação e tempo. Manrich e Pessan (1987) apud Reis (2008) denominavam que a reologia é a capacidade de uma força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento de um corpo. Se ela é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, sua importância é grande para a Ciência dos Materiais e, de modo particular, para a Química, a Física e as Engenharias.

Na prática, o estudo da reologia está preocupado com materiais cujas propriedades ao escoamento são mais complicadas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, embora possa ser observado que, para um material, um comportamento considerado simples sob uma restrita variação da condição de ensaio, poderá exibir um comportamento muito mais complexo sob outras condições (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

Barnes *et al.* (1989) mencionam que fluidos reais (ideais) se deformam irreversivelmente. Quando tensões são aplicadas sobre esses materiais, os mesmos escoam. A energia da deformação é dissipada dentro dos fluidos em forma de calor e não pode ser recuperada se a tensão aplicada for cessada.

A reversibilidade e a irreversibilidade são fenômenos ligados às propriedades reológicas de uma substância, que exibem mudanças consideráveis com o tempo ou com uma deformação prolongada. Castro (2007) coloca que a reologia quantitativa está relacionada com as relações entre a tensão, a deformação, o tempo e a influência de fatores, como a temperatura, sobre os materiais.

## 2.2 CONCEITOS

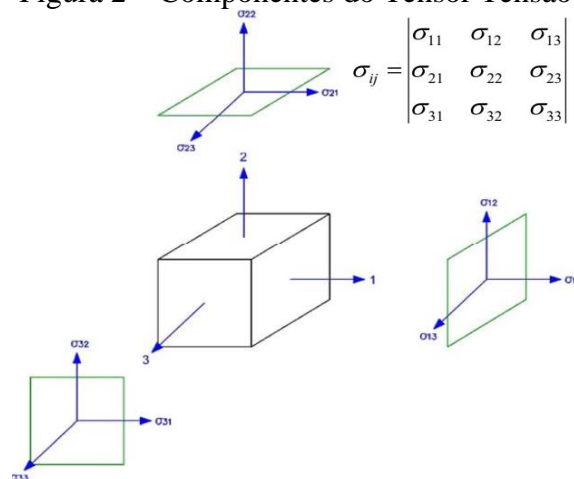
São necessários alguns conceitos para compreender o comportamento reológico de alguns materiais como: tensão, deformação e viscosidade, que são discutidos na sequência.

- **Tensão:** Quando um fluido está em movimento, vários tipos de forças atuam sobre o mesmo. Essas mesmas forças surgem devido ao seu movimento, à ação da gravidade, aos gradientes de pressão e às interações entre as moléculas do material estudado (BRETAS e D'ÁVILA, 2000).

A equação 1 define tensão ( $\sigma$ ) como uma força (F) por unidade de área (A). O termo tensor tensão é definido como uma solitação de um corpo posto num campo tencionado (Figura 2).

$$\sigma = \lim \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{equação 1})$$

Figura 2 – Componentes do Tensor Tensão



Fonte: REIS, 2008.

Segundo Reis (2008), os componentes normais têm índices iguais, já os componentes tangenciais têm índices diversos: o primeiro índice se refere à direção do componente normal

ao plano onde ocorre a tensão, o segundo à direção da tensão. Assumindo que o componente será positivo na tração e negativo na compressão.

- **Deformação:** pode ser definida como uma modificação da forma primitiva da matéria. A deformação pode ser dividida em dois tipos: elasticidade ou deformação espontaneamente reversível, e plasticidade ou deformação irreversível.

A elasticidade é a propriedade de um material sólido que permite restaurar sua forma após a remoção de uma carga externa. Já a plasticidade é a propriedade de uma substância sólida que lhe permite manter sua forma deformada mesmo quando a carga externa é removida.

Em relação a reologia dos materiais, pode-se definir os fluídos são como uma matéria que se deforma continuamente sob a tensão de cisalhamento, mas que na ausência desta, não ocorre deformação. Ao submetê-los a qualquer tensão externa, eles se deformam continuamente até encontrar uma barreira física capaz de impedir seu escoamento (PANDOLFELLI *et al.*, 2000). Logo a caracterização reológica dos fluídos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo ao invés da deformação absoluta dele (REIS, 2008).

Conforme Schramm (2006) a tensão de cisalhamento conduz um líquido para o seu perfil de escoamento, a velocidade de escoamento será máxima numa camada superior e irá diminuir à medida que a velocidade atravessa o corpo de prova até chegar à zero na camada ligada a placa estacionária. O gradiente de velocidade na amostra é chamado de taxa de cisalhamento e é definido como uma diferencial da velocidade pela distância.

- **Viscosidade:** é uma propriedade do escoamento, no caso de concretos e argamassas está ligado à pasta/matriz cimentícia, ou seja, a relação a/c (água/cimento), à origem mineralógica dos materiais utilizados, dimensão e forma dos agregados miúdos. A viscosidade de um líquido por exemplo mede a resistência interna oferecida ao movimento relativo de diferentes partes desse líquido, ou seja, mede a resistência de um líquido em fluir (escoar) e não está diretamente relacionada com a densidade do líquido, que é a relação massa/volume (RAGO, 1999; KIRYU, 2006).

Outra definição clássica para a viscosidade é a relação da variação da tensão de cisalhamento pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido Newtoniano. A equação 2 demonstra a viscosidade ( $\mu$ ) como sendo a relação entre a taxa de cisalhamento ( $\tau$ ) e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ):

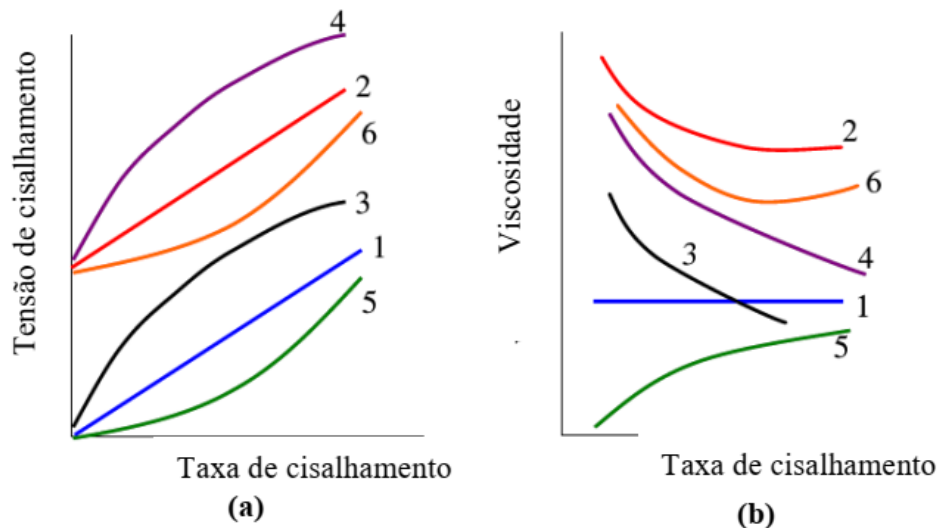
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{equação 2})$$

Conforme Pandolfelli *et al.* (2000), a viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluído, pois indica sua facilidade de escoar continuamente sob a

ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante.

Os fluidos podem ser classificados através da análise do perfil das curvas de fluxo e/ou de viscosidade, de acordo com seu comportamento reológico. Os principais e mais comuns tipos de fluidos estão relacionados na Figura 3 (BETIOLI, 2007).

Figura 3 – Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluidos



Fonte: BETIOLI, 2007.

Alguns comportamentos reológicos são definidos e explicados a seguir:

I. Fluidos newtonianos – Representado na curva 1 (Figura 3 (a) e (b)), neste tipo de fluido a viscosidade independe da taxa, uma vez que a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento.

II. Fluidos pseudoplásticos – No caso de fluidos pseudoplásticos, há uma diminuição da viscosidade aparente quando há um aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento (curva 3 da Figura 3 (b)).

III. Fluidos dilatantes – Em fluidos que apresentam este comportamento, a correlação das propriedades é diretamente proporcional, ou seja, a viscosidade se eleva com o aumento da taxa de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento, conforme a curva 5 da Figura 3 (b).

IV. Fluidos com ponto de escoamento – As curvas 2, 4 e 6 da Figura 3 (a) e (b) representam os fluidos que precisam de uma tensão de cisalhamento mínima para iniciar o seu escoamento.

## 2.3 MODELOS REOLÓGICOS

Os fluídos são caracterizados de acordo com seu comportamento reológico, e podem ser Newtonianos e não-Newtonianos.

### 2.3.1 Fluídos Newtonianos

Os fluidos newtonianos só são influenciados pela temperatura e pressão. A viscosidade é única e absoluta, pois a razão entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento é constante. Reis (2008) argumenta que um exemplo de fluídos newtonianos são a maioria dos líquidos puros, soluções e dispersões que possuem uma viscosidade constante. Em um gráfico de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento, a viscosidade será uma reta linear igual ao coeficiente angular, sendo única e constante (SÉRGIO FILHO, *et al.*, 2020).

A curva de escoamento de um fluído Newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação cujo inverso é igual ao coeficiente de viscosidade. Assim é possível dizer que para este tipo de fluído um único ensaio será suficiente para medir os parâmetros reológicos (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

Reis (2008) ainda cita que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento são proporcionais, independentemente da deformação e do tempo. Como exemplos de fluídos newtonianos podemos citar alguns materiais, entre eles: glicerina, água, ar, álcoois, óleos etc.

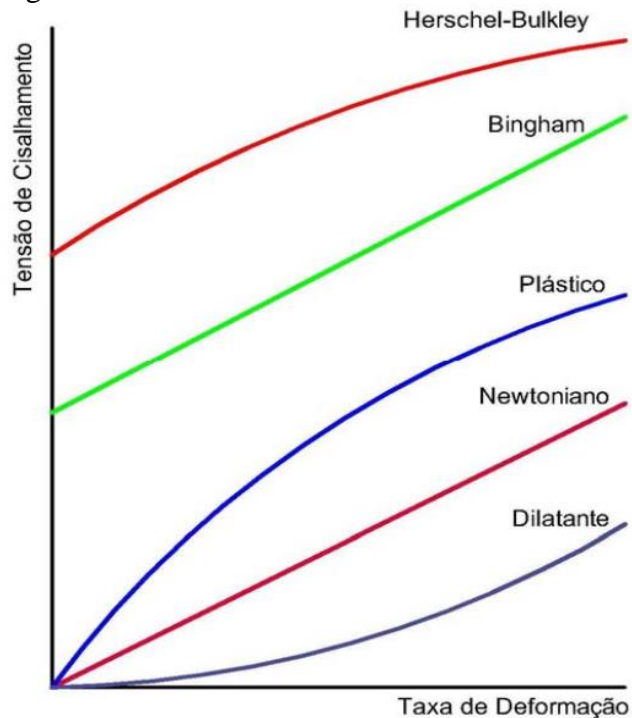
### 2.3.2 Fluídos Não-Newtonianos

Todo fluído cuja relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento não é constante é considerado não-newtoniano, considerando temperatura e pressão constantes e o escoamento laminar (SÉRGIO FILHO, *et al.*, 2020). Esses fluídos são classificados conforme o aspecto da curva de fluxo e correlação com alguma equação ou modelo matemático. Nesse tipo de fluído a viscosidade varia de acordo com a intensidade da tensão, ou seja, a viscosidade não é constante sob uma dada temperatura e pressão, mas dependente da taxa de cisalhamento ou, de maneira mais geral, da sua prévia história de cisalhamento (TATTERSALL e BANFIL, 1983).

Os fluídos não-newtonianos independentes do tempo podem ser subdivididos em fluídos pseudoplásticos, fluídos dilatantes e fluídos Binghamianos ou plásticos (VAN WAZER, 1966;

SCHRAMM, 2006). A Figura 4 ilustra esquematicamente os diversos comportamentos reológicos independentes do tempo.

Figura 4 – Modelos de fluidos não-Newtonianos



Fonte: REIS (2008).

Nos fluidos ditos pseudoplásticos a viscosidade pode ser definida com o a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento e com isso diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (MCCLEMENTS, 2005, apud REIS, 2008), sendo que a taxa de cisalhamento versus a tensão de cisalhamento forma uma linha convexa (SHARMA *et al.*, 2000) conforme Figura 4.

Para este comportamento diversos fatores são levados em consideração: características físicas das partículas, como área superficial, formato, dimensões; o tipo de interação entre partículas; e a concentração, peso molecular e conformação de moléculas de dispersante presentes no meio líquido (PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

Quando em repouso apresentam um estado desordenado, e quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada, com isso a viscosidade será menor.

O fluido mais semelhante a um fluido Newtoniano é o fluido chamado de Bingham, este tipo de fluido é caracterizado pela aplicação de uma tensão inicial mínima, o ponto de ruptura ou “*yield stress*” para que o material comece a fluir. O sistema apresenta em repouso altas forças de interações intermoleculares, dando a substância um caráter sólido, que o impede de fluir, até

que a força externa seja superior à força das interações, onde possamos observar o ponto de ruptura (BOURNE, 1982 apud REIS, 2008).

Castro (2007) ainda complementa que um fluido plástico ou binghamiano em repouso apresenta uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de escoamento e se comporta como um sólido elástico rígido. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra. Quando a tensão de cisalhamento aplicada for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada.

E por fim os fluidos dilatantes apresentam o comportamento inverso aos fluidos pseudoplásticos, ou seja, a viscosidade aumenta à medida que aumenta a taxa de cisalhamento. Esse tipo de fluxo somente é encontrado em líquidos que contém uma alta proporção de partículas rígidas insolúveis em suspensão (BOURNE, 1982). Para que haja escoamento nesta situação, é necessário que o meio líquido flua através dos estreitos canais entre as partículas. Todas as situações que contribuem para a redução da distância médias de separação entre as partículas e dificultam a movimentação relativa entre elas favorecem o aparecimento do comportamento dilatante na suspensão (PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

## 2.4 REOLOGIA DOS CONCRETOS

Já é conhecido que a composição básica do concreto é formada por cimento, agregados e água. Para concretos como, por exemplo, os de alto desempenho (CAD), aditivos químicos e materiais suplementares são incorporados na mistura para que outras propriedades sejam atingidas. Ao correlacionar com o comportamento reológico, concretos são considerados como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento) (FERRARIS, 1999).

Analisando macroscopicamente, o concreto no estado fresco flui como um líquido e para compreender o seu comportamento à deformação, nada mais adequado do que buscar os conceitos de reologia considerados adequados para materiais complexos que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

Os modelos reológicos independentes do tempo são os mais utilizados para avaliar a trabalhabilidade de concretos/argamassas (fluidos binghamianos, pseudoplásticos e dilatantes). A tensão de cisalhamento é difícil de computar quando muda para taxa de cisalhamento zero denominada de tensão de escoamento. Para solucionar isso são aplicados diferentes modelos



reológicos capazes de predeterminar estatisticamente a tensão de escoamento (NEHDI e RAHMAN, 2004).

Diversos estudos como Tattersall e Banfill (1983), Hu e Larrard (1996) e Ferraris (1999) concluíram que o concreto/argamassa em termos de propriedades reológicas no estado fresco se comportam como um fluido plástico ou binghamiano. Outros estudos indicam que misturas cimentícias com adições pozolânicas (materiais suplementares) também apresentam curvas de fluxo que se ajustam a modelos não-Newtonianos, cujas adições contribuem para um melhor escoamento e menor viscosidade da mistura (VANCE, *et al.*, 2013).

As equações que relacionam a concentração com a viscosidade são usadas para descrever o comportamento no escoamento de pastas de cimento, não sendo aplicáveis ao concreto em função da complexidade da suspensão. As equações que relacionam a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, comumente usadas para descrever o comportamento no escoamento do concreto fresco, são apresentadas na Tabela 1 (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Tabela 1 - Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento para descrever o comportamento do escoamento de concretos no estado fresco

Modelo reológico	Equação do modelo
Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$ $\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$ , para fluido newtoniano
Lei das potências	$n > 1$ , para fluido dilatante $n < 1$ , para fluido pseudoplástico
Vom Berg, Ostwald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Eyring	$\tau = a \dot{\gamma} + B \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Atzeni <i>et al.</i>	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$

Obs.:  $\tau$  = tensão de cisalhamento;  $\tau_0$  = tensão de escoamento;  $\mu$  = viscosidade;  $\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento;  $A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$  = constantes.

Fonte: CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI (2011).

Os modelos reológicos independentes do tempo permitem ajustar os dados da tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e viscosidade a tendências específicas conforme

necessidade de caracterização da amostra. É uma tarefa bastante complexa transformar a tensão de cisalhamento para a taxa de cisalhamento zero, conhecida como tensão de escoamento. Para solucionar esta dificuldade podem ser aplicados diferentes modelos reológicos já predeterminados estatisticamente à tensão de escoamento (NEHDI e RAHMAN, 2004).

Os autores Nehdi e Rahman (2004) ainda citam que utilizando estes modelos é possível caracterizar a viscosidade plástica para determinadas variações de taxa de cisalhamento. Diversos autores como: Ferrais (1999), Hu e Larrard (1996) comentam que quando se trata de concreto, o material deve ser classificado como um fluido plástico ou binghamiano com intervalo das taxas e cisalhamento envolvidos no uso do material. Assim, a tensão necessária ao escoamento do material – tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) – é igual à soma da tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e de outro termo proporcional à taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), denominada viscosidade plástica ( $\mu$ ) (equação 3).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \text{ (equação 3)}$$

Como o concreto fresco é considerado um material heterogêneo, podendo ser classificado como um material que possui descontinuidades internas e externas, não é possível caracterizá-lo no meio contínuo. Os parâmetros reológicos são normalmente medidos como dependentes do equipamento utilizado no ensaio e expressos em unidades de torque, resultando em curvas de cisalhamento onde o torque ( $T$ ) é apresentado como uma função da velocidade de rotação ( $N$ ), cuja relação é dada pela equação 4 (CASTRO, LIBORIO, PANDOLFELLI, 2011).

$$T = g + h * N \text{ (equação 4)}$$

Onde  $g$ , torque de escoamento, em [Nm], é a intersecção com o eixo do torque e  $h$ , viscosidade de torque, em [Nm.s], é a inclinação da reta. Essas duas constantes são análogas à tensão de escoamento e a viscosidade plástica, respectivamente (YEN *et al.*, 1999).

#### 2.4.1 Influência da Trabalhabilidade

Quando se trata de misturas cimentícias com uso de materiais suplementares, a trabalhabilidade é uma característica importante no estado fresco influenciada por fatores como: relação água/cimento, idade da mistura, características do cimento, natureza das adições químicas e minerais incorporadas à mistura e procedimentos de mistura empregados na sua produção. Ainda é possível obter informações sobre o comportamento ao escoamento destas misturas, e identificar quais influências que podem ser determinadas durante o ensaio. (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001).

Os autores Ferraris e Gaidis (1992) já mencionavam que a pasta de cimento é considerada o lubrificante entre os agregados de um tipo qualquer de concreto, sendo um fator que caracteriza bastante a fluidez do mesmo. Os autores ainda citam que a pasta de cimento influencia diretamente a trabalhabilidade do concreto, e que se houver mudanças volumétricas da pasta da mistura de concreto a fluidez será influenciada diretamente.

Existem inúmeras formas de medir a trabalhabilidade de concretos, inclusive a maioria das normas técnicas nacionais especificam diferentes métodos de ensaio para diferentes tipos de avaliação. O ensaio mais conhecido é o abatimento do tronco de cone, que é uma medida da estabilidade ou da coesão das misturas sob condições estáticas de ensaio, não se enquadrando como um ensaio de medição de trabalhabilidade real, apenas sendo uma avaliação qualitativa (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004).

Definições como trabalhabilidade, consistência, capacidade de escoamento, mobilidade e capacidade de bombeamento dos concretos têm sido usados para descrever o comportamento do concreto no estado fresco, mas, esses termos refletem mais pontos de vista qualitativos do que uma precisão científica quantitativa (WALLEVIK, 2006).

Em busca de análises mais profundas com relação à trabalhabilidade dos concretos, foram aplicados os conceitos de reologia o qual considera o concreto com um comportamento se aproximando de um fluido (FERRARIS, LARRAD, MARTYS, 2001). Para identificar a natureza reológica do concreto, é necessário o desenvolvimento de diversos experimentos com reômetros nos quais as medidas são realizadas para uma gama de velocidades de escoamento distintas.

Conforme Ferraris (1999) a maioria das equações já conhecidas hoje para uso em suspensões, que poderia ser o concreto, procura a correlação com a concentração de uma suspensão com a sua viscosidade ou a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, entendendo, assim, que existe um valor de viscosidade para todo o sistema analisado, tema que será abordado no próximo subitem desta dissertação.

#### 2.4.2 Viscosidade Plástica e Tensão de Escoamento

Castro (2007) já mencionava em seu estudo uma procura pelo meio acadêmico de métodos e ensaios que conseguissem análises quantitativas fundamentais sobre a trabalhabilidade das misturas cimentícias. O autor ainda menciona que com o desenvolvimento do reômetro foi possível simplificar a avaliação da trabalhabilidade do concreto ao longo do

Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

tempo, devido a este equipamento permitir conhecer as origens do fenômeno da perda de trabalhabilidade dos concretos.

Larrard (1996) definiu a tensão de escoamento como uma tensão mínima necessária que deve ser aplicada para deformar o concreto fresco após o cisalhamento, citando que esta tensão está relacionada diretamente com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Larrard e Sedran (2002) definiram também a tensão de escoamento como sendo uma característica comum do concreto fresco e que resulta do atrito intergranular dos sólidos que leva em consideração o tamanho e a morfologia dos agregados.

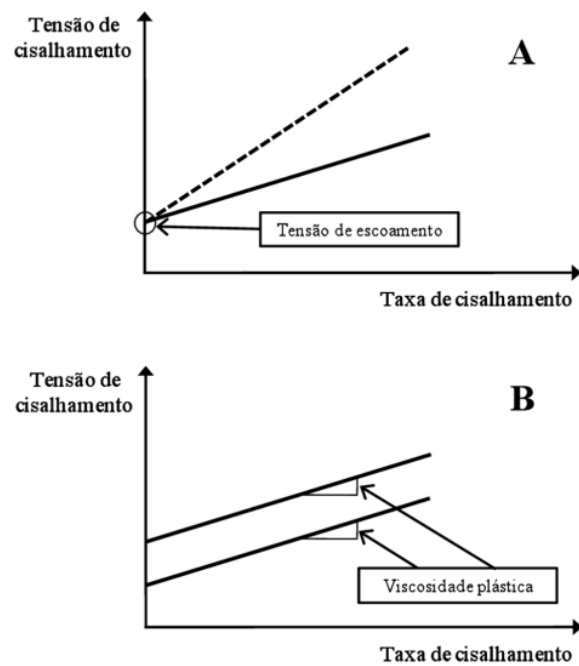
Segundo os autores Pandolfelli *et al.* (2000) a tensão de escoamento tem sua origem pela aglomeração das partículas sólidas do fluido, de modo que forma uma estrutura espacial rígida de partículas por toda a suspensão. Para romper essa estrutura é necessária uma tensão mínima, chamada de tensão de escoamento.

É possível interpretar que a tensão de escoamento é a tensão que precisa ser aplicada no material a fim de que seu escoamento inicie. Quando a tensão de cisalhamento é maior que a tensão de escoamento, a mistura escoar e sua resistência ao escoamento depende da viscosidade plástica do material, no caso, do concreto (GOLASZEWSKI e SZWABOWSKI, 2004).

A viscosidade plástica relaciona o concreto fresco com outros tipos de materiais viscosos, que pode ser correlacionada com a aplicação, bombeamento e a segregação dos concretos, que é relacionada com o teor de água na mistura (PARK; NOH; PARK, 2005). Pode-se definir que a viscosidade plástica é governada pela concentração relativa da mistura, sendo a razão entre proporção de materiais sólidos (em volume) e a sua densidade de empacotamento (LARRARD e SEDRAN, 2002).

A importância de se medir tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica pode ser mais bem compreendida na Figura 5 que compara parâmetros reológicos de dois tipos de concretos quaisquer. Ferraris (1999) menciona que os dois concretos podem ter um dos parâmetros reológicos idênticos, enquanto outro parâmetro pode ser completamente diferente, o que resulta no fato destes concretos apresentarem comportamentos reológicos completamente distintos entre eles.

Figura 5 - Reologia do concreto: (A) mesma tensão de escoamento e diferentes viscosidades; (B) mesma viscosidade e diferentes tensões de escoamento



Fonte: FERRARIS, 1999.

Relacionando estes dois parâmetros reológicos com as aplicações práticas na construção civil, pode-se relacionar que a tensão de escoamento indica a resistência ao escoamento para baixas velocidades de rotação, e que a viscosidade plástica indica como a resistência ao escoamento aumenta com o aumento da velocidade de rotação (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001).

### 3 ENGINEERED CIMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais conceitos relativos ao tema de pesquisa. Inicialmente, são abordados o surgimento e desenvolvimento de concretos e compósitos especiais. O capítulo enfatiza o comportamento e propriedades de compósitos cimentícios denominados na bibliografia estrangeira de *Engineered Cementitious Composites*.

#### 3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, e tal notoriedade impulsiona pesquisas em busca do seu avanço tecnológico. Com o avanço de programas computacionais, é permitido aos projetistas desenvolverem as mais variadas estruturas em concreto armado e protendido. Neste contexto, para sanar aos requisitos de projeto em que o concreto convencional não é satisfatório, surgem novas combinações de materiais, aditivos e adições químicas que garantem propriedades específicas para diversas situações (WATANABE, 2008; TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

As principais desvantagens do concreto convencional são o peso elevado, a baixa ductilidade e a retração plástica. Figueiredo (2011) também aponta o comportamento frágil à tração com pouca capacidade de deformação antes da ruptura; salienta que a capacidade de tração é muito inferior à de compressão, fato que torna o material suscetível às fissuras que diante dos carregamentos. Sendo assim, a tecnologia do concreto surge com o intuito de diminuir essas deficiências na busca por concretos especiais, incorporando propriedades específicas não inerentes aos concretos convencionais, de modo a atender às especificações mecânicas, de rigidez e de trabalhabilidade especificadas. (GENCEL *et al.*, 2021).

Para conferir melhorias aos concretos convencionais são desenvolvidas pesquisas com aditivos químicos que podem propiciar, por exemplo, concretos de alto e ultra alto desempenho (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011); a utilização de fibras de aço e polipropileno e principalmente (FIGUEIREDO, 2011); a utilização de adições minerais (materiais suplementares) com capacidade pozolânica, no caso escória siderúrgica, sílica ativa e o *metacaulim* (WATANABE, 2008). E ainda pozolanas oriundas de rejeitos da indústria como a CCA, escória siderúrgica e escória granulada de alto forno (DAL MOLIN, 2011; GENCEL *et al.*, 2021). Ainda existem pesquisas no entorno da utilização de concreto reforçado com fibras definindo o produto como um compósito de duas fases (CAMPELLO, 2013; GENCEL *et al.*, 2021).

Zarbin (2007) define os compósitos como materiais constituídos a partir da união de dois ou mais materiais distintos, que mantendo suas características individuais proporcionam propriedades únicas e sinérgicas em conjunto quando em uma interface bem definida. Jones (1975) apud Campello (2013) e Hsissou *et al.* (2021) indicam que a formulação dos compósitos permite a combinação ou modelagem de ingredientes de origem natural ou sintética, muitas vezes incompatíveis entre si, de modo a obter um produto comercial com melhores propriedades mecânicas e/ou capacidade de satisfazer uma especificação predeterminada.

Os materiais compósitos são formados por duas fases: a matriz é o meio que proporciona estrutura ao material, preenche espaços e envolve a outra fase; e o elemento de reforço, também chamado de fase dispersa, é representado pelos materiais que quando incorporados na matriz realçam a mecânica do conjunto. A fase dispersa também permite dividir os compósitos em dois grupos: fibrosos, quando fibras são adicionadas à matriz; e, particulados, quando a abdicação à matriz ocorre de forma particulada (HSISSOU *et al.* 2021).

Materiais a base de cimento Portland são considerados compósitos, onde a matriz é formada pela pasta cimentícia a qual envolve os mais variados agregados (fase dispersa). Lameiras (2007) afirma que as matrizes cimentícias são ideais para inserção de fibras, podendo melhorar a ductilidade, tração e flexão do elemento endurecido. Nesse contexto Figueiredo (2011) apresenta a sigla FRC (*fibre reinforced cementitious material*), que define os materiais cimentícios reforçados com fibras como materiais a base de cimento hidráulico com fibras discretas e descontínuas, com a inserção ou não de agregados na mistura.

Muitas aplicações do FRC estão associadas a grandes obras de infraestrutura, saneamento básico e transportes, por conta da elevada capacidade de absorver tensões e resistir aos esforços de tração. Figueiredo (2011) indica que no Brasil esse tipo de compósito é mais utilizado em pavimentos, seguido de revestimento de túneis através da técnica de projeção, e ainda na fabricação de tubos pré-moldados para saneamento básico. Em geral, o uso de compósitos na construção civil tem sua crescente por conta da diminuição da fissuração dos elementos contínuos e aumento da ductilidade (LAMEIRAS, 2007).

### 3.1.1 Matrizes Cimentícias com fibras

As matrizes cimentícias tem capacidade resistente à tração limitada e, por conseguinte apresentam ruptura frágil. Mehta e Monteiro (2014) esclarecem que há uma susceptibilidade,

no caso do concreto, de ocorrência de fissuras e/ou microfissuras na zona de transição entre pasta e agregados, fato que acarreta o rompimento do elemento.

Além disso, a ocorrência de fissuras se soma a dificuldade de cessar das mesmas, que se propagam na zona de transição dos agregados e também por entre vazios que constituem a matriz cimentícia. A presença de vazios, sejam eles capilares, interlamelares e/ou ar incorporado, reduzem as propriedades mecânicas e de durabilidade dos elementos cimentícios (MEHTA, MONTEIRO, 2014). Portanto, para sanar as limitações da propagação de fissuras, Figueiredo (2011) indica que uma das alternativas é a inserção de fibras dispersas na matriz, as quais ainda contribuem para preencher os vazios e densificar a mistura. Lameiras (2007) expõe que é usual a utilização de adições minerais (materiais suplementares), do tipo pozolânicas, e o uso de aditivos químicos que melhoram propriedades específicas, as quais serão tratadas ao longo deste capítulo.

A eficiência da fibra na matriz cimentícia irá depender de uma série de características tanto intrínsecas da fibra (propriedades físicas e geométricas) quanto de mistura dos elementos (tipo de matriz, e interação de outros materiais). Além disso, o tipo e volume de fibra são determinantes para que estas consigam interligar as fissuras de tal modo que permitam aumento na tenacidade, na resistência à tração e ao impacto do compósito (HSISSOU *et al.* 2021).

Diante dos diversos tipos de fibras existentes no mercado, os quais estão indicados na Tabela 2, as propriedades de elasticidade e resistência mecânica é que orientam a capacidade de. As fibras ditas de “baixo módulo” possuem módulo de elasticidade inferior à matriz cimentícia, tendo como exemplo as poliméricas; as fibras denominadas de “alto módulo” apresentam módulo de elasticidade superior à matriz, como por exemplo, aramida, carbono, vidro e aço (FIGUEIREDO, 2011; LAMEIRAS, 2007).

Tabela 2 – Propriedades de diversos tipos de fibras

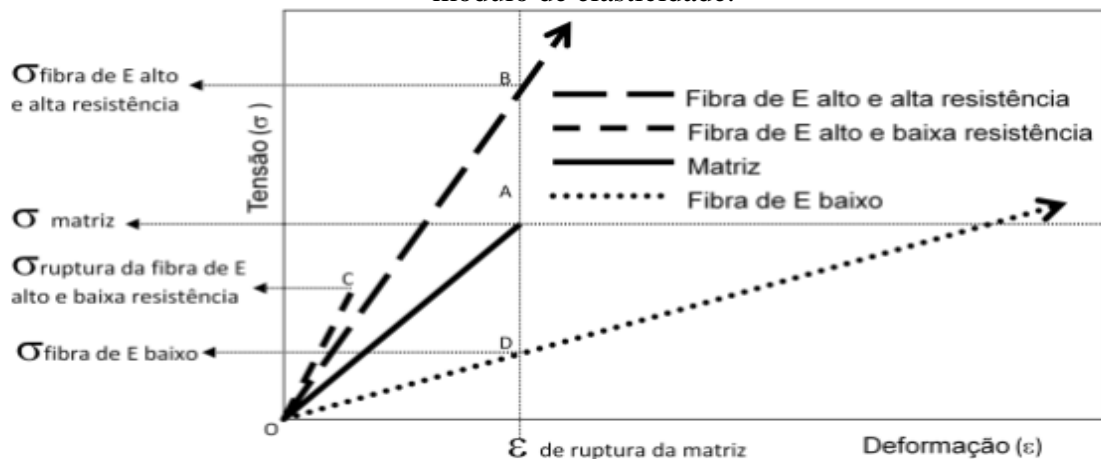
Fibra	Diâmetro Eq. (µm)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Acrílico	18	1,18	0,4 - 1,0	14 - 19,5	3
Aço	5 – 500	7,84	0,5 - 2,0	190 - 210	0,5 - 3,5
Amianto	0,02 -0,4	2	3 - 3,5	10 - 200	2 - 3
Carbono	9	1,9	2	230	1
Celulose	-	1,2	0,3 - 0,5	10	-
Fibra Madeira	-	1,5	0,9	71	-
Nylon	-	1,1	0,9	4	13 - 15
Polietileno	-	0,95	0,7x10 <sup>-3</sup>	0,3	10
Polipropileno	20 – 200	0,9	0,5 - 0,75	5 - 7,7	8
Sisal	10 – 50	1-50	0,8	-	3
Vidro	9 – 15	2	2,04	70 - 80	2 - 3,5

Fonte: BENTUR; MINDESS, 1990.



Figueiredo (2011) considerou uma matriz cimentícia hipotética, e na Figura 6 demonstrou três distintos comportamentos de fibra de acordo com sua relação de elasticidade e resistência mecânica à tração. As fibras com baixo módulo de elasticidade apresentam uma tensão baixa quando há ocorrência de fissuras na matriz; quando a tensão na fibra aumenta até a mesma tensão de rompimento da matriz, estas já irão demonstrar um alto nível de deformação que em consequência irá permitir grandes aberturas de fissuras. Assim, o autor indica que essas fibras devem ser adicionadas em grande volume na matriz do compósito cimentício para que cumpram com o nível de reforço desejado. Em contrapartida, o custo e a dificuldade de trabalhabilidade com uma maior quantidade de fibras inviabilizam sua utilização.

Figura 6 – Diagrama de tensão x deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011.

As fibras com alto módulo de elasticidade podem apresentar tanto baixa quanto alta resistência a deformação. No caso da alta resistência, quando a matriz cimentícia entra em ruptura, a fibra já demonstra aplicação de elevada tensão o que proporciona uma alta capacidade de reforço pela mesma, podendo ser utilizada em menores volumes. Por outro lado, quando em situação de baixa resistência da fibra, sua capacidade de reforço pós fissura é diminuída ou nula, atingindo sua máxima tensão e deformação antes mesmo da abertura de fissuras na matriz cimentícia, mantendo o eventual conjunto com característica frágil e de baixa elasticidade.

Figueiredo (2011) afirma que com o objetivo de reforço das matrizes cimentícias são consideradas fibras que possuam mais capacidade de deformação na ruptura e maior resistência mecânica aa tração e/ou cisalhamento; as fibras de baixa resistência e baixo módulo são utilizadas em pavimentos para evitar a retração plástica e o aparecimento de fissuras no início do endurecimento de pavimentos, por exemplo.

A volumetria da fibra dentro da matriz cimentícia do compósito também é um fator relevante na concepção do compósito. Em tese quanto maior a quantidade de fibras, melhores os resultados de controle na propagação de fissuras. Contudo, na prática, o excesso de fibras pode ocasionar diminuição da trabalhabilidade. Nesse sentido, há uma classificação proposta por Mehta e Monteiro (2014): baixa fração volumétrica (<1%); fração volumétrica média (entre 1% e 2%) e alta fração volumétrica (maior que 2%). A baixa fração volumétrica permite compósitos com redução de fissuras por retração; a fração moderada é indicada para aumentar o módulo de ruptura das matrizes; e, uma elevada fração volumétrica é o que orienta os compósitos de alto desempenho.

### 3.1.2 Interação Fibra-Matriz e Aspectos Tecnológicos

A reduzida capacidade de tração do concreto é decorrente da dificuldade de interromper a propagação de fissuras quando a mesma é submetida a esforços desse tipo. Como a abertura de fissuras ocorre de modo transversal a direção principal de tensão de uma seção usual de concreto, logo apresentando uma superfície de ruptura menor, a energia necessária para gerar a fissuração também é reduzida, marcando o comportamento frágil. Sendo assim, o uso de fibras gera uma ponte de transferência de tensões aumentando a energia ligada à ruptura do compósito e no deslocamento de fissuras.

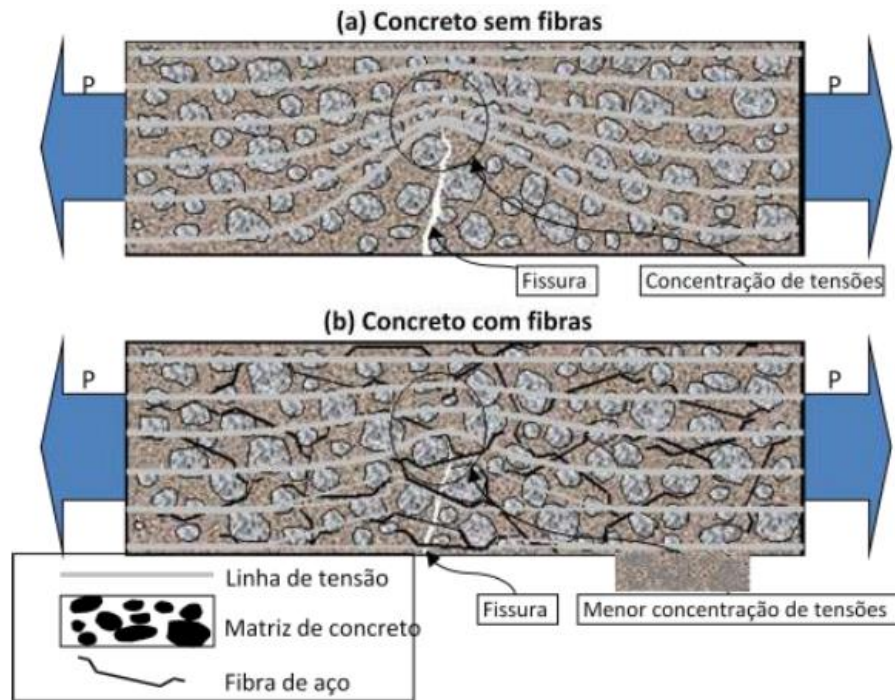
A efetiva transferência da tensão depende de mecanismos associados a interação fibra-matriz, que ocorrem na interface da zona de transição. Como visto anteriormente, a fragilidade desta zona impacta na durabilidade e nas propriedades mecânicas do compósito (CARVALHO; MOTTA, 2019).

Quando se adicionam fibras de módulo e resistência adequadas, e em teor apropriado na matriz cimentícia, o material deixa de refletir comportamento frágil. Pois, as fibras se distribuem aleatoriamente reforçando todo o conjunto, de modo a servir de transferência de tensões através das fissuras, e reduzindo a concentração de esforços nas extremidades das fissuras.

Figueiredo (2011) comparou o comportamento de dois concretos submetidos à tração, um com adição de fibras, neste caso de aço, e outro sem. Na Figura 7, o concreto sem fibras (a) indica uma concentração de tensão na extremidade da fissura, tal concentração barra a transmissão de esforços por entre as linhas de tensão do material, e no momento em que a tensão aplicada superar a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura. No concreto com fibras (b), nota-se que a propagação da fissura é reduzida, pelo fato de não haver um acúmulo de e tensão em sua

extremidade, assim a propagação da fissura tem sua velocidade reduzida, e o material passa a ter um comportamento pseudodúctil ou não frágil.

Figura 7 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b).

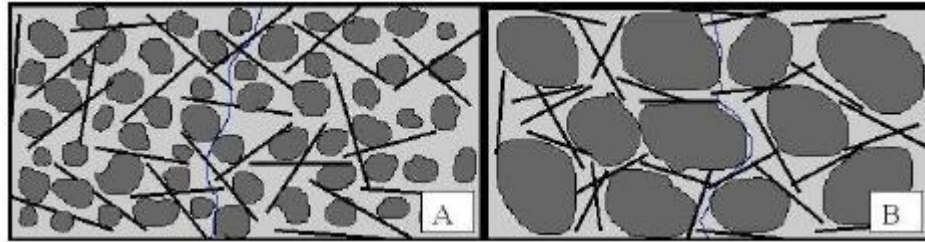


Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Como a ponte de transferência de tensão ao longo da fissura depende da atuação da fibra e sua interação na matriz, a geometria da fibra também afeta o desempenho. Existe um parâmetro chamado teor de forma que orienta a escolha correta da geometria da fibra, pois representa a relação entre comprimento e diâmetro da seção transversal da mesma. No geral, melhor será a capacidade resistente pós fissuração quanto maior for o fator de forma (LI, 1994).

No entanto, deve haver atenção na escolha do comprimento de fibra. Conforme indica Maidl (1991) a medida deve ser igual ou superior a duas vezes a dimensão máxima característica do agregado utilizado na mistura, gerando uma compatibilidade dimensional para que seja eficaz a interceptação de fissuras. Na Figura 8, representada por Figueiredo (2011), a primeira matriz indica compatibilidade entre agregado e fibra; já na segunda matriz, as fibras curtas em relação aos agregados pouco conseguem interceptar a fissura, sendo que poucas conseguem atuar com ponte de transferência de tensões.

Figura 8 – Concreto reforçado com fibras em que há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (A) e onde não há (B).



Fonte: FIGUEIREDO, 2011.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES – ECC

O desenvolvimento do ECC foi liderado pelo pesquisador Victor Li através do grupo ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) da Universidade de Michigan (EUA) em meados dos anos 90. As misturas de compósitos cimentícios reforçado com fibras foram baseadas na aplicação de conceitos de micromecânica e mecânica da fratura, fatores determinantes para obtenção de um material muito deformável com um volume baixo de fibras, da ordem de 2%. Este fator é importante, pois teores elevados de fibras podem prejudicar a trabalhabilidade e encarecer a fabricação destes compósitos (GARCEZ, 2009).

Originalmente o ECC definido pelo Professor Li (2003) não utiliza agregado graúdo, e para agregado miúdo considera a areia de sílica fina, com dimensão máxima próxima a 200 µm. Existem alguns limites para o tamanho das partículas de agregados, do contrário pode haver problemas como dispersão de fibras, perda de trabalhabilidade, dificuldade ancoragem da fibra à matriz, entre outros que podem interferir no desempenho mecânico do material (SAHMARAN e LI, 2009).

Esse tipo de compósito faz parte de uma classe de compósitos com fibras denominado de HPFRC (*high performance fiber reinforced concrete*) conhecido como concreto de alto desempenho reforçado com fibras. Segundo Li (2003), o ECC é um compósito que possui uma alta ductilidade, quando reforçados com fibras em adições máximas de 2%. O ECC foi projetado para resistir elevadas cargas de tensões e de cisalhamento, obtendo uma elevada ductilidade e uma elevada capacidade de absorção de energias e grandes deformações sob carregamento de tração.

Devido à sua ductilidade, o ECC possui elevada capacidade de deformação proporcionando também diversas fissuras múltiplas de pequena abertura durante o processo de ruptura (CASAGRANDE, 2012). Ding, Yu e Li (2022) explicam que assim é possível superar

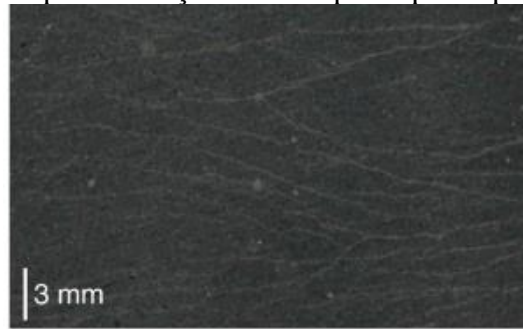
a fragilidade inerente ao concreto comum, pois a capacidade dúctil e tenaz do ECC permite uma deformação por tração normalmente variando de 3% a 12% sob tensão uniaxial.

O tipo de fibra que obteve melhores resultados e adotada pelo grupo de pesquisa do Professor Victor Li foi a fibra de PVA (Álcool Polivinílico). Pela disponibilidade facilitada no mercado norte-americano, esse tipo de fibra tem sido amplamente utilizado na produção de ECC devido à sua tenacidade relativamente alta, alto módulo e fácil dispersão (DING; YU; LI, 2022). Garcez (2009) afirma que esse tipo de compósito com o uso de fibras de PVA tem as fissuras estabilizadas em 1% de deformação, ou seja, as fissuras não possuem um aumento significativo na sua espessura, obtendo um aumento dessa espessura com deformações acima de 5%.

Este comportamento de micro fissuração torna-o resistente à corrosão, bem como auxilia na auto cicatrização dessas fissuras, desenvolvendo o comportamento denominado de *self-healing* (LI, 2003; HERBERT e LI, 2013). Este comportamento possui diferentes sinônimos como: autocura; auto costura; cicatrização autógena entre outros. O tipo de auto cicatrização é a natural (autógeno), que utiliza materiais já existentes da mistura. Para que ocorra este processo o ECC deve apresentar grãos de cimento não hidratados, para que a hidratação tardia desses grãos cause o preenchimento das fissuras com os hidratos formados. Além disso deve haver a presença de água para que seja possível a hidratação desses grãos (HERBERT e LI, 2013).

Wang e Li (2007) comentam que é necessária uma elevada concentração de cimento no compósito, chegando a se utilizar duas a três vezes mais do que um concreto convencional. Este fato que proporciona a presença de grãos de cimento não hidratado na produção do ECC, originando uma reserva para que ocorra o comportamento *self-healing*. A Figura 9 ilustra o processo de múltipla fissuração induzida com uma pré-carga para a realização dos ensaios de durabilidade nos compósitos pós-fissurados. Para o controle de abertura de fissuras, os autores fixaram a deformação de 3 mm, e atingindo esse valor o ensaio era encerrado.

Figura 9 - Processo de múltipla fissuração num corpo de prova para ensaios de durabilidade



Fonte: ŞAHMARAN et al. (2009).

### 3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS – ECC

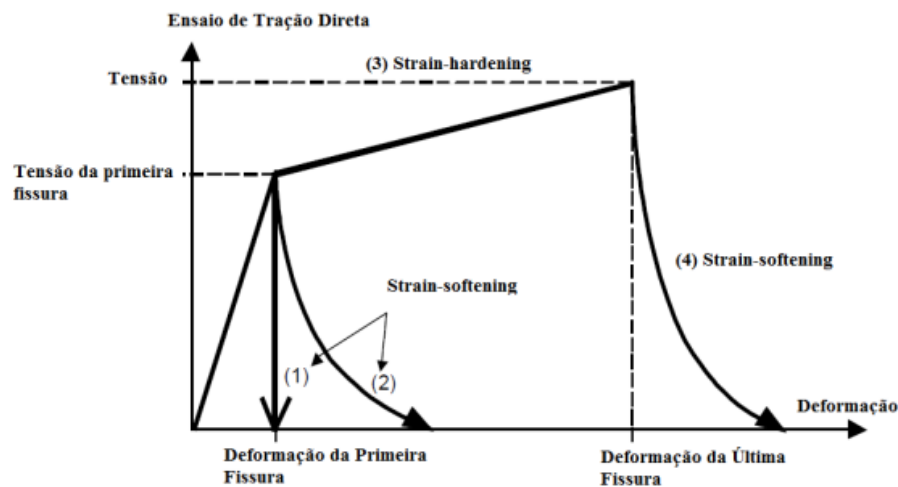
Li (2003) esclarece que a característica distinta do ECC para os demais compósitos cimentícios é a sua adição máxima de 2% de fibras em relação ao volume do compósito, capaz de resistir a altas tensões de tração e cisalhamento, devido à alta ductilidade.

Esta alta ductilidade proporciona uma elevada capacidade de absorção de energia e uma alta capacidade de deformação quando solicitado um carregamento (*strain-hardening*). Este processo ocasiona no ECC diversas fissuras de pequena espessura durante o carregamento, devido a interação fibra-matriz do compósito que foi projetado por meio das teorias de micromecânica e da mecânica da fratura.

Este comportamento proporciona o desenvolvimento de múltiplas fissuras através da transferência de carregamentos entre as fibras existentes. Na transferência de carga a fibra carrega outro ponto criando uma fissura, este processo repetitivo resulta na múltipla fissuração e o aumento da ductilidade do compósito, proporcionando que o compósito não rompa bruscamente e obtenha deformações superiores a 3% (LI, 2003).

Righi (2015) exemplifica o comportamento *strain-hardening* e compara com o comportamento *strain-softening*, o comportamento *strain-softening* após a abertura da primeira fissura perde sua capacidade de suportar carregamento (tensões), já o comportamento *strain-hardening* após a abertura da primeira fissura tem a capacidade de suportar o carregamento, mantendo o nível de tensão gerando um patamar de deformação pós primeira fissura, esses dois tipos de comportamentos podem ser observados na Figura 10.

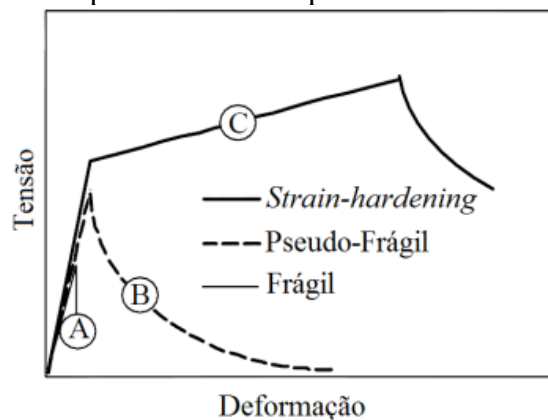
Figura 10 - Concepção dos comportamentos *strain-softening* e *strain-hardening* sob tensões de tração uniaxial



Fonte: JSCE (2008) apud Righi (2015).

Li (1998) ainda dividi em três tipos de comportamento de ruptura desses tipos de compósitos como pode ser observado na Figura 11: Frágil, Pseudo-Frágil e *Strain-hardening*. Li (1998) explica que na curva A é considerada uma fratura frágil, como o caso de concretos convencionais, por possuir uma súbita tensão com o surgimento da primeira fissura, a uma deformação específica última da ordem de 0,01%. As rupturas pseudo-frágeis, como ilustrada pela curva B, são caracterizadas por uma curva linear com um relaxamento de tensões após a abertura da primeira fissura, causada pela zona de interface pasta-agregado, ligações das partículas de cimento e com as fibras. Já o comportamento de *strain-hardening* são caracterizados pela capacidade para sustentar níveis crescentes de carregamento após a primeira fissura, e possuir elevadas deformações antes de romperem definitivamente (curva C).

Figura 11 - Três tipos de comportamento na ruptura observados em materiais cimentícios



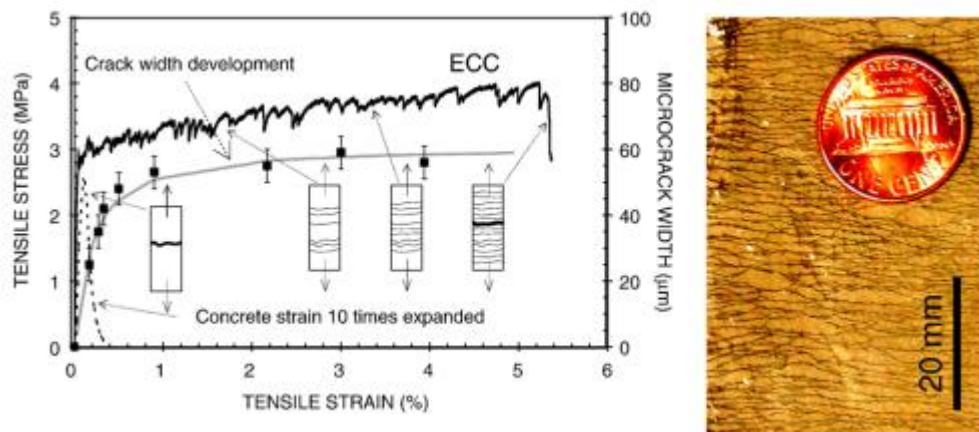
Fonte: Li (1998).



Para se obter o comportamento de *strain-hardening* nos ECCs é necessário que haja uma reserva de grãos não hidratados na produção e mistura deste compósito. Normalmente esses compósitos são produzidos com elevados teores de cimento normalmente em proporções de duas a três vezes maiores do que em concretos convencionais. A utilização desses maiores teores proporciona um controle reológico facilitando a dispersão das fibras e permitindo um controle melhor da tenacidade da matriz (WANG e LI, 2007).

A Figura 12 demonstra o comportamento *strain-hardening* e o processo de múltipla fissuração que ocorre simultaneamente com esse comportamento. É possível observar que a abertura da primeira fissura é seguida por um aumento ou pelo menos uma estabilização na capacidade de carga do compósito. Esse comportamento ocorre porque o carregamento é inicialmente suportado pela matriz cimentícia e logo após é transferido para as fibras de pequeno diâmetro com uma alta resistência a tração e com uma boa aderência à matriz que facilita a transferência de esforços da matriz para a fibra. Estas fibras conseguem suportar as cargas e transferir o carregamento para outro ponto da matriz, provocando a abertura de uma nova fissura, que irá mobilizar e transferir o carregamento às fibras existentes nesta nova região. Este mecanismo se repete de forma sucessiva, permitindo que microfissuras múltiplas se desenvolvam ao longo do compósito, mas preservando a integridade global e evitando a ruptura do elemento (GARCEZ, 2009).

Figura 12 - Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional



Fonte: SAHMARAN *et al.* (2009).

### 3.3 AVANÇOS DOS ESTUDOS DO ECC NO GRUPO DE PESQUISA LEME

O ECC teve o seu primeiro estudo realizado no Brasil com o trabalho de Garcez (2009) por intermédio do grupo de pesquisas no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais - LEME



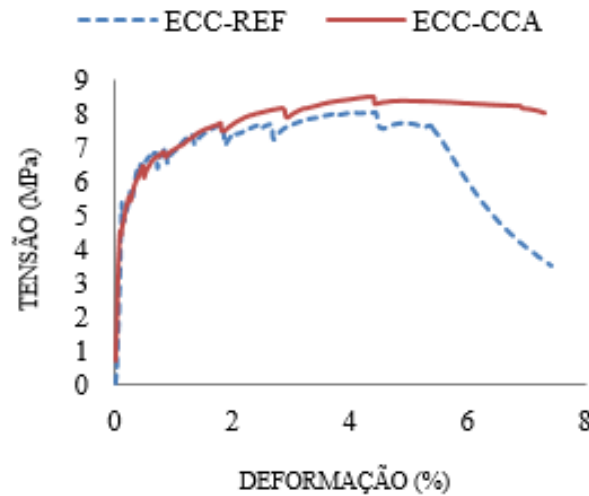
na UFRGS. A autora estudou a viabilidade do uso de fibra de polipropileno (PP) substituindo a fibra de PVA como material de *overlay*, ou seja, recapeamento de pavimentos. Outro ponto que a autora iniciou os estudos foi a diferenciação entre os cimentos do tipo I, III e V-ARI e a utilização da cinza volante na matriz cimentícia do ECC, a partir daí foi verificado o comportamento mecânico deste compósito com ensaios de flexão e fadiga, visando o dimensionamento de diversas alturas de recapeamento, e pôr fim a autora realizou uma análise do ciclo de vida.

Garcez (2009) conseguiu manter o comportamento característico do ECC de *strain-hardening* e o desenvolvimento da múltipla fissuração, que atingiram, em média, deformações específicas da ordem de 5 a 8%, inclusive para uma abertura de fissura média de 60  $\mu\text{m}$  para as novas fibras de PP, diante de uma abertura de 10  $\mu\text{m}$  para as tradicionais fibras de PVA.

O primeiro trabalho utilizando a incorporação da CCA na matriz cimentícia dos compósitos foi o de Righi (2015), a autora realizou diversas dosagens com o uso desse resíduo agroindustrial sem controle de queima. Foi realizada uma moagem em laboratório dessa cinza nos tempos de 1, 2, 4, 6, e 8 horas com substituições de 10%, 20% e 30% e realizados ensaios mecânicos para caracterização desse compósito. Como resultado mais promissor, o compósito com 30% de cinza de casca de arroz com um tempo de moagem de 8 horas apresentou os melhores resultados com o comportamento *strain-hardening* e o desenvolvimento da múltipla fissuração.

A Figura 13 ilustra os resultados mais promissores encontrados por Righi (2015), é possível observar a curva tensão-deformação dos compósitos sob flexão a quatro pontos, no qual o compósito com CCA (ECC-CCA) que possui 30% de CCA moída por 8 horas mostrou um comportamento *strain-hardening* evidente e com o processo de múltipla fissuração desenvolvido, afirmando que o uso da cinza de casca de arroz favorece o desenvolvimento das características principais do ECC desenvolvido por Li (2003), assim tornando a cinza de casca de arroz como um elemento importante na constituição do traço dos compósitos brasileiros.

Figura 13 - Curva tensão-deformação dos compósitos sob flexão a quatro pontos



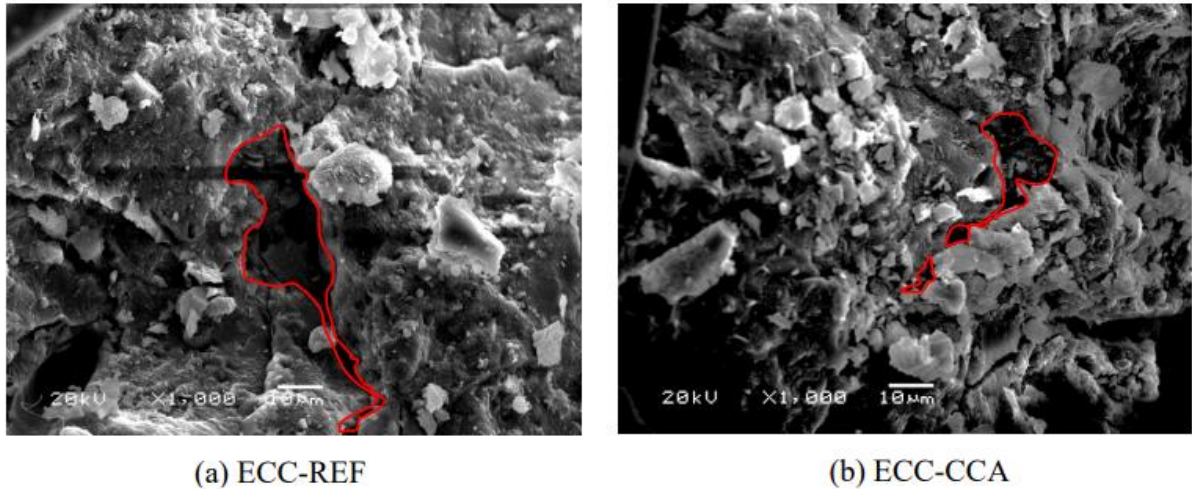
Fonte: adaptado de RIGHI (2015).

Um outro trabalho que foi desenvolvido em conjunto com o de Righi (2015) foi o trabalho da autora Pereira da Costa (2015), o que difere os trabalhos é que a autora estudou a durabilidade dos compósitos com o uso de 30% de CCA moída por 8 horas e comparou com dois tipos distintos de concretos, um convencional e outro para pavimentação.

Pereira da Costa (2015) estudou a estrutura de poros, ensaios de penetração de íons cloretos, ensaios de retração e ensaios de desgaste abrasivo nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. Todos os ensaios realizados pela autora foram realizados em corpos de prova íntegros, moldados e já ensaiados para cada ensaio. Sabe-se que essa classe de compósitos foi desenvolvida para trabalhar no estado fissurado, visto que a sua característica principal é o processo de múltipla fissuração.

Pereira da Costa (2015) concluiu que utilizar a CCA vai além de ganhos relacionados apenas a destinação de um resíduo. O compósito com substituição do cimento pela cinza possui vantagens que unifica um conjunto de fatores desejáveis para aplicação de um material em estruturas diversas, isto é, ganhos mecânicos, de sustentabilidade ambiental e de durabilidade. Isso se explica pela Figura 14, onde através de imagens de uma microscopia eletrônica por varredura (MEV) é possível visualizar que mesmo diante da presença de alguns poros dentro do ECC-CCA eles apresentam reduzida conectividade. Essa configuração vai de encontro aos resultados que indicaram redução de cerca de 70% da absorção de água por capilaridade, e que por consequente favoreceu uma avaliação qualitativa “baixa” para penetrabilidade de íons de cloreto em uma análise de 91 dias.

Figura 14 - Comparação por MEV para identificação dos poros capilares nos compósitos



Fonte: Pereira da Costa (2015)

Um outro trabalho que também utilizou a CCA na matriz cimentícia dos compósitos foi o de Rodríguez (2018). Partindo dos resultados que demonstraram que as misturas de ECCCCA apresentaram uma resistência à tração na flexão média ( $f_t$ ) de 8,2 MPa e resistência à compressão simples média ( $f_c$ ) de 50 MPa diante de valores médios de 6,8 MPa e 36 MPa, respectivamente para o ECCRef, o autor realizou o dimensionamento de diferentes alturas de recapeamento (de 50 e 30 mm de espessura) sobre pavimentos flexíveis. O autor realizou ensaios de pista experimental dos compósitos com e sem o uso da CCA quando aplicados sob o pavimento asfáltico e concluiu que compósitos com o uso da CCA favorece melhor absorção das deformações aplicadas pelo simulador de tráfego.

Pasinatto (2018) iniciou os primeiros estudos desse compósito quando aplicados em elementos estruturais como uma opção de reparo/reforço. Este trabalho teve como foco principal analisar a viabilidade do uso desse compósito quando aplicado em reparo/reforço de vigas corroídas. A autora chegou à conclusão de que o traço de ECC necessita de melhores adaptações visando um aumento de durabilidade e principalmente desenvolver mecanismos para a fixação desse material em vigas que necessitam desse reparo.

Molz (2021) em seu trabalho estudou a utilização do ECC como pavimento em tableiros metálicos, verificando o comportamento da estrutura em termos de cura, aderência e retração. A pesquisa foi dividida em dois tipos de traços, ECC referência e outro ECC com 20% de cinza de casca de arroz substituindo ao cimento, ambos os traços com aditivo acelerador de cura. Os resultados da autora demonstraram que o ECC com cinza de casca de arroz apresentou uma menor trabalhabilidade, porém exibiu maiores resistências mecânicas.

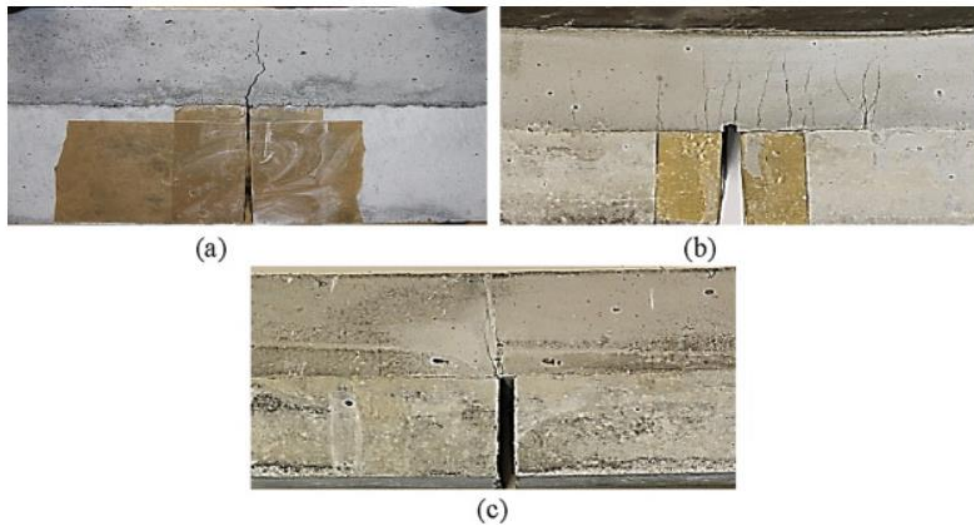
E por fim, um dos últimos trabalhos publicados até o momento, Righi (2022) em seu doutorado realizou um compilado de todas as informações já estudadas pelo grupo de pesquisa, e todos os trabalhos indicavam uma perda de trabalhabilidade do traço ECC. Por este motivo iniciou os estudos sobre a reologia do ECC, avaliando propriedades reológicas de traços com 30%, 50% e 70% de substituição de cimento por CCA. A autora também realizou estudo sobre análise de ciclo de vida desses mesmos traços de ECC. Os resultados encontrados pela autora demonstraram que avanços sobre a reologia do ECC precisam ser estudados, incluindo a possibilidade de novas combinações de pozolanas.

### 3.4 APLICAÇÕES DO ECC NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O ECC tem suas aplicações em duas grandes áreas em estruturas viárias e na construção civil. Este tipo de compósito teve muitos estudos visando a possibilidade de reparo ou reabilitação de pavimentos rígidos e flexíveis pela sua alta resistência e ductilidade. Também vem sendo utilizado como material de reparo de superfície para aumentar a durabilidade e a capacidade de suporte de carga do elemento estrutural até mesmo em estruturas com perda de capacidade de suporte de carga causada pelo corrosão de armaduras (DING; YU; LI, 2022).

Um exemplo de estudo para aplicação do ECC como reparo/reforço de pavimento rígido é em aeródromos da China. A pavimentação rígida, mesmo que com elevada capacidade de carga, em condições de manutenibilidade inadequadas pode vir a se deteriorar após 5 e 7 anos de uso. Ma e Zhang (2020) propuseram um estudo com uma sobreposição (*overlay*) de ECC com fibra de PVA e suplementação por cinza volante no pavimento de concreto de aeródromo para prevenir e retardar fissuras reflexivas. Conforme imagens da Figura 15, foram realizadas três combinações para análise: cobertura de pavimento com concreto de cimento Portland convencional (a); Cobertura com ECC com  $k=25\text{mm}$  (b); e cobertura por ECC com  $k=0\text{mm}$ . O  $k$  indica uma delaminação preexistente entre camadas, artifício utilizado para reduzir a resistência à fratura da interface entre base e camada de recapeamento. Ao aplicar no conjunto cargas sucessivas em flexão a quatro pontos os autores concluíram que a sobreposição de ECC aumenta a capacidade de carga em 100% e a capacidade de deformação em sete vezes o do sistema convencional. Além disso, definir a delaminação interfacial inicial entre o ECC e as camadas de concreto é benéfico para induzir as características de endurecimento por deformação e fissuras múltiplas do ECC, e retardar o desenvolvimento de fissuras reflexivas. A partir disso concluíram que a sobreposição de ECC aumentou a vida útil em fadiga do sistema de pavimento de aeródromo.

Figura 15 - Padrões de fissuração de diferentes sistemas de sobreposição

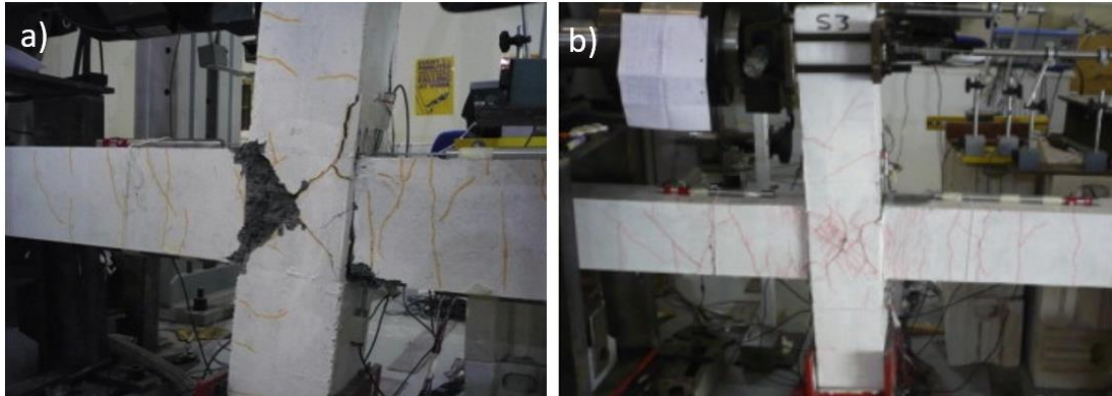


Fonte: Ma e Zhang (2020)

Segundo Li (2003) o ECC também tem excelente capacidade de resistir a esforços de cisalhamento. Esse tipo de carregamento também desenvolve o comportamento de múltipla fissuração, com fissuras alinhadas na direção normal à direção das tensões principais de tração. O ECC possui um comportamento à tração dúctil e como consequência a resposta ao cisalhamento também é dúctil.

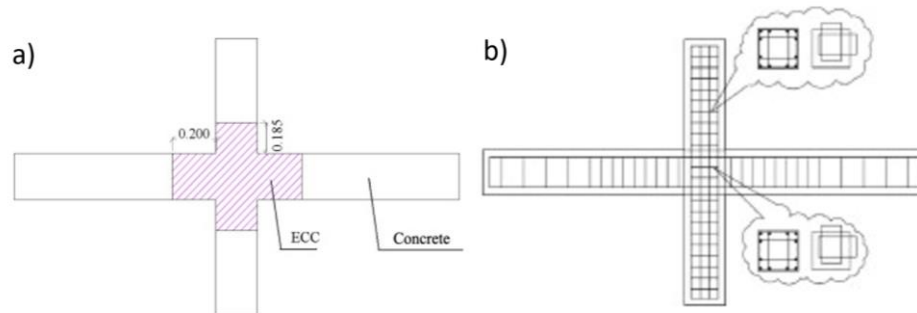
Qudá e Maalej (2014) verificaram o desempenho das ligações viga-pilar melhoradas com ECC quando comparadas a transições de concreto convencional. Os resultados dos testes indicaram que o uso de material ECC na zona plástica da conexão como substituto do concreto e substituição parcial da armadura transversal pode aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento da junta, a capacidade de absorção de energia e a resposta à fissuração sem qualquer indicação de ruptura por cisalhamento nem no núcleo da junta nem nos outros membros conectados à junta como indicam as imagens da Figura 16, diante da configuração de ensaio da Figura 17. Os deslocamentos foram realizados por terremotos induzidos com ciclos de deslocamentos laterais no topo da coluna.

Figura 16 - Padrões de rachadura conexão viga-pilar (a) estrutura controle (b) estrutura com ECC (c) condição de amostra



Fonte: Qudá e Maalej (2014)

Figura 17 - Padrões de ensaios para teste de cisalhamento na conexão viga pilar em situação de terremoto

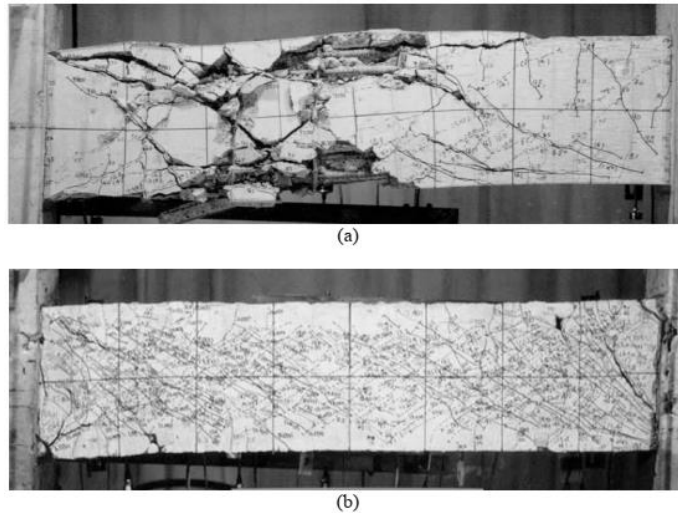


Fonte: Qudá e Maalej (2014)

Li (2003) para verificar a atuação do ECC em elementos estruturais, ensaiou pilares sem estribos em concreto convencional e em ECC. Na primeira situação o elemento construtivo atingiu facilmente o colapso, demonstrando menos capacidade de conter o lascamento. Já na configuração com o ECC existe uma tolerância maior ao dano da estrutura. Diante das conclusões do estudo, o autor afirma ser possível viabilizar elementos com uma menor quantidade ou até mesmo dispensar o uso de armadura de cisalhamento.

Fukuyama *et al.* (2000) estudaram o comportamento de elementos estruturais sob carregamentos de cisalhamento em ciclos cíclicos comparando o ECC com concreto convencional. A Figura 18 ilustra o resultado final do elemento ensaiado com concreto convencional e com o ECC.

Figura 18 - Padrão de degradação sob carregamento cíclico de cisalhamento (a) concreto convencional, e (b) ECC



Fonte: FUKUYAMA *et al.*, (2000).

Um estudo realizado por Rokugo *et al.* (2005) realizou uma aplicação do ECC em uma parede de contenção de terra (18m de largura e 5m de altura) danificada por rachaduras por reação álcali-sílica. A decisão de usar ECC para o reparo de 50 a 70 mm de espessura de sobreposição baseou-se na necessidade de evitar que as rachaduras no concreto do substrato refletissem na camada de reparo. Para monitoramento, a parede foi dividida em 9 blocos de reparo com um bloco adicional (bloco 10) deixados sem conserto. Para o reparado dos blocos, dois tipos de ECC foram utilizados um contendo 1,5% de fibras híbridas de PVA e PE (blocos 1-4), e outro contendo 2,1% de fibras de PVA (blocos 5-8). Em cada bloco, foi colocado um reforço de tela de arame soldado, outras com um reforço de metal expandido ou outras sem reforço. Desde que o reparo ocorreu em 2003, esta parede foi monitorada continuamente. A Figura 19 (a) ilustra a parede de contenção de terra com danos causados pela reação álcali-sílica, (b) após reparo aos 12 meses, e (c) após reparo aos 24 meses. Com sete após o reparo pelo ECC ainda não era observada a abertura de fissuras, enquanto com a argamassa normal em apenas um mês de reparo já apresentava degradações.

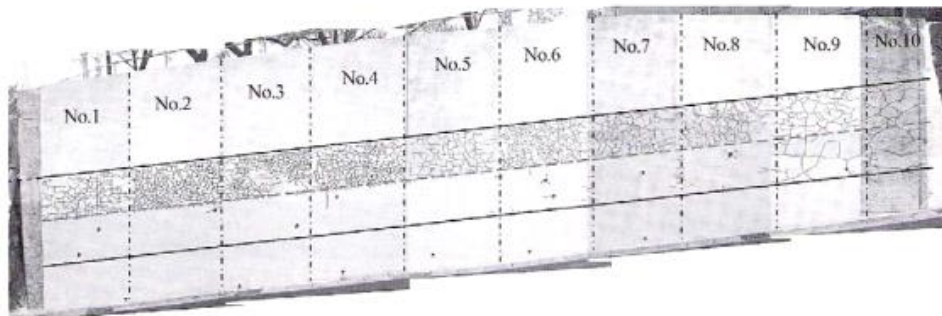
As larguras das fissuras nos blocos de reparo de ECC foram menores que 50  $\mu\text{m}$  e 120  $\mu\text{m}$  aos 10 e 24 meses, respectivamente. Em contrapartida a largura das fissuras no reparo de argamassa foram de 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  aos 10 e 24 meses, respectivamente, muito superior ao ECC.



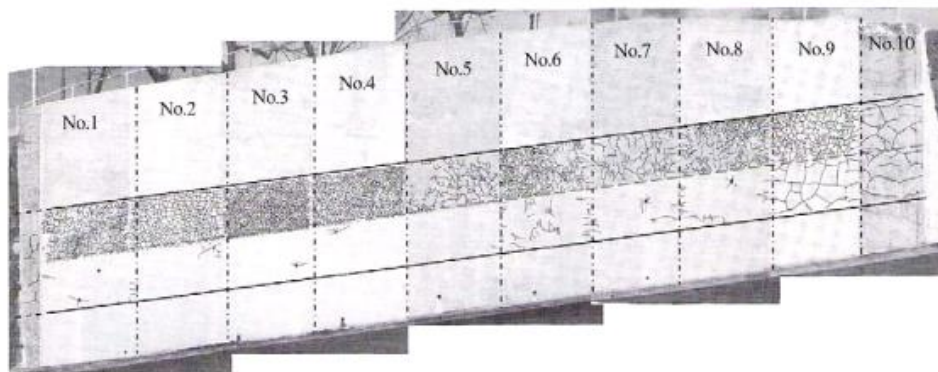
Figura 19 - Comportamento de uma parede de contenção de terra reparada (a) Antes da reparação e mostrando dano pela reação álcali-sílica, e (b) após reparo aos 12 meses, e (c) após reparo aos 24 meses. Os blocos de 1 a 8 foram usados o ECC, o bloco 9 usou-se uma argamassa de reparo normal e o bloco 10 foi deixado não reparado



(a)



(b)



(c)

Fonte: ROKUGO *et al*, (2005).

### 3.5 INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA MATRIZ DO ECC - GREENER ECC

Além de dar origem ao ECC, o grupo de pesquisa liderado pelo Professor Li também foi o pioneiro a incorporar materiais suplementares na matriz cimentícia do ECC. As cinzas volantes hoje são os materiais mais utilizados, seus estudos iniciaram por Wang e Li (2007)



com o intuito de que esse material pudesse melhorar as propriedades mecânicas do ECC inclusive aquelas relacionadas ao desenvolvimento de *strain-hardening*. Os autores identificaram que a cinza volante proporcionou uma melhora no controle da tenacidade da matriz em torno de 2-3% em relação ao ECC apenas com cimento Portland. E, também foi notado que a cinza volante melhorou a múltipla fissuração do ECC.

Wang e Li (2007) ainda comentam que a substituição parcial do cimento Portland por cinza volante se torna uma alternativa economicamente mais atrativa, pois para que ocorra o comportamento mecânico do ECC é necessário utilizar uma elevada concentração de cimento. Garcez (2009) em seu estudo também pesquisou misturas de ECC com cinza volante, e por meio de uma análise de ciclo de vida concluiu que esta substituição pode colaborar na minoração de emissões de CO<sub>2</sub> globais resultantes da produção do cimento.

O cimento é o material mais caro entre todos os outros materiais constituintes no concreto, por exemplo. O processo de produção do cimento Portland é altamente intensivo em energia que requer cerca de 4 GJ de energia por tonelada métrica de produto acabado. Devido às suas altas exigências de energia, pesquisas consideráveis têm sido realizadas para descobrir os materiais cimentícios alternativos que possam substituir parcialmente o cimento nas misturas. Materiais prontamente disponíveis e menos intensivos em energia que possuem propriedades cimentícias podem ser encontrados a partir de subprodutos industriais e agrícolas (JUENGER e SIDDIQUE, 2015; RAHMAN *et al.* 2023).

Nas últimas décadas, uma vasta pesquisa está em andamento para a utilização de produtos agrícolas (KARIM *et al.*, 2013; ZAIN *et al.*, 2011), industriais e resíduos de usinas termelétricas (SHUKLA *et al.*, 2011) na fabricação de concreto como substituto parcial do cimento. Vários materiais com propriedades cimentícias como cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, cinza combustível de óleo de palma, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e CCA têm desempenhado um papel importante na produção de concreto e argamassa de alta resistência (IBRAHIM *et al.*, 2014; KARIM *et al.*, 2013; LE *et al.*, 2015; SHOJI *et al.*, 2022). O consumo desses subprodutos como materiais suplementares nas indústrias de cimento e concreto minimiza tanto o custo quanto a energia utilizada dentro das plantas (ANTIOHOS *et al.*, 2013).

Esses materiais suplementares são denominados como pozolanas por causa de sua capacidade de reagir com o cimento ou o produto de hidratação do cimento (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2014). As pozolanas contribuem para as propriedades de

endurecimento da argamassa ou do concreto de duas maneiras; ou seja, pelo efeito de *filler* ou pela reação pozolânica propriamente dita.

O efeito físico (*filler*) é definido como o arranjo adequado de partículas menores no corpo de prova de concreto ou argamassa que aumenta a densidade, bem como a resistência à compressão sem qualquer reação química (GIVI *et al.*, 2010). Essas partículas menores preenchem os vazios interespecíficos das misturas. Como resultado, produz concreto com maior resistência à compressão em comparação com partículas de pozolana maiores (RUKZON e CHINDAPRASIRT, 2013).

Por outro lado, o efeito pozolânico é governado pela reação química entre pozolanas e cimento ou produtos de hidratação do cimento. Sabe-se que as pozolanas reagem com a Portlandita, (CH) formada na hidratação do cimento, gerando produtos de hidratação resistentes. O processo de reação da pozolana com o hidróxido de cálcio contribui para a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (A-C-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H) gerando, assim, um aumento de resistência mecânica, diminuição da permeabilidade e, também, um aumento na durabilidade (CORDEIRO, 2009).

Outro fator que favorece o uso de pozolanas na matriz cimentícia é a diminuição do calor de hidratação do cimento. Para Metha e Monteiro (2014), os compostos do cimento Portland são produtos de reações de alta temperatura que não estão em equilíbrio e, por isso, estão em um estado de energia elevada. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de baixa energia e o processo é acompanhado pela liberação de calor.

Em suma, as reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de calor pela hidratação dos compostos individuais podem ser diminuídas quando se utilizam materiais pozolânicos nas misturas cimentícias.

### 3.5.1 Combinações Binárias e Ternárias

Já é sabido que existem inúmeros trabalhos e pesquisas sobre o uso de materiais suplementares na matriz cimentícia de concretos e argamassas, mas existem ainda lacunas pouco exploradas. Quando se utilizam dois ou mais materiais suplementares, sejam em misturas binárias, ternárias ou até mesmo quaternárias, nos deparamos com os efeitos sinérgicos

causados pela mistura, devido às interações físico-químicas que ocorrem na microestrutura tornando-a mais densa do que nas misturas simples (FRANCO DE LIMA, 2018).

Isaia (1997) foi um dos trabalhos pioneiros sobre combinações binárias e ternárias de pozolanas, utilizando cinza de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa em concretos, com teores de substituição ao cimento entre 10% e 50%.

Seguindo na mesma linha de pesquisa, o estudo de Antiohos *et al.* (2007) desenvolveu uma pesquisa sobre a sinergia entre misturas ternárias de diferentes cinzas volantes; Zelic *et al.* (2009) trabalhou com misturas ternárias de cimento, *filer* calcário e sílica ativa; e Dave *et al.* (2016) com misturas quaternárias de sílica ativa, escória de alto forno, metacaulin e cinza volante.

Isaia (2016), menciona que quando se utiliza uma pozolana menos reativa (ou *filer*), junto com outra(s) mais reativa(s), existe uma sinergia entre elas, devida ao efeito pozolânico e efeito físico, resultando um acréscimo para o desempenho da variável estudada, do que a simples soma aritmética das misturas binárias em relação às ternárias.

As ações químicas e físicas entre misturas binárias ou ternárias dependem do nível de resistência do concreto/argamassa (porosidade e interface pasta/agregado), e dependem do efeito pozolânico das pozolanas utilizadas. Erhart *et al.* (2014) em seu estudo que concretos com 20% de CCA acrescido de 50% de agregados reciclados de concreto apresentaram um melhor resultado a compressão axial em relação aos outros traços estudados.

Zunino e Lopez (2016) apresentam os efeitos físicos e químicos de misturas de CCA com pozolana natural, a partir do uso de *filers* calcários inertes, em que os resultados de resistência apresentaram acréscimo de 78% devido ao efeito químico e 22% de efeito físico.

### 3.5.2 Combinações Binárias e Ternárias em ECC

Assim como já demonstrado no subitem anterior, o uso de combinações binárias e ternárias também são comuns em estudos do ECC com intuito de baratear a produção e aumentar a característica de *greener* ECC. Zhu *et al.* (2014) estudaram a combinação da cinza volante com a escória de alto forno (EAF) como combinação binária de materiais suplementares. As proporções estudadas foram com 70% de cinza volante; 60% de cinza volante e 10% EAF; 50% de cinza volante e 20% de EAF e 40% de cinza volante e 30% de EAF. Para todas as combinações binárias de cinza volante e EAF foi notado um aumento da

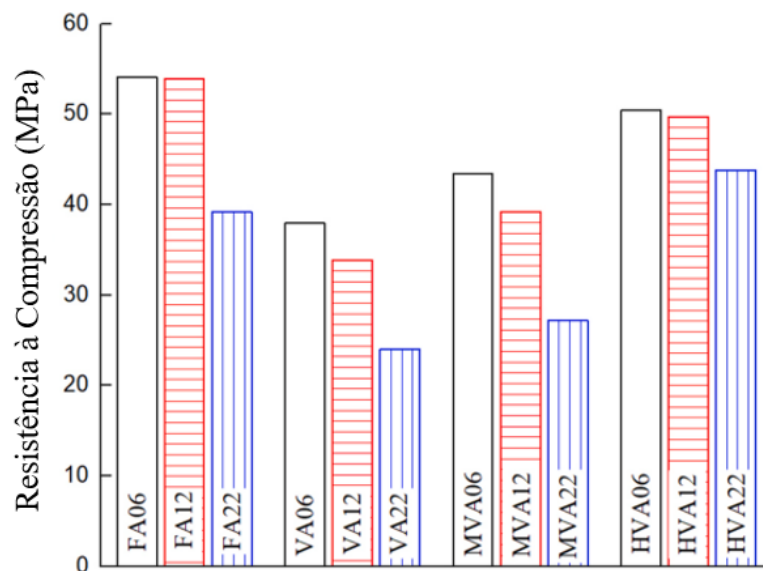
capacidade de carga depois do aparecimento da primeira fissura com deformações variando entre 2,50% e 3,80% para todas as combinações (ZHU *et al.*, 2014).

Zhu *et al.* (2014) concluíram que para as combinações (cinza volante + cimento; EAF + cimento) obtiveram um aumento da deflexão e abertura de fissuras. Também foi analisado que a combinação binária de escória de alto forno apresentou uma múltipla fissuração mais acentuada do que a de cinza volante. Esta melhor abertura de fissuras pode estar correlacionada ao formato das partículas dos materiais suplementares, o formato angular da partícula de EAF facilita o ancoramento das fibras e proporciona o desenvolvimento da múltipla fissuração.

Já nas combinações ternárias, Zhu *et al.* (2014) perceberam que a combinação cinza volante + sílica ativa + cimento apresentaram menores deflexões e uma abertura de fissuras mais suave em relação as demais combinações ternárias. E também foi observado que as pozolanas utilizadas melhoraram a rigidez da matriz, proporcionando um aumento de resistência para a abertura da primeira fissura.

Zhu *et al.* (2023) estudaram combinações binárias e ternárias usando cinza volante e cinza vulcânica como materiais suplementares nas misturas de ECC. A Figura 20 ilustra os resultados de resistência à compressão utilizando diversas combinações de materiais suplementares na matriz cimentícia do ECC na idade de ruptura de 28 dias de cura.

Figura 20 – Resultados de resistência à compressão de misturas de ECC com diferentes materiais suplementares



Fonte: ZHU *et al.* (2023).

Os autores Zhu et al (2023) comentam em seu estudo que a utilização de combinações da cinza vulcânica com cimento apresentou menores resultados de resistência à compressão quando comparados com as combinações de cimento + cinza volante. Entretanto nas

combinações ternárias de cimento + cinza volante + cinza vulcânica os resultados de resistência à compressão aumentam seu desempenho, demonstrando que combinações de diferentes materiais suplementares podem proporcionar o melhor empacotamento de partículas da matriz cimentícia o que favorece no aumento do desempenho mecânico.

### 3.6 ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO ECC

Os critérios de projeto do ECC baseados na teoria da micromecânica são fundamentais para a compreensão das interações mecânicas entre a matriz e a fibra e na interface fibra-matriz. Para obter a alta ductilidade desejada, a fibra deve ser uniformemente distribuída por toda a matriz do ECC. Porém em alguns casos, devido à falta de dispersão das fibras uniformemente pode afetar as propriedades mecânicas do ECC, introduzindo variáveis indesejadas. Outro fator que pode promover um descontrole das variáveis são os materiais utilizados, de diferentes características como tipo, tamanho e quantidade, que podem ocasionar uma perda de trabalhabilidade e também perda nas propriedades mecânicas do estado endurecido do ECC (LI, 1998; YANG *et al.*, 2009).

Fatos como esses restringem a ampla aplicação e usabilidade do ECC na construção civil. Muitas pesquisas sobre as misturas de ECC, normalmente variam apenas a proporção de substituição do cimento por um material pozzolânico, mantendo outros parâmetros constantes. No entanto para que se obtenha um bom desempenho do ECC é necessário aplicar critérios da micromecânica para modificar a trabalhabilidade e as propriedades reológicas destas misturas (WANG e LI, 2007; SAHMARAN e LI, 2009).

Alguns estudos no meio acadêmico internacional sugerem correlações entre a viscosidade da argamassa e a dispersão das fibras. Também sugerem que haja um controle da viscosidade da argamassa fresca com ajustes na relação água/aglomerante, uso do aditivo superplastificante e adições minerais, para se obter resultados dos ECC no estado endurecido e uma baixa variabilidade nos resultados (BUI *et al.*, 2013; KUDER *et al.*, 2007; OZYURT *et al.*, 2007; LI e LI, 2013).

Um estudo pioneiro sobre estudo reológico do ECC foi desenvolvido por Li e Li (2013), desenvolvendo uma faixa ótima de viscosidade do ECC para que ocorresse uma melhor dispersão das fibras. Foram testadas sete misturas de ECC variando um modificador de viscosidade. Os ensaios na matriz cimentícia do ECC (sem Fibra) foram: viscosidade plástica, tempo de fluxo pelo Cone de Marsh e trabalhabilidade por meio do mini *slump*. Já para o ECC

Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

com as fibras dispersas na mistura foram realizados ensaios de mini *slump* e ensaios mecânicos no estado endurecido.

Hao-Liang Wu *et al.* (2020) estudaram a influência da substituição parcial do cimento por argila calcinada na trabalhabilidade do ECC por método do mini *slump*. Os autores observaram neste estudo que a trabalhabilidade do ECC é afetada devido ao tamanho da partícula da argila calcinada no ECC. Por isso, o superplastificante foi ajustado até atingir o valor de abertura de escoamento de 160 mm a 200 mm na proporção a/c de 0,3 a 0,4.

Seguindo nessa mesma linha de estudos sobre o comportamento reológico do ECC, Righi (2022) também estudou o aumento do aditivo superplastificante nas misturas de ECC com uso de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz. Foram realizados ensaios reológicos na matriz cimentícia e na mistura do ECC com fibras. Para a matriz foram realizados ensaios em um reômetro para avaliar a viscosidade plástica e para avaliar a trabalhabilidade foi utilizado o ensaio de mini *slump flow* e o tempo de fluxo pelo cone de Marsh. Os resultados encontrados pela autora demonstraram que não houve nenhuma melhora na trabalhabilidade conforme se aumentou o teor de aditivo.

Righi (2022) ainda cita que para que ocorra uma maior trabalhabilidade das misturas do ECC é necessário realizar um estudo mais crítico sobre o empacotamento de partículas do ECC. A autora percebeu que nas suas misturas ocorreu um excesso de partículas grossas e uma deficiência de partículas finas. Mesmo sendo utilizado uma pozolana mais fina que a partícula do cimento não foi suficiente para suprir o déficit de partículas finas do traço.

Com isso este estudo visa dar continuidade ao estudo iniciado por Righi (2022), de modo a estudar as propriedades reológicas de misturas distintas com combinações binárias e ternárias de aglomerantes, com o intuito de melhorar o empacotamento de partículas das misturas do ECC já estudadas pelo grupo de pesquisa LEME-UFRGS.

## 4 METODOLOGIA

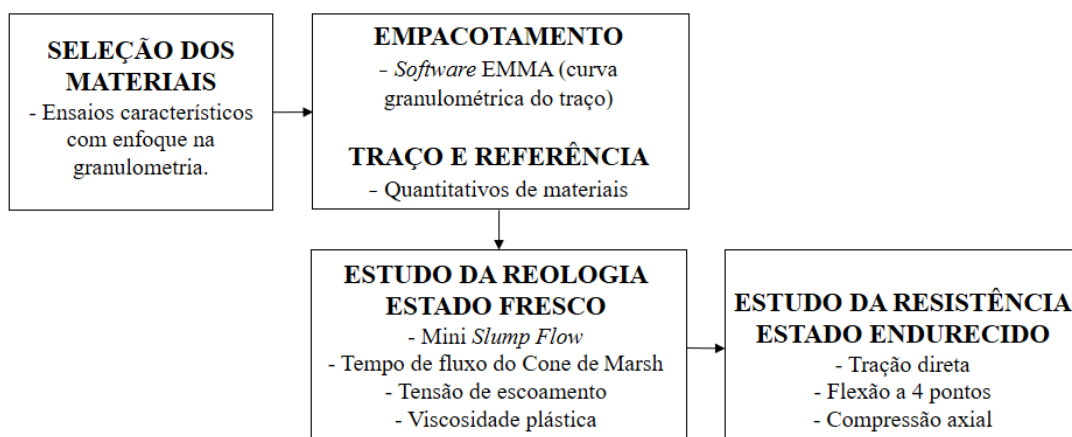
Este capítulo descreve as bases do programa experimental elaborado para que seja atingido o objetivo principal do trabalho. O método é dividido em quatro etapas conforme Figura 22, cujos objetivos e métodos são expressos a seguir. A primeira fase do método deste estudo incidiu na seleção e caracterização dos materiais a serem utilizados. A caracterização teve foco na granulometria e massa específica dos materiais com o respaldo ao estudo de traço e dosagem por meio de cálculo e análise computacional.

A fase dois destinou-se aos processos de dosagem com foco no empacotamento de partículas tendo como base o traço padrão de Righi (2015). Os ajustes foram realizados por meio de auxílio computacional do programa *Elken Material Mix Analyzer* (EMMA), o qual demonstrou a necessidade de definição granulométrica para a areia.

A mistura dos materiais em uma argamassadeira contemplou a terceira fase, na qual se seguiu com os ensaios em estado fresco e moldagem dos corpos de prova em pequena escala. Espera-se a partir dos resultados desta etapa verificar se há melhoras significativas na trabalhabilidade com a incorporação de um novo material para combinação ternária de aglomerante, a escória de alto forno.

Por fim, a quarta etapa integra a análise mecânica dos compósitos, através da realização de ensaios em estado endurecido como os de flexão a quatro pontos, tração direta e compressão axial, conforme Figura 21.

Figura 21 - Etapas da pesquisa



Fonte: a autora, 2023.

## 4.1 MATERIAIS

Neste item os materiais empregados no programa experimental são apresentados junto às suas características básicas. Com exceção a CCA, que é um resíduo agroindustrial não comercializado, todos os materiais são produtos disponíveis no comércio brasileiro.

### 4.1.1 Cimento Portland

O ECC foi produzido com a utilização do Cimento Portland do tipo CP V-ARI de alta resistência inicial produzido pela empresa Cimento Nacional. Sua caracterização físico, química e mecânica está disposta na Tabela 3, cujos dados são fornecidos pelo fabricante. A granulometria tem como diâmetro médio de partícula 10,92  $\mu\text{m}$ , a mesma foi ensaiada por difração de raio X (DRX) em um equipamento chamado de granulômetro, marca Cilas, modelo 1064, realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS) (Figura 22).

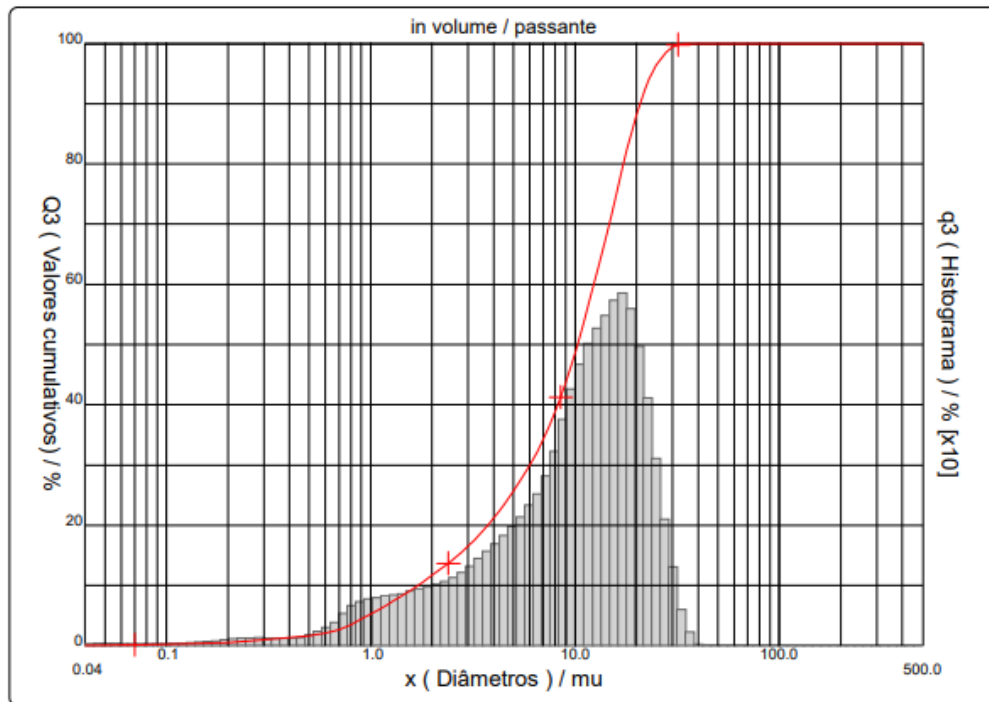
Tabela 3 - Composição do Cimento CP V -ARI

Ensaio Químicos			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel - RI	%	0,7	$\leq 1,0$ - NM 15/12
Perda ao Fogo - PF	%	3,57	$\leq 4,5$ - NM 18/12
Óxido de Magnésio - MgO	%	1,36	$\leq 6,5$ - NM 21/12
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	2,65	$\leq 4,5$ - NM 16/12
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	%	2,55	$\leq 3,0$ - NM 20/12
Ensaio Físicos			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4.575	$\geq 3.000$ – NBR 16372/15
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,105	não aplicável – NBR 16605/17
Índice de Finura - #75 $\mu\text{m}$ (n°200)	%	0,02	$\leq 6,0$ - NBR 11579/13
Resíduo na Peneira #325	%	0,4	não aplicável - NBR 9202/85
Água de consistência normal	%	31,4	não aplicável - NM 43/03
Início de Pega	minutos	139	$\geq 60$ - NM 63/03
Fim de Pega	minutos	198	$\leq 600$ - NM 65/03
Expansibilidade à quente	mm	0,00	$\leq 5,0$ - NBR 11582/12
Ensaio Mecânicos - NBR 7215 (ABNT, 2019)			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resistência à Compressão - 1 dia	MPa	29,8	14
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	42,5	24
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	48,2	34
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	57,2	não aplicável

Fonte: a autora, 2023.



Figura 22 - Distribuição granulométrica do CPV-ARI



Fonte: Resultado LACER 17/11/2022.

#### 4.1.2 Água de Amassamento

A mistura do ECC deu-se com a água potável disponível na rede pública de distribuição de água da cidade de Porto Alegre. A mesma demonstra concordância aos parâmetros de qualidade da NBR 15900-1 (ABNT, 2009), respeitando padrão de coloração, não exala odores, com  $\text{pH} > 5$ , e sem a presença de materiais sólidos e demais impurezas.

#### 4.1.3 Agregado Miúdo

A composição do traço padrão réplica de Righi (2015) utilizou uma areia quartzosa natural obtida em Porto Alegre. A composição granulométrica da Tabela 4 foi obtida através da realização do ensaio da NBR 17054 (ABNT, 2022): Agregados — Determinação da composição granulométrica, e a mesma apresenta a distribuição conforme Figura 23. Os traços estudados a partir da etapa deste programa experimental ficaram constituídos exclusivamente por areia na granulometria passante em  $300 \mu\text{m}$ .

Tabela 4 - Características granulométrica do agregado miúdo

Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
1180	0	0
600	0,08%	0,08%
300	3,97%	4,05%
150	92,00%	96,05%
FUNDO	3,95%	100,00%

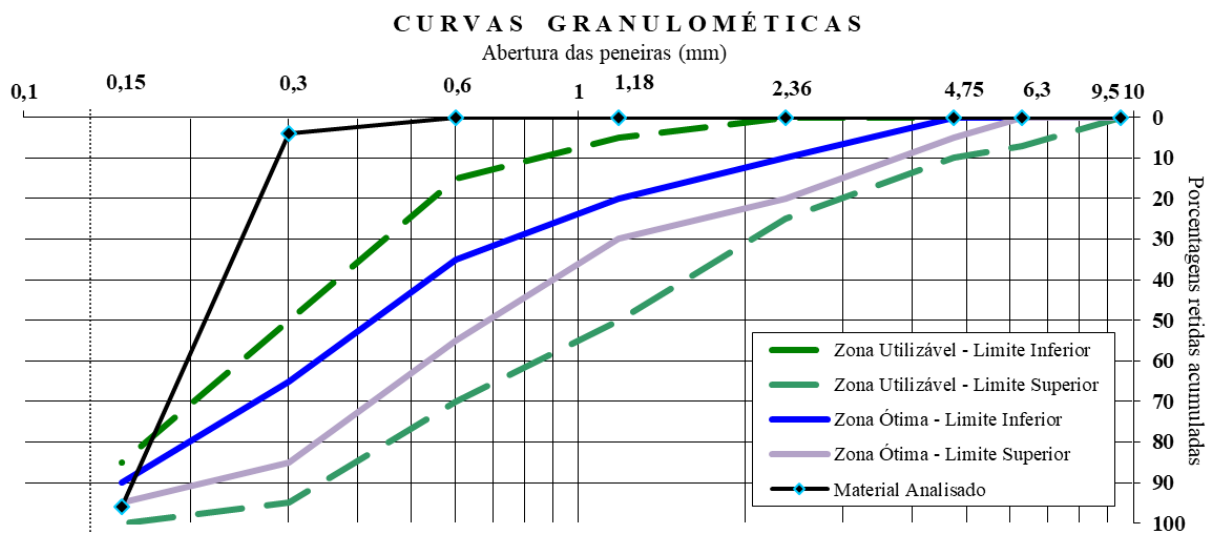
Módulo de finura = 1,0

Diâmetro máximo característico = 300 $\mu\text{m}$

Massa específica = 2,445 g/cm<sup>3</sup>

Fonte: a autora, 2023.

Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: a autora, 2023.

A curva característica da areia analisada encontra-se fora da zona utilizável inferior definida pela NB 7211 (ABNT, 2022), o que juntamente com o módulo de finura igual a 1 conclui-se dizer que a areia utilizada é do tipo muito fina.

A identificação da massa específica apontada também na Tabela 4 se pautou na NBR 16916 (ABNT, 2021): Determinação da densidade e da absorção de água. Considerando o procedimento de dosagem utilizado a massa específica foi considerada para areia em condição seca.

#### 4.1.4 Aditivos

Neste estudo foi utilizado o aditivo superplastificante TECFLOW 8000 com base de éter policarboxílico. Fornecido pela empresa GRACE, esse tipo de aditivo proporciona

eficiência na redução de água da mistura, com a intenção de manter a coesão e evitar a segregação dos materiais durante o espalhamento.

Os aditivos redutores de água são usados principalmente para reduzir a água necessária durante a mistura. Redutores de água e os superplastificantes são utilizados em ampla escala nas misturas de ECC pois mantêm a fluidez e permitem a dispersão das fibras de modo a manter a natureza plástica durante a sequência de mistura (LI; LEPECH, 2011).

#### 4.1.5 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima Sem Controle de Temperatura

A CCA utilizada neste programa experimental foi doada pela empresa CAAL de Alegrete/RS sendo oriunda do processo de parbolização dos grãos de arroz. A casca de arroz é combustível deste processo agroindustrial, e sua queima se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas, resultando em uma cinza de cor predominantemente preta ou cinza escuro (Figura 24).

Figura 24 - Aspecto da CCA sem moagem



Fonte: Righi (2015).

Para utilização da CCA nas misturas é necessário antes a moagem do material para redução da sua granulometria. De acordo com estudos anteriores de Righi (2015, 2022) a moagem de 8 horas se mostra mais promissora para a CCA no sentido de incrementar a finura do material. Utilizou-se para o procedimento um moinho de bolas com dimensões de 310 mm de altura e diâmetro de 275 mm contendo 75 bolas de 38 mm de diâmetro (Figura 25).

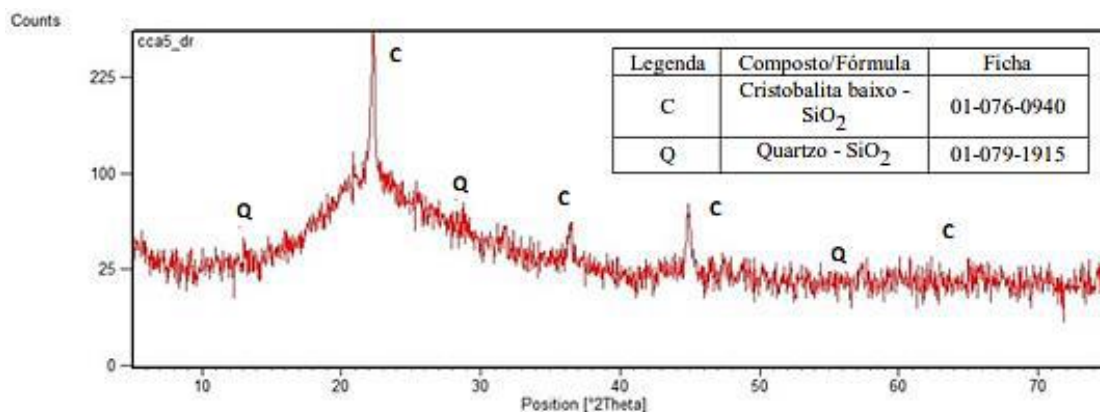
Figura 25 - Moinho de Bolas utilizado para a moagem da CCA



Fonte: a autora, 2023.

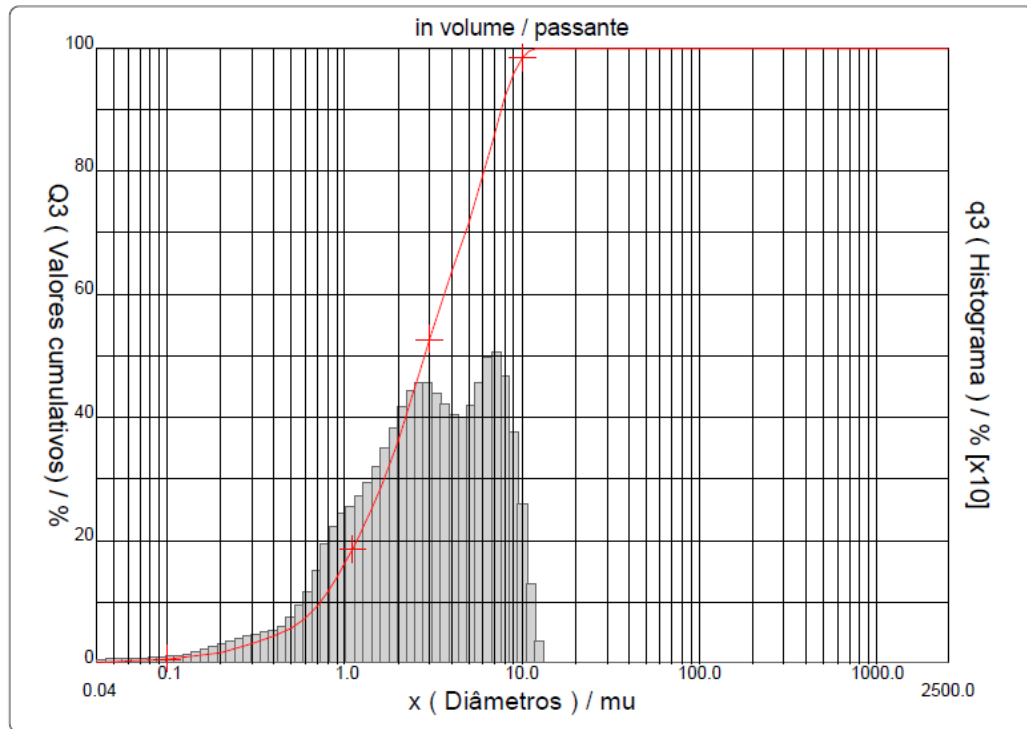
Após a moagem a CCA ensaiado pela norma pela NBR 16605 (ABNT, 2017): Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. A exemplo do cimento Portland, a granulometria do CCA foi realizada por difração a laser no (LACER/UFRGS) (Figura 27); as características químicas foram definidas por Fluorescência de raio X (FRX); a Figura 26 apresenta o difratograma da CCA utilizada neste estudo (os resultados foram replicados de Righi (2022) por se tratar do mesmo material da pesquisa da autora); e, em síntese, a Tabela 5 compila as características físicas e químicas da CCA utilizada neste trabalho após o processo de moagem. Para o ensaio de DRX nota-se uma estrutura amorfa, com picos cristalinos pontuais de cristobalita, configurando uma estrutura aceitável para uso em misturas cimentícias com foco na suplementação do cimento Portland devido a característica pozolânica de formar compostos aglomerantes na presença do hidróxido de cálcio.

Figura 26 - Difratograma da CCA



Fonte: Righi (2022).

Figura 27 - Distribuição granulométrica da CCA



Fonte: Resultado LACER 17/11/2022.

Tabela 5 - Características da CCA

Características físicas e químicas		Normas	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,029	NBR16605 (2017)	
Perda ao fogo (%)	13,99	NBR NM 18 (2012)	
Índice de atividade pozolânica (%)	162,48	NBR 5752 (2014)	
Diâmetro médio (μm)	3,59	Granulometria a laser	
Composição química			
SiO <sub>2</sub> (%)	82,21	MnO (%)	0,34
K <sub>2</sub> O (%)	1,85	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,10
CaO (%)	0,75	SO <sub>3</sub> (%)	0,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,48	CO <sub>2</sub> (%)	12,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,65		

Fonte: a autora, 2023.

#### 4.1.6 Fibras de Polipropileno

Em tese quanto maior a quantidade de fibras, melhores os resultados de controle na propagação de fissuras. Contudo, na prática o excesso de fibras em relação a matriz pode ocasionar diminuição da trabalhabilidade. Nesse sentido, há uma classificação proposta por

Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

Mehta e Monteiro (2014) dentro da qual uma fração volumétrica média entre 1% e 2% é indicada para aumentar o módulo de ruptura das matrizes. Portanto, como a volumetria da fibra dentro da matriz cimentícia é um fator relevante na concepção do compósito. Assim, optou-se por seguir os estudos de Righi (2015) com a porcentagem de 2% de fibras de polipropileno do volume total de mistura o que vai ao encontro do também proposto por Mehta e Monteiro (2014).

Neste estudo a fibra utilizada foi produzida pela empresa Brasilit – Saint-Gobain de Esteio (RS), sendo do tipo monofilamento com cadeia polimérica e disponível em comprimento de 10 mm (Figura 28). As características físicas e mecânicas estão relacionadas na Tabela 6.

Figura 28 - Fibras de polipropileno



Fonte: a autora, 2023

Tabela 6– Características da fibra de polipropileno

Propriedades da Fibra de Polipropileno	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,91
Comprimento (mm)	10
Diâmetro (µm)	12
Resistência à Tração (MPa)	850
Alongamento na Ruptura (%)	21
Módulo de Elasticidade (GPa)	6
Resistência à Álcalis	Excelente

Fonte: GARCEZ, 2009.

#### 4.1.7 Escória de alto forno

Para composição ternária de material aglomerante do ECC optou-se pela escolha de escória de alto forno (EAF) junto a mistura de CCA e cimento Portland pelo fato de alguns estudos já estarem sendo desenvolvidos no campo do ECC com esse tipo de material

(BARROS, 2022; KIM *et al.*, 2019; LIM *et al.*, 2012; ZHOU *et al.*, 2009; ZHU, YANG, YAO, 2012).

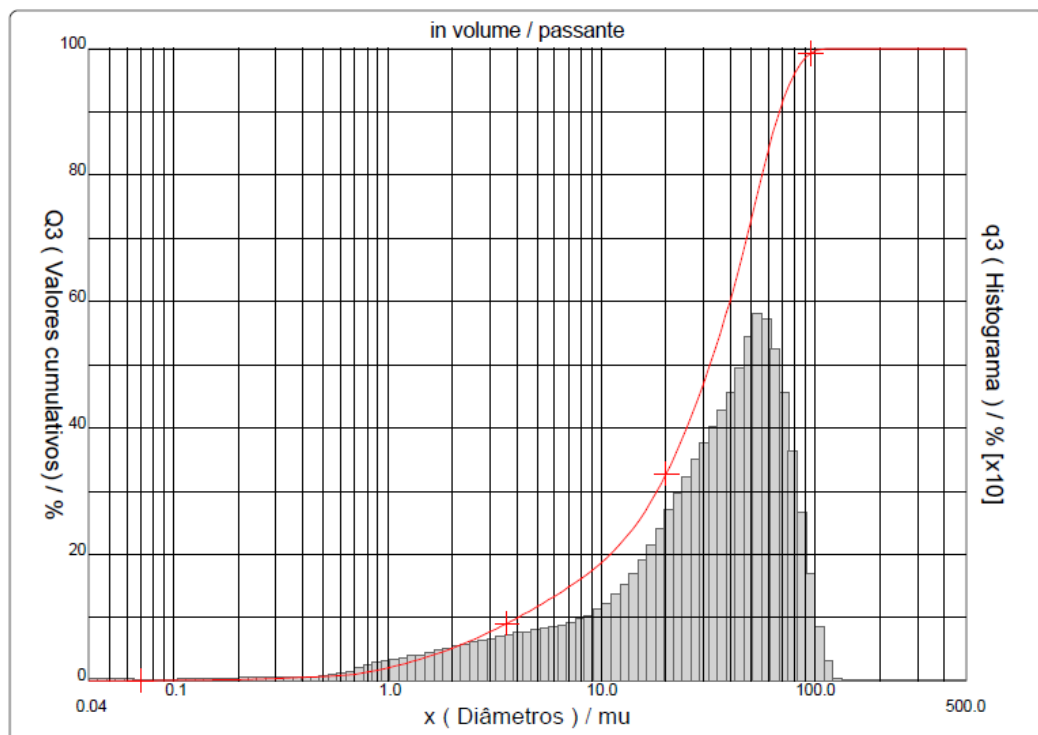
A EAF utilizada neste programa experimental foi obtida na empresa Arcelor Mittal - Tubarão (SC). Para sua utilização na mistura com possibilidade de atuar como material pozolânico, a amostra de material teve que passar por moagem de 8 horas, resultando em um pó fino descolorido (Figura 29) que ainda se sucedeu na passagem pela peneira de 75  $\mu\text{m}$ ; a massa específica foi determinada por picometria de gás hélio resultando no valor de 2,87  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; a granulometria após moagem e peneiramento também foi realizada por difração a laser no LACER, ficando o diâmetro médio em 32,60  $\mu\text{m}$  (Figura 30).

Figura 29 - Escória de alto forno após moagem



Fonte: a autora, 2023.

Figura 30 - Distribuição granulométrica da EAF



Fonte: Resultado LACER 19/01/2023.

## 4.2 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

Este item engloba as especificações de traço e as relações de mistura do ECC. O traço padrão escolhido foi o de Righi (2015) pelo fato de estar sendo desenvolvido e aprimorado ao longo dos anos nas pesquisas de ECC pelo LEME. Este traço é uma adaptação do traço precursor do ECC desenvolvido por Li (2003).

### 4.2.1 Análise Computacional dos Traços e Empacotamento de Partículas

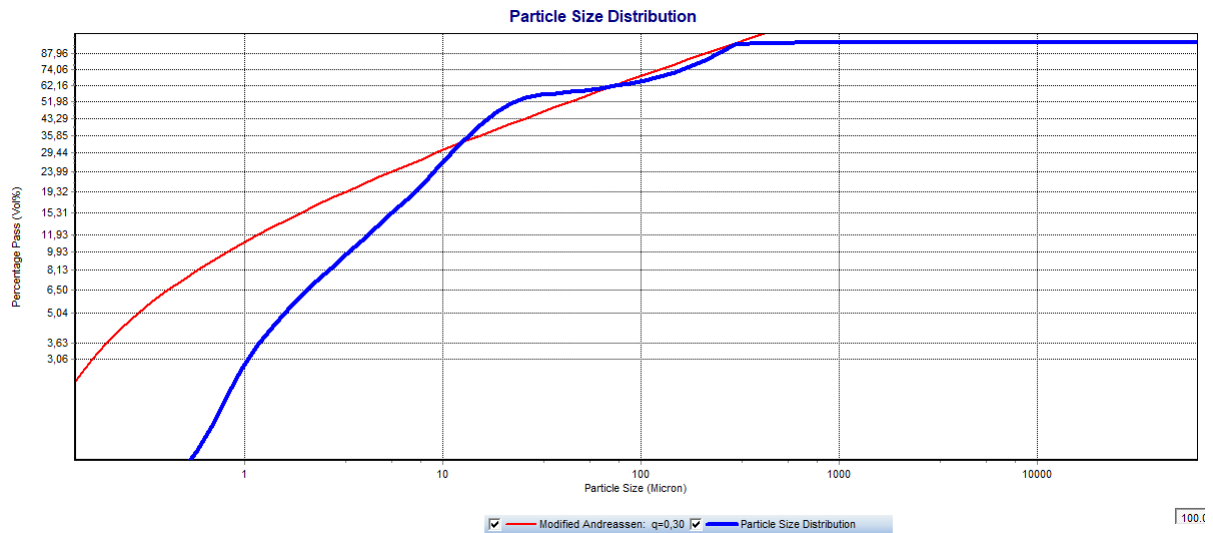
A fim de otimizar o empacotamento de partículas e buscar possíveis melhorias na granulometria do ECC realizou-se a dosagem com o auxílio do programa *Elken Material Mix Analyzer* (EMMA) desenvolvido pela empresa ELKEM AS versões 352.

A partir de valores conhecidos da distribuição granulométrica, diâmetro médio de partículas, massa específica, e relação água cimento pré-fixada é possível armazenar os dados de cada material, interpolar valores de granulometrias não registradas e simular combinações de misturas. O EMMA foi utilizado nesta análise para se obter curvas granulométricas experimentais de misturas de ECC, testando possíveis modificação da distribuição granulométrica.

Com os valores granulométrico dos materiais utilizados, o coeficiente de distribuição e as dimensões máximas e mínimas, foram realizadas simulações preliminares com o traço padrão, nas quais o ajuste da granulometria da areia foi a alteração que demonstrou maior capacidade, e viabilidade, de aproximar a dosagem do ECC com partes da curva ótima de distribuição do modelo de empacotamento. O traço padrão de Righi (2015) foi moldado com areia muito fina, de DMC 300  $\mu\text{m}$  e D50 173,9  $\mu\text{m}$ , o mesmo obteve uma curva de distribuição granulométricas com vários pontos afastados da curva de distribuição ideal do modelo de *Andreassen* modificado, tanto com excesso de partículas superiores a 10 e 100  $\mu\text{m}$ , quanto uma carência de quantidade de partículas finas uniformemente distribuídas abaixo desta mesma graduação, evidenciando a granulometria não uniforme da mistura (Figura 31). Nas figuras que seguem o estudo de empacotamento, a curvatura vermelha do gráfico indica a proporção ideal de grãos, enquanto a representação azul indica a curvatura proporcionada pelos materiais escolhidos.



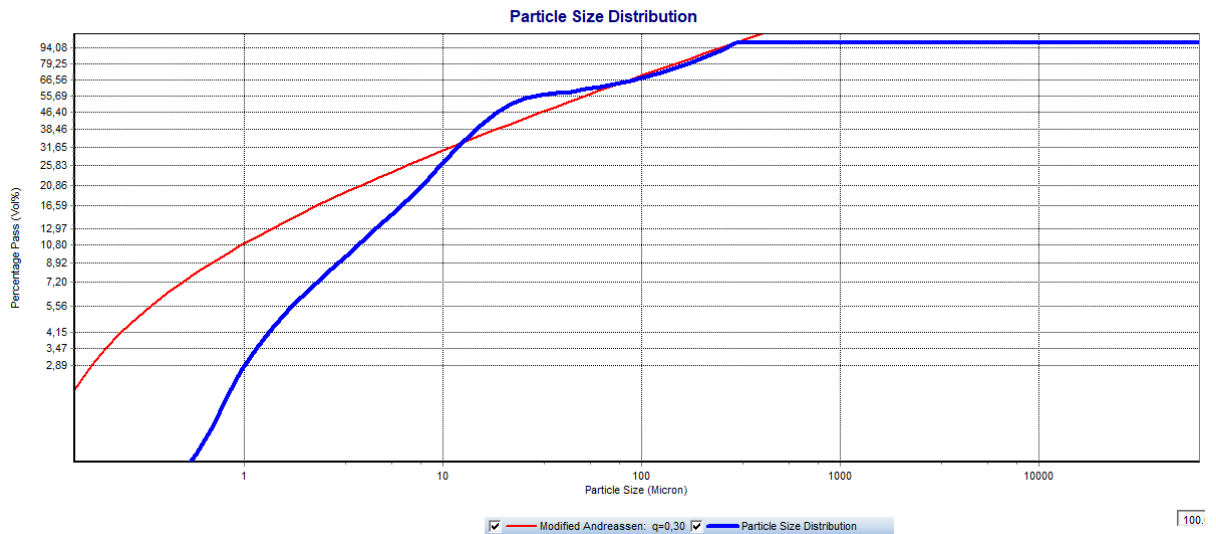
Figura 31 - Simulação de traço referência de Righi (2015)



Fonte: simulação no EMMA pela autora, 2023.

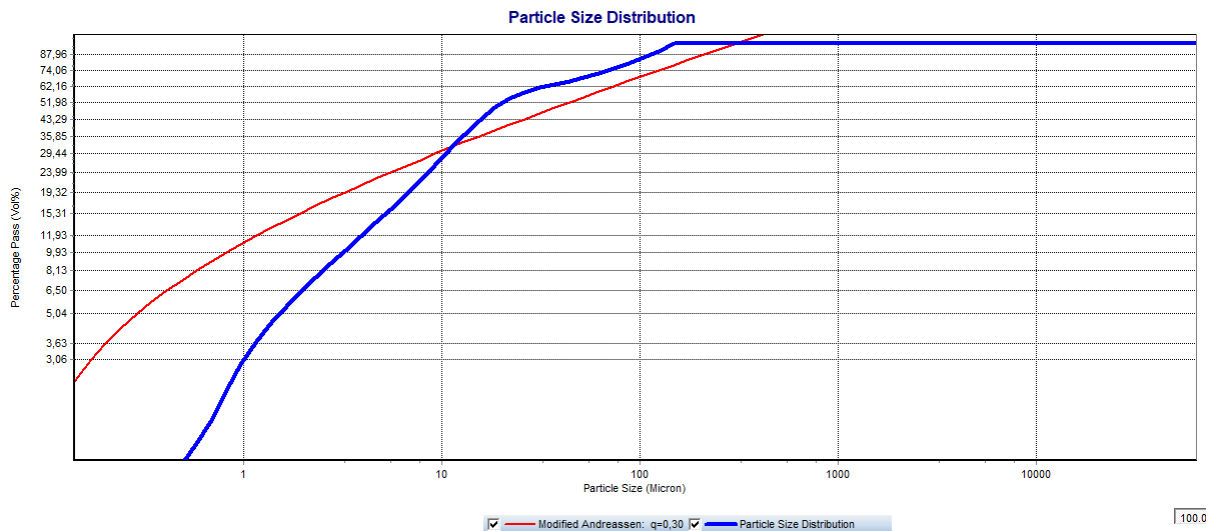
O traço com areia peneirada em malha de 300  $\mu\text{m}$ , como demonstra a Figura 32, consegue coincidir a curva ideal de partículas acima de 100  $\mu\text{m}$ , justamente pelo controle de graduação, porém ainda apresenta certa carência de partículas finas. A carência de partículas finas, é decorrente da impossibilidade de fracionamento de partículas inferiores a 10  $\mu\text{m}$  apenas por peneiramento, e também pela falta de materiais que apresentem valores intermediários de DMC. Já o traço com areia peneirada em malha de 150  $\mu\text{m}$ , demonstra um deslocamento ainda mais acentuado da quantidade ideal de material, sendo que a quantidade de areia graduada nesta granulometria se torna excessiva à mistura (Figura 33). Por conta disso, em tese para partir de uma mistura referencial pautada em um certo equilíbrio e sem alterar parâmetros de porcentagem de areia e/ou incrementar a relação a/c, foi utilizada a granulometria de 300  $\mu\text{m}$ , de modo a se esperar uma possível granulometria contínua quando realizada a inserção dos materiais cimentícios suplementares.

Figura 32 - Simulação do traço com graduação da areia limitada em 300  $\mu\text{m}$



Fonte: simulação no EMMA pela autora, 2023.

Figura 33 - Simulação do traço com graduação da areia limitada em 150  $\mu\text{m}$



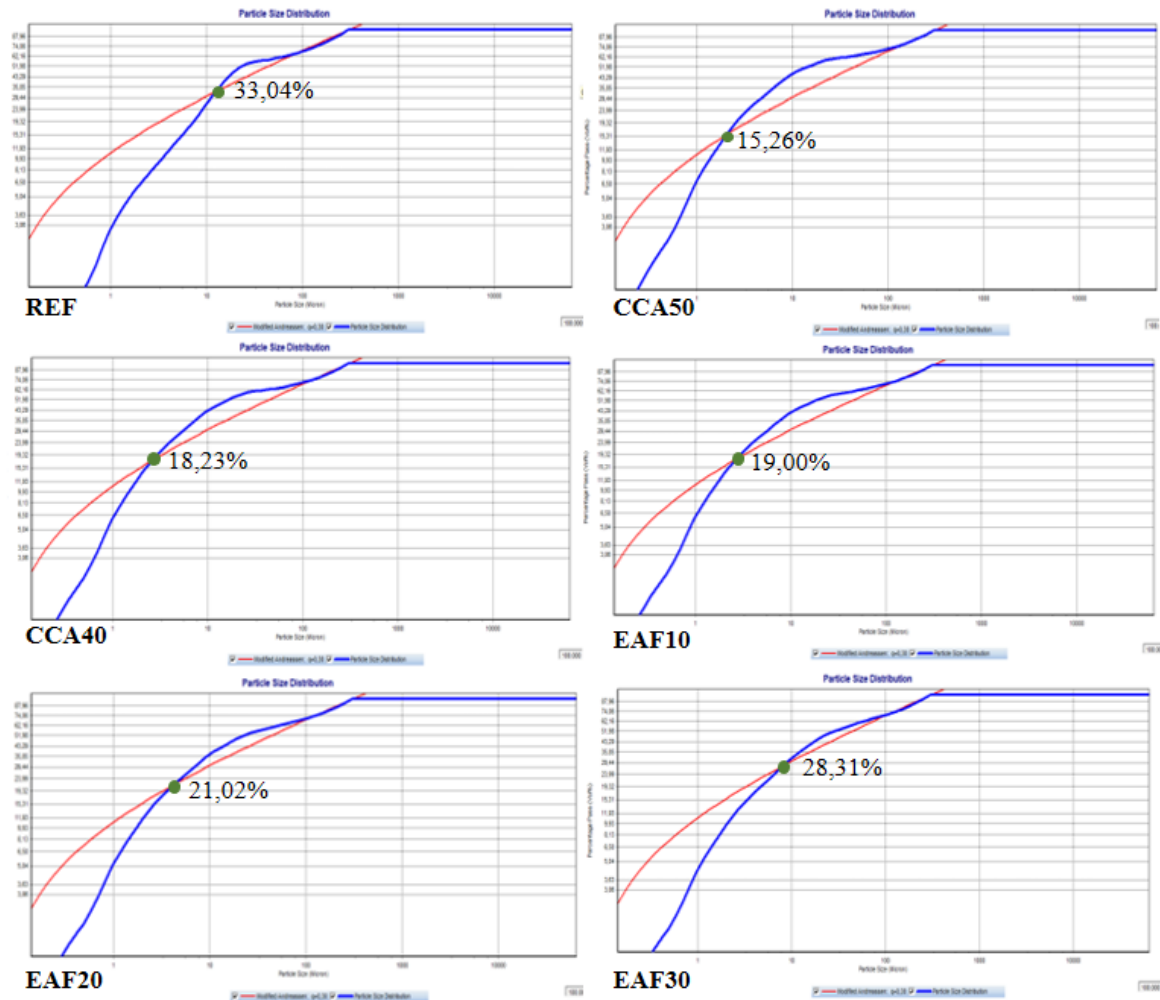
Fonte: simulação no EMMA pela autora, 2023.

As simulações com as combinações definidas para este estudo estão indicadas em comparativo na Figura 34. O ponto destacado em verde representa a intersecção entre a curva ótima de empacotamento (vermelha) e a curva para dosagem escolhida (azul) no sentido de material faltante para as granulometrias mais finas da dosagem. Observa-se que as misturas com EAF são as que apresentam menor amplitude entre curvas, ou seja, maior possibilidade de coincidência de materiais. Provavelmente isto decorre da utilização de três materiais aglomerantes que contribuem para uma melhor graduação da mistura.

A mistura de referência demonstra grande carência de materiais fino abaixo de 10  $\mu\text{m}$ , com 33,04% de desconformidade entre as curvas analisada. Na transição para as misturas apenas com incremento do CCA, nota-se uma melhora nesta condição com menor porcentagem

de carência de finos abaixo de 10  $\mu\text{m}$ , devido ao DMC novo de 3,59  $\mu\text{m}$ , pois a interseção entre as duas curvas ocorre abaixo desta granulometria.

Figura 34 - Comparativo entre simulações dos traços a serem estudados



Fonte: simulação no EMMA pela autora, 2023.

#### 4.2.2 Especificações de Dosagem e Parâmetros de Mistura

Para determinação da quantidade de materiais se utilizou o método de dosagem ABCP/IPT (1984) adaptado do método da *American Concrete Institute* (ACI) conforme equação 5, seguindo o traço padrão de Righi (2015) e a graduação de areia supracitado (300  $\mu\text{m}$ ). Apenas foram realizados ajustes dos valores de massa específicas dos materiais aqui utilizados, por conta dos novos testes de caracterização, logo obtendo o quantitativo para traço padrão conforme indica a Tabela 7.

Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

$$C = \frac{V}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{1}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_x} + (\dots) + a/c} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

C: massa de cimento para volume de concreto (g);

V: volume de concreto (cm<sup>3</sup>);

$\gamma_c$ : massa específica do cimento (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_a$ : massa específica da areia (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_x$ : massa específica do(s) material(is) suplementar(es) a serem acrescentados na mistura (g/cm<sup>3</sup>) e assim sucessivamente com cada novo material;

a/c: relação água cimento.

Tabela 7 – Dosagem do Traço Referência (REF)

Componentes	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Proporção	Peso (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )
Cimento	3,11	1	2092,557	672,847
Areia fina sem peneiramento	2,44	0,75	1569,418	643,204
Água	1	0,34	711,469	711,469
Aditivo	1,09	0,006	13,335	12,234
CCA	2,029	-	-	-
Fibra PP	0,9	0,020	36,703	40,781
Volume total				2080,535

Fonte: a autora, 2023.

O primeiro estudo de Righi (2015) caracterizou ECC contendo 10%, 20% e 30% (em volume) de substituição de cimento por CCA, dos quais os com 30% de CCA moído a 8 horas obtiveram melhores resultados, demonstrando ser um traço de melhor desempenho mecânico; em Righi (2022) foram obtidos ECC em porcentagens de 30%, 50% e 70% de substituição em massa do cimento por CCA, dos quais os com 50% apresentaram melhores condições de resistência mecânica e durabilidade, sendo que de 50% para 70% de CCA residual, o comportamento *strain-hardening* não fica tão evidente, dificultando a capacidade de desenvolvimento da múltipla fissuração

Seguindo por esta linha de pesquisa, uma faixa ideal de substituição de cimento por CCA aparenta estar entre 30% e 50%, com destaque ainda para a segunda porcentagem. A fim de poder comparar resultados que já estão sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do LEME, foi realizada a substituição do cimento por CCA residual em 40%; contudo também foi repetida aquela com 50% ambas com a areia peneirada conforme dados obtidos pelo EMMA.

Para a combinação ternária de material aglomerante, com cimento Portland, CCA e EAF, foram definidas as porcentagens conforme mostra a Tabela 8. Observa-se que a quantidade de cimento foi mantida fixa na proporção de 50%. A Tabela 8 também evidencia a quantidade de material para cada mistura de modo a atender aproximadamente 2,4 litros de material (necessário para moldagem dos corpos de prova em estado endurecido). Toda substituição de material cimentício foi realizado perante a massa do cimento para o traço padrão desta pesquisa com base nas suas respectivas massas específicas.

Os materiais foram misturados em um misturador mecânico planetário especial para argamassas com capacidade de 2 litros. Como a quantidade necessária era de 2,4 litros, e pelo fato de inicialmente os materiais secos apresentarem grande volume, as misturas foram feitas em duas etapas consecutivas e de mesma ordem, sendo unidas ao fim e misturadas novamente.

Tabela 8 - Proporção de materiais das misturas de interesse

Traço	Componentes	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Proporção	Peso (g)	Volume(cm <sup>3</sup> )
50%C50%CCA (CCA50)	Cimento	3,11	0,50	1130,874	363,625
	Areia	2,44	0,75	1442,525	591,199
	Água	1,00	0,34	980,917	980,917
	GGBS	2,87	-	-	-
	CCA	2,03	0,50	961,683	474,086
	Fibra PP	0,90	0,02	36,703	40,781
	Glenium	1,09	0,01	13,335	12,234
60%C40%CCA (CCA40)	Cimento	3,11	0,60	1313,260	422,270
	Areia	2,44	0,75	1469,580	602,287
	Água	1,00	0,34	940,250	940,250
	GGBS	2,87	-	-	-
	CCA	2,03	0,40	787,990	388,459
	Fibra PP	0,90	0,02	36,703	40,781
	Glenium	1,09	0,01	13,335	12,234
50%C10%EAF40%CCA (EAF10)	Cimento	3,11	0,50	1117,580	359,351
	Areia	2,44	0,75	1462,465	599,371
	Água	1,00	0,34	994,476	994,476
	GGBS	2,87	0,10	194,995	67,943
	CCA	2,03	0,40	779,981	384,511
	Fibra PP	0,90	0,02	36,703	40,781
	Glenium	1,09	0,01	13,335	12,234
50%C20%EAF30%CCA (EAF20)	Cimento	3,11	0,50	1103,915	354,956
	Areia	2,44	0,75	1482,964	607,772
	Água	1,00	0,34	1008,415	1008,415
	GGBS	2,87	0,20	395,457	137,790
	CCA	2,03	0,30	593,185	292,426
	Fibra PP	0,90	0,02	36,703	40,781
	Glenium	1,09	0,01	13,335	12,234
50%C30%EAF20%CCA (EAF30)	Cimento	3,11	0,50	1089,860	350,437
	Areia	2,44	0,75	1504,045	616,412
	Água	1,00	0,34	1022,751	1022,751
	GGBS	2,87	0,20	601,618	209,623
	CCA	2,03	0,30	401,079	197,722
	Fibra PP	0,90	0,02	36,703	40,781
	Glenium	1,09	0,01	13,335	12,234

Fonte: a autora, 2023.

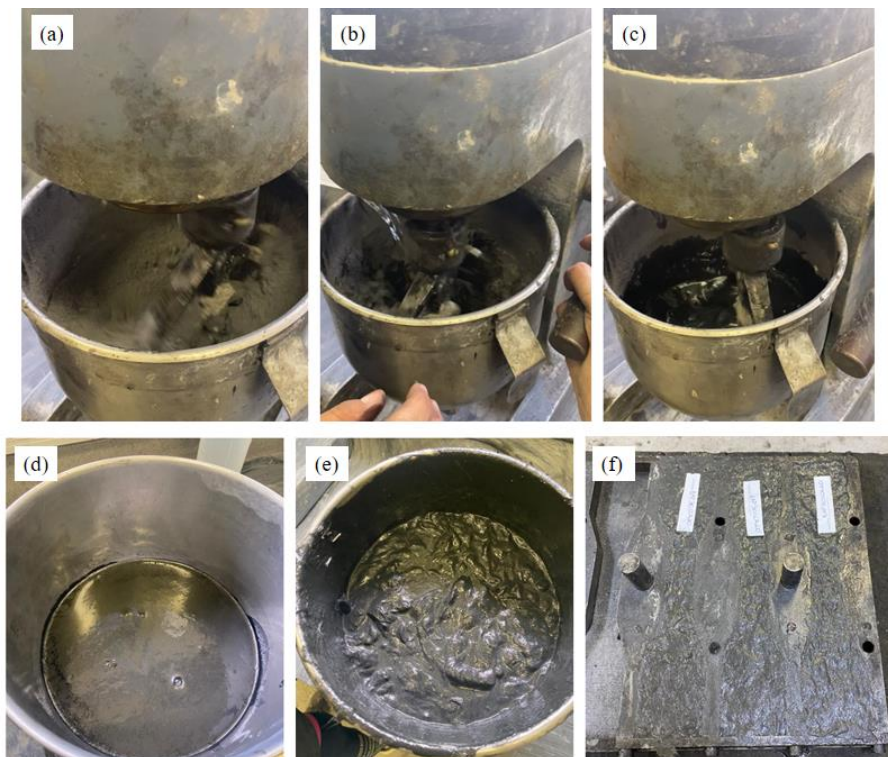
Inicialmente na cuba de inox foram depositados os materiais secos, os quais foram misturados até a homogeneidade. Após, foram adicionados o aditivo superplastificante em conjunto com a água de amassamento, resultando em uma pasta fluída necessária a completa dispersão das fibras.

Os ensaios de trabalhabilidade e reologia, descritos nos itens seguintes, foram realizados inicialmente sem a inserção das fibras. Após a realização dos mesmos, toda base da mistura retorna ao misturador planetário para então receber a adição de fibras e constituir o compósito

cimentício de elevada capacidade de deformação, ECC, objeto desta pesquisa. Quando adicionadas as fibras à mistura, são necessários 3 minutos de rotação em velocidade elevada no misturador para a total dispersão das mesmas. Nesta etapa, ainda antes da moldagem dos corpos de prova, é realizado um único ensaio em estado fresco, o de índice de consistência pela NBR 7215 (ABNT, 2019), o qual também será detalhado nos itens que seguem.

Alguns processos descritos acima em síntese podem ser representados pela ordem de imagens da Figura 35: (a) mistura dos materiais secos; (b) inserção da água e aditivo; (c) mistura constante para homogeneizar a mistura ao ponto de uma pasta fluída (d); (e) aspecto do compósito com a presença das fibras na mistura; (f) moldagem dos corpos de prova, neste caso indicando aqueles para ensaio de tração direta. De acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016): Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, a cura dos corpos de prova precisou ser realizada em uma câmara úmida à temperatura de  $(23\pm 2)$  °C e umidade relativa do ar superior a 95%.

Figura 35 - Etapas de mistura até moldagem dos corpos de prova



Fonte: a autora, 2023.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E REOLOGIA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

O ECC vem sendo objeto de pesquisas consecutivas no LEME, cujos resultados indicam que é possível desenvolver o ECC com materiais locais e garantir as características básicas de um ECC, como alta capacidade de deformação quando submetidos à esforços de tração uniaxial e múltipla micro fissuração (GARCEZ, 2009; CASAGRANDE, 2012; RIGHI, 2015, 2022; PEREIRA DA COSTA, 2015; RODRÍGUEZ, 2018; PASINATTO, 2018). Contudo, ainda existem ressalvas quanto a sua trabalhabilidade para aplicação em larga escala e necessidade de compreender melhor a reologia da mistura.

Pasinatto (2018) estudou a viabilidade do ECC quando aplicado como reparo/reforço estrutural e constatou uma grande dificuldade de moldagem. Rodríguez (2018) utilizou o ECC em pistas experimentais de pavimentos em escala real e constatou uma grande dificuldade de moldagem, devido à baixa trabalhabilidade. O fator principal que culmina nesta dificuldade está ligado a característica do ECC de conter o uso de fibras de PVA ou de polipropileno na sua adição máxima de 2%, pois, a sua distribuição aleatória na matriz cimentícia ocasiona uma reduzida capacidade de adensamento, demandando uma moldagem não convencional. Sendo assim, no item que segue, serão realizados os ensaios para identificação dos parâmetros de trabalhabilidade a fim de validar se as substituições propostas permitem sanar as lacunas desta propriedade.

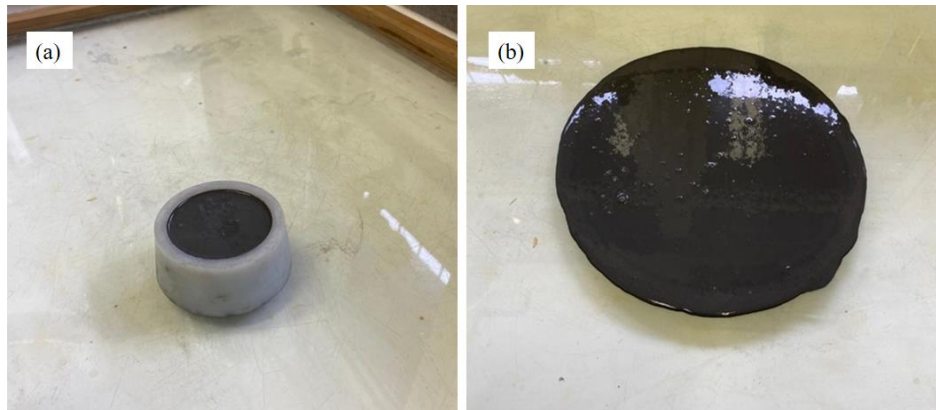
#### 4.3.1 Trabalhabilidades pelo Método de Mini *Slump-Flow*

Para que se possa ter um comparativo da variação percentual de trabalhabilidade da mistura ao longo dos processos foi realizado o ensaio denominado Mini *Slump-Flow* da mistura sem a adição de fibras.

Esse ensaio se fundamenta por preencher um molde com diâmetro de 82 mm na parte inferior, 70 mm na parte superior e uma altura de 40 mm, conferindo formato de cone truncado (Figura 36a). Após, esse cone é retirado e a mistura se espalha sobre uma superfície de vidro liso sem que nenhuma força de compressão tenha sido exercida anteriormente. No momento em que o espalhamento cessa, são capturadas três medidas do diâmetro do espalhamento da mistura (Figura 36b).



Figura 36 - Procedimento de Mini *Slump-Flow*

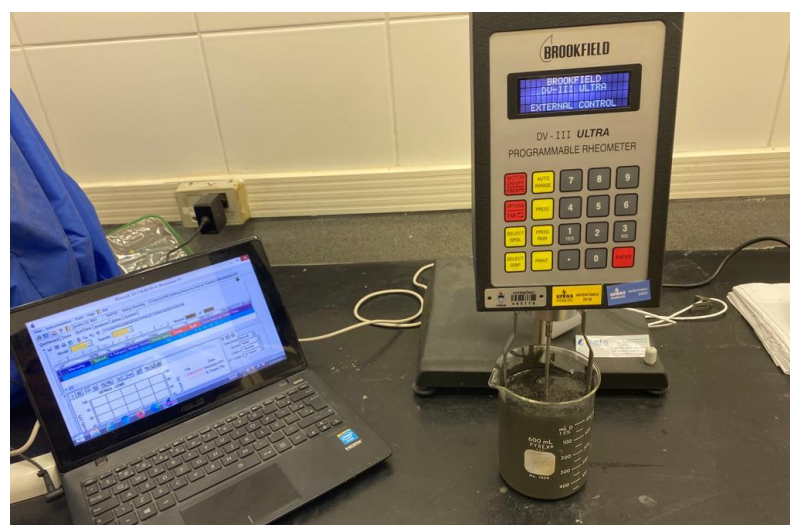


Fonte: a autora, 2023.

#### 4.3.2 Viscosidade Plástica e Torque

Foram realizados ensaios de verificação de viscosidade para as misturas frescas da base cimentícia das misturas de ECC. Foi utilizado um equipamento de viscosímetro rotacional cilíndrico concêntrico com paredes lisas (Brookfield DV-II + Pro) em  $23 \pm 2$  °C, conforme Figura 37. Para verificar os limites de tensão exercida sobre o fluido foram empregadas diferentes rotações com variação constante de 0 a 100 rpm, correspondendo a uma taxa de cisalhamento de 34 segundos; e, após a velocidade foi reduzida gradualmente de 100 a 0 rpm para identificar se o fluido volta a ter comportamento não newtoniano do modelo de Bingham. Para cada taxa de cisalhamento escolhida as amostras foram ensaiadas a tensão de cisalhamento por 20 segundos.

Figura 37 - Execução do ensaio no viscosímetro



Fonte: a autora, 2023.

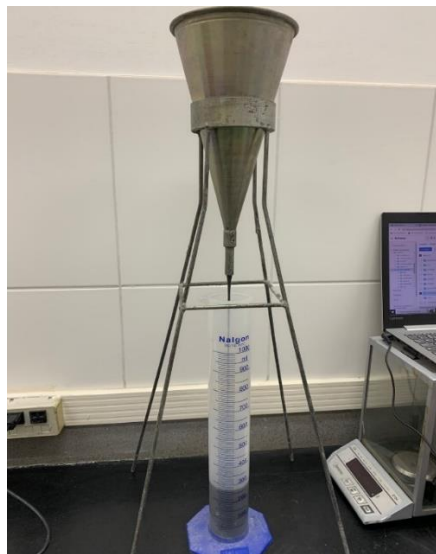
Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

#### 4.3.3 Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh

Para que se possa entender a reologia do fluido como a tensão de escoamento e a consistência de forma indireta também foi realizado em estado fresco sem a adição de fibras o ensaio de fluidez pelo cone de Marsh.

Neste ensaio é verificado o tempo em que um volume de mistura cimentícia leva para passar por um cone metálico. Este ensaio está referenciado pela NBR 7681-2 (ABNT,2013): Calda de cimento para injeção Parte 2: determinação do índice de fluidez e da vida útil – método de ensaio. Para execução do ensaio, ilustrado pela Figura 38, foram utilizados: um cone metálico indeformável de abertura superior com diâmetro de 155 mm que em forma de funil com altura de 290 mm se afunila até um bocal de 10 mm o qual se estende por 60 mm de altura; um suporte metálico para apoio do funil com altura a permitir encaixe para uma proveta graduada com capacidade de 1000 cm<sup>3</sup>; e um cronômetro. A fim de compor uma curva que indicasse a progressão da fluidez da mistura o tempo foi registrado a cada evolução de 100 ml.

Figura 38 - Execução do ensaio no Cone de Fluxo Marsh



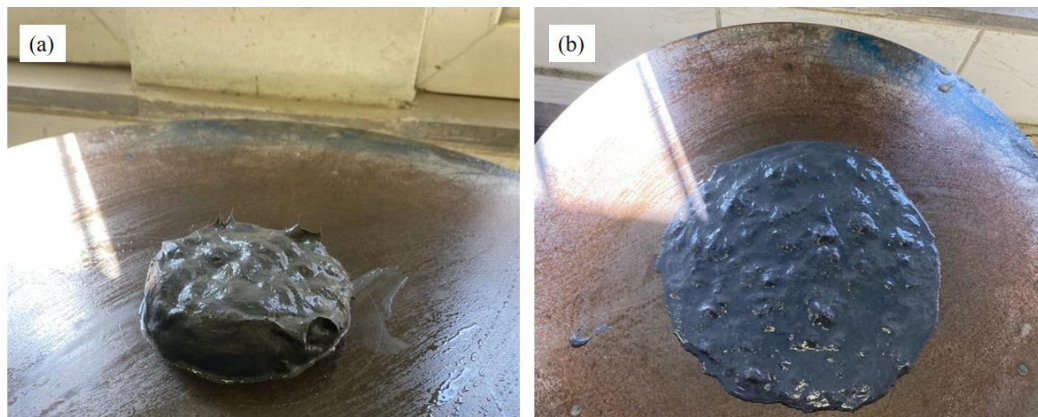
Fonte: a autora, 2023.

#### 4.3.4 Determinações do Índice de Consistência

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. Segue como normativa a NBR 7215 (ABNT, 2019): Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

Sobre uma mesa de metal não corrosível com possibilidade de acionamento de queda vertical ascendente foi posicionado um molde troncônico (idem do item 4.3.1), onde, internamente em três camadas iguais o mesmo foi preenchido com a mistura de ECC, sendo que cada camada levou respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com um soquete metálico. Após o preenchimento do molde, a superfície foi alisada para retirar excessos, o molde foi removido verticalmente, e a mesa acionada para tombar 30 vezes dentro de um período de 30 segundos (Figura 39). Ao final, foram capturadas três medidas do diâmetro do espalhamento da mistura.

Figura 39 - Execução do ensaio de índice de consistência



Fonte: a autora, 2023.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS

A fim de se conhecer as características físicas do ECC foram realizados ensaios de tração direta, flexão por quatro pontos e compressão axial. Nesta etapa todos os corpos de prova foram moldados considerando a mistura com fibras.

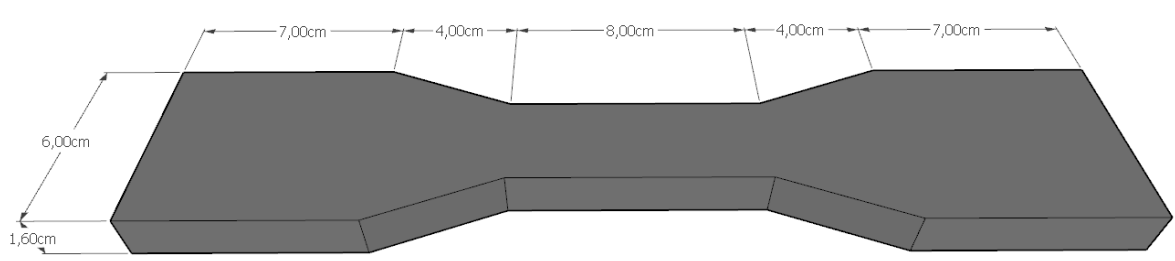
##### 4.4.1 Tração Direta

A múltipla fissuração e a característica de *strain-hardening* do ECC tem como principal ensaio o de tração direta para verificação da relação tensão x deformação. Hoje, ainda não existem normativas que padronizem os ensaios e o reconhecimento dos resultados da tração direta, assim para este estudo foi utilizado o método proposto por Boshoff e Zijl (2009).

O corpo de prova utilizado apresenta formato de *dogbone* com dimensões detalhadas na Figura 40, cuja seção transversal da alma corresponde as medidas de 1,6 cm x 3 cm. Para preencher o molde, a mistura fresca de ECC foi golpeada com soquete metálico (o mesmo do

item 4.3.4), e a sua superfície foi alisada para um completo preenchimento da forma (Figura 37 do item 4.2.2). Foram moldadas 3 amostras para cada traço do estudo, os quais foram levados para cura em câmara úmida a  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  por uma idade de 28 dias. Antes dos ensaios, os corpos de prova foram retirados para secarem em temperatura ambiente, e as arestas foram alisadas para remover irregularidades da moldagem e/ou extravaso por parte das fibras.

Figura 40 - Molde para ensaio de tração direta



Fonte: a autora, 2023.

Nos corpos de prova foram fixadas bases para conectar um sistema para aquisição de dados de carga chamado *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT, em português transdutor de deslocamento variável linear) (Figura 41a, c). O LVDT utilizado é da marca HBM com sensibilidade de  $\pm 10$  mm e precisão de 0,01 mm.

Figura 41 - Execução do ensaio de tração direta



Fonte: a autora, 2023.

Para fixar os corpos de prova foram utilizadas garras metálicas presas a uma prensa com capacidade de carga de 100 kN (Figura 41b). O ensaio de ruptura foi realizado no Laboratório

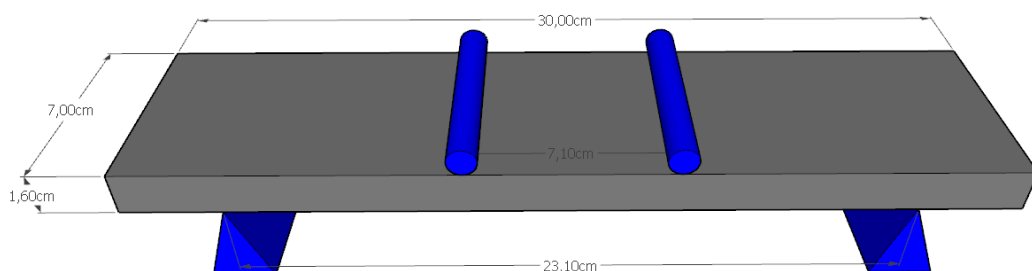
de Materiais Poliméricos (LAPOL – UFRGS). A prensa foi operada com velocidade de carregamento tensor aplicada igual a 5 N/s (Figura 41d).

Li (2019) indica que para que se alcance os resultados desejáveis, os ensaios devem seguir rigor quanto à geometria dos corpos de prova e a rigidez na fixação das garras ao corpo de prova e prensa. O autor afirma ainda que, durante o ensaio é possível a ocorrência de alguma excentricidade na aplicação da carga tensora. Uma das maneiras de assegurar que o ensaio esteja correto, e a peça corretamente posicionada, é observar o local de manifestação da fissura, que deve ocorrer na região mais esbelta da peça.

#### 4.4.2 Flexão a Quatro Pontos

O ensaio utilizado é uma adaptação da Norma C1609 (ASTM, 2012): *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete*, realizados em quatro pontos do corpo de prova. Os corpos de prova têm formato retangular, cujas medidas são apresentadas pela Figura 42, a carga aplicada foi igualmente dividida em dois terços do vão conforme medidas. O preenchimento do molde seguiu as mesmas etapas utilizadas no item de tração. Seguindo a mesma linha de análise, também foram moldadas 3 amostras para cada traço do estudo, e as mesmas permaneceram em cura úmida ( $23 \pm 2$ ) °C por 28 dias até o dia da realização dos ensaios.

Figura 42 - Molde para ensaio de flexão



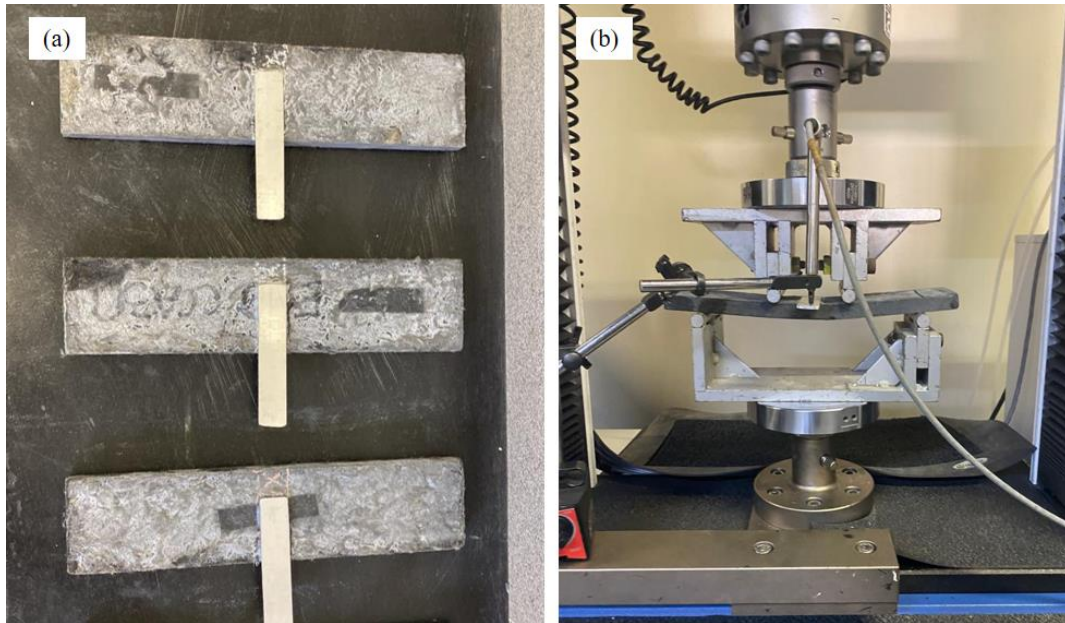
Fonte: a autora, 2023.

No centro do corpo de prova foi posicionado uma chapa metálica de base para leitura vertical do LVDT (Figura 43a). O LVDT utilizado também é da marca HBM, porém com sensibilidade de +/- 50 mm e precisão de 0,01 mm. Tanto neste ensaio, quanto no anterior, de tração direta, os dados de deslocamento foram gerados pelo software *Catman Easy*, a partir do equipamento *Spider8*, também da marca HBM, com frequência de captação igual a 10 Hz. O



ensaio de ruptura também foi realizado no LAPOL, e a prensa foi operada com velocidade de carregamento tensor aplicada igual a 5 N/s (Figura 43b).

Figura 43- Execução do ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: a autora, 2023.

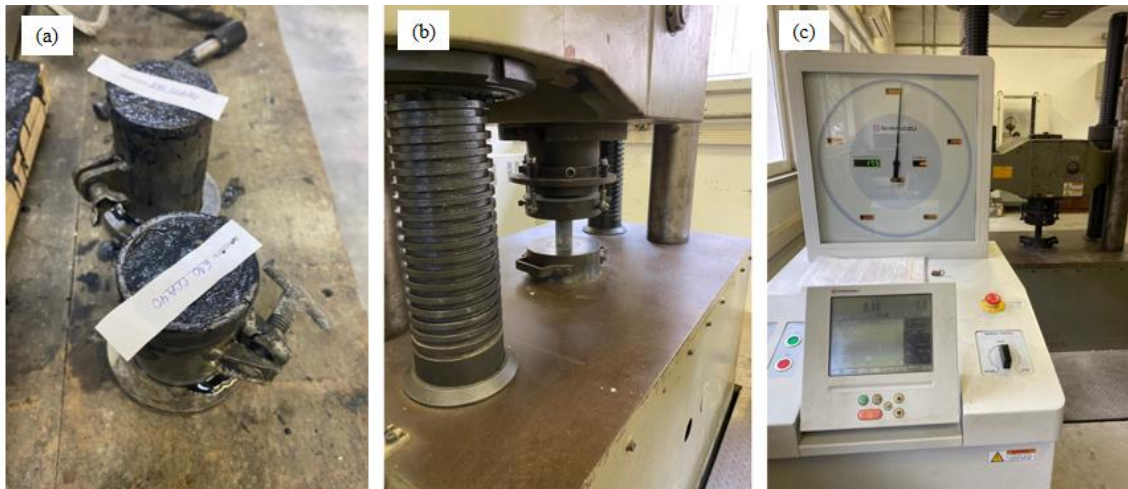
#### 4.4.3 Compressão axial

Considerando que na maioria dos projetos em concreto armado o parâmetro mais importante é a resistência a compressão, foram realizadas a moldagem de corpos cilíndricos para rompimento a compressão em prensa hidráulica. Seguindo a NBR 7215 (ABNT, 2019): Cimento Portland – resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos.

Foram utilizados 3 moldes com diâmetro interno de  $50 \pm 0,1$  mm e altura de  $100 \pm 0,2$  mm para cada traço deste estudo (Figura 44a). Os mesmos foram preenchidos em duas camadas iguais que receberam 12 golpes de soquete metálico cada. Após moldagem a superfície foi alisada, e as amostras foram levadas para cura em câmara úmida por uma idade de 28 dias, quando se sucederam os ensaios de compressão. Antes da ruptura os corpos de prova tiveram suas faces retificadas para que ficassem totalmente sem irregularidades.

A partir da NBR 5739 (ABNT, 2018): Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica com carregamento contínuo à velocidade de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. O ensaio foi executado no LEME e pode ser verificado na Figura 44.

Figura 44 - Execução do ensaio de compressão axial



Fonte: a autora, 2023.

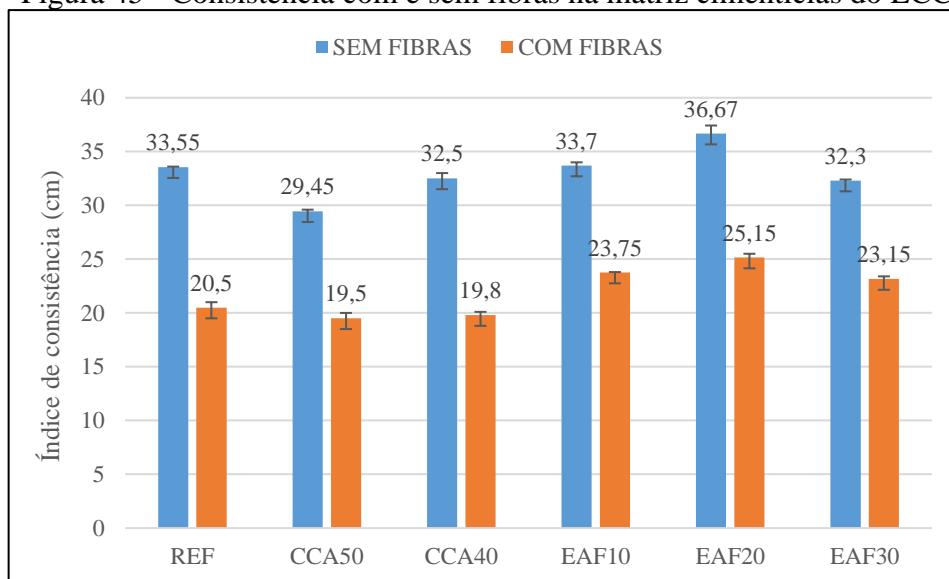
## 5 RESULTADOS

### 5.1 TRABALHABILIDADE PELO MINI *SLUMP FLOW* E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A consistência e trabalhabilidade das misturas foram aferidas para a matriz cimentícia, respectivamente, com e sem adição das fibras. O intuito foi verificar em um momento inicial, sem fibras, a capacidade do aditivo superplastificante em porcentagem de 0,6% junto a baixa relação a/c de 0,34 em tornar a matriz fluída permitindo maior trabalhabilidade para a sequência de inserção das fibras. E, uma vez em que aditivos e relação a/c foram mantidas constantes, o mini *Slump* também foi utilizado para verificar a influência dos materiais suplementares junto ao cimento na capacidade de espalhamento da mesma.

A Figura 45 demonstra a diferença de consistência para os diâmetros de espalhamento quando a fibra é inserida na matriz. Ao inserir as fibras, a trabalhabilidade reduz em média em todas as combinações de traço isso se deve a baixa densidade do material, que ocupa uma grande área específica para que se atinja a quantidade de 2% em relação a mistura de ECC. Esse resultado observa-se em outros estudos com ECC, como os de Li e Li (2013) e Li e Lepech (2011). A sequência de imagens da Figura 46 indica uma constatação visual de como a trabalhabilidade é reduzida após inserção das fibras, o aspecto final da mistura de ECC se apresenta como uma massa densa.

Figura 45 - Consistência com e sem fibras na matriz cimentícias do ECC



Fonte: a autora, 2023.



Figura 46 - Verificação dos estágios de consistência do ECC



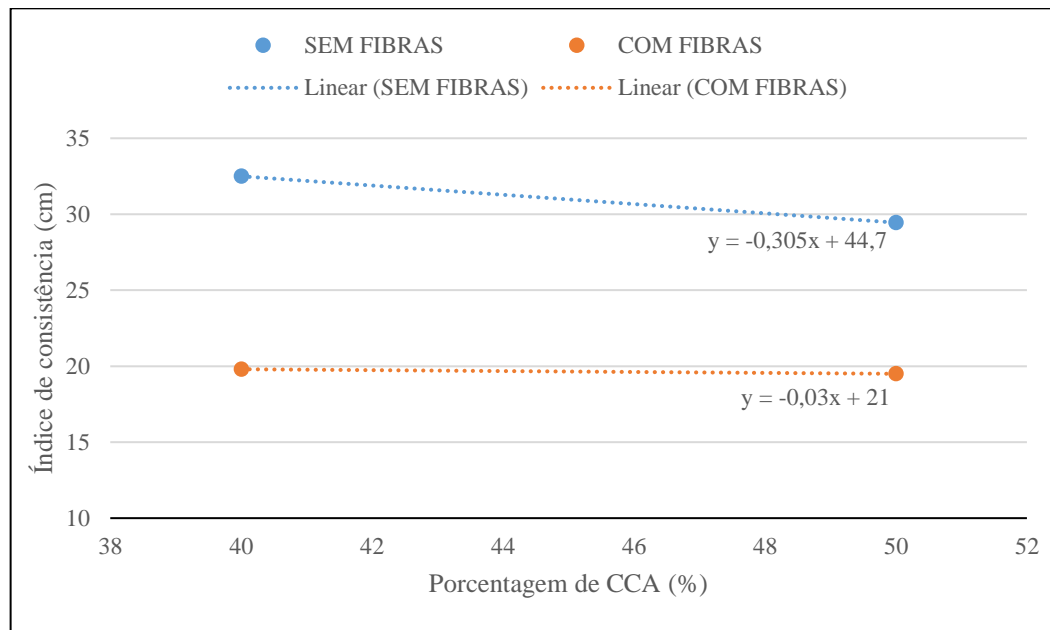
Fonte: a autora, 2023.

O traço de referência apresentou consistência de 33,55 cm sem fibras e 20,5 cm com fibras, indicando uma redução de 38,89% na trabalhabilidade. Para CCA50 a diferença entre si após adição de fibras foi de 33,78% menos trabalhabilidade; e para os valores de CCA40 foi de 39,07%. Porém, em relação a mistura de referência, estes dois traços, apresentaram redução de trabalhabilidade inclusive em relação às misturas com EAF.

Ao realizar um comparativo com o traço de referência apenas com a matriz cimentícia, a mistura de CCA50 foi a que menor trabalhabilidade apresentou, com redução de 12,22%. Porém, tanto o CCA50 quanto CCA40 em relação à matriz referencial com fibras a redução de trabalhabilidade teve média de 4,14%. Isso ocorre pelo fato de ao substituir o cimento, cujo diâmetro médio de partícula é de 10,92  $\mu\text{m}$ , por uma partícula de média 3,59  $\mu\text{m}$  do CCA, há necessidade de uma maior quantidade de água na mistura por conta de uma maior superfície específica das partículas, e uma vez mantida a relação a/c e a quantidade de aditivo a trabalhabilidade tende a ser reduzida conforme indicam os valores.

Conforme Figura 47 há uma tendência de que a medida em que se aumenta a quantidade de CCA, como único material suplementar na mistura, ocorre uma inversa relação de redução na trabalhabilidade. O mesmo foi verificado por Righi (2022) que para uma dosagem com 0,6% de aditivo superplastificante e substituições de 30%, 50% e 70% de CCA também ocorreu redução na trabalhabilidade.

Figura 47 - Relação decrescente de consistência pelo diâmetro do fluxo mini slump antes e depois da adição de fibras, para combinações binárias



Fonte: a autora, 2023.

No momento em que é realizado uma composição ternária de material suplementar, combinando o cimento com diferentes porcentagens de CCA e EAF, observa-se ainda na Figura 47 que os valores de trabalhabilidade foram semelhantes ou até mesmo superiores ao traço referência. Isso decorre do fato de a mistura apresentar uma melhor capacidade de empacotamento por dispor de um novo material com diâmetro médio de 32,60  $\mu\text{m}$  junto do cimento e CCA, cujos diâmetros médios estão supracitados na metodologia deste estudo, o que por conseguinte permite melhor interação de acomodação e graduação junto aos grãos de areia peneirados em 300  $\mu\text{m}$ .

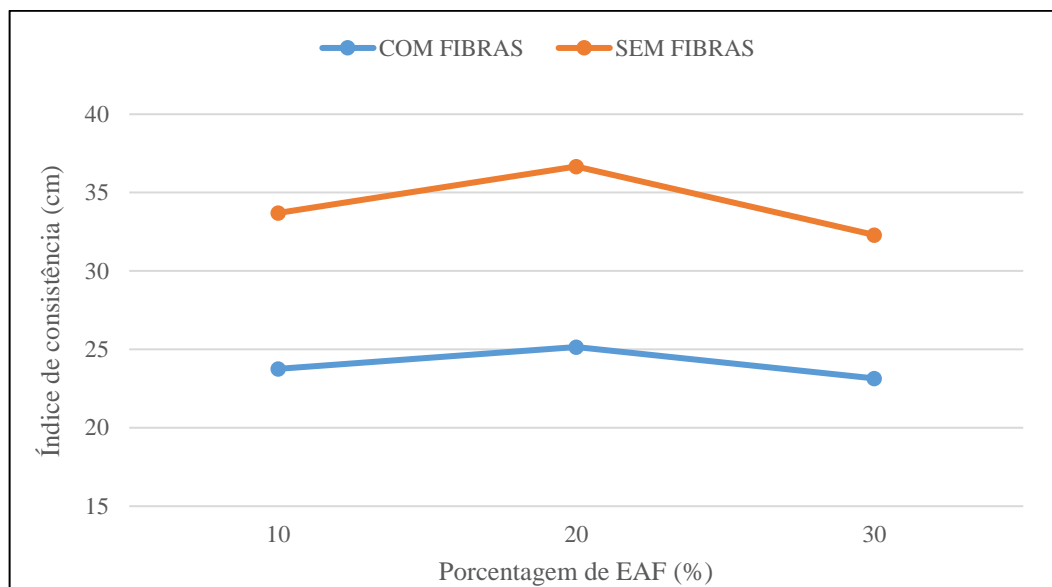
O traço de EAF20 apresentou consistência de 36,67 cm sem fibras e 25,5 com fibras, indicando uma redução de 31,41% da trabalhabilidade quando a fibra é inserida. Para EAF10 a diferença entre si após adição de fibras foi de 29,52% menos trabalhabilidade; e para os valores de EAF30 foi de 28,32%. Fazendo um comparativo com o traço de referência apenas com a matriz cimentícia, a mistura de EAF20 foi a que maior trabalhabilidade apresentou, com aumento de 9,29%, diante de um aumento de 18,48% na condição de matriz com fibras em relação ao referencial.

O traço de EAF10 apresentou na condição de matriz sem fibras consistência de 33,7 cm se equivalendo em desvio padrão ao traço de referência (33,55 cm). Porém, tanto o EAF10 quanto EAF30 em relação a matriz referencial com fibras o incremento da trabalhabilidade teve média de 14,39%.

Kim *et al.* (2019) ao estudarem misturas de ECC com fibras de PVA, e matriz aglomerante de cimento e EAF observaram que as partículas de escória contribuíram para melhorar a dispersão da fibra, que é incorporada com maior trabalhabilidade atribuída à superfície oxidada do grão. Os resultados dos autores sugerem que, dentro de uma dosagem limitada de escória, a contribuição das partículas deste material em relação a trabalhabilidade supera o efeito colateral de diminuir o potencial de múltipla fissuração. Os autores ainda perceberam que o limite para uso da escória como material suplementar foi de 25%, e ao utilizar uma relação de 38% para água/aglomerante os produtos de hidratação da escória levam à diminuição da porosidade na matriz, resultando em maior resistência e tenacidade.

De encontro com os dados dos autores, observa-se na Figura 48 que há uma crescente capacidade de trabalhabilidade até a utilização de 20% de escória, na mistura EAF20, e um posterior decréscimo de consistência após isso. Sendo assim, diferente da Figura 47, das misturas CCA40 e CCA50, aqui não foi possível demonstrar uma tendência linear ou proporcional, pois 20% de escória (EAF20) demonstrou-se ser um valor suplementar da escória ideal para o contexto analisado de mistura ternária em 30% de CCA e 50% de cimento como matriz aglomerante.

Figura 48 – Índice de consistência pelo diâmetro do fluxo mini *slump* antes e depois da adição de fibras para combinações ternárias



Fonte: a autora, 2023.

Para verificar se realmente há influência entre as combinações de materiais suplementares para a trabalhabilidade pelo método de *slump-test* das amostras com e sem fibra, as Tabelas 9 e 10 confirmam estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se

um valor de F consideravelmente maior que o valor de F crítico. Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o F crítico.

**Tabela 9 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas no ECC sem fibras**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	55,63667	5	11,12733	21,0612	0,000966	4,387374
Dentro dos grupos	3,17	6	0,528333			
<b>Total</b>	<b>58,80667</b>	<b>11</b>				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

**Tabela 10 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas no ECC com fibras**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	55,2875	5	11,0575	42,66559	0,00013	4,387374
Dentro dos grupos	1,555	6	0,259167			
<b>Total</b>	<b>56,8425</b>	<b>11</b>				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

Assim é possível constatar que para o ensaio de trabalhabilidade pelo método de mini *slump flow* as combinações de pozolanas nas misturas de ECC influenciam sim nos resultados, fato que pode ser corroborado com o gráfico da Figura 47, que a mudança de combinações binárias para ternárias modificam os resultados no estado fresco das misturas de ECC.

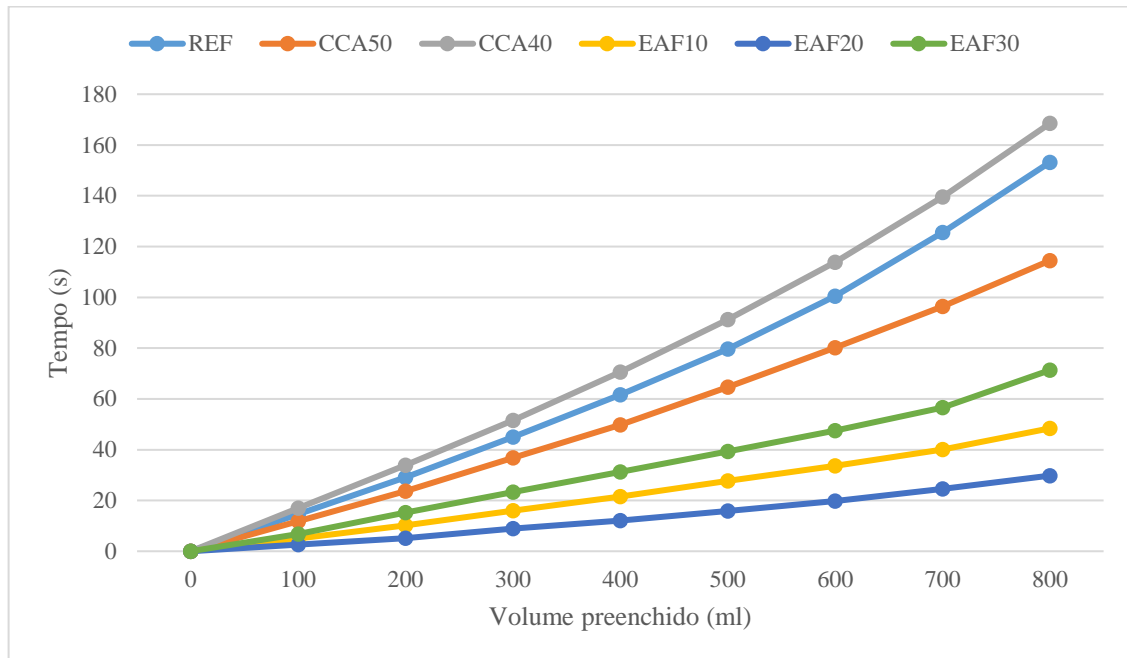
## 5.2 FLUIDEZ PELO CONE DE MARSH

Dentre os parâmetros de reologia, o fluxo de Marsh é considerado um método simples de medição e controle antes da adição de fibras, sendo também utilizado indiretamente para medir a viscosidade plástica da mistura fresca. Li e Li (2013) indicam que os valores de tempo obtidos ao escoar um volume conhecido de argamassa por um funil podem se relacionar com a viscosidade encontrada pelos ensaios diretos utilizando um viscosímetro rotacional, sendo esta hipótese verificada com os resultados que irão decorrer no item seguinte.

O gráfico da Figura 49 demonstra o tempo em que cada mistura demorou para escoar no cone de Marsh dando um indicativo da fluidez da mistura. Li *et al.* (2013) indicam que maiores tempos refletem misturas menos fluidas e com uma viscosidade plástica mais alta. Os autores concluíram em uma pesquisa anterior (2012) que a viscosidade plástica correspondente ao

tempo de fluxo do cone de Marsh de  $30 \pm 5$  s é desejável para alcançar dispersão homogênea de 2% de fibras de PVA, por exemplo, na matriz de ECC.

Figura 49 - Resultados de fluidez pelo Cone de Marsh



Fonte: a autora, 2023.

O resultado de fluxo de Marsh que vai ao encontro dos estudos de Li e Li (2013) foi aquele obtido para mistura EAF20 cujo tempo médio de escoamento acumulado foi de 29,78 s para passar pelo cone de ensaio, valor 80,56% inferior ao tempo de 153,19 s da mistura de referência. A mistura de EAF10 demorou 48,4s para o mesmo feito, representando diminuição de 68,40% no tempo de fluxo da mistura referencial. Nota-se que a mistura de referência, e aquelas apenas com CCA junto ao cimento apresentaram os maiores tempos de escoamento, refletindo em menor fluidez da mistura, o que porventura acarreta uma maior dificuldade para dispersão de fibras.

A mistura com CCA40 refletiu um tempo necessário de 168,5s para a completa passagem de material, valor superior 9,99% da mistura de referência, refletindo uma demora de 5,65 vezes o tempo da mistura de EAF20, o que por sua vez reflete uma tensão de escoamento maior entre as demais misturas.

Tais resultados novamente podem relacionar-se ao tamanho das partículas, onde uma vez mantida a proporção de agregado miúdo fixa, o restante das partículas de cimento e CCA com uma granulometria muito fina dificultam o espalhamento da mistura, pois necessitariam maiores quantidades de água e/ou aditivo para garantir fluidez da mistura; porém, ao inserir-se

um material de granulometria maior em substituição parcial aos aglomerantes, pode haver uma melhor acomodação de partículas no espaço mais bem graduado da matriz cimentícia.

Li *et al.* (2013) ao estudar agregados alternativos de rejeito de minério de ferro nas misturas de ECC, observaram que para granulometrias de 300  $\mu\text{m}$  e 425  $\mu\text{m}$  o tempo de fluxo de Marsh ficou superior a 60 s; para granulometria de 600  $\mu\text{m}$ , se estabeleceu em 28 s e acima disso, em 1180  $\mu\text{m}$  o tempo de 16s pode refletir uma fluidez passível de segregação dos materiais, em conclusão observou, portanto, que o aumento gradativo da partícula dos agregados diminuiu o tempo de fluxo do cone Marsh da matriz ECC.

Para verificar se realmente há influência nas combinações de materiais suplementares nas misturas de ECC estudadas, a Tabela 11 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F maior que o valor de F crítico. Assim é possível constatar que para o ensaio de fluidez pelo método do cone de fluxo de Marsh o uso de diferentes combinações de pozolanas influencia nos resultados.

Tabela 11 - ANOVA da influência de combinações de pozolanas nas misturas de ECC

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	29058,78943	5	5811,758	4,173882	0,003144	2,408514
Dentro dos grupos	66835,71651	48	1392,411			
Total	95894,50594	53				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

Em busca de avaliar se as combinações EAF10, EAF20 e EAF30 possuem diferenças significativas entre as mesmas para a matriz do ECC, também foi realizado uma análise estatística por meio de análise de variância ANOVA. A Tabela 12 demonstra os resultados encontrados onde é possível observar que em relação as misturas com cimento, CCA e escória de alto forno não há variação estatística entre as 3 porcentagens estudadas. É possível comprovar este fato devido ao F crítico ser maior que o valor de F.

Tabela 12 – ANOVA da influência das combinações EAF10, EAF20 e EAF30 nas misturas de ECC

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1653,953	2	826,9765	2,671427	0,089641	3,402826
Dentro dos grupos	7429,525	24	309,5635			
Total	9083,478	26				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

### 5.3 VISCOSIDADE PLÁSTICA E TORQUE

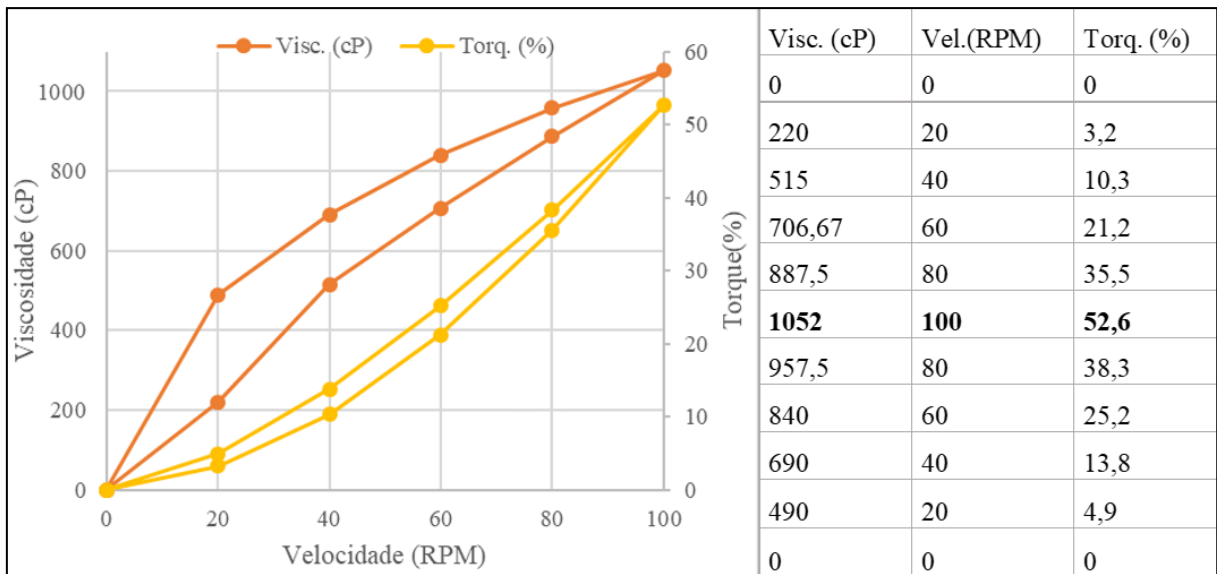
Os estudos acerca da trabalhabilidade do ECC relacionam o fluxo no cone de Marsh com resultados obtidos de forma direta por viscosímetros rotacionais. Pautado no modelo de Bingham, a argamassa fresca deve superar uma tensão de escoamento antes que possa fluir; uma vez que começa a fluir, a tensão de cisalhamento aumenta linearmente com o aumento da taxa de deformação, cuja inclinação define a viscosidade plástica. Portanto, Li e Li (2013) explicam que a viscosidade plástica mede a facilidade com que o material pode fluir uma vez que a tensão de escoamento é superada.

Yang *et al.* (2009) salientam que no concreto autoadensável (CAA) a viscosidade é um fator dominante para evitar a segregação causada pelo fluxo não homogêneo entre os ingredientes da mistura fresca e a sedimentação gravitacional. No caso da ECC, além da preocupação com a segregação, a viscosidade da argamassa fresca pode desempenhar um papel importante na distribuição das fibras, o que afeta a eficiência da ancoragem das mesmas, as propriedades endurecidas do compósito em geral e o comportamento de tração.

O ensaio com viscosímetro rotacional foi realizado a uma taxa de rotação constantemente elevada até 100 rpm e depois retornada a zero, ensaiado em um ambiente com temperatura constante de aproximadamente 28,7 °C. Os resultados de ensaios acabaram por gerar um gráfico de viscosidade dada em Centipoise (cP) x velocidade (rpm); no eixo secundário é possível identificar o valor de resistência ao cisalhamento dado em Torque, sendo refletido na taxa de força aplicada para rotação do medidor do viscosímetro.

A Figura 50 indica os resultados encontrados para o traço referência, onde para uma rotação máxima de 100 rpm o alcance da viscosidade chegou a 1052 cP com taxa máxima de torque de 52,6%; à medida que a rotação decaiu, nota-se uma redução na viscosidade decorrente de menor torque, porém com valores ainda superiores aos iniciais.

Figura 50 - Viscosidade e torque do ECC referência



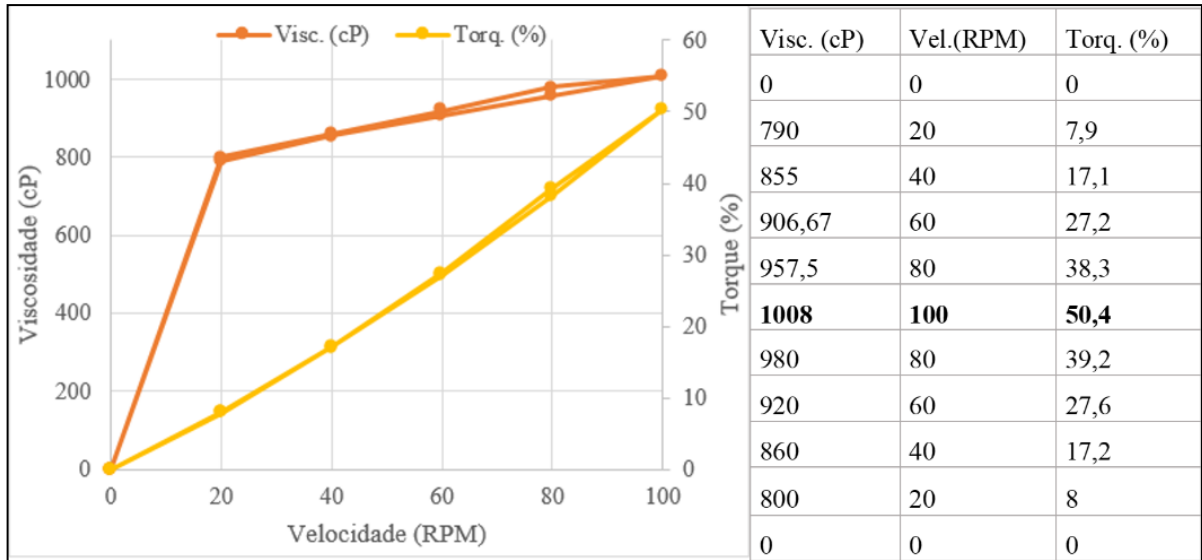
Fonte: a autora, 2023.

Para os traços em que houve substituição do cimento por CCA, como os traços CCA50 e CCA40, os resultados estão indicados pelas Figuras 51 e 52. É possível observar que para o traço com 50% de CCA ocorreu uma leve redução da viscosidade na taxa máxima de rotação, de 4,18% em relação ao referencial. Contudo, ao atingir o limite de escoamento, a redução das tensões do fluido com o decréscimo da velocidade ocorre de maneira mais lenta, tanto que para uma rotação final de 20 rpm, enquanto o traço referência de ECC apresenta viscosidade de 490 cP, o de CCA50 mantém um valor 1,63 vez superior.

O traço de CCA40 apresenta maior valor de viscosidade dentre todos analisados. A viscosidade de 1186cP necessitou aumento no torque da mistura para 59,3%. Malkin (1994) fundamenta que a medida em que a viscosidade representa a força coesiva entre as partículas, valores elevados podem prejudicar a trabalhabilidade das misturas, o que demonstra uma concordância com o fato da mistura de CCA40 apresentar o maior tempo de escoamento no ensaio de fluxo de Marsh. De acordo com estudo de Righi (2022) maiores viscosidades para as misturas com incremento de CCA se relacionam com a distribuição granulométrica por inserção de partículas finas que demandam maior consumo de água na hidratação ocasionando maior densificação da mistura.

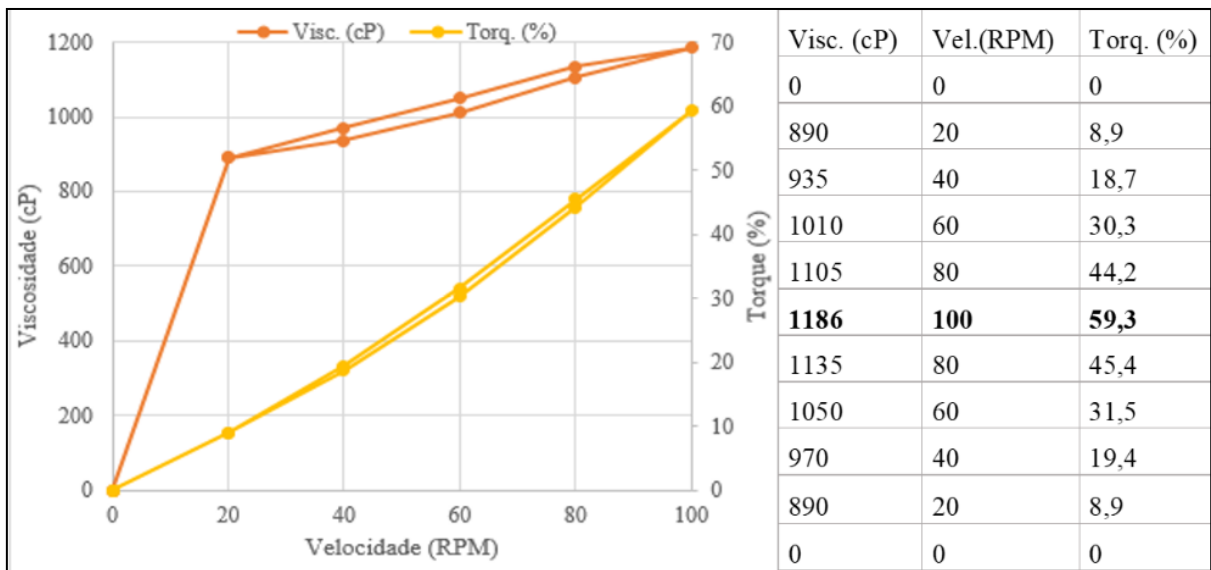


Figura 51 - Viscosidade e torque do ECC CCA50



Fonte: a autora, 2023.

Figura 52 - Viscosidade e torque do ECC CCA40



Fonte: a autora, 2023.

Para todas as misturas em combinação ternárias do cimento Portland, a viscosidade e o torque foram reduzidos. Com o incremento de 10% de EAF, (EAF10 – Figura 53) a mistura de ECC apresentou viscosidade em rotação máxima de 420 cP sob um torque de 21%. Esse valor é 2,14 vezes inferior a viscosidade do traço de referência, indicando redução de 53,42% do parâmetro.

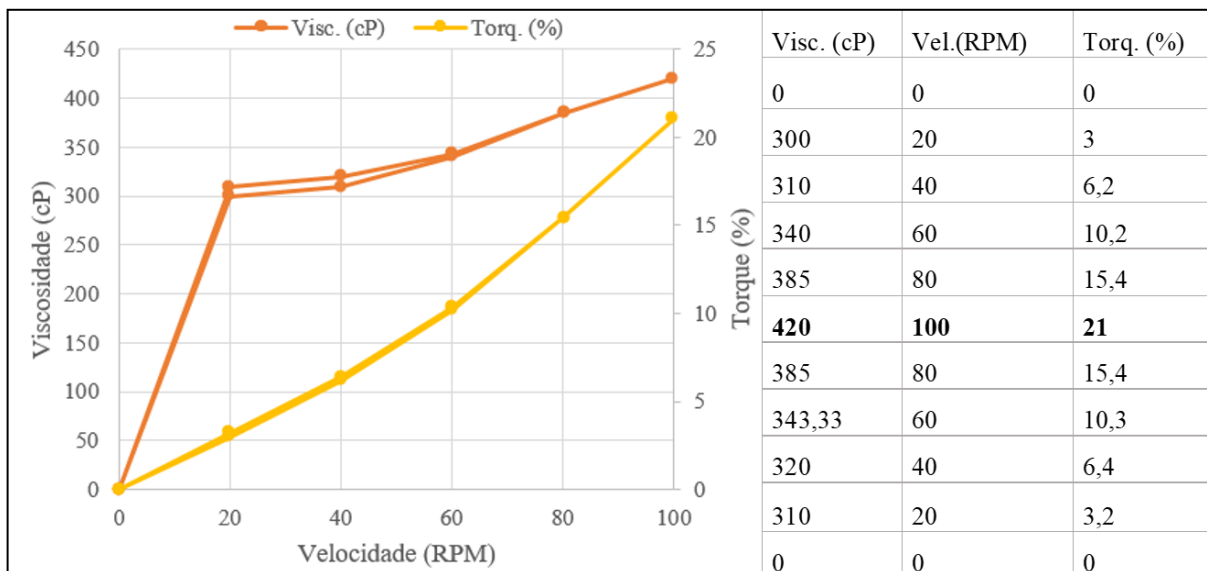
Aumentando a porcentagem de EAF para 20%, (EAF20 – Figura 54), a viscosidade chega ao nível de 276 cP com torque de 13,8% indicando uma baixa tensão de escoamento, e por conseguinte maior fluidez de mistura, concordando com o menor tempo de escoamento no

Estudo das propriedades reológicas dos Compósitos Cimentícios de Elevada capacidade de deformação tipo ECC com uso de fibras de polipropileno e combinações de pozolanas.

teste de fluxo de Marsh observado no item anterior. O valor demonstrou redução de 73,76% em relação ao traço REF; 72,61% em relação ao CCA50; 76,72% em relação ao CCA40; 34,28% em relação ao EAF10; e 51,06% se comparado ao valor do EAF30. Percebe-se que tanto para EAF10 quanto para EAF20 com o decréscimo de rotação a taxa de viscosidade e torque, praticamente não há diferença entre os valores até 0 rpm.

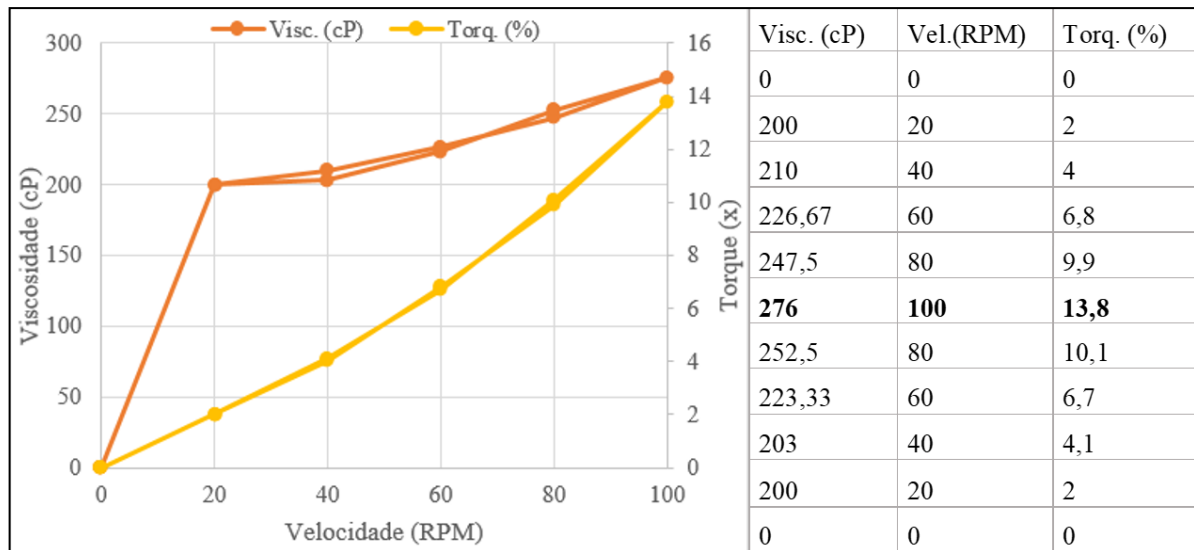
A mistura de EAF30 (Figura 55) demonstrou viscosidade 1,86 vezes inferior ao valor do traço REF, com taxa de torque de 28,2% e a viscosidade atingiu 564 cP. Dentre todas as combinações ternárias de materiais suplementares, esta demonstrou aumento de viscosidade de 25,53% em relação a EAF10 e 51,06% sobre EAF20. Nota-se aqui uma redução da viscosidade e torque conforme a velocidade retorna para 0 Rpm. Yang *et al.* (2009) sintetizam que viscosidades baixas são necessárias para melhor deformabilidade das misturas de ECC enquanto elevadas tensões de escoamento são desejáveis para uma melhor distribuição das fibras, podendo essa última verificação ser analisada em concordância com os resultados de tração em estado endurecido. Os resultados obtidos para as misturas com EAF vão de encontro as afirmações de Vance *et al.* (2013) que ao estudarem misturas binárias e ternárias contendo materiais suplementares, aquelas contendo *metacaulim* apresentaram diminuição da tensão de escoamento e viscosidade por um provável empacotamento e continuidade entre as partículas.

Figura 53 - Viscosidade e torque do ECC EAF10



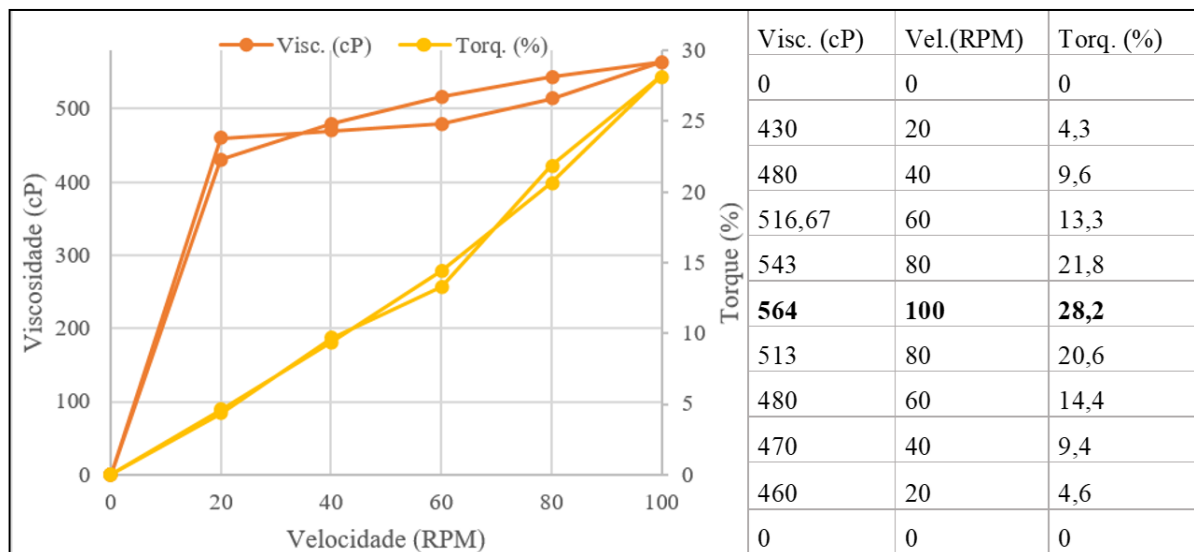
Fonte: a autora, 2023.

Figura 54 - Viscosidade e torque do ECC EAF20



Fonte: a autora, 2023.

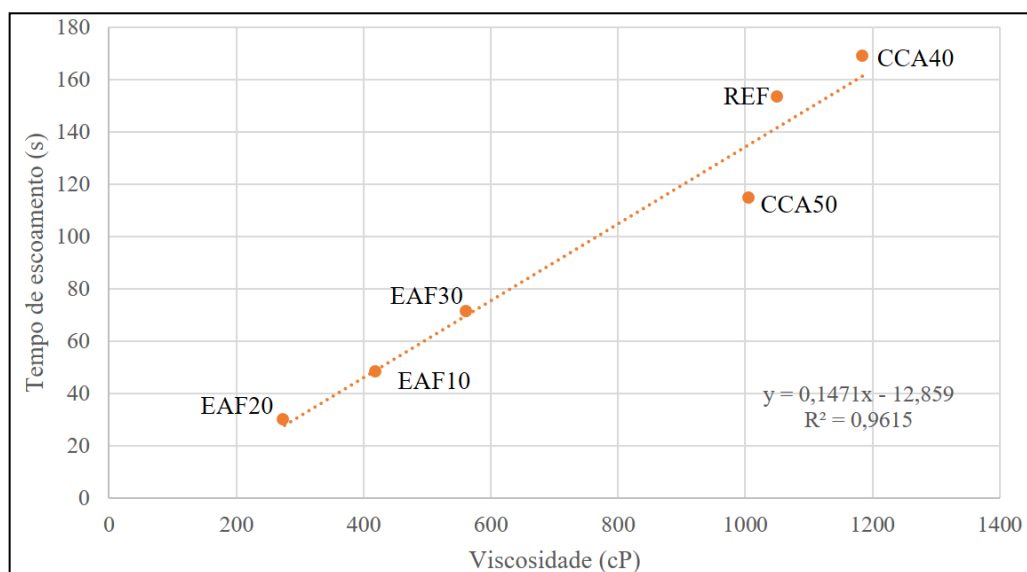
Figura 55 - Viscosidade e torque do ECC EAF30



Fonte: a autora, 2023.

Uma forte correlação linear ( $R^2 = 0,96$ ) foi encontrada neste estudo entre o tempo de fluxo do cone de Marsh e a viscosidade plástica. Sendo a viscosidade diretamente relacionada ao tempo de escoamento da mistura, conforme indica a Figura 56. Isso demonstra que o teste de fluxo do cone de Marsh pode ser um método indireto, simples e confiável para medição de viscosidade no local ou em laboratório. Li e Li (2013) encontram semelhante relação para um estudo com sete misturas variando o agente aditivo, onde o  $R^2=0,95$  para estas duas propriedades.

Figura 56 - Relação entre ensaio direto com viscosímetro e valores indiretos do fluxo do Cone de Marsh



Fonte: a autora, 2023.

#### 5.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO

No compilado dos resultados em estado fresco, o intuito foi verificar como a inserção de materiais suplementares afetam as propriedades reológicas das misturas, todos comparados ao traço referencial já desenvolvido pela linha de pesquisa do LEME por Righi (2015, 2022). Uma vez que as misturas alternativas se demonstraram passíveis de inserção em fôrmas, foram realizados os ensaios destrutivos em estado endurecido a fim de comparar resultados com a pesquisa supracitada.

Um dos objetivos é verificar se o controle na granulometria de areia impacta no desempenho mecânico das misturas. Considerando que Righi (2015) encontrou os melhores resultados para inserção de 30% de CCA suplementar, e em Righi (2022) para misturas com 50% de CCA, cabe aqui uma análise atenta a mistura de CCA40 como hipótese de ser uma mistura intermediária satisfatória. A mistura de CCA50 foi realizada como um balizador de resultados, uma vez que, até então, é a mistura recente mais satisfatória encontrada nos estudos.

No conjunto de resultados do item anterior a trabalhabilidade mostrou significativa melhora para misturas com incorporação de EAF. Contudo, neste item será identificado se as características mecânicas para essas misturas, EAF10, EAF20 e EAF30, são capazes de manter o desempenho para um ECC passível de aplicação em escala real.

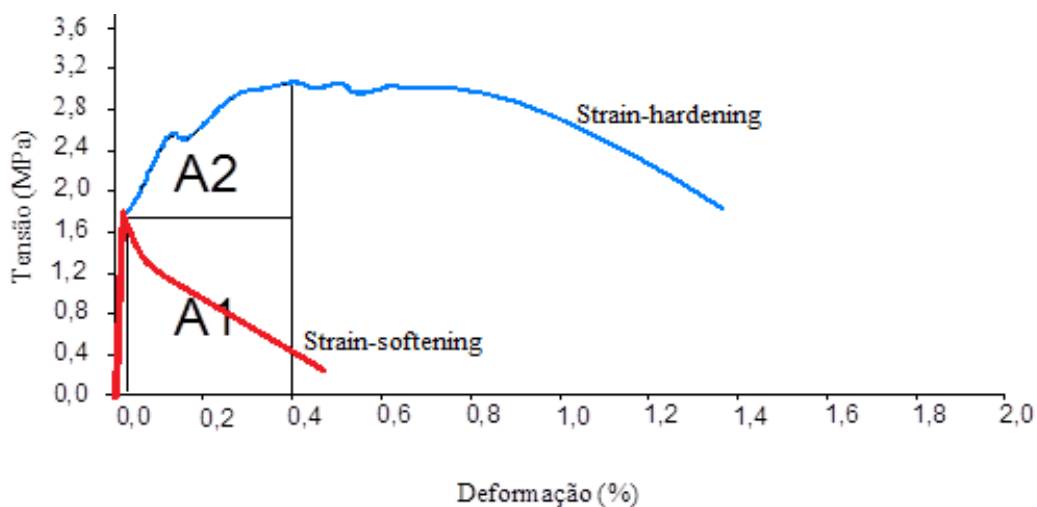
Os resultados seguintes irão levar em consideração dados quantitativos e qualitativos para selecionar o traço com resultado mais satisfatório para esta pesquisa levando também em consideração o desempenho fresco. Como discriminado na metodologia, os testes foram realizados com 28 dias de idade, tendo sido realizados, os de tração e flexão no Laboratório LAPOL, e o de compressão axial no próprio LEME.

Uma das características qualitativas mais relevantes do ECC é sua capacidade de múltipla fissuração e ganho de resistência mesmo após tensão de ruptura inicial, ou seja, comportamento *strain-hardening*. Para definição deste parâmetro foi necessário obter o coeficiente de deformação também estudado por Righi (2015) e retratado em pesquisas recentes de Chen, Wang, Chen (2023) na pesquisa de outros ECC, bem como rochas duras e frágeis. Essa verificação foi definida apenas para o ensaio de tração em deformações de 0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4%.

De acordo com a equação 6 e ilustrações da Figura 57, a obtenção do coeficiente (A2') se dá por uma relação entre uma área fictícia abaixo da curva de deformação cujo limite é a tensão de abertura da primeira fissura (A1) e uma área acima (positiva) ou abaixo (negativa) desta tensão até os limites estabelecidos na leitura do equipamento (A2). Se, o coeficiente for igual ou mais de 1, o compósito representa característica *strain-hardening*. Caso contrário, se o coeficiente for inferior a 1, o compósito se caracteriza por comportamento *strain-softening*, indicando perda na capacidade resistiva em tensões superiores a primeira fissura.

$$COEFICIENTE = A2' = \frac{A1 + A2}{A1} \quad (\text{equação 6})$$

Figura 57 - Definição de áreas de interesse para cálculo de coeficiente de deformação



Fonte: Righi (2015).

#### 5.4.1 Tração Direta

A Tabela 13 compila os coeficientes numéricos, os quais são uma síntese da análise gráfica das figuras que irão seguir a discussão desses resultados. Salienta-se que as porcentagens de deslocamento são apenas em referência a alma do corpo de prova limitada para o ensaio de tração, no mesmo local também foi identificado a quantidade de fissuras para os diferentes traços que se apresenta na mesma tabela (Figura 58).

Para todas as amostras e em uma análise geral das marcas estipuladas para cálculo do coeficiente de deformação, o valor resultante ficou superior a 1, indicando comportamento *strain-hardening*, que pode ser visualizado pelas oscilações na leitura dos resultados para as Figuras que seguem. Salienta-se que para todas as análises, o carregamento foi cessado quando a contínua deformação não apresentasse mais tensão de aumento, sendo o mesmo aplicado para os testes seguintes de flexão a quatro pontos.

Figura 58- Situação após ensaio do corpo de prova submetido à tração – verificação das fissuras na alma (amostra CP1 CCA50)



Fonte: a autora, 2023.

Zhou *et al.* (2010) indicam que o comportamento de múltiplas trincas do ECC resulta da interação entre fibra, matriz e interface. Um dos critérios para ter o comportamento de múltiplas trincas é que a resistência à tração da matriz deve ser menor do que a resistência da ponte de fibra ao longo do plano da trinca. Conseqüentemente, após as trincas da matriz, as fibras podem suportar a carga de tração crescente, o que gera novas trincas. Quando a carga de tração excede a resistência mínima da ponte de fibra no ECC, as fibras neste plano de trinca são

puxadas para fora da matriz ou se rompem e o ECC falha. A resistência mínima da ponte de fibra é registrada como a resistência à tração final no teste de tração uniaxial. Obviamente, uma margem maior entre a resistência à tração última e a primeira resistência à fissuração dá à matriz mais chances de fissurar e resulta em uma maior capacidade de deformação à tração.

Tabela 13 - Resultados para comportamento de corpos de provas ensaiados à tração

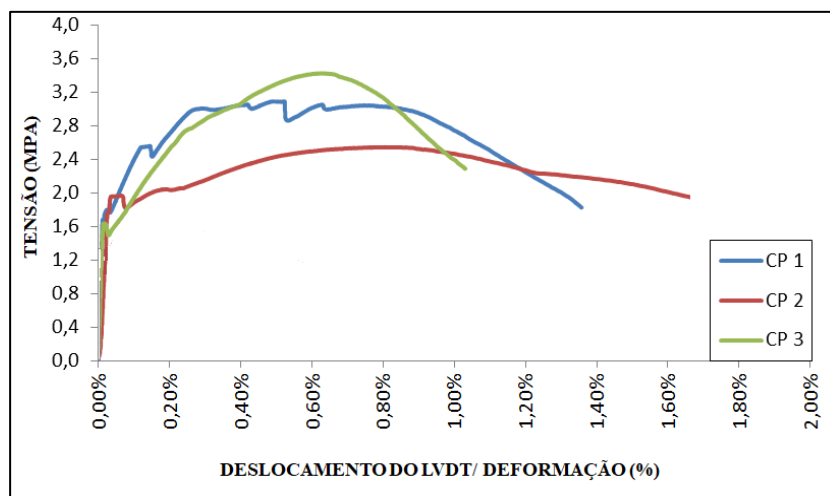
TRAÇÃO DIRETA									
TRAÇO	CP	Tensão de abertura da primeira fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Nº de fissuras	A2' (0,4%)	A2' (0,8%)	A2' (1,2%)	A2' (1,4%)	Comportamento
REF	1	1,62	3,08	8	2,26	2,06	1,94	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	1,69	2,54	9	1,32	1,42	1,45	1,43	<i>Strain-hardening</i>
	3	1,55	3,42	7	1,67	1,96	*	*	<i>Strain-hardening</i>
CCA40	1	1,31	2,09	2	1,26	1,44	1,44	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	2,25	3,13	4	1,01	1,13	*	*	<i>Strain-hardening</i>
	3	1,94	1,94	3	0,79	0,79	0,81	0,85	<i>Strain-softening</i>
CCA50	1	1,53	1,9	7	1,1	1,13	1,16	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	2,11	2,11	3	0,78	0,78	*	*	<i>Strain-softening</i>
	3	2,48	2,48	2	0,71	0,74	*	*	<i>Strain-softening</i>
EAF10	1	0,99	1,2	4	1	1,05	1,09	1,11	<i>Strain-hardening</i>
	2	1,6	1,82	3	1,03	*	*	*	<i>Strain-hardening</i>
	3	2,21	2,21	5	0,96	0,93	0,91	*	<i>Strain-softening</i>
EAF20	1	1,61	1,97	4	1,11	1,12	1,14	1,11	<i>Strain-hardening</i>
	2	1,27	1,62	5	1,01	1,08	1,13	1,15	<i>Strain-hardening</i>
	3	1,44	1,46	2	1	1	0,92	0,94	<i>Strain-softening</i>
EAF30	1	1,44	1,8	2	1,13	1,1	1,1	1,08	<i>Strain-hardening</i>
	2	0,95	0,95	3	1	0,99	0,98	*	<i>Strain-softening</i>
	3	0,99	1,06	3	1,06	1,02	*	*	<i>Strain-hardening</i>

Fonte: a autora, 2023.

Para o traço referência, Figura 59, sem utilização de material suplementar ao cimento, a média de tensão para abertura da primeira fissura foi de 1,62 MPa, tendo tensão máxima de 3,01 MPa ao longo do carregamento. Os traços com CCA40 (Figura 60) e CCA50 (Figura 61)

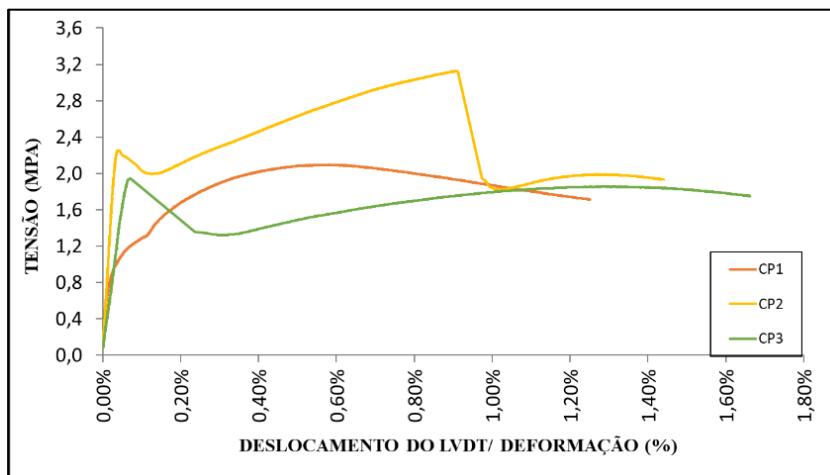
apresentaram média de tensão na abertura da primeira fissura de, respectivamente 1,83 MPa e 2,04 MPa, cujas tensões máximas de leitura atingiram os patamares médios de 2,38 MPa e 2,16 MPa, esses valores refletem uma redução respectiva de 20,93% e 28,24% em relação a máxima tensão referencial. Para ambos os conjuntos de amostra é possível notar aumento do coeficiente de deformação simultâneo a deformação da alma do corpo de prova. Para o CCA50 duas amostras apresentaram comportamento *strain-softening* indicando perda da capacidade de múltipla fissuração em ECC com essa quantidade de substituição.

Figura 59 - Resistência a tração para o ECC referência



Fonte: a autora, 2023.

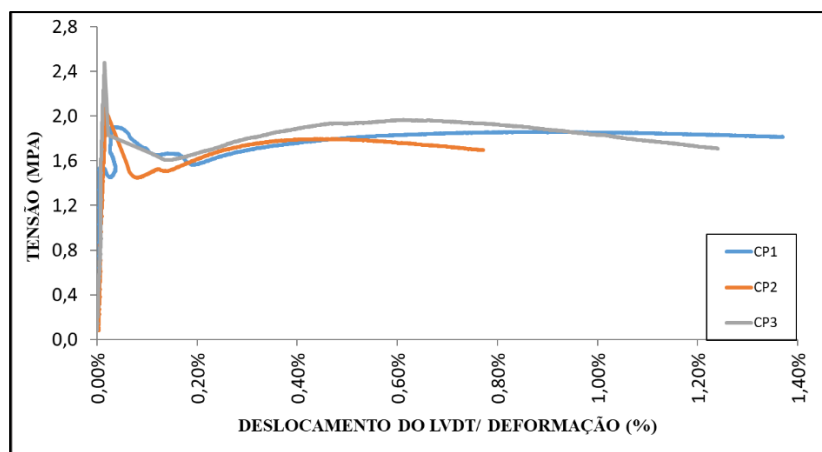
Figura 60 - Resistência a tração para o ECC CCA40



Fonte: a autora, 2023.



Figura 61 - Resistência a tração para o ECC CCA50



Fonte: a autora, 2023.

Zhang *et al.* (2020) testaram misturas de ECC com uma combinação de cinzas volante e de CCA combinadas ao cimento, para uma mistura com 50% de CCA os resultados de tração que apresentaram redução na capacidade de deformação, mesmo que exibindo capacidades de deformação elevadas.

No estudo de Righi (2015) onde no ECC o cimento foi substituído por CCA em 10%, 20%, 30% moído a 8 h, a resistência à tração e capacidade de deformação foram comparáveis ao grupo de referência, com destaque para o CCA 20% cujos coeficientes de deformação para as mesmas marcas aqui analisadas (0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4%) atingiram marcas de 3,28, 4,09, 5,12 e 4,53 indicando elevado potencial de múltipla fissuração. Isso implicaria afirmar que em combinações binárias exclusivas de cimento e CCA, porcentagens de substituições favoráveis ao desenvolvimento do *strain-hardening* ainda estariam na faixa igual ou inferior a 30%. Isso também pode ser relacionada a matriz densa que por sua vez dificulta o espalhamento e dispersão das fibras, e, uma vez que o espalhamento da fibra não for efetivo, as mesmas não iriam conseguir desempenhar o papel de ponte para segurar a tendência de deformação ao teste de tração.

Os traços de EAF10 (Figura 62) indicaram abertura da primeira fissura diante de uma tensão média de 1,6 MPa dentro do desvio padrão considerado para as amostras de referência. Contudo a média da máxima tensão atingida de 1,74 MPa representa só 57% dos valores referenciais. Além disso, considerando os corpos de prova numerados das amostras de EAF10, existe uma grande disparidade entre os resultados, podendo implicar em um ruído experimental ou de leitura de resultados: o CP1 apresentou ganho no coeficiente de deformação ao longo do carregamento, e evidenciou um característica de *strain-hardening* consistente, contudo sua

tensão de abertura de fissura foi inferior a 1 MPa; o CP2 apresentou baixa deformação, se estabilizando na marca de 0,4%; e o CP3 mesmo demonstrando as maiores resistências dentre todo o contexto de utilização de EAF indicou um comportamento de *strain-softening*.

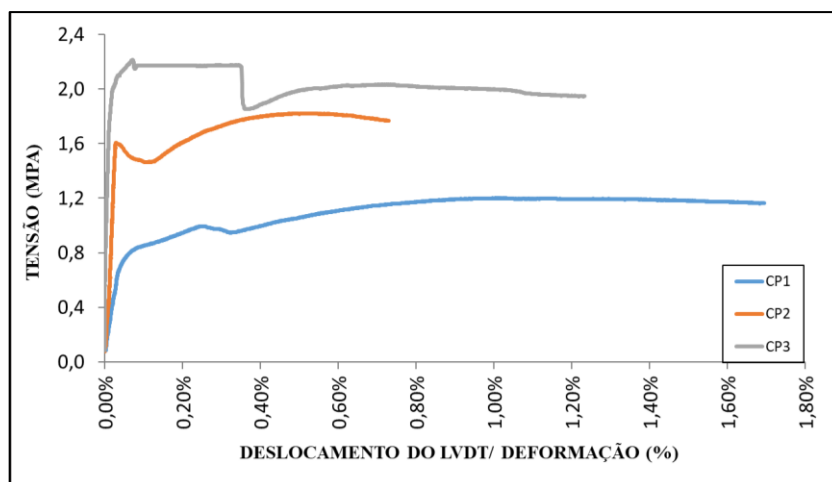
Em síntese, mesmo que as amostras tenham indicado comportamento *strain-hardening* através do cálculo do coeficiente de deformação, este se demonstra muito sutil nesta análise de tração, inclusive diante das outras misturas desenvolvidas, EAF20 e EAF30.

Para os conjuntos de EAF20 (Figura 63) e EAF30 (Figura 64) a máxima tensão atingida foi de 1,68 MPa e 1,27 MPa, o que, respectivamente representa apenas 55,81% e 42,91% da tensão máxima referencial; já, a abertura da primeira fissura ocorreu na média de 1,44 MPa e 1,12MPa. Para as leituras de deformação os coeficientes não demonstraram valores expressivos mesmo que justificassem o comportamento de *strain-hardening*. Considerando os gráficos dos resultados, o de EAF20 se desenha como o mais semelhante a um comportamento consistente de *strain-hardening*.

Kim *et al.* (2019) misturaram 25% de EAF em misturas de ECC com variação de relação a/c de 0,60, 0,48 e 0,35, nos resultados os autores identificaram que todos as amostras exibiram padrões aparentes de fissuras múltiplas com capacidades de deformação variando de 1,0% a quase 3,6%, contudo, à medida que a relação a/c foi sendo reduzida, com ela também a deformação diminuiu, sendo que, por exemplo, as misturas com EAF e a/c = 0,48 apresentaram tenacidade 40% superior a mistura de ECC referência. Os autores ainda explicam que o aumento da tenacidade é devido ao aumento da resistência da matriz causada pela redução da relação água/aglomerante, e que também as partículas de escória são mais comumente ativadas pelo produto de hidratação do cimento Portland, onde o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação é o principal ativador.

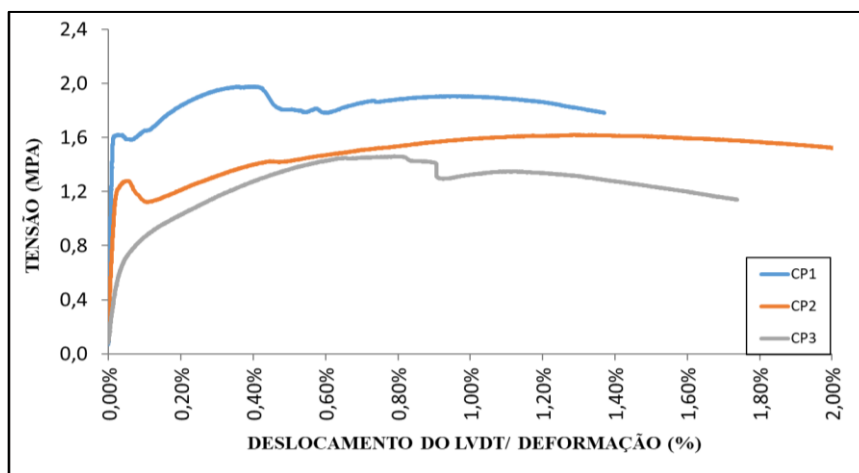
Tais produtos de hidratação da EAF levam à diminuição da porosidade na matriz, resultando em maior resistência e tenacidade da mesma, o que por consequência reduz a margem para desenvolver trincas múltiplas em termos de taxa de tenacidade. No entanto, Kim *et al.* (2019) também verificaram características de trabalhabilidade e dispersão da fibra, concluíram que, dentro da dosagem limitada de escória empregada nos experimentos, a contribuição das partículas de escória para a trabalhabilidade superou o efeito colateral da diminuição do potencial de múltipla fissuração.

Figura 62 - Resistência a tração para o ECC EAF10



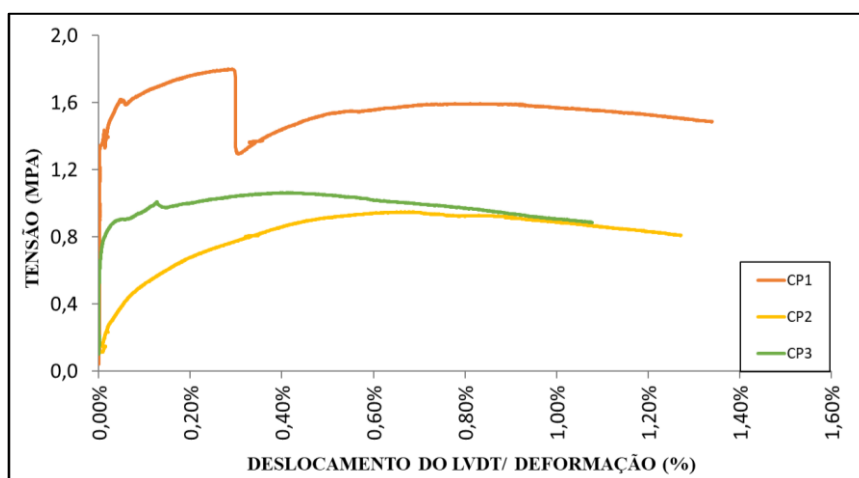
Fonte: a autora, 2023.

Figura 63 - Resistência a tração para o ECC EAF20



Fonte: a autora, 2023.

Figura 64 - Resistência a tração para o ECC EAF30



Fonte: a autora, 2023.

Mesmo sendo possível a comparação de resultados com outros pesquisadores do LEME, de modo geral este ensaio ainda apresenta grande variabilidade que implica em possíveis erros de leitura, os quais podem ser refletidos na irregularidade e descontinuidade dos gráficos e dados tabelados. Como já informado sobre esta dificuldade no item 4.4.1, são necessários ensaios complementares para afirmação de uma condição real de comportamento *strain-hardening*, assim o próximo item, de flexão à quatro pontos, vem como indicativo para tentar preencher as lacunas da variabilidade dos resultados supracitados. Esta dificuldade foi comunicada anteriormente por Righi (2022) e Barros (2023), abrindo um pressuposto que mais estudos devem ser desenvolvidos com o intuito de parametrizar os passos que regem os ensaios de tração direta, como molde de corpos de prova, garras metálicas para fixação, base para dispositivos de leitura, entre outros itens necessários a realização do ensaio.

#### 5.4.2 Flexão à quatro pontos

Semelhante a análise de tração, para flexão a quatro pontos também foi considerado a análise do comportamento da variação da curvatura dos gráficos ao longo dos esforços de tensão. Os resultados de deslocamento obtidos inicialmente em milímetro pela leitura do LVDT foram convertidos em porcentagem de deslocamento para melhor entendimento e comparação. Salienta-se que como a força flexora está em direção perpendicular à seção longitudinal de 30 cm dos corpos de prova, este é o sentido que irá tender ao deslocamento representando 1% a cada 3 mm deformados. Para verificação conforme equação 6 e ilustrações da Figura 57, foram definidas as verificações em deformações de 1%, 2%, 3% e 4%. Se a resultante do coeficiente for inferior a 1 o ECC será classificado como *strain-softening*, do contrário será definido como *strain-hardening*. A síntese dos resultados com base nessa identificação se apresenta na Tabela 14 e análise gráfica está demonstrada na Figuras que irão seguir a discussão desses resultados.

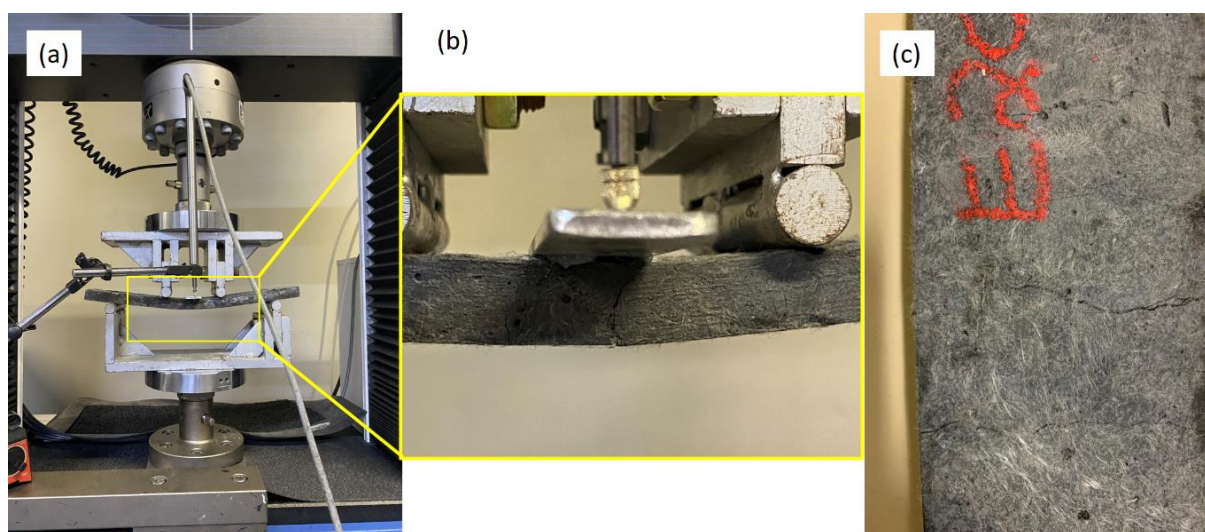
Tabela 14 - Resultados para comportamento de corpos de provas ensaiados à flexão

FLEXÃO DIRETA										
TRAÇO	CP	Força de abertura da 1ª fissura (N)	Força Máx. (N)	Desloc. vertical na primeira fissura (mm)	Desloc. vertical na tensão máxima (mm)	A2' 1,0 %	A2' 2,0 %	A2' 3,0 %	A2' 4,0 %	Comportamento
REF	1	451,18	615,19	0,49	4,47	1,22	1,26	1,24	1,2	<i>Strain-hardening</i>
	2	582,36	764,15	0,31	4,04	1,2	1,22	1,17	*	<i>Strain-hardening</i>
	3	515,95	641,47	0,07	5,02	1,11	1,17	1,16	*	<i>Strain-hardening</i>
CCA40	1	220,87	295,23	0,52	8,25	1,05	1,12	1,19	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	224,05	342,23	0,15	11,12	1,12	1,27	1,3	1,35	<i>Strain-hardening</i>
	3	218,12	341,42	0,06	4,96	1,26	1,4	*	*	<i>Strain-hardening</i>
CCA50	1	230,05	420,34	0,27	6,18	1,37	1,59	1,67	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	236,73	334,99	0,17	3,37	1,19	1,28	1,29	*	<i>Strain-hardening</i>
	3	204,73	288,2	0,24	7,13	1,19	1,26	1,31	*	<i>Strain-hardening</i>
EAF10	1	194,9	303,07	0,37	9,36	1,16	1,29	1,37	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	194,21	348,69	0,35	10,72	1,35	1,5	1,59	1,64	<i>Strain-hardening</i>
	3	175,5	267,25	0,01	8,31	1,32	1,39	1,43	*	<i>Strain-hardening</i>
EAF20	1	80,41	327,32	0,21	6,76	2,9	3,27	3,41	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	81,34	347,37	0,03	9,66	3,03	3,32	3,49	3,61	<i>Strain-hardening</i>
	3	90,71	290,54	0,19	8,51	2,14	2,51	2,71	*	<i>Strain-hardening</i>
EAF30	1	58,04	298,92	0,02	1,73	4,3	4,39	4,3	*	<i>Strain-hardening</i>
	2	165,42	297,85	0,13	6,75	1,55	1,69	1,72	*	<i>Strain-hardening</i>
	3	138,33	295,52	0,08	5,14	2,06	2,13	2,13	*	<i>Strain-hardening</i>

Fonte: a autora, 2023.

A partir de uma primeira visão geral da Tabela 14 é possível identificar que todos os corpos de prova apresentaram um comportamento de *strain-hardening*, indicando capacidade de se deformarem e de resistir ao aumento de carga constante mesmo após a primeira abertura de fissura (Figura 65). Comportamento semelhante, inclusive com ilustração de gráfico força x deformação, já foram demonstrados pelas pesquisas de autores como Li (2003), Zhou *et al.* (2010), Yang *et al.* (2007) e Righi (2022), Lim *et al.* (2012).

Figura 65 - Situação durante e após ensaio do corpo de prova submetido à flexão – verificação das fissuras (amostra CP1 EAF20)

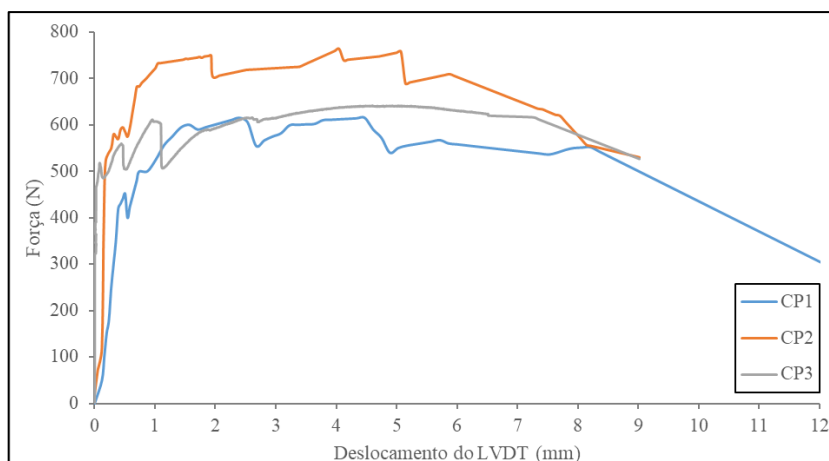


Fonte: a autora, 2023.

Considerando o traço de referência, é possível observar na Figura 66 que mesmo a média da força máxima ser de 673,60 Mpa, e configurando o maior valor dentre o conjunto das amostras, a visibilidade do comportamento *strain-hardening*, considerando as faixas de deslocamento de análise, é a menos perceptível, inclusive apresentando com decréscimo de capacidade de múltipla fissuração à medida que ultrapassa os 2% de deformação. Além disso, em contrapartida para maior força máxima, as amostras de referência apresentam o menor deslocamento nesta faixa de tensão, de 4,51 mm.

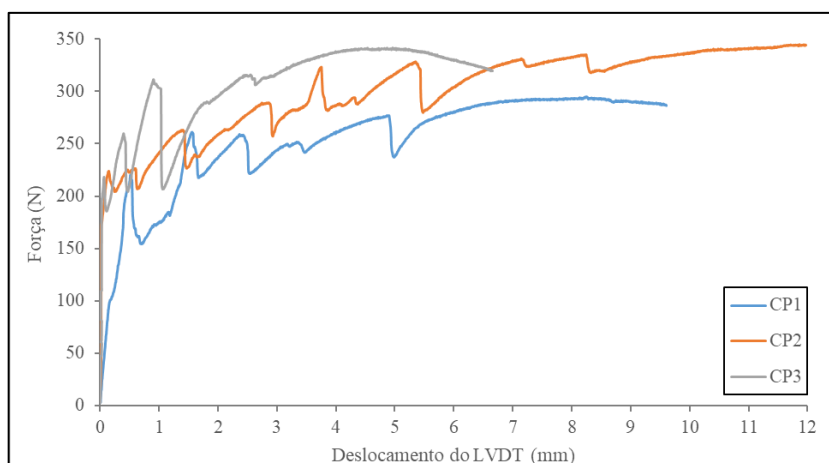
As amostras do compósito de CCA40 (Figura 67) apresentaram força média máxima de 326,29 MPa com respectivo deslocamento de 8,11mm, redução de 51,56% de resistência. Já para CCA50 (Figura 68) a força média máxima atingida foi de 347,84 MPa, 48,36% inferior ao referencial, e mesmo o comportamento *strain-hardening* ter maiores taxas se comparado ao CCA40, seu deslocamento na tensão máxima foi na média de 5,56 mm. Este decréscimo de capacidade *strain-hardening* e menor abertura de fissura com aumento gradual da suplementação por CCA também foi observado por Righi (2022) ao substituir o cimento Portland pelo subproduto nas porções de 30, 50 e 70% sem controle de agregado miúdo.

Figura 66 - Resultados do ensaio de flexão - ECC Referência



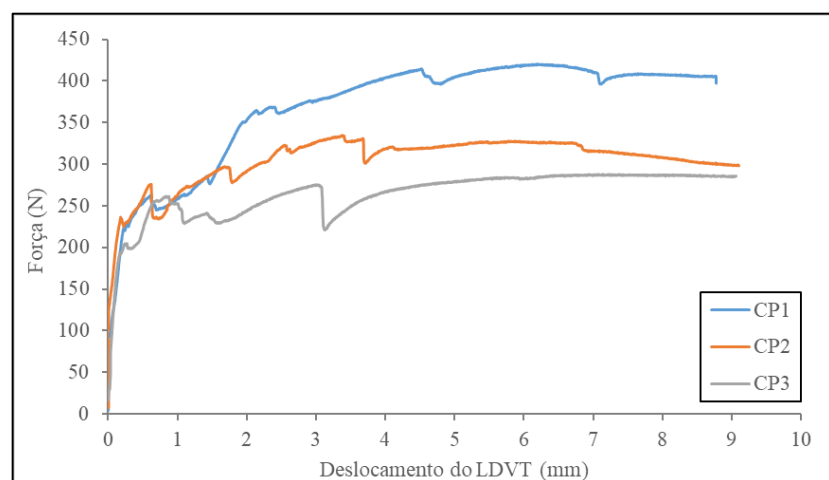
Fonte: a autora, 2023.

Figura 67 - Resultados do ensaio de flexão - ECC CCA40



Fonte: a autora, 2023.

Figura 68 - Resultados do ensaio de flexão - ECC CCA50

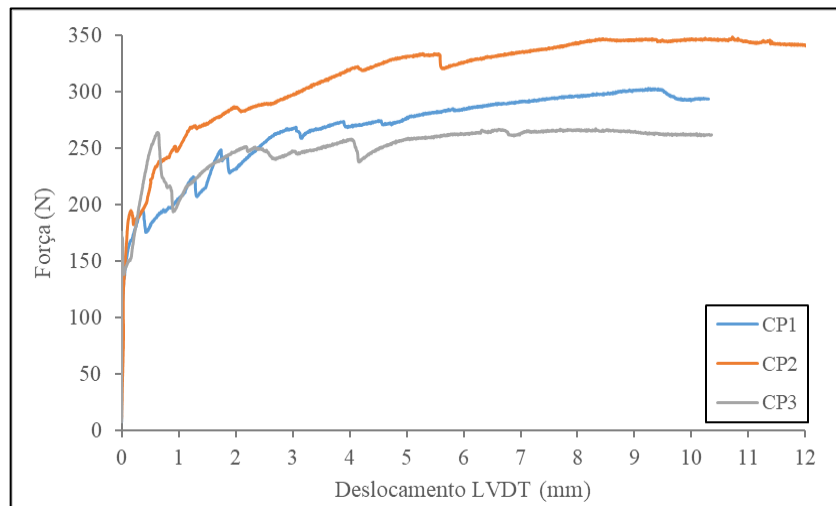


Fonte: a autora, 2023.

O conjunto de amostras com 10% e EAF junto ao CCA em substituição ao cimento Portland apresentou média de tensão máxima 306,33MPa e deslocamento médio de 9,46mm, superando a capacidade de deformação em duas vezes (Figura 69). Na sequência, com 20% de EAF (Figura 70), exemplificado em ensaio pela Figura 65, o deslocamento obteve aumento de 84% relacionado ao referencial, com valor médio de 8,31mm para tensão máxima média de 321,74 MPa, indicando queda de resistência de 52,23%.

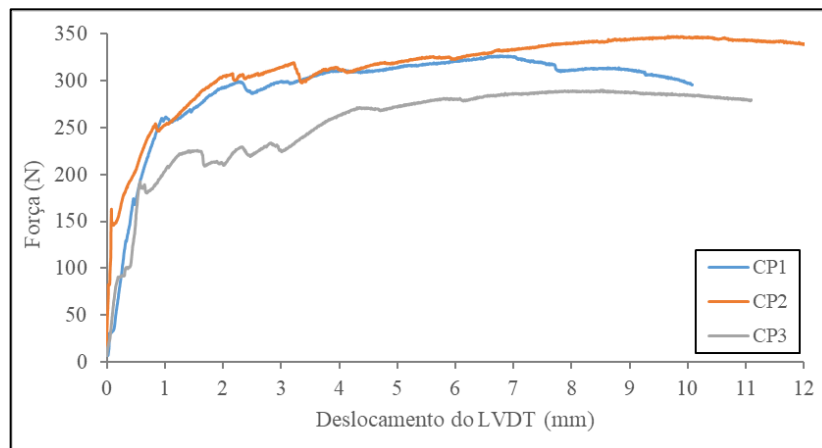
Considerando a teoria de que o ECC deve apresentar capacidade de múltipla fissuração, estes valores de deslocamento conseguem superar a questão de queda de resistência a flexão comparado ao referencial. Porém, para EAF30 (Figura 71), o deslocamento médio praticamente se iguala às amostras de referência, contudo demonstra uma capacidade a flexão de apenas 44,15% dos valores de referência, com capacidade de força máxima média de 297,43 MPa.

Figura 69 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF10



Fonte: a autora, 2023.

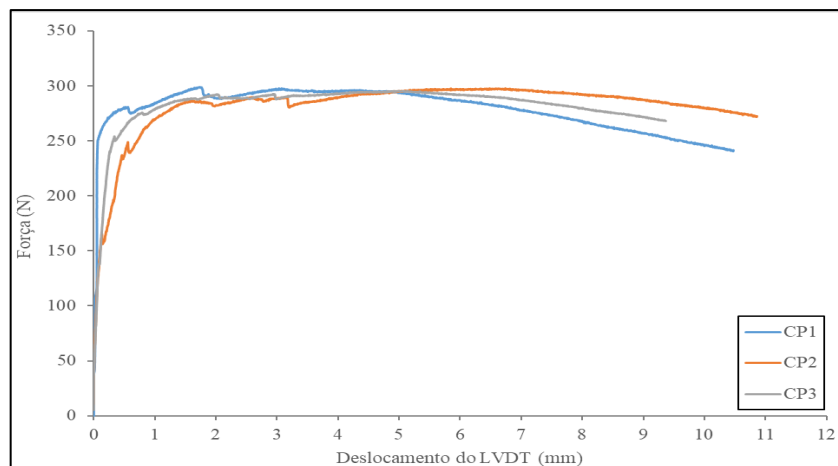
Figura 70 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF20



Fonte: a autora, 2023.



Figura 71 - Resultados do ensaio de flexão - ECC EAF30

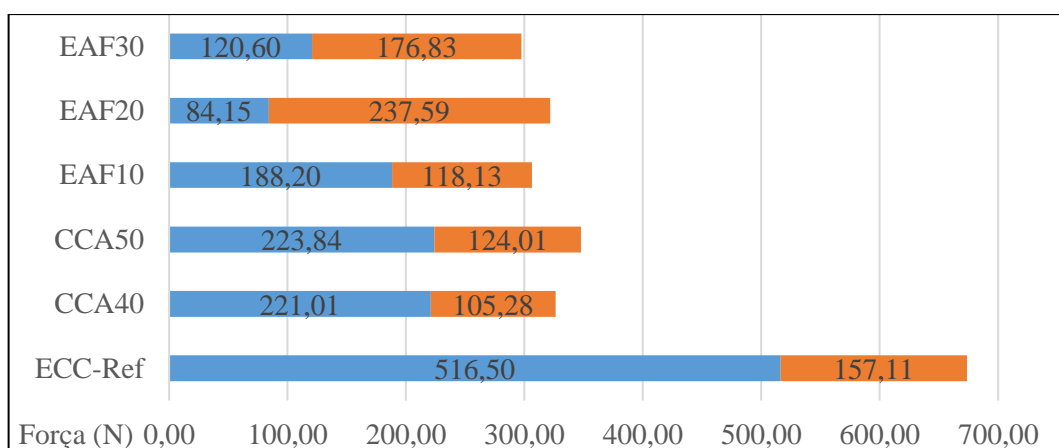


Fonte: a autora, 2023.

Independente da resistência inicial que a amostra consegue ter ante a primeira fissuração, o comportamento expressivo de *strain-hardening* se manifesta pelo ganho de resistência após esse primeiro evento. A exemplo disso, foi desenvolvido o gráfico da Figura 72, onde as barras em azul representam a média de tensões na abertura da primeira fissura, e o complemento da barra em laranja demonstra o ganho de resistência após fissuração até o pico máximo de tensão (ou seja, média da tensão máxima subtraindo a média de tensão no início da fissuração).

Assim, as informações demonstram que apesar da alta resistência à fissuração das amostras referencias submetidas a flexão, as mesmas amostras obtiveram ganho de resistência pós-fissuração de apenas 30,41% de capacidade. Destacam-se os corpos de prova de EAF20 que desenvolveram 282,33% de resistência após a primeira abertura de fissura com tensão média de 84,15 MPa, sendo está a menor tensão média de abertura de fissura dentre todos os conjuntos analisados para este ensaio. Zhou *et al.* (2010) investigaram ECC com mistura ternária de pó de calcário, escória de alto forno e cimento Portland e constataram que à medida que o teor de EAF aumentava na mistura, a primeira resistência à primeira fissuração diminuía. Isso pode ser bastante perceptível de EAF10 para EAF20; e de EAF10 para EAF30 a teoria se repete.

Figura 72 - Ganho de força diante da resistência à flexão após primeira fissuração



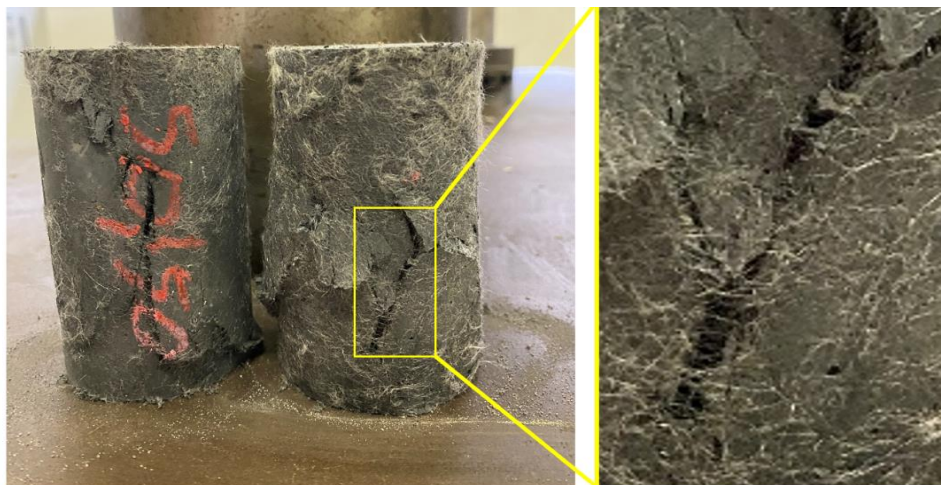
Fonte: a autora, 2023.

#### 5.4.3 Compressão Axial

A resistência a compressão é geralmente um parâmetro comparativo que remete a matriz cimentícia e interação da fibra-matriz com os compósitos. Zhu, Yang e Yao (2012) ao estudarem a EAF e cinzas para melhorar o comportamento do ECC perceberam que esses materiais não apenas aumentam a resistência da matriz, mas também melhoram a ductilidade e a tenacidade. Zhou *et al.* (2010) indicam que a resistência do ECC deve permitir que a ligação friccional entre a fibra e a matriz aumente à medida que a fibra desliza para fora da matriz durante a solicitações de esforços (Figura 73).

Neste ponto, à medida que as fibras saem da matriz, a trinca se abre progressivamente de modo a suportar uma carga crescente, o que gera novas trincas em outros locais. Deste modo, ECC com matrizes pouco resistentes podem não ancorar adequadamente as fibras; enquanto matrizes muito densas podem não permitir o deslize da fibra, fazendo com que se rompa ao invés de agir em múltipla fissuração como ponte de transição de tensões.

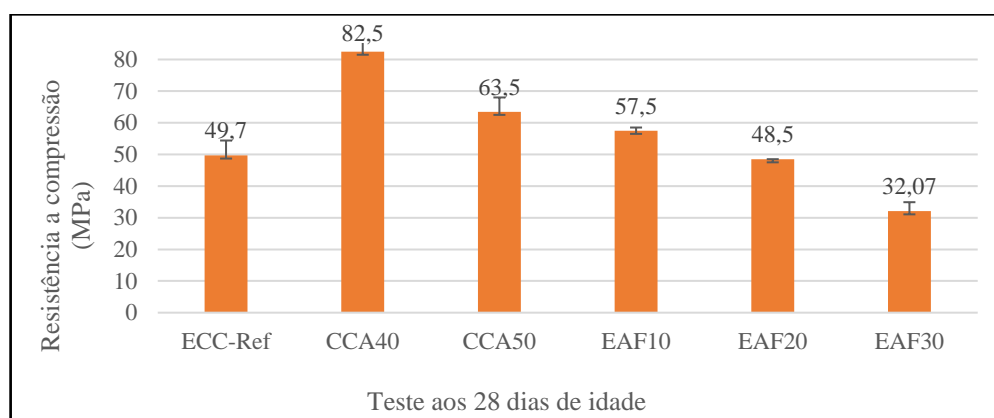
Figura 73 - Ponte de fibras na abertura da fissuração para ensaio de compressão



Fonte: a autora, 2023.

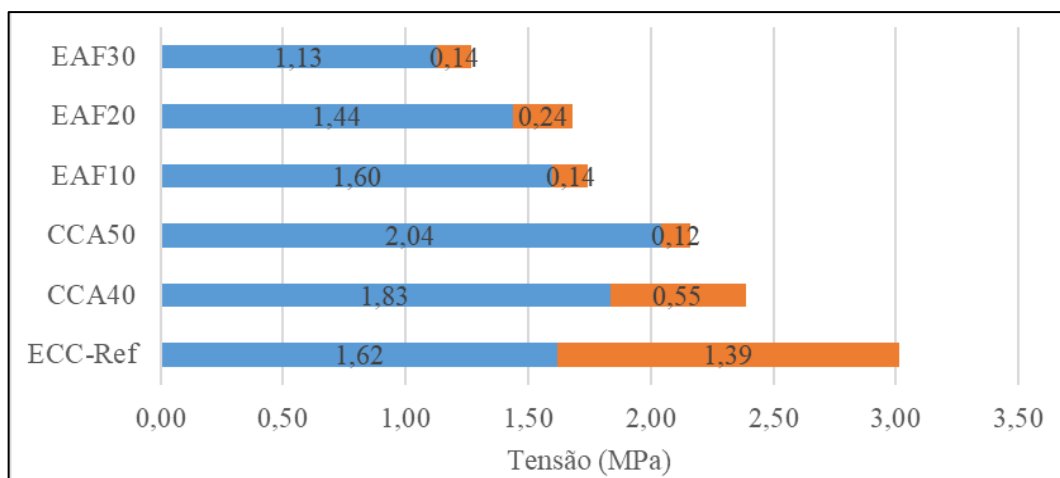
Zhou *et al.* (2010) ao analisar compósitos com pó de calcário e EAF identificaram boas propriedades de tração a partir de resistências a compressão acima de 38 MPa. Zhu *et al.* (2014) em estudos com sistemas binários e ternários de ECC com cinzas volantes e EAF conseguiram estabelecer uma relação diretamente proporcional entre a abertura de fissura e resistência a flexão e tração máxima com a resistência à compressão do ECC. Partindo desse contexto inicial seguem os gráficos das Figuras 74 e 75 (que segue a mesma concepção do gráfico da Figura 72) respectivamente com dados de compressão e o demonstrativo dos resultados de tração no que tange a crescente resistência após a primeira abertura de fissura. Com base nas figuras, e exceto para o traço de referência, nota-se de modo geral um decréscimo de resistência coincidente entre tração e compressão na ordem do conjunto de amostras analisadas, podendo indicar uma certa correlação entre os parâmetros característicos.

Figura 74 - Valores de resistência a compressão



Fonte: a autora, 2023.

Figura 75 - Ganho de resistência à tração após primeira fissuração



Fonte: a autora, 2023.

Considerando apenas a análise de compressão, o traço referência da pesquisa apresentou média de 49,7 MPa. O CCA40, apresentou a maior resistência dentre todas as amostras modificadas de ECC, com incremento de 66% da resistência, num total de 82,5 MPa; na sequência o traço de CCA50 apresentou 63,5 MPa, um crescimento de 27,76% de resistência se comparado ao traço referencial. Righi (2022) ao investigar ECC com CCA no mesmo traço que este trabalho, porém sem controle granulométrico de areia, e para as substituições em CCA30, CCA50 e CCA70, obteve os respectivos resultados médios de resistência a compressão: 52,82 MPa, 41,92 MPa, e 38,75 MPa.

Percebe-se que assim como em Righi (2022), o aumento da quantidade de CCA nas misturas tende a decair a resistência à compressão. Além disso, aqui as resistências de CCA50 foram maiores do que se comparadas a autora por um possível melhoramento no empacotamento das partículas decorrentes do controle granulométrico do agregado miúdo.

As misturas de EAF10 resultaram em uma resistência de 57,5 MPa, ficando ainda acima do traço referência em 15,69%. Já, EAF20 e EAF30 com respectivas resistências de 48,5 MPa e 38,07 MPa, apresentaram decréscimo de resistência nos patamares de 2,41% e 35,47%. Considerando o aumento das porcentagens de EAF na mistura, de EAF10 para EAF30 nota-se também um decréscimo da capacidade resistente a compressão. Somado aos resultados de menores resistência a flexão e a tração vistos anteriormente, pode-se dizer que a EAF implicou em uma dificuldade na formação de resistência mecânica, podendo ser decorrente das características pozolânicas que necessitariam maior tempo de análise, ou até mesmo por uma dificuldade de agir como suplementação ao cimento, sendo aqui necessário maiores estudos para se concluir se o uso do material teve efetividade como a pretendida ao longo desta pesquisa.

Para verificar se realmente há influência das combinações pozolanas aos 28 dias de idade, a Tabela 15 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F consideravelmente maior que o valor de  $F_{crítico}$ , que há influência nas combinações de pozolanas usadas na matriz do ECC.

Tabela 15 - ANOVA da influência de combinações pozolanas no ECC quanto à resistência à compressão

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2857,483	5	571,4967	25,4247	0,000571	4,387374
Dentro dos grupos	134,8681	6	22,47801			
Total	2992,351	11				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

Em busca de melhor compreender os resultados encontrados para os ensaios de resistência à compressão, foi separado em duas análises as combinações de pozolanas nas misturas de ECC. A Tabela 16 demonstra os resultados de análise de variância para as misturas de CCA40 e CCA50 em relação ao traço de referência e a Tabela 17 demonstra os resultados para as misturas de EAF10, EAF20 e EAF30 em relação também ao traço de referência. É possível observar que para as duas análises de variância em relação ao traço de referência e entre os tipos de pozolanas adotadas nos traços, ainda se manteve a constatação que a diferença de porcentagens de pozolanas e os tipos de pozolanas adotadas influenciam nos resultados.

Tabela 16 - ANOVA da influência de combinações CCA40, CCA50 quanto à resistência à compressão

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1084,853	2	542,4267	13,94652	0,030262	9,552094
Dentro dos grupos	116,68	3	38,89333			
Total	1201,533	5				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

Tabela 17- ANOVA da influência de combinações EAF10, EAF20 e EAF30 quanto à resistência à compressão

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	685,6608	3	228,5536	14,65838	0,012666	6,591382
Dentro dos grupos	62,36805	4	15,59201			
Total	748,0289	7				

Onde: SQ = Soma quadrada; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada

Fonte: a autora, 2023.

## 6 CONCLUSÕES

Em síntese, este trabalho cumpriu com seu objetivo de avançar os estudos em busca de um ECC com materiais suplementares brasileiros dentro do grupo de pesquisas do LEME. A escolha das misturas se justificou na busca pela redução de cimento Portland, principal fator que orienta estudos de ECC alternativo como este. De modo geral, mesmo os resultados de resistência ainda inferiores do que trabalhos anteriores, é notável o avanço nas questões de trabalhabilidade e reologia, características que orientaram o objetivo geral desta pesquisa. Cada novo avanço dentro de pesquisas acadêmicas permite que os resultados sirvam de base para o contínuo aprimoramento dos materiais, neste caso de um ECC que satisfaça necessidades de mercado como aquelas sugeridas no capítulo anterior. Neste contexto, e a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa e análise dos dados experimentais e estatísticos foram elaboradas, de forma resumida, as seguintes constatações:

- ✓ Em relação aos ensaios no estado fresco, as misturas com a presença de EAF indicaram maior trabalhabilidade através dos resultados pelo mini *slump-flow* e índice de consistência. Por meio de uma análise estatística foi possível perceber que as combinações binárias e ternárias influenciaram nos resultados destes parâmetros. Neste contexto a mistura de EAF20 foi a que permitiu maior espalhamento da mistura mesmo após a inserção das fibras na matriz;
- ✓ De encontro ao resultado dos dois parâmetros supracitados, a mistura de EAF20 também demonstrou maior fluidez pelo Cone de Marsh. A Mistura de CCA40 demonstrou perda na fluidez inclusive sobre o traço referencial deste estudo. De modo geral, através da análise estatística por ANOVA, as combinações com materiais suplementares influenciam na maior fluidez da mistura; porém considerando apenas as variações de EAF não houve entre si tal relação, pois o menor tempo de fluxo foi de EAF20, seguido por EAF10 e após por EAF30, ou seja, não houve uma mudança proporcional a crescente tal como a porcentagem de substituição;
- ✓ Considerando os resultados sobre viscosidade plástica e torque, a mistura com CCA40 vai de encontro ao maior tempo para escoamento no cone de Marsh, pois esta mistura apresentou maior viscosidade plástica e maior torque para conseguir se comportar como fluído. As misturas ternárias com EAF apresentaram os

menos valores de viscosidade e menor torque, e isso vai de encontro aos melhores resultados obtidos para trabalhabilidade dos ensaios anteriores para estado fresco.

- ✓ Apenas analisando os resultados de estado fresco conclui-se dizer para as combinações binárias, a mistura de CCA50 ainda demonstra desempenho superior a CCA40, mantendo relação com os estudos de Righi (2022); e para as combinações ternárias, os resultados de EAF20 são os mais satisfatórios considerando a reologia da mistura;
- ✓ De um modo geral, considerando os resultados em estado fresco foi possível estabelecer uma relação entre as leituras do cone de Marsh e a viscosidade plástica. Sendo a viscosidade diretamente relacionada ao tempo de escoamento da mistura no cone de Marsh, garantindo uma alternativa simples e confiável para medição de viscosidade mesmo que por um método indireto.
- ✓ Os resultados de tração direta todos os conjuntos de amostras demonstraram a condição *strain-hardening* no mínimo para dois exemplares de cada dosagem. Salienta-se que este ensaio por não ser padronizado, pode ocorrer oscilações e erros de leitura decorrentes do posicionamento das peças e encaixe nas garras de tração. Tal explicação pode suprir o fato da análise variável e dos gráficos com bastante distinção entre amostras de um mesmo traço, indicando possíveis ruídos experimentais. Para as composições apenas com CCA, nota-se um leve ganho de resistência conforme maiores teores de cinza, porém os resultados ainda são inferiores à mistura referencial. À medida que a porcentagem de EAF aumenta junto a combinação ternária, a resistência tende a diminuir bem como o posterior ganho de resistência após primeira fissuração.
- ✓ Os ensaios de flexão a quatro pontos resultaram em leituras mais claras do comportamento inclusive junto a leitura dos dados tabelados. Nota-se maior definição no comportamento *strain-hardening* para todos os conjuntos de amostras. Para as composições binárias ocorre um decréscimo de capacidade *strain-hardening* e menor abertura de fissura com aumento gradual da suplementação por CCA; As misturas com combinações ternárias demonstram menor tensão na abertura da primeira fissura do que as demais, porém após esse evento conseguem resistir mais do que o dobro de tensão aplicada para o primeiro rompimento, com destaque para a mistura de EAF20 que inversamente



a menor tensão de abertura de fissura, obteve o maior ganho de resistência ao longo do carregamento, chegando a 282,33% de resistência.

- ✓ Em relação a compressão axial, com exceção ao EAF30, todas as misturas de ECC refletiram resistências finais compatíveis com valores de mercado, ficando acima de 40MPa. Foi realizado um comparativo com os resultados de tração, onde menores resistências de compressão também significam menores resistência de tração, inclusive à medida que se aumenta a porcentagem de CCA, e EAF nas misturas. Além disso, através de uma análise de ANOVA, foi possível identificar que as diferentes proporções de matérias na composição do ECC influenciam na resistência final.
- ✓ Considerando apenas os ensaios em modo endurecido o as misturas de CCA40 demonstram em parâmetros gerais com os melhores resultados do que as de CCA50, podendo ser uma composição intermediária utilizável. As composições ternárias, se considerar certo equilíbrio entre resultados de estado fresco e endurecido, por mais que não apresentem grandes resistências, são capazes de manter uma trabalhabilidade passível de replicar em escala comercial. Considerando a teoria do ECC de suportar múltipla fissuração após pico de carregamento, os valores apresentados pela mistura de EAF20, em especial para o teste de flexão, podem conseguir superar a questão de resistências inferiores ao traço originário.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo foi possível observar que a EAF proporciona significativas melhoras em estado fresco das misturas de ECC. Contudo, em estado endurecido não demonstrou as maiores resistências se comparada aos traços com CCA e ao traço referência, fato este que pode estar diretamente relacionado com a atividade pozolânica que pode se desenvolver ao longo de idades superiores aos 28 dias de análise. Portanto, para apurar o conhecimento da EAF na contribuição da resistência mecânica recomenda-se testar idades maiores para realização dos ensaios destrutivos de verificação da resistência mecânica;

- Realizar ensaios de fadiga e durabilidade para uma estimativa de viabilidade do ECC em reforço e/ou reparo de obras de arte especiais;

- Estudar melhores parâmetros e diretrizes para os ensaios de tração, visto que a modalidade de ensaio aqui utilizada, e também seguida por outros autores do LEME, demonstra ainda muitos ruídos que permitem oscilações de leituras;
- Simular a utilização como *whitetopping* a fim de quem sabe ir ao encontro das pesquisas feitas com *overlay* por Garcez (2009) para identificar se o desempenho do material e questões ambientais superam os mínimos de resistência exigidos para essas modalidades de recapeamento;
- Produzir dosagens em escala e condições mecânicas ambientais para identificar se, em especial com a escória de alto forno, a trabalhabilidade se mantém em níveis viáveis de utilização.

Além disso no decorrer deste trabalho verificou-se uma série de dados técnicos das misturas, com o enfoque na reologia e características mecânicas que permitissem a identificação do comportamento *strain-hardening*. Mesmo não constante no escopo inicial desta pesquisa, entende-se que com base nessas informações podem ser desenvolvidas outras verificações, dentre elas a quantificação de gasto energético para as misturas de ECC com materiais suplementares. Como é o caso de outros pesquisados, por exemplo Righi (2022) que perpetuou seus estudos de 2015 utilizando por base parte das informações de sua dissertação para compor um levantamento de ACV em sua tese e entender com maior especificidade o *trade off* do seu objeto de estudo. Portanto, também sugere-se avançar os estudos de ACV para verificação de ganho ambiental mesmo diante de resistências não tão elevadas.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609/C1609M: Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)**. Pennsylvania, p. 9. 2012.

ANTIOHOS, S. K., PAPADAKIS, V. G., CHANIOTAKIS, E., TSIMAS, S. Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 877-885, 2007.

ANTIOHOS, S. K.; TAPALI, J. G.; ZERVAKI, M.; COUTINHO, J. S.; TSIMAS, S.; PAPADAKIS V. G. “Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study.” **Construction and Building Materials**. 2013 v. 49, pp. 455-463.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, p. 9. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 10. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, p. 12. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-2: Calda de cimento para injeção Parte 2:determinação do índice de fluidez e da vida útil – método de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 4. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, p. 7. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados — Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, p. 5. 2022.

BANFILL, P. F. G., “Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials”, **Construction and Building Materials**, v. 8, pp. 43-50, 1994.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. New York: Elsevier, 1989. 199 p. (Rheology Series, 3).

BARROS, D. A. **Estudo das propriedades mecânicas de dosagens alternativas de concreto com elevada ductilidade**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Brasil.

BENTUR, A.; MINDESS, S., **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 449 p., London: Elsevier Applied Science, 1990.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 188p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BRETAS, R. E. S.; D’AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: Editora da UFSCar, 2000. 196p.

BOSHOFF, W.; ZIJL, G. **Crack characterisation in SHCC towards durability assessment, Advances in cement-based materials**. Proceedings International Conference on Advanced Concrete Materials. 2009, 215-221.

BUI, V. K.; GEIKER, M. R.; SHAH, S. P. **Rheology of fiber-reinforced cementitious materials**. Conference of High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), p. 221–231, 2013.

CAMPELLO, E.F., **Comportamento Mecânico de Argamassas Reforçadas por Fibras Sintéticas e Metálicas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

CARVALHO, L. L. C; MOTTA, C. A. Uso de Fibras de Aço para Execução do Concreto Armado. **Boletim do Gerenciamento**, v. 8, n. 8, p. 65-74, 2019.

CASAGRANDE, E. Q. **Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Polipropileno e com Adição de Cinza Volante: Estudo do Desempenho em Pavimentos de Concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 79. 2012.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 302. 2007.

CASTRO, A.L., LIBORIO, J.B.L., PANDOLFELLI V.C., Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: revisão. *Revista Cerâmica*, ed57, março, 2011.

CHEN, J.; WANG, W.; CHEN, L. **A Strain Hardening and Softening Constitutive Model for Hard Brittle Rocks**. *Appl. Sci.* 2023, n.3, p. 2764.

CHEN, Z.; YANG, Y.; YAO, Y. Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag. **Materials & Design**. 2013, v. 44, pp. 500-508.

CHINDAPRASIRT, P.; SINSIRI, T.; KROEHONG, W.; JATURAPITAKKUL, C. “Role of filler effect and pozzolanic reaction of biomass ashes on hydrated phase and pore size distribution of blended cement paste.” **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2014, v. 26, n. 9.

CLAISSE, P. A.; LORIMER, O.; AL OMARI, M. Workability of cement pastes. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 98, n. 6, p. 476-482, Nov.-Dec. 2001.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da Variação do Índice de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz sobre a Atividade Pozolânica**. Porto Alegre. Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2009.

DAL MOLIN, Denise Carpena. **Adições Minerais**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011, 1 v. p. 361 – 310.

DAVE, N., MISRA, A. K., SRIVASTAVA, A., KAUSNIK, S. K. Experimental analysis of strength and durability properties of quaternary cement binder and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 117-124, 2016.

DE LARRARD, F. et al. **Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer**. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley. Proceedings... London: E & FN Spon, 1996. p. 377-388.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 068: Pavimento rígido – Execução de camada superposta de concreto do tipo whitetopping por meio mecânico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR – 068, 2004. 17p.

DING, Y; YU, K.; LI, M. A review on high-strength engineered cementitious composites (HS-ECC): Design, mechanical property and structural application, **Structures**. V. 35, p. 903-921, 2022.

ERHART, R.; SCHAFER, M.; SOUZA, R.; KRAS, J.; MANCIO, M.; KULAKOWSKI, M. **Influência da cinza de casca de arroz na resistência e na absorção de água de concretos**

**produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto.** Anais do 56º IBRACON – Congresso Brasileiro de Concreto. Natal/RN. Outubro, 2014.

FERRARIS, C. F.; GAIDIS, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 89, n. 4, p. 388-393, July.-Aug. 1992.

FERRARIS, C. F. , “**Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**”, J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 104, 5 (1999) 461-478.

FERRARIS, C., LARRAD, F., MARTYS, N., “**Fresh Concrete Rheology: Recent Developments**”, Natl Inst. Stand Thecnol, pp. 215-241, 2001.

FIGUEIREDO, A. D. **CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO.** 2000. 70 f. Monografia (Especialização) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A.D., **Concreto Reforçado com Fibras.** Texto apresentado para título de Livre Docente, São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRANCO DE LIMA, C.J., **Sustentabilidade de concreto com misturas binárias de pozolanas e resíduos de demolição de concreto com ênfase na avaliação e custo do ciclo de vida.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.

FUKUYAMA, H.; MATZUZAKI, Y.; SATO, Y.; ISO, M; SUWADA, H. **Structural performance of engineered cementitious composite elements.** **Composite and Hybrid Structures.** 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, p. 969–976, 2000.

GARCEZ, E. O. **Investigação do comportamento de engineered cementitious composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 194. 2009.

GENCEL, O.; KARADAG, O.; OREN, O. H.; BILIR, T. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review, **Construction and Building Materials**, v. 283, 2021,

GIVI, N. A.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N. A.; MOHAMAD, S. M. A. “Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete.” **Construction and Building Materials**. 2010, v. 24, n. 11, pp. 2145- 2150.

GOLASZEWSKI, J.; SZWABOWSKI, J., “Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars”, **Cement Concrete Research**. 34, 2 (2004) 235-248.

HERBERT, E.N.; LI, V.C., 2013. Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment. **Materials**, 6(7), pp.2831-2845.

HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, 2021.

HU, C.; LARRARD, F. The rheology of fresh high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 2, p. 283–294, 1996.

HUSAIN, N. F. H; LEE, S. The Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag Content on Mechanical Properties of Polypropylene Fibre Engineered Cementitious Composites. **Journal of Polymer Science and Technology**. v. 3, n. 1, p. 32-36, 2018.

IBRAHIM, R. K.; HAMID, R.;TAHA, M. R. “Strength and microstructure of mortar containing nano silica at high temperature.” **ACI Materials Journal**. 2014, v. 111, n. 2, pp. 163-170.

ISAIA, G. C. **Synergic action of fly ash in ternary mixtures with microsilica and rice husk ash - strength aspects**. In: 10th International Congress on the Chemistry of Cement, 1997, Gothenburg, Sweden. Proceedings. Göteborg: Amarkai AB, 1997. v.3. p.110 –115.



ISAIA, G. C. **Projeto de pesquisa: Influência da nano/microestrutura de concretos com adições minerais e/ou resíduos no desempenho estrutural sob o enfoque da sustentabilidade por ACV e CCV.** Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71-80, 2015.

KARIM, M.R., M.M. HOSSAIN, M.N.N. KHAN, M.F.M. ZAIN, M. JAMIL and F.C. LAI, 2014. On the utilization of pozzolanic wastes as an alternative resource of cement. **Materials**, 7: 7809-7827.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. **Cement. Concrete and Aggregates**. Orlando, v. 2, 1980.

KIM, J. K.; KIM, J. S.; HA, G. J.; KIM, Y. Y. Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Research**. 2019, v. 37, n. 7, pp. 1096-1105.

KIRYU, H. S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não newtonianos**, 2006. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ciências Térmicas) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

KUDER, K. G.; OZYURT, N.; MU, E. B.; SHAH, S. P. Rheology of fiber-reinforced cementitious composites., v. 37, p. 191–199, 2007.

LAMEIRAS, R. M., **Contribuição ao Estudo das Propriedades dos Materiais Cimentícios Reforçados com Fibras de Vidro (Glass Fibre Reinforced Cement-GRC)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LARRARD, F.de, SEDRAN, T.,“Mixture-proportioning of high-performance concrete, **Cement Concrete Research**. 32, 11 (2002) 1699-1704.

LE, H. T., KRAUS, M., SIEWERT, K., AND LUDWIG, H. M. “Effect of macro-mesoporous rice husk ash on rheological properties of mortar formulated from self-compacting high performance concrete.” **Construction and Building Materials**. 2015, v. 80, pp. 225-235.

LI, V.C., **Engineered cementitious composites – tailored composites through micromechanical modeling. Fiber reinforced concrete: present and the future**. In: Banthia N, Bentur AA, Mufti A, editors. Montreal, Quebec, Canada: Canadian Society for Civil Engineering; 1998. p. 64–97.

LI, V.C., 2003. On engineered cementitious composites (ECC). **Journal of advanced concrete technology**, 1(3), pp. 215-230.

LI, V. C. **Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure**. Springer, 2019.

LI, V.C., KANDA, T. Multiple Cracking sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites. **JCI Concrete Research and Tecnology**, vol.9, n.2, p.19-33, 1998.

LI, V.; LEPECH, M. **General Design Assumptions for Engineered Cementitious Composites**. 2011.

LI, M.; LI, V. C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 46, p. 405–420, 2013.

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

LI, V. C.; WU, C.; WANG, S; OGAWA, T. S. **Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)**. ACI Materials jornal. 2002, 99 (5), pp. 463-472.

LIM, I.; CHERN, J. C.; LIU, T.; CHAN, Y. W. "EFFECT OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG ON MECHANICAL BEHAVIOR OF PVA-ECC," **Journal of Marine Science and Technology**. 2012, v. 20, n. 3.

MA, H.; ZHANG, Z. Paving an engineered cementitious composite (ECC) overlay on concrete airfield pavement for reflective cracking resistance. **Construction and Building Materials**. 2020, v. 252.

MAIDL, B., *Stahlfaserbeton*. Berlin. **Ernst & Sohn Verlag fur Architektur und technische Wissenschaften**, 1991.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON, 2014.

MOLZ, C. **Avaliação da aplicabilidade de compósitos cimentícios de elevada deformação como pavimento de tabuleiros metálicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2021.

MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. 2003. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

NEHDI, M., RAHMAN M.-A., “Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction”, **Cement Concrete Research**. 34, 11 (2004) 1993-2007.

ONER, A; AKYUZ S. **An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete**. *Cement & Concrete Composites*. Science Direct. 29. ed. 2007. p. 505–514.

OZYURT, N.; MASON, T. O.; SHAH, S. P. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 2, p. 70–79, 2007.

PASINATTO, V. **Avaliação experimental do potencial do ECC (Engineered Cementitious Composites) como reparo de vigas de concreto armado deterioradas pela corrosão da armadura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 85. 2018.

PAN, B., LIU, F., ZHUGE, Y., ZENG, J. J., & LIAO, J. ECCs/UHPFRCCs with and without FRP reinforcement for structural strengthening/repairing: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**. 2022, v. 316.

PANDOLFELLI, V. C.; OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195p.

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, **Cement and Concrete Research**. 35, 5 (2005) 842-849.

PEREIRA DA COSTA, F. B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 169. 2015.

QUDAH, S.; MAALEJ, M. Application of engineered cementitious composites (ECC) in interior beam–column connections for enhanced seismic resistance. **Engineering Structures**, v. 69, p. 235–245, 2014.

RAGO, F. **Características reológicas de pastas de cales hidratadas normalizadas e de cimento**. 1999. 207f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

REIS, J.F. A., **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia UNESP. São Paulo, 2008.

RIGHI, D.P. **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) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RIGHI, D.P. **Influência de altos teores de cinza de casca de arroz nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade nos engineered cementitious composites (ECC)**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RODRÍGUEZ, C. A. M. **Avaliação do comportamento mecânico de um ecc (engineered cementitious composites) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 262. 2018.

ROKUGO, K.; KANDA, T.; YOKOTA, H.; SAKATA, N. Outline of JSCE recommendation for design and construction of multiple fine cracking type fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC). Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 5), p. 203–212, 2005.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. “Strength, porosity, and chloride resistance of mortar using the combination of two kinds of pozzolanic materials.” **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**. 2013, v. 20, n. 8, pp. 808-814.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 3, p. 363-371, Mar. 2004.

ŞAHMARAN, M.; BILICI, Z.; OZBAY, E.; TAHIR, K. E.; HASAN, E. Y.; MOHAMED. **Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design.** Composites Part B: Engineering. 2013, v. 45, pp 356-368.

ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1033–1043, 2009.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos 2ed.** São Paulo, Artiber, 2006, 240p.

SHOJI, D.; HE, Z.; ZHANG, D. LI, V. C. **The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review.** Construction and Building Materials. 2022, v. 327.

SHUKLA, A., C.K. SINGH and A.K. SHARMA, 2011. **Study of the properties of concrete by partial replacement of ordinary Portland cement by rice husk ash.** Int. J. Earth Sci. Eng., 4(06): pp. 965-968.

STRUBLE, L. J., LEI, W-G., “Rheological Changes Associated with setting on cement paste”, **Advance Cement Based Materials**, n.2, pp. 224-230, 1995.

TANNER, R.I., **Engineering Rheology**, Clarendon Press, Oxford, 1985

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete.** London: Pitman, 1983. 347 p.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra alto desempenho.** In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, p. 1283-1325. v. 2.

VENCE, K., KUMAR, A., SANT, G., et al., The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 52, pp. 196-207, 2013.

VAN WAZER, J. R. et al. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. 2.ed. New York: Interscience Publishers, 1966. 406p.

WALLEVIK, J.E., “Relationship between the Bingham parameters and slump”. **Cement and Concrete Research**. 2006, v. 36 n. 6, pp.1214-1221.

WANG, S; LI, V. C. **Engineered cementitious composites with high-volume fly ash**. ACI Materials journal. 2007, 104 (3), pp. 233-241.

WANG, L.; LING, Z. B.; ZHANG, L. F.; LIU, W. Q. **On-axis and off-axis compressive behavior of pultruded GFRP composites at elevated temperatures**. Composite Structures. 2020, 236(2).

WATANABE, Paula Sumie. **Concretos especiais: propriedades, materiais e aplicações**. Bauru, 2008. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/50683/concretos-especiais-propriedades-materiais-e-aplicacoes/>.

YANG, E. H.; SAHMARAN, M.; YANG, Y.; LI, V. C. **Rheological control in production of engineered cementitious composites**. ACI Materials Journal 2009;106(4):357–66.

YANG, E. H.; YANG, Y.; LI, V., “**Use of High Volumes of Fly Ash Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness**” ACI Materials J., Vol.104, No.6, pp 620-628, NOV-DEC 2007.

YEN, T.; TANG, C. W.; CHANG, C. S.; CHEN, K. H. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**. 1999, v. 21, n. 5-6, p. 413-424.

YU, J.; LI, G.; LEUNG, C. K. Y. **Hydration and physical characteristics of ultrahigh-volume fly ash-cement systems with low water/binder ratio**. Construction and Building Materials. 2018, n. 161, pp. 509-518.

YU, J.; WU, H.-L.; LEUNG, C.K.Y., Feasibility of using ultrahigh-volume limestone calcined clay blend to develop sustainable medium-strength Engineered Cementitious Composites (ECC), **J. Clean. Prod.** 262, 2020.

ZAIN, M.F.M., M.N. ISLAM, F. MAHMUD and M. JAMIL, 2011. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Constr. Build. Mater.**, 25(2): pp. 798-805.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. **Química Nova.** 2007, v. 30, n. 6, pp. 1469-1479.

ZELIC, J., JOZIC, D., KRPAN-LISICA, D. **Synergistic action of ternary system of Portland cement – limestone – silica fume – in concrete.** In: BITTNAR, Z. et al (eds). Nanotechnology in Construction 3. Proceedings of NICOM 3, p. 425-434. New York: Springer, 2009.

ZHANG, D.; YU, J.; WU, H.; JAWORSKA, B.; ELLIS, B. R.; LI, V. C. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). **Composites Part B: Engineering.** 2020, v. 184.

ZHANG, M.; ZHU, X.; PYO, S.; YANG, Y.; LIU, B.; SHI, J. Feasibility of using high-volume pozzolanic fillers to develop sustainable engineered cementitious composites (ECC). **Powder Technology.** 2023, v. 428.

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.** 2020, v. 137.

ZHOU, J.; QIAN, S.; BELTRAN, G. S.; YE, G.; BREUGEL, K.; LI, V. C. Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. **Materials and Structures.** 2010, v. 43, pp 803–814.

ZHOU, J.; ROOIJ, M.R.; SCHLANGEN, E.; YE, G.; BREUGEL, K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. **Cement and Concrete Composites.** 2009, v. 31, n. 9, pp. 613-621.



ZHU, Y.; YANG, Y.; YAO, Y. Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes of fly ash, **Journal Construction and Building Materials**. 2012 v.36 p.1076-1081.

ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, Y.; YAO, Y., Measurement and Correlation of Ductility and Compressive Strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) Produced by Binary and Ternary Systems of Binder Materials: Fly ash, Slag, Silica Fume and Cement. **Construction and Building Materials Journal**. 2014, n.68, p. 192-198.

ZHU, H.; HU, W.A.; MEHTEL, M.B.; VILLETTE, T.B.; VIDAL, O.S.B; NASSER, W.N.B.; LI, V.C.A. Engineered cementitious composites (ECC) with a high volume of volcanic ash: Rheological, mechanical, and micro performance. **Cement and Concrete Composites**. 2023, n139.

ZUNINO, F., LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability. A multilevel approach. **Cement Concrete and Composites**. v. 65, jan. 2016, p. 19-28.